



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**APLICACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS EN LA
DETERMINACIÓN DE LENTES DE BIOGÁS EN UN RELLENO
SANITARIO, CASO DE APLICACIÓN BORDO PONIENTE**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

(INGENIERIA AMBIENTAL)

P R E S E N T A

ING. MA. DE LOURDES MIRANDA COSS

DIRECTOR DE TESIS:

M. en I. ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ



JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: DRA. ITURBE ARGÜELLES ROSARIO
SECRETARIO: ING. CASTREJÓN PINEDA HÉCTOR RICARDO
VOCAL: M.I. SILVA MARTÍNEZ ANA ELISA
1er. SUPLENTE: DRA. ORTA LEDESMA MARÍA TERESA
2do. SUPLENTE: LEÓN RODRÍGUEZ FRIDA MARÍA

LUGAR DE LA TESIS: Relleno Sanitario Bordo Poniente, Estado de México.

TUTOR DE TESIS

M.I. ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ

DEDICATORIA

A mis sinodales, por la paciencia, la sabiduría y la entereza con que comparten su conocimiento.

A CONACYT por la beca otorgada.

A mi tutora, por todo su ánimo y amor a la enseñanza.

A mis Padres, por la generosidad con que día con día bendicen mi camino.

A mis Hermanos, por caminar continuamente a mi lado.

A mi Esposo, por transitar conmigo paso a paso en el aprendizaje.

A mi Hija, por llenar mi vida de esperanza y alegría.

A mis Maestros, por la paciencia y entrega en cada etapa de la enseñanza.

A mis compañeros, por compartir las expectativas del aprendizaje.

A mis amigos, que comparten el conocimiento además del afecto.

A mis guías, que con su experiencia han sabido forjar imperios de sabiduría.

A ti, que lees, te diviertes y aprendes.

CONTENIDO

Página

Contenido

Planteamiento del Problema

Objetivo

Hipótesis

Alcances y limitaciones

Capítulo I Marco Histórico

I.1 Introducción.	1
I.2 Residuos Sólidos.	1
I.3 Sitios de Disposición Final.	9

Capítulo II Marco Teórico

II.1 Residuos Sólidos.	16
II.2 Sitios de Disposición Final.	20
II.3 Lixiviado.	30
II.4 Biogás.	37
II.5 Marco legal.	50

Capítulo III Marco de Referencia

III.1 Relleno Sanitario Bordo Poniente.	54
III.1.1 Bordo Poniente, etapas I, II y III.	56
III.1.2 Bordo Poniente, etapa IV.	63
III.2 Localización y vías de acceso.	68
III.2.1 Fisiografía y geomorfología.	70
III.3 Geología Regional.	73
III.3.1 Propiedades mecánicas.	75
III.3.2 Propiedades dinámicas.	76
III.3.3 Hundimientos regionales y agrietamientos.	78
III.3.4 Geología de detalle.	80
III.4 Hidrología.	85

Capítulo IV. Metodología

IV.1 Métodos Geofísicos.	88
IV.1.1 Estudios Geofísicos Preliminares.	90
IV.2 Desarrollo de los trabajos.	94
IV.2.1 Transitorios electromagnéticos.	96
IV.2.2 Métodos sísmicos.	102

Capítulo V Resultados e interpretación

V.1 Resultados.	110
V.2 Interpretación.	129

Capítulo VI Conclusiones y recomendaciones

VI.1 Conclusiones.	132
VI.2 Recomendaciones.	136

Bibliografía

Anexo A. Resultados de los métodos sísmicos

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la zona urbana de la Ciudad de México se producen del orden de 10,500 a 21,000 toneladas de residuos sólidos diariamente, conocida como basura (Gobierno del Distrito Federal GDF, 2007), gran parte (60%) se dispone en rellenos sanitarios, (suman 95 a lo largo de la República Mexicana); producto de esta disposición se generan tanto biogás como lixiviados que potencialmente pueden impactar al subsuelo y al área vecina de asentamientos civiles.

El relleno sanitario Bordo Poniente, ubicado al oriente de la Ciudad de México carece de geomembrana en sus etapas I, II y III, provocando mayor susceptibilidad a migraciones de lixiviados y biogás a través de las arcillas del ex-Lago de Texcoco (parte de la estructura del relleno sanitario), al presentarse fracturas por compactación deficiente de los residuos sólidos, las que pueden formar estructuras como las de socavamiento de los materiales de soporte e impactar el subsuelo. Por otro lado, la etapa IV que cuenta con geomembrana no garantiza, que se soluciona por siempre la posible infiltración de fluidos (lixiviado y biogás) a los cuerpos litológicos y acuífero; esta condición implica monitorear las etapas del relleno sanitario para evitar daños estructurales, de infiltración y de liberación de biogás en zonas habitadas.

El biogás se comporta como un fluido, debido a que se encuentra generándose en, dentro y con residuos sólidos, en una fase estable de degradación (fase metanogénica), pero dentro de una celda que debiera tener contacto con las celdas aledañas para que ese producto se canalizara a un pozo de venteo, a un quemador o a un sistema de aprovechamiento de energía; sin embargo, la falta de homogeneidad en los residuos sólidos dispuestos de las celdas, provoca formaciones de lentes de biogás que tienden a migrar a través de sitios de debilidad estructural (fracturas, fallas, materiales de alta porosidad, etc.), e inclusive a sótanos, tuberías, edificios abandonados y en general a zonas pobladas en donde el metano (60% del biogás), provocan asfixia general y es inflamable con posibilidad de ser explosivo en bajas concentraciones entre 5-15% (en volumen). La exploración geofísica aplicada en ambiental es una herramienta que aporta información en la caracterización de sitios de interés, al ubicar y delimitar los lentes de biogás presentes en el subsuelo.

La Ciudad de México contaba con tres sitios de disposición final, designados por el Gobierno del Distrito Federal: San Juan de Aragón, Santa Catarina y Bordo Poniente; los dos primeros cerraron en el año 2001 por término de su vida útil, y Bordo Poniente está por cubrir su propia vida útil, tras 24 años de operación, durante los cuales recibió casi 43 millones de toneladas en sus cuatro etapas (SMADF, 2003).

Así mismo, el relleno sanitario de Bordo Poniente, ha sido uno de los más estudiados y analizados debido a su importancia dentro del Distrito Federal y por el volumen que maneja, el cual varía entre 11 y 20 mil toneladas de basura diarios. La etapa IV ha sido objeto de diversos estudios y experimentación con materiales, piezómetros e instrumentación sismológica (tres acelerómetros) a cargo del instituto de Ingeniería, UNAM con calibraciones periódicas.

Los estudios realizados en el relleno sanitario de Bordo Poniente van desde auditorías técnicas e información sobre metodologías y resultados de estudios que se llevaron a cabo en periodos de 2 años para realizar el cierre del sitio desde 2004 hasta 2008. Como parte de estos destaca el estudio solicitado por la Cámara de Diputados de riesgo por factores ambientales derivados de la operación del relleno sanitario, resultados que fueron favorables para la operación del Bordo Poniente, ya que no es un factor de riesgo para la población. En cambio, dicho estudio señaló que sí constituyen un factor de riesgo los tiraderos de Chimalhuacán y Nezahualcóyotl, en el Estado de México y propone que sean analizados a profundidad (Servicios urbanos G.D.F., 2007).

Las normatividades vigentes en el caso de contaminación del suelo, subsuelo y agua subterránea establecen una caracterización del sitio generalmente llevado a cabo con muestreos dirigidos o estadísticos que implican la realización de perforación de pozos y el análisis de las muestras en laboratorio, situación que no se aplica para el presente trabajo; lo que sí se incluye es la ubicación geográfica, geológicas existente, hidrogeología y la exploración geofísica, lo que explica el fenómeno de migración de fluidos (biogás y lixiviado) desde el punto de vista estructural, definiendo profundidades y localizando las áreas de interés aportando la ubicación y características, como una primera etapa.

La Geofísica es una ciencia interdisciplinaria relacionada con la física de la Tierra y sus ambientes, se debe aclarar que se divide en tres tipos: la Geofísica Básica que se limita a la revisión de conceptos como estructura académica; Geofísica Aplicada que establece con base en observaciones, las condiciones internas y externas de la Tierra, y en una escala más pequeña la Ingeniería Geofísica que estudia porciones restringidas y superficiales de la corteza terrestre con fines de utilidad práctica (Del Valle, 2006).

Por otra parte, la aplicación de los métodos geofísicos o prospección geofísica en México ha sido utilizada tradicionalmente para la localización de yacimientos económicamente explotables (hidrocarburos, minerales y agua); sin embargo, en las últimas décadas se ha aplicado en la ubicación de áreas contaminadas, tuberías perdidas, intrusión salina, etc., la cantidad de ejemplos, de técnicas e instrumentos se encuentran ampliamente ilustradas en revistas especializadas tanto nacionales como internacionales.

La detección de biogás, con base en las experiencias publicadas, propone desarrollar una metodología para su ubicación, la que se produce por descomposición anaerobia de los residuos sólidos; en contraste con el gas metano asociado con los hidrocarburos, tanto la composición como la profundidad determinan diferente respuesta en las mediciones de los parámetros establecidos, los contrastes de conductividad y las impedancias acústicas; estableciendo que para este caso no se realizan las lecturas en rocas como medio circundante con valores conocidos, sino en un medio construido por el hombre (antropogénico), realizado con los residuos sólidos que componen al sitio de disposición final (relleno sanitario) y toda su infraestructura.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Aplicar los métodos geofísicos de alta resolución, para la localización de lentes de biogás generados en un sitio de disposición final, caso de análisis el Relleno Sanitario Bordo Poniente, Estado de México.

OBJETIVOS PARTICULARES

1. Revisar las características geológicas, litológicas, mecánicas e hidrológicas que determinan el comportamiento de los materiales del sitio de estudio y su relación con los fenómenos de migración de los fluidos (biogás y lixiviado).
2. Caracterizar el subsuelo por medio de métodos de detección indirecta especializada, localizando y delimitando las zonas de acumulación del biogás.
3. Proponer los métodos de detección indirecta más adecuados en la caracterización y monitoreo del biogás para su uso extensivo en fenómenos similares.
4. Promover la prevención de accidentes con el adecuado manejo del biogás, ubicando sitios con presencia de lentes de biogás para su venteo, quema y/o su utilización como fuente de energía, sin provocar efectos adversos en la salud humana, el medio ambiente y los bienes materiales.

HIPÓTESIS

El biogás se maneja como un residuo más en los Sitios de Disposición Final sin considerar su peligrosidad inclusive en bajas concentraciones (5-15%), por lo que se requiere implementar una metodología en su localización y caracterización para un adecuado manejo en su venteo, quema o explotación; la migración del biogás se establece como un mecanismo de flujo que se puede llevar a cabo por medio de fenómenos de capilaridad o a través de discontinuidades presentes o causadas por el relleno sanitario. Los métodos geofísicos son capaces de identificar estructuras que facilitan la migración del gas y/o que permitan su entrapado o confinamiento; es decir, un reservorio.

ALCANCES Y LIMITACIONES

La metodología que se desarrollará en el relleno sanitario Bordo Poniente se pretende aplicar para el caso de la localización del biogás, tomando en cuenta los tipos de residuos que dieron origen al subproducto, delimitando la presencia de éste en perfiles proyectados sobre la etapa II y etapa IV. Se propone la aplicación de dos métodos geofísicos de diferentes campos; el método de resistividad electromagnética en donde para el biogás, se espera una respuesta de anomalías con valores de baja resistividad (zonas conductoras) que a diferencia del gas asociado a hidrocarburos, su respuesta eléctrica se reporta con valores resistivos; y la aplicación del método sísmico donde no se especulará con la respuesta, pues no existe una experiencia con valores tan superficiales para la parte de sísmica de reflexión en la bibliografía especializada para biogás; sin embargo, el método sísmico será capaz de definir las estructuras y corroborará las zonas conductoras. Los métodos geofísicos de resistividad y de sísmica se debe realizar en los mismos sitios con las mismas longitudes y cuidando que la geometría sea similar para obtener la misma profundidad y detalle en los perfiles; sin embargo, existe la posibilidad de variación en los resultados.

Dentro de las limitaciones más significativas que tienen que ver con los métodos geofísicos aplicados son las limitaciones que presente el método aplicado, la inversión del tiempo que se lleva en el sitio, el clima o estación del año en que se realicen, el que los equipos sean portátiles y que utilicen algún tipo de batería que limita el tiempo de estudio, el adecuado manejo de las consolas de adquisición para obtener información completa y de calidad; algunas de las limitaciones mencionadas se pueden corregir, pero no todas.

Con respecto al sitio de igual forma se presentan limitaciones, el tipo de material presente en el subsuelo; es decir, las arcillas son de los materiales que se deben considerar un caso especial dentro de los estudios geofísicos, los métodos tienen limitaciones en el sentido de una adecuada generación de la señal a utilizar; además, de los efectos laterales que se obtengan por los límites de las celdas. Desafortunadamente no se llevará un control con perforaciones en las zonas localizadas en el relleno sanitario Bordo Poniente; tampoco se realizarán análisis en laboratorio del biogás ni de su composición; se llevará un control exclusivamente por algunas características que se tienen en la bibliografía de generación de biogás en un relleno sanitario.

RESUMEN

Los rellenos sanitarios como parte de la solución del problema a la generación de residuos sólidos en el mundo, son una obra de ingeniería diseñados, conceptualizados, construidos, operados y monitoreados con este fin; precisamente las técnicas de monitoreo son generalmente empleando sondeos (perforaciones) y muestreando generalmente los subproductos conocidos como biogás y lixiviado (fluidos); para tener una idea de la parte estructural del relleno sanitario en el subsuelo se proponen los métodos geofísicos ahora aplicados en la localización de los fluidos (biogás y lixiviados), centrando el objetivo en los lentes de biogás que quedan atrapados y que pueden desplazarse de forma horizontal (migrar) a zonas habitadas, representando una situación de alerta: inflamabilidad-explosión y asfixia principalmente (metano). El relleno sanitario Bordo Poniente se estudio con técnicas geofísicas, aplicando dos métodos (electromagnéticos y sísmica de refracción-reflexión). La combinación resultó en la identificación del biogás por su respuesta conductora, la estructura donde se identificaba (refracción) y el comportamiento de la ondícula de reflexión. Las discontinuidades en la litología del sitio, son presentadas y se recomienda atención a las mismas.

ABSTRACT

Landfills as part of the solution to the generation of solid waste in the world, are an engineering work designed, conceptualized, constructed, operated and monitored for this purpose, precisely monitoring techniques are generally using drilling (drilling) and sampling products generally known as biogas and leachate (fluid) to get an idea of the structural part of the landfill proposed underground geophysical methods now applied in the location of the fluids (biogas and leachate), centering the target biogas in the lenses that are trapped and can move horizontally (migrate) to inhabited areas, representing a state of alert: flammability, explosion and asphyxiation mainly (methane). The Bordo Poniente landfill was studied with geophysical techniques, using two methods (electromagnetic and seismic refraction-reflection). The combination resulted in the identification of host response biogas, which identified the structure (refraction) and the behavior of the reflection wavelet. Discontinuities in the lithology of the site are presented and attention is recommended to them.

CAPÍTULO I MARCO HISTÓRICO

I.1 INTRODUCCIÓN

El incremento de la población en las últimas cinco décadas, de 3 a 26 millones de habitantes en el Distrito Federal y área conurbada (INEGI, 2008), provocó una demanda de servicios, aunado a este crecimiento: vivienda, agua potable, electricidad, drenaje, servicio de limpia, entre otros, que contribuyen a las actividades productivas de la sociedad en la Ciudad de México. La generación de residuos en estado sólido, líquido, gaseoso, o la combinación de ellos, se encuentra en la producción, distribución y consumo por cada receptor (consumidor) que lo lleva a la transposición, en forma (físico) y/o composición (bioquímico) y al movimiento de éstos a otros recipientes mayores para almacenarlos y/o disponerlos.

La generación de los residuos sólidos (basura), para los años 1960 era de 0.37 kilogramos/habitante/día, más del 60% de su composición consistía en materia orgánica. Con la transformación de la ciudad y la industrialización de los alimentos y bienes materiales, así como el movimiento de gran parte de la población de sus centros de trabajo a sus hogares se creó la necesidad de bebidas embotelladas y alimentos para llevar; el estrés en el traslado origina los medicamentos en presentación individual; en las escuelas la eliminación de materias como ética y civismo entre otras, además de otras causas, crearon una necesidad intermedia llamada consumismo, que llevó a la producción de basura para el 2008 entre 1.38 y hasta 1.5 kilogramos/habitante/día (Sánchez, 2009) que, de acuerdo a los datos duros el 38% es materia orgánica y el resto materiales conocidos como embalajes, envases contenedores de productos varios, sin tener una base técnica para el tratamiento adecuado del tipo de residuos generados, ni responsabilizando a las industrias generadoras de los mismos, se limitó al desarrollo de grandes tiraderos, a cielo abierto, ubicados en las afueras de zonas habitadas y que por obvias razones al crecer la mancha urbana quedaron inmersos en la ciudad. En algunos casos estos tiraderos se cubrieron con tepetate y se lotificaron realizando únicamente pozos de venteo para la salida de gases, producto de la descomposición de residuos.

Dentro de las diversas soluciones al problema de generación de residuos sólidos se encuentran los rellenos sanitarios, la composta (materia orgánica, desechos del jardín, residuos de alimento) y el reciclaje (materia inorgánica: vidrio, papel, latas, plástico, textiles, tetrapak, etc), además de otras técnicas como la incineración (convencional, hidrogenación, oxidación, hidrólisis, recuperación de escoria), y la pirólisis (con poco o en ausencia de aire).

I.2 RESIDUOS SÓLIDOS

En México, al inicio del siglo XX, el servicio de limpia estaba encomendado a la Comisión de Limpia con un presupuesto de \$12,200.00 mensuales, contaba con alrededor de 100 carros para uso diurno y 42 nocturno, entre vehículos de dos

ruedas, con equipo para regar, carretones y mulas; la basura se enviaba a los depósitos mayores, para lo cual el Ayuntamiento alquilaba ocho corrales particulares, uno por cada demarcación, contaba con 16 unidades distribuidas en ambos turnos, e inclusive existía el servicio de los “piperos” que recogían las materias fecales.

Como la infraestructura era insuficiente, se aceptaron contrataciones particulares que resultaron en fraudes y abusos, debido a las ganancias que se obtenían sin cumplir con las obligaciones pactadas; como el de Leandro Pairó que se encargó del aseo de diversas calles, entre otras la de Morilla hoy 5 de febrero, recibía diariamente la basura en los tiraderos de Zoquipa, la que aprovechaba para la elaboración de vidrio, cola, sulfato, carbón animal y otros productos...antecedente del reciclaje y reutilización. Uno más, fue la colecta nocturna de material fecal encargada al Sr. Wandorf, quien lo utilizaba en su fábrica de abonos artificiales (Llamas, 1994).

Para 1901, se dispuso que la recogida de la basura domiciliaria se hiciera a base de carros cubiertos con lonas, para evitar la emanación de malos olores, derrame de sobrante, así como el mal aspecto.

Para una ciudad con 12 avenidas, 125 callejones, dos calzadas, tres alamedas, 17 plazas, 31 plazuelas y 2000 calles (figura I.1), se requería de un programa ambicioso y complicado sobre limpia, barrido y riego, el cual en 1907 presentó el Dr. E. Ruiz y época en que el país se convulsionó por la Revolución, durante más de una década el Ayuntamiento no tuvo tiempo ni oportunidad para preocuparse de esos servicios.

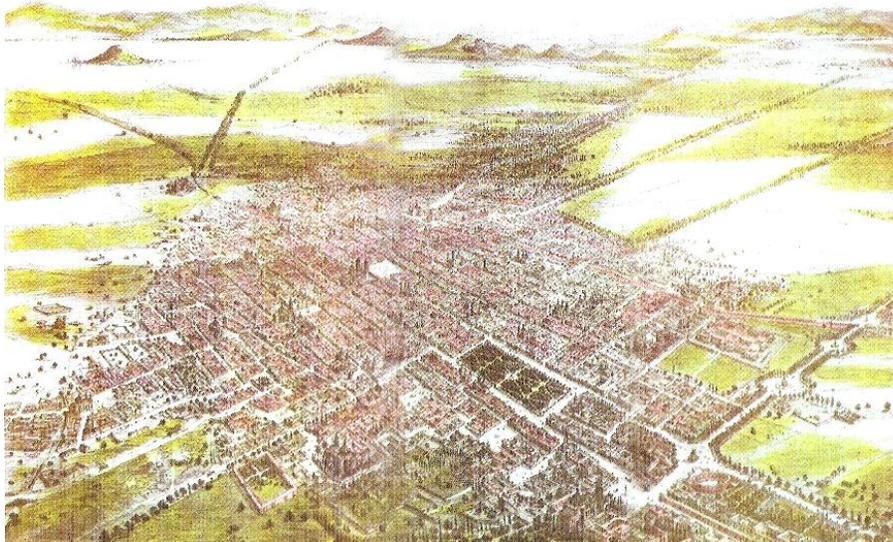


Figura I.1 Plano aéreo de la Ciudad de México tomado desde un Globo, 1855
(litografía de Casimiro Castro)

En 1920, la población urbana producía 35 toneladas diarias de basura; inició la modernización del servicio de limpia introduciendo 52 camiones diurnos y siete nocturnos para la zona central; y para la periferia continuaba el servicio con carros guayines, de tracción animal, cuyo costo fue en 1925 de \$279,845.00.

Con el crecimiento de la zona urbana se perdieron espacios para depositar la basura que se transportaba en góndolas ferroviarias; posteriormente se adquirieron 36 remolques de acero con ruedas de hule y dos grandes tractores para transportarla a los tiraderos; en lugares fangosos se utilizaba un tractor Caterpillar.

Para 1935 ascendió la descarga de basura, se realizaba en cuatro tiraderos municipales, en ese entonces a las orillas de la ciudad, representando un problema en el futuro inmediato. Se empezó a estudiar la eliminación de basura mediante una técnica adecuada, por lo que se renovaron los estudios iniciados a principios de siglo, para la construcción de hornos, celdas y procesamiento de desechos (Llamas, 1994).

En la década de los 40's se presentó el primer reglamento para el servicio de limpia, que dentro de sus disposiciones contemplaba un servicio auxiliar de vigilancia, de limpia y aseo de la vía pública en el D.F. a cargo de 100 técnicos con facultades de instruir a vecinos, así como de infraccionarlos. Se otorgó, por acuerdo presidencial la concesión para industrializar la basura, obligando a la empresa a destinar los beneficios a la mejora del servicio de limpia. Se trató de concienciar a la ciudadanía instalando cestos papeleros en la mayoría de las calles. Se instalaron tres plantas industrializadoras de basura localizadas en Tetepilco, Azcapotzalco y en las cercanías del antiguo aeropuerto. Para 1942, el Departamento del D.F. aumentó su infraestructura con 44 unidades, una barredora y 86 carros de tracción animal; un año después aumentó a 142 unidades no así el personal. El acarreo diario de basura a los tiraderos se elevó de 800 a 1000 toneladas; las plantas industrializadoras se clausuraron en ese año. En 1946 la Oficina de Limpia se responsabilizó del barrido y recolección en la ciudad y en las delegaciones, del lavado interior de mercados y del transporte a los tiraderos; para ello la ciudad se dividió, además del primer cuadro urbano en ocho zonas y 39 sectores. En conjunto, la basura urbana se depositaba en los tiraderos denominados Magdalena Mixhuca, Santa Catarina, Bramaderos, La Modelo, Dos Ríos, Nativitas, Independencia y Pedregal (Llamas, 1994 y Deffis, 1993).

En 1950, se duplicó el volumen de residuos aumentando a 219 camiones, 69 carros de tracción animal y 19 barredoras; se mejoró la recolección de basura de aproximadamente 2000 ton/día. En 1952, se sustituyeron los carros de tracción animal por vehículos de compactación tubular y carga trasera.

En 1975, después de una serie de estudios se concluyó que el promedio de desechos era de 7000 toneladas, lo que condujo a que la oficina del Sistema de Recolección y Tratamiento de Basura formara parte de la Dirección General de Servicios Urbanos, misma que desapareció un año después para ser la Oficina de Recolección de Desechos Sólidos dependiente de la Dirección General de Obras del Departamento del Distrito Federal.

A partir de 1983 se inició un lustro de innovaciones técnicas para evitar los focos de infección muy próximos a la ciudad, con problemas sociales álgidos y necesitados de espacios que permitieran nuevos y mejores asentamientos, se aplicó una

infraestructura adecuada para disposición final con base en los rellenos sanitarios y en otras tecnologías, empezaron a desaparecer los grandes tiraderos.

El funcionamiento de los primeros rellenos sanitarios del siglo XX, se ubicaron en Santa Catarina, Prados de la Montaña y el Bordo Poniente del ex-Lago de Texcoco; fortaleciendo las acciones en la recolección y limpieza de hasta ese momento las zonas críticas urbanas y la mejora del sistema de transferencia. En 1984 la Oficina de Recolección de Desechos Sólidos pasó a ser Dirección General de Servicios Urbanos del Departamento del Distrito Federal, por ello se emitió el nuevo Reglamento para el Servicio de Limpia en el Distrito Federal, también en ese año se inició el saneamiento del tiradero de Santa Catarina (S.O.S., 2004 y JICA-GDF 1999).

Las acciones se reforzaron en 1991, con la colocación de membranas de alta densidad en los rellenos sanitarios y con la instrumentación para el monitoreo ambiental; el tratamiento del lixiviado y biogás en los diversos sitios de dispersión final del Departamento del Distrito Federal. Además de la mejora en las unidades de transporte con placas que comprimían los residuos sólidos.

El enfoque que se tiene desde hace algunos años, es resolver el problema de los residuos sólidos incluyendo una gestión de éstos para su sustentabilidad, desde la fuente generadora con un grado de responsabilidad del consumidor (sanciones establecidas en la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal), hasta los sitios de disposición final que cumplen con las normas oficiales de responsabilidad del reforzamiento de su infraestructura y operación de los mismos.

Retomando las fuentes de generación, el origen de la problemática (sin contar el consumo previo de los productos) de acuerdo a la Secretaría de Obras y Servicios (S.O.S., 2004) ésta reporta los más representativos, clasificados por tipo de establecimientos: domiciliarios, comercios, mercados, servicios, entre otros (figura I.2), se presentan las fracciones de la composición física de los residuos sólidos en orgánicos e inorgánicos.

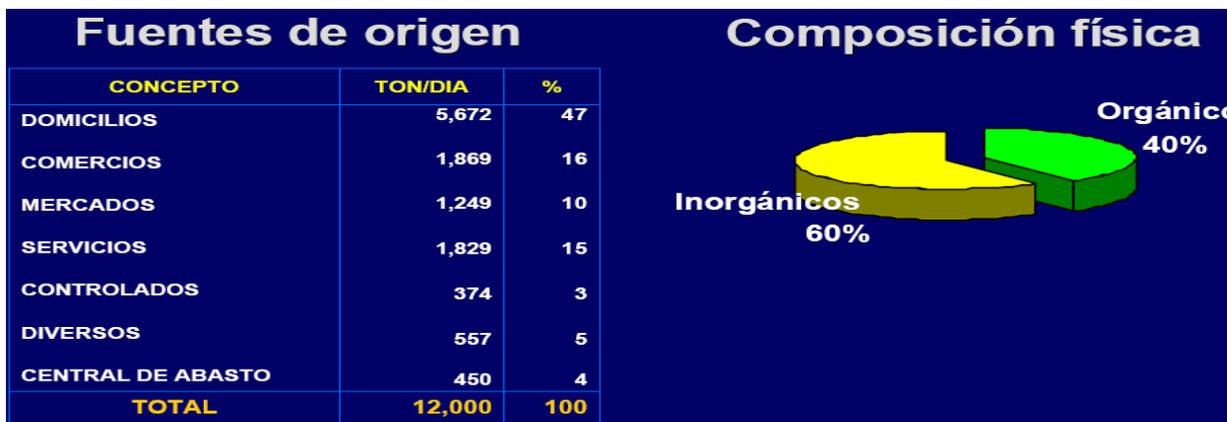


Figura I.2 Fuentes de origen de los residuos sólidos (S.O.S., 2004)

El recorrido que tienen que realizar los residuos sólidos se pueden resumir en las diferentes fases por las que éstos pasan, lo que incluye una recolección diaria, transportación a las estaciones de transferencia, posteriormente a las plantas de selección y por último al sitio de disposición final. La operación de la infraestructura se realiza en la siguiente secuencia:

RECOLECCIÓN: la Ciudad de México genera diariamente alrededor de 12,000 toneladas de residuos sólidos, recolectadas por medio de un parque vehicular integrado por 2 mil 97 unidades recolectoras, con distintas capacidades que van de los 0.5 hasta los 18 m³ dependiendo del tipo de contenedor que transporten o del tipo de vehículo y una plantilla de personal de más de 17 mil trabajadores en las 16 Delegaciones del Distrito Federal (figura I.3).

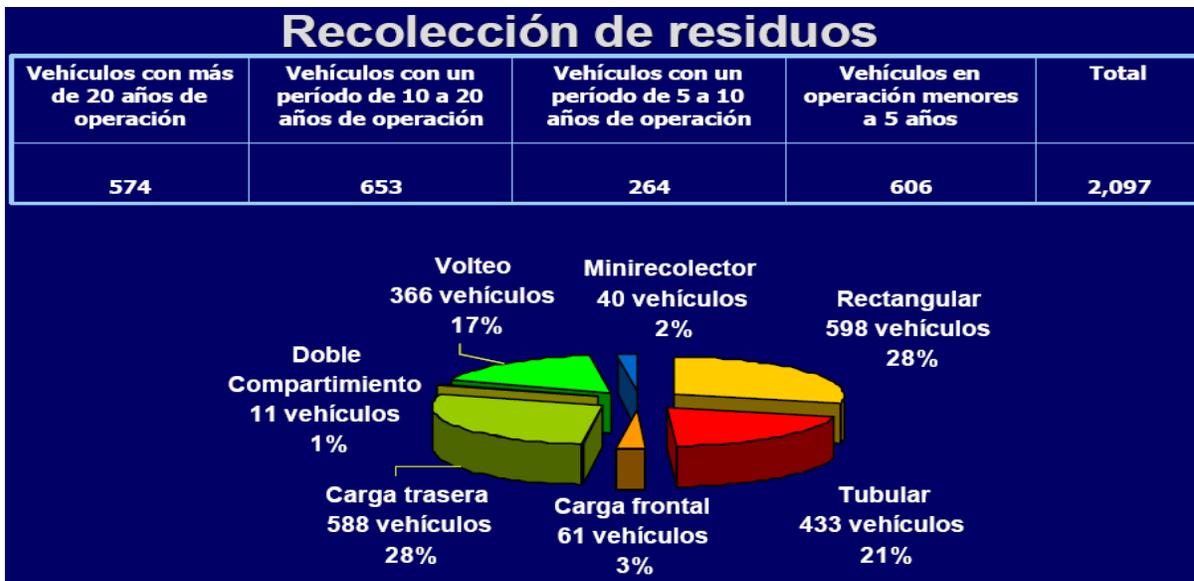


Figura I.3 Recolección de residuos (S.O.S., 2004)

Las Delegaciones tienen a su cargo la recolección de los residuos y su transporte fundamentalmente a las estaciones de transferencia y en menor medida a las plantas de selección o directamente a los sitios de disposición final.

Los métodos de recolección son variados, pero destacan el de esquina, el de acera y el de contenedores; para la recolección domiciliar se utiliza el método de parada fija en esquinas y aceras. Los contenedores usualmente son aplicados para la recolección de centros de gran generación, como son hoteles, mercados, centros comerciales, hospitales y escuelas; se ubican en una zona determinada como almacenamiento central y de fácil acceso para el vehículo recolector, en donde los usuarios han depositado sus residuos.

TRANSFERENCIA: la Ciudad de México cuenta con trece estaciones de transferencia (figura I.4), que son instalaciones intermedias entre las diversas fuentes generadoras de residuos sólidos y las plantas de selección o el sitio de disposición

final; su objetivo principal es incrementar la eficiencia del servicio de recolección, en la medida que los vehículos recolectores reducen los tiempos para la descarga de sus residuos, recurren a la estación de transferencia ubicada en su demarcación o bien, a la más cercana a su ruta de trabajo, para descargar sus residuos en los tractocamiones o transfers que transportan un volumen equivalente a 4 ó 5 camiones recolectores, ya sea a las plantas de selección o al sitio de disposición final. Esta operación permite que los vehículos de recolección se incorporen nuevamente a sus rutas durante la jornada de trabajo (S.O.S., 2004 y Sánchez, 2009).



Figura I.4 Estaciones de Transferencia del Distrito Federal

El Gobierno del Distrito Federal adoptó la tecnología de estaciones de transferencia cerradas, con la finalidad de controlar los efectos ambientales adversos, tales como ruido, polvo, fauna nociva, microorganismos y malos olores; así como para reducir el impacto y deterioro del entorno urbano a la estación de transferencia.

SELECCIÓN: el Distrito Federal cuenta actualmente con tres plantas de selección de residuos urbanos mezclados, con capacidad instalada conjunta de 6,500 toneladas por día (figura I.5). Estas tres plantas se ubican en Bordo Poniente, San Juan de Aragón y Santa Catarina (S.O.S., 2004 y Sánchez, 2009).

La organización y operación de las plantas se realiza de manera coordinada entre el Gobierno del Distrito Federal (la Dirección General de Servicios Urbanos, de la Secretaría de Obras y Servicios) y los gremios de selectores (antes pepenadores); en estas instalaciones se recuperan más de 20 materiales reciclables que son

comercializados en la Ciudad de México y sus alrededores por los gremios de selectores; el material no recuperado o rechazado, se transporta al Sitio de Disposición Final Bordo Poniente (JICA-GDF, 1999; S.O.S., 2004 y Sánchez, 2009).



Figura I.5 Plantas de Selección del Distrito Federal

Los principales materiales recuperados (S.O.S., 2004), son: Aluminio traste, macizo, chatarra, perfil, bote aluminio, bote ferroso, fierro, lámina metálica, cobre, alambre, botellas de refresco y cerveza, vidrio ámbar, transparente y verde, cartón, todo tipo de papel, periódico, PVC, PET, plástico rígido o nylon y vinil, entre otros (figura I.6).

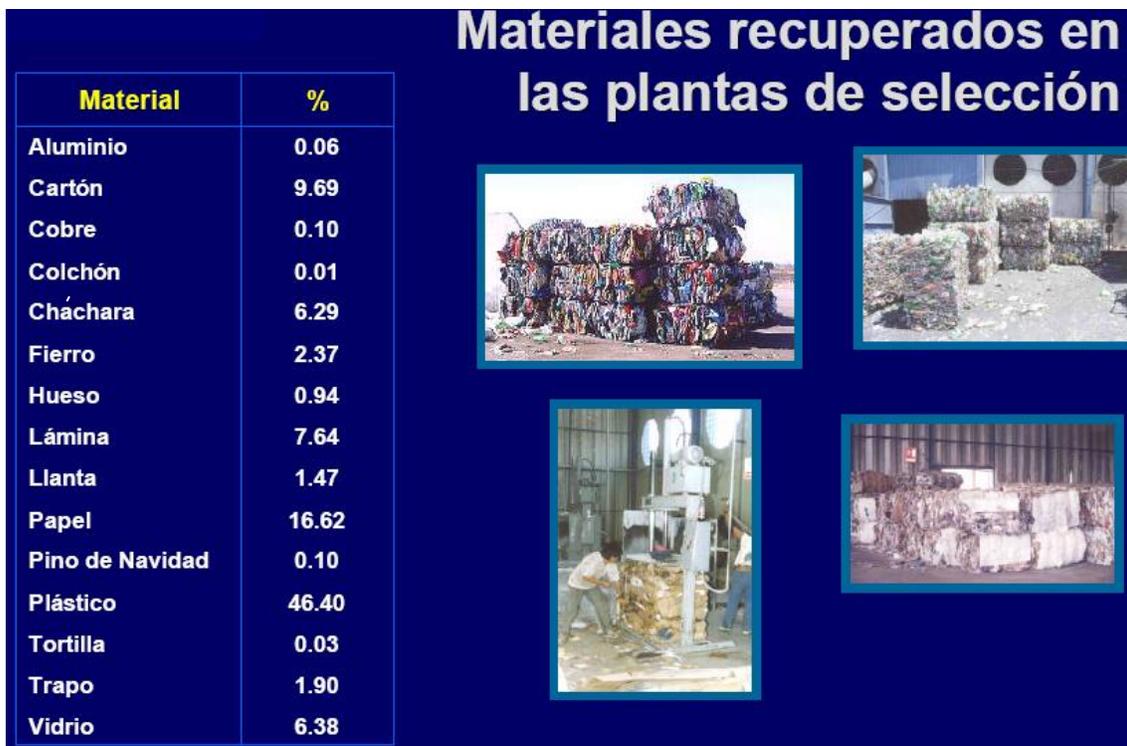


Figura I.6 Materiales recuperados en las plantas de selección

PLANTA DE COMPOSTA: la planta de composta está ubicada en el sitio Bordo Poniente IV Etapa; recibe actualmente residuos orgánicos de poda de los programas operados por la Dirección General de Servicios Urbanos, de la Secretaría de Obras y Servicios, Comisión Federal de Electricidad y de Luz y Fuerza del Centro además de una fracción de residuos provenientes del área de flores y hortalizas de la Central de Abasto. Tiene una capacidad instalada de 200 ton/día y el producto obtenido es utilizado como mejorador de suelos de camellones y áreas verdes de la red vial primaria.

DISPOSICION FINAL: en la construcción del sitio de disposición final de Bordo Poniente, Etapa IV previo al inicio del depósito de materiales, se coloca una geomembrana de polietileno de alta densidad, que funge como impermeabilizante para evitar la filtración de lixiviados a los mantos freáticos e incluso al acuífero. Los lixiviados son líquidos altamente contaminantes, producidos por la circulación de agua (generalmente la de lluvia) en los residuos. En los sitios de disposición final, los residuos sólidos son confinados en forma segura y controlada, en espacios que al finalizar su vida útil son reforestados y se convierten en áreas verdes destinadas a la recreación (JICA-GDF, 1999 y Sánchez, 2009).

La Dirección General de Servicios Urbanos es la responsable de la disposición final de los residuos sólidos generados en el Distrito Federal (GDF, 2007), teniendo actualmente como único sitio para tal fin el Relleno Sanitario Bordo Poniente IV etapa (figura I.7).



Figura I.7. Relleno Sanitario Bordo Poniente

Finalmente, es claro que el generar residuos sólidos no es un delito, pero si debe ser un compromiso y responsabilidad, tanto del consumidor que representa la fuente generadora, como de las autoridades, como son la Secretaría del Medio Ambiente, las Delegaciones, la Dirección General de Servicios Urbanos – Secretaría de Obras y Servicios en la Ciudad de México.

I.3 SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL

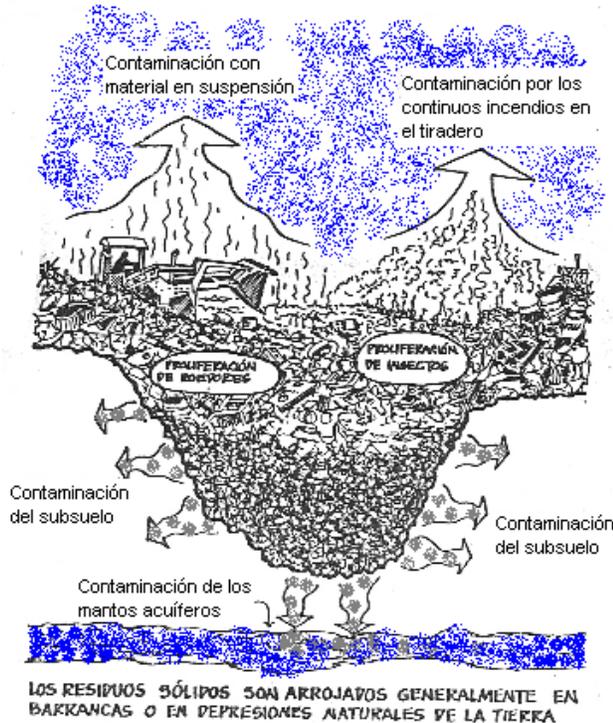
La revolución industrial del continente europeo trajo con la producción en serie, la problemática actual de la “basura”. Problema agudizado por la invención del material plástico. Al tener una mayor cantidad de residuos, los países europeos comenzaron a buscar la forma de eliminarlos; de tal manera, que Europa es la pionera en la elaboración de la composta y del método de incineración de residuos, sistemas que adoptaría posteriormente Estados Unidos de América (Torres, 2005).

El manejo metódico de los desechos sólidos se inició en 1930, en Inglaterra. El sistema de Vertedero Controlado o tiradero a cielo abierto fue introducido en Badford, Inglaterra en 1935, poco después en Francia y en España, después de 1945. La aplicación fue muy popular por la facilidad de “deshacerse” de los residuos sólidos, se acostumbraba quemar los residuos con periodicidad generando una contaminación mayor, a la vez de representar un foco de infección por la fauna nociva presente.

El informe de la situación del medio ambiente en México, editado en 2002 por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, señala que en el país los sitios de disposición final de la basura (SMA, 2008 internet), son:

1. **Tiraderos a cielo abierto o Vertedero:** aquellos donde clandestinamente se depositan y acumulan los desechos sólidos municipales sin control técnico; estos pueden ser ubicados en lotes baldíos, barrancas, ríos, arroyos, manglares y otros cuerpos de agua, en las orillas de las vías de comunicación, etc. (figura I.8), los que se han erradicado en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (SMA, 2003).
2. **Rellenos de tierra no controlados:** oquedades donde se vierten y mezclan diversos tipos de residuos sólidos municipales sin control o protección del ambiente.
3. **Rellenos de tierra controlados:** cuentan parcialmente con inspección, vigilancia y aplicación de las medidas necesarias para el cumplimiento de las disposiciones establecidas. Algunos en proceso de clausura, como el Neza II en el Estado de México.
4. **Rellenos sanitarios:** técnicas de ingeniería que procuran el adecuado confinamiento de los residuos sólidos municipales. Comprenden el esparcimiento, acomodo y compactación de los residuos, su cobertura con

tierra u otro material inerte por lo menos una vez al día, así como el control de gases, lixiviados y proliferación de vectores; con el fin de evitar la contaminación del ambiente y proteger la salud de la población.



Tomado de Deffis, 1993.

Figura I.8 Tiradero a cielo abierto o Vertedero

Muchos de los tiraderos a cielo abierto ubicados en la periferia de la ciudad de México asentados por la falta de opciones y de profesionales en el área, son los de Santa Cruz Meyehualco (apertura en 1924), para 1938 había cuatro más el primero por el monumento a la raza, el segundo en la parte alta de Tacubaya, el tercero conocido como el de Dos Ríos ubicado donde ahora se encuentra la colonia del Valle y el cuarto en la Magdalena Mixuca, cerca del actual Palacio de los Deportes (Deffis, 1989).

A principios de la década de los 80, existían cerca de 25 mil tiraderos clandestinos y numerosos tiraderos a cielo abierto: Santa Cruz Meyehualco, Santa Fe, San Lorenzo Tezonco, Tlalpan, Milpa Alta, Cerro de la Estrella, Tarango, San Mateo Nopala, Vaso de Texcoco y Santa Catarina (Deffis, 1989).

Los factores que hacen de estos tiraderos un foco de contaminación son en gran medida los que tienen que ver con el tipo de residuo que ahí se acumula y es sabido que es una mezcla de todo, desde residuos sólidos urbanos (materia orgánica, textiles, envases, zapatos, muebles y varios más), residuos de manejo especial (de volúmenes extraordinarios, chatarra y de la construcción), residuos industriales (productos que no cumplen con la calidad, residuos de la materia prima,

combustibles, etc), hasta residuos peligrosos (materiales radioactivos y hospitalarios, entre otros), que atraen animales como las ratas, moscas, moscos, perros (conocidos como vectores por transportar a su vez organismos patógenos, bacterias, hongos y/o virus); por la inestabilidad de los materiales son un foco de contaminación ambiental, el alto contenido calorífico, los incendios frecuentes y el transporte de residuos por el viento a otras áreas.

Los tiraderos representan un foco de contaminación al suelo y al agua subterránea, principalmente por la presencia del subproducto lixiviado; un cinturón de pobreza para los pepenadores y sus familias por el tipo de organización de sus líderes, y psicológicamente hablando, la basura es algo que no se quiere ver más de una vez en el bote, ni pasar cerca de donde la hay.

El manejo descontrolado de los desechos urbanos que se tiraban arbitrariamente en grandes basureros como los de Santa Fe, Santa Cruz Meyehualco y el del socavón de Iztapalapa, trajeron graves consecuencias que en ocasiones tienen que ver con accidentes “inexplicables” en éstas áreas como deslizamientos (barranca Becerra, Santa Fe), llamaradas (Prados de la Montaña y Santa Catarina), etc. En los últimos 14 años se ha tecnificado el manejo de los residuos sólidos y esto gracias a la participación de los profesionistas como los geotecnistas, ambientales, técnicos y personal involucrado que hicieron posible la estabilidad de los taludes de los rellenos, avance importante en el diseño, operación y cierre de los rellenos (TGC, 2005).

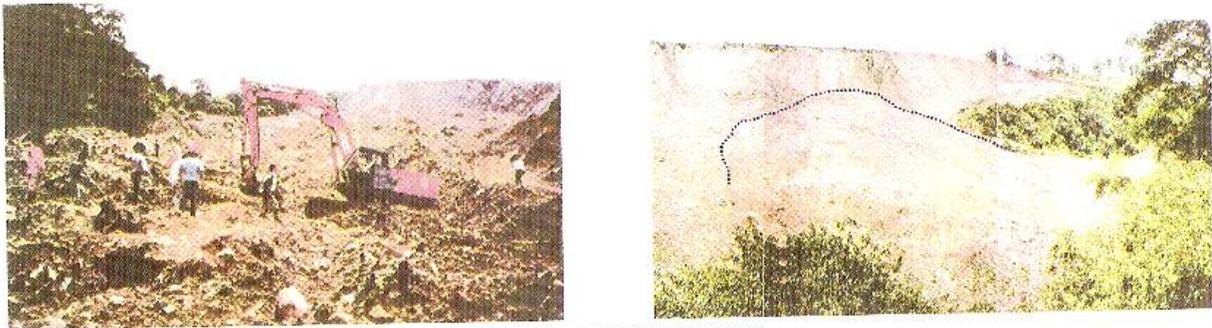
El cierre de los tiraderos Santa Cruz Meyehualco (clausurado en 1982) y Santa Fe (cerrado en 1987), los cuales por sus características físicas y operativas fueron los más grandes de Latinoamérica, se hizo con el fin de erradicar la presencia constante de fauna nociva, malos olores, incendios y asentamientos irregulares que, en conjunto, condicionaban el sistema integral del servicio público de limpia y perturbaban el paisaje urbano. (Torres, 2005).

El primer tiradero en clausurarse fue el de Santa Cruz Meyehualco de extensión 150 hectáreas con 58 años de funcionamiento que se convirtió en un gran parque con áreas verdes, que a la fecha se ilumina utilizando el biogás que se obtiene de la descomposición de la basura. En 1985 se clausuró el tiradero de San Lorenzo Tezonco, que a pesar de no ser tan grande recibía 2000 ton/día y albergaba 2500 pepenadores; le siguieron casi de inmediato los tiraderos de Tlalpan, Tlahuac, Milpa Alta y el del Vaso de Texcoco que recibía los residuos de las delegaciones Gustavo A. Madero y Venustiano Carranza; para 1987 cerró el ciclo el de Santa Fe, con 35 años de funcionamiento.

Santa Fe: El “tiradero de Santa Lucía” se ubica en una de las barrancas de Santa Fe y por años sirvió para depositar la basura generada en la Ciudad de México, inclusive los desechos hospitalarios e infecciosos. En su operación el único control que se implantó fue depositar la basura doméstica en una zona y en otras la hospitalaria. Los escombros de construcción, materiales térreos y lodos de desazolve del drenaje se depositaban en la barranca vecina de Becerra. En el tiradero de

Santa Fe se produjo un deslizamiento que obligó a revisar su estabilidad, lo que condujo a construir un pedraplén al pie del talud y a corregir la geometría del cuerpo del relleno para darle la seguridad de la que carecía. El relleno se cubrió con suelo vegetal, se perforaron pozos para venteo del biogás y posteriormente se transformó en la Alameda Poniente (TGC, 2005).

En los depósitos de la barranca de Becerra ocurrió un deslizamiento brusco de unos 200 000m³ de material se desplazó varias centenas de metros y atrapo a tres personas. Se estabilizó con una bóveda de mampostería al pie del relleno, como una cortina de arco, y con la reconfiguración del talud (figura I.9). Este desastre obligó a las autoridades a poner en orden los rellenos y corregir los errores (TGC, 2005).



Deslizamiento de la Barranca Becerra

Figura I.9 Deslizamiento en la Barranca de Becerra (TGC, 2005)

Prados de la Montaña: este sitio se ubica en Santa Fe y fue diseñado y clausurado como un relleno sanitario que cumple con las normas del Código Regulatorio del Estado de California. En su base se colocó una placa de arcilla plástica y en el contacto con los taludes de toba se instaló una membrana de polietileno HDP. Además, cuenta con pozos para la extracción activa forzada del biogás a quemadores (figura I.10). Aún está pendiente la instalación del sistema de extracción y tratamiento de lixiviados (TGC, 2005).



Figura I.10 Relleno Sanitario Prados de la Montaña

Santa Catarina: se ubica en las faldas del volcán La Caldera y lo limita la autopista México-Puebla (figura I.11). En sus inicios también fue un tiradero a cielo abierto.

Posteriormente se evaluó la estabilidad de sus taludes, lo que justificó corregir su inclinación para darles seguridad. Se perforaron pozos para el venteo del biogás; se han instalado drenes horizontales para desalojar los lixiviados en los puntos donde se acumulan.

Al pie de ese relleno se construyó una planta para seleccionar desechos sólidos domésticos que se envían al Bordo Poniente porque el relleno Santa Catarina está prácticamente clausurado. La superficie que ocupó Santa Catarina es de 37 hectáreas, operó entre 1982 y 2001 y la cantidad de residuos sólidos albergados es de 13'153 018 toneladas.



Figura I.11 Santa Catarina su ubicación, vista y clausura (S.M.A., 2003)

Bordo Xochiaca: se ubica en el bordo poniente del lago de Texcoco en el Estado de México, lo separa del Relleno Sanitario Bordo Poniente el brazo derecho del río Churubusco. Todos los tiraderos se ubican en el triángulo Bordo Xochiaca, Nezahualcoyotl cuenta con tres tiradero oficiales: Neza I (43 hectáreas) su existencia data de hace 40 años, se consideró tiradero controlado hasta que fue transformado en relleno sanitario en 1999, Neza II (5 Hectáreas) y Neza III (28.7 hectáreas) que se compone por cuatro tiraderos, tres reconocidos por el ayuntamiento y otro clandestino; además, existe otro tiradero de escombros y cascajo, que dan un total de siete tiraderos (Torres, 2005)

El futuro de estos sitios en Bordo Xochiaca es cerrarlos, hacer el saneamiento y construir un relleno seco, que consistirá en separar los residuos orgánicos e inorgánicos y por tanto los productos de estos residuos no serán aprovechables. Los espacios se destinarán a sitios de recreación no sin antes realizar una cobertura total y poner una cubierta vegetal adecuada; otra alternativa es que se utilice para siembra pero seleccionando el tipo de planta a sembrar por el socavamiento que pueda realizar la raíz. Además se han considerado otros sitios para disposición final de sus residuos sólidos en Nezahualcoyotl, los más cercanos son Tequexquahuac

y Coatlinchán, ubicados en Texcoco (Torres, 2005). Se tienen propuestas por parte de las autoridades de la creación de bioreactores, basándose en instalar una planta de selección para separar los residuos orgánicos y los inorgánicos; donde la parte inorgánica crearía un relleno sanitario seco que según la autoridad no tiene impacto significativo al ambiente, los residuos orgánicos generarán biogás que puede aprovecharse para producir energía, donde el producto final del bioreactor es la composta que se puede utilizar en el campo.

CAPITULO II MARCO TEÓRICO

Los rellenos sanitarios hacen énfasis en la aplicación de principios de ingeniería, procedimientos y técnicas para el manejo de los residuos sólidos que tienen que ver con minimizar su volumen por medio de su compactación, asegurando una cobertura con tierra al final del día evitando la generación de fauna nociva y con esto también la eliminación de los peligrosos tiraderos; como opción los rellenos sanitarios tienen una vida útil de entre 3-15 años en operación, que depende del área empleada y el volumen de residuos sólidos ahí dispuestos y con la implementación de medidas adecuadas puede incrementarse esta vida útil conjuntamente con la aplicación de otras tecnologías, teniendo claro en que parte del proceso deben aplicarse, además debe tomarse en cuenta el tipo de relleno sanitario que deberá ser utilizado.

El diseño, construcción y operación de los rellenos sanitarios como solución al problema de residuos sólidos, trajo como consecuencia considerar, la generación de nuevos retos como son la generación de lixiviados, biogás, mal olor, la fauna nociva y los repenadores (Deffis, 1993 y Robles, 2008)).

Dentro del diseño de los rellenos sanitarios se contempla el tipo de relleno, infraestructura de tuberías, captadores y distribución de las áreas generales como son las oficinas, vigilancia, báscula, celdas adecuadas, pozos de venteo de biogás, zonas de recuperación de materiales, composta y de ser necesario una planta de tratamiento de lixiviado. De acuerdo con la norma NOM-083-SEMARNAT-2003, que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a rellenos sanitarios para la disposición final de los residuos sólidos municipales, debe haber una distribución de pozos de venteo dependiendo de la densidad de la celda de dos pozos por hectárea (SEMARNAT-GTZ, 2007).

Los subproductos generados por esta técnica deben ser tomados en cuenta ya que son los responsables de que a los rellenos sanitarios se les considere contaminantes, la solución para los lixiviados ha sido la utilización de membrana de alta densidad, un cárcamo y una planta de tratamiento del lixiviado; en el caso del biogás se ha limitado en muchos casos al venteo a la atmósfera, pero también se han hecho esfuerzos para la recuperación y aprovechamiento del biogás para la producción de energía eléctrica (Guerrero, 1996).

En el caso del biogás por su composición y sus condiciones físicas y químicas, se debe tener en cuenta el comportamiento dinámico del relleno (Botero, 1999), tomando en cuenta que la ubicación del biogás dentro del relleno sanitario varía y se acumula en lentes, que deben ser localizados para su correcta explotación o venteo y minimizar los riesgos (Guerrero, 1996).

Una vez clausurado el relleno sanitario se puede utilizar como zona de esparcimiento plantando pasto, arboles o como campo deportivo, estudiando el grado de fermentación de los residuos, cuando son materiales compactados el terreno se

considera estable después de doce años (Bárceñas, 2009). El aprovechamiento del biogás de un relleno sanitario para producción de energía eléctrica o bien la recolección de los residuos y el cribado del producto, una vez que la fermentación está lo suficientemente avanzada (Deffis, 1993; Guerrero, 1996 y Camacho 2001).

II.1 RESIDUOS SÓLIDOS

En la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, en el artículo 3° (frac. XXXI), se define residuo como: "Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó" (ISEF, 2005). El residuo es el material o producto que su poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido, semisólido, líquido y gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o que requiere sujetarse a tratamiento o disposición final (Robles, 2008); la Real Academia Española define residuo como lo que resulta de la descomposición o destrucción de una cosa, parte o porción que queda de una cosa y la palabra sólido de igual forma es imprecisa, ya que no se habla de líquidos y gases (Deffis, 1993). La situación en realidad tiene que ver con el término de "basura" que para nuestra sociedad tiene un significado de todo aquello que se desea eliminar, deshacerse de ello y por supuesto es algo sin valor, debido a que sugiere suciedad, falta de higiene, mal olor, desagrado a la vista, contaminación, impureza y turbiedad. Para cambiar el concepto generado, se recurre a un enfoque para darle a ese material una segunda oportunidad, valorizarlo, reciclarlo y formar conciencia de los altos costos que resultan en la inversión de compra, consumo, reciclaje (opcional) y disposición en contenedores adecuados, por ello se adopta el término "residuo sólido" para referirse en general a los residuos domiciliarios, residuos comerciales, residuos de mercado, residuos de barridos de calles y a los residuos institucionales que son aquellos que llegarán a un relleno sanitario, o que serán tratados por otras técnicas.

El mejor parámetro de los residuos sólidos es conocer su composición, para determinar la factibilidad de programas de reciclaje y tratamiento adecuados; además de conocer las fuentes generadoras, para su manejo y gestión integral. La composición generalmente es representada por un porcentaje en peso en base seca o en base húmeda de materia orgánica como el papel, cartón, plástico, textiles, metal, vidrio entre otros.

Las características físicas y químicas de los residuos sólidos son de importancia para la selección de sistemas de disposición final, como se les denomina a los rellenos sanitarios, el reciclaje, el composteo y la incineración. La diversidad en el manejo de los residuos sólidos es uno de los caminos a seguir, si se desea darle mayor rendimiento a los rellenos sanitarios en donde va a disponerse el 84.2% de los residuos mientras que el reciclaje representa solo el 15.8% (JICA, 1999). Se revisarán algunas alternativas de tratamiento de los residuos sólidos, en el trayecto de los residuos sólidos al relleno sanitario.

El reciclaje, generalmente lo llevan a cabo el personal que recolecta la basura en camiones, bien a algunos “pepenadores” y a personal que labora en las unidades de transferencia; este proceso reduce el gasto de energía en la industria y minimiza la exploración de los recursos no renovables (Palma et al., 2005).

El composteo se define como el proceso de degradación de la materia orgánica llevado a cabo por microorganismos (hongos, levaduras y/o bacterias aerobias y anaerobias) para la generación de humus (resto vegetal o animal que forma la capa orgánica del suelo) (Camacho, 2001). El objetivo del composteo es la reducción de los residuos orgánicos, eliminar los gérmenes patógenos que pudieran estar presentes en los residuos y obtener un producto con alto contenido de nutrientes como el fósforo, nitrógeno y potasio. La selección de los residuos para este fin debe cumplir con no contener materiales o trazas no biodegradables (vidrio, plásticos, metales, etc.), porque alteran el producto final.

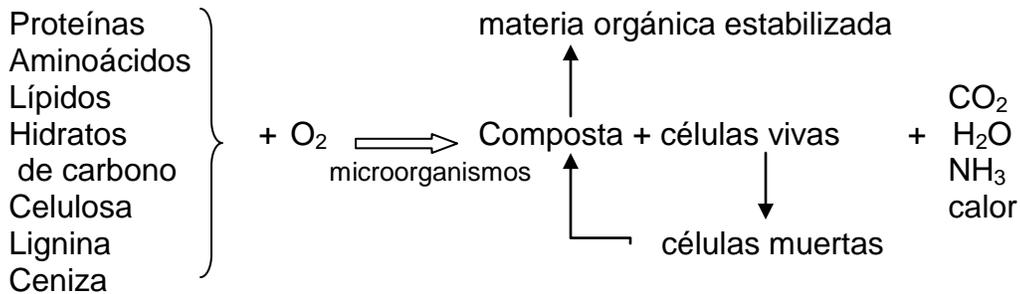
El mecanismo de la descomposición aerobia de la parte orgánica de los residuos sólidos, se resume en la reacción estequiométrica siguiente (Camacho, 2001).



donde:

$$r=0.5(b-nx-3(d-nx))$$

$$s=a-nx$$



Los factores que determinan un buen composteo son el rango de la temperatura entre los 55 y 60°C, el contenido de humedad alrededor del 55% y la aireación regular; además existen dos tipos de composteo, el lento con una duración de por lo menos 90 días y por fermentación rápida donde la materia orgánica se muele y se mantiene en reactores con suficiente agua, aire y agitación.

Como otra alternativa la incineración, es el proceso de combustión en el cual se reduce el volumen de los residuos de manera controlada; se realiza en hornos especiales. El rango de temperatura que se debe manejar según Henry y Henke, esta alrededor de 760°C y 870°C, para obtener una combustión completa y evitar el desprendimiento de malos olores (Camacho, 2003).

En el diseño del horno es importante considerar los parámetros físico-químicos de los residuos, el volumen de residuos sólidos a manejar y el control ambiental.

- La humedad de los residuos depende, además de los propios residuos, del clima y las estaciones anuales, los residuos con más del 40% de humedad no pueden ser incinerados directamente.
- Las cenizas generadas son consideradas como material inerte que representan la reducción del volumen de los residuos durante la combustión. Las cenizas deben ser analizadas para conocer el grado de toxicidad y determinar si es necesario un tratamiento posterior.
- La materia orgánica son todos los compuestos derivados del carbono (excepto carbonatos y bicarbonatos). Dentro de las sustancias orgánicas se encuentran los plásticos, solventes, fármacos, resinas y derivados del petróleo entre otros; pero todos tienen en común al carbono, nitrógeno, azufre, halogenados hidrógeno y/o oxígeno.
- El peso volumétrico determina las dimensiones del equipo de tratamiento que depende de los hábitos de consumo y finalmente el poder calorífico que se desprende por la combustión completa y se expresa en joules/kg o kilocalorías/kg

La importancia de una gestión de residuos sólidos significa el conjunto interrelacionado y articulado de acciones normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de monitoreo, supervisión y evaluación de los residuos desde la fuente de generación hasta su disposición final, a fin de lograr beneficios ambientales, la optimización económica de su manejo por región y su aceptación social respondiendo a sus necesidades y circunstancias de cada región o localidad (SEMARNAT-GTZ, 2007). La composición de los residuos sólidos es también determinada dependiendo del nivel de vida, la estación del año, estilos de vida de la población, zonas, época del año y día de la semana.

En la generación actual de residuos sólidos se pueden distinguir tres tipos de metodologías para realizar esta estimación. La primera y más barata es aquella que considera modelos matemáticos a partir de estadísticos socio-económicos (Deffis, 1993). La segunda es aquella que considera muestreos en la población y ofrece el mejor nivel de información al menor costo. La tercera, son los censos que pueden tener un costo sumamente elevado si no se cuenta con un padrón de generación, sin embargo, es el método que estima con mayor confianza y precisión. El modelo matemático más sencillo es el recomendado por SEDESOL. Para este modelo se requieren dos datos; el número de habitantes y el tipo de población (tabla II.1).

Tabla II.1 Índice de generación de residuos por localidad

Tipo de localidad	Generación (Kg / Hab / Día)
Zonas metropolitanas	1.2
Ciudades medias	0.90
Localidades urbanas pequeñas	0.63
Localidades semirurales y rurales	0.38
NACIONAL	0.83

SEDESOL, 2000

Es importante señalar que la cantidad de residuos sólidos en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Distrito Federal y zona conurbada), ascendió en el año 2000 cercano a las 25 mil toneladas al día, de las que 54% corresponden al Distrito Federal y se estimó en 1997 una generación de 1.204 kg/hab/día (Camacho, 2001).

Otros modelos matemáticos relacionan la generación de residuos con otros indicadores socioeconómicos como lo son el ingreso, el número de viviendas, el número de trabajadores, la producción bruta, etc. Cada una de estas variables contribuye con un índice. La evaluación tiene que hacerse en torno a los parámetros que miden el proceso más que a los índices de generación. La mayoría de los muestreos consideran distribuciones normales y en este sentido se describen los estadísticos más empleados.

En el caso de los residuos sólidos en México y con la finalidad de conocer sus características de generación (composición y propiedades físico-químicas), recolección, transferencia y disposición; se desarrollaron normas oficiales, las cuales soportan los estudios de manejo y disposición de los residuos sólidos de la Secretaría del Medio Ambiente (tabla II.2) (SEMARNAT-GTZ, 2007).

Tabla II.2 Normatividad de los residuos sólidos

Referencia	Descripción
NMX-AA-015-1985	Método de cuarteo
NMX-AA-022-1985	Selección y cuantificación de subproductos
NMX-AA-052-1985	Preparación de muestras en el laboratorio para su análisis
NMX-AA-25-1984	pH Método potenciométrico
NMX-AA-016-1984	Determinación de Humedad
NMX-AA-033-1985	Poder calorífico superior
NMX-AA-021-1985	Materia orgánica
NMX-AA-24-1984	Nitrógeno
NMX-AA-067-1985	Relación carbono / nitrógeno
NMX-AA-068-1986	Hidrogeno
NMX-AA-080-1986	Oxígeno
NMX-AA-92-1984	Azufre
NMX-AA-094-1985	Fósforo
NMX-AA-18-1984	Determinación de cenizas
NMX-AA-61-1985	Generación
NMX-AA-019-1985	Peso volumétrico "in situ"

Los resultados obtenidos a través del informe del Sistema de Información de Residuos Sólidos relativo a la recepción de residuos sólidos en el relleno sanitario Bordo Poniente muestran la información de todas las fuentes de residuos que ingresan a este sitio de disposición final.

Tabla II.3 Residuos sólidos en el Relleno Sanitario Bordo Poniente, (ton/día)

Origen	2004	2005	2006
Particulares	100	106	57
Planta de Selección	3,840	3,867	3,319
Estaciones de Transferencia	8,230	8,227	7,289
Estado de México	18	18	0
DGSU	14	1	28
Otros orígenes	0	0	1,297
Total	12,202	12,219	11,990

La tabla II.3 presenta el origen de residuos sólidos enviados al relleno sanitario que proviene directamente de las trece estaciones de transferencia, las cuales agrupan más del 98% de los residuos recibidos, a excepción del año 2006 donde estas instalaciones reportan el 88% de los residuos recibidos, debido a que los datos reportados son hasta el mes de septiembre del 2006 (SMA, 2006).

II.2 SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL

El crecimiento de la población en el área urbana de la Ciudad de México, como factor determinante en la generación de residuos sólidos (figura II.1) (modificado de TGC, 2005), de los censos del crecimiento a partir del año 1325, donde se contaba con grupos diseminados (aldeas); para el año de la conquista de los Españoles en 1521 la población era de 190 000 habitantes, posterior a la conquista hubo un decremento en la población debida a las enfermedades traídas al Continente Americano de España, menor de 50 000 habitantes; habiendo un repunte de 70 000 habitantes hasta antes de la inundación de 1630 con 50 000 personas; situación por la que se consideró cambiar la capital del virreinato, pero a pesar de la destrucción de las casas habitacionales; los templos, iglesias y conventos justificaban el alto costo de recuperar la ciudad.

El crecimiento desmedido que se ha llevado a partir del año 1900 se refleja en la figura II.1, en 1990 la población en la zona Metropolitana de la Ciudad de México era contabilizando la del Distrito Federal (8.2 millones) y la zona conurbada del Estado de México (7.8 millones), de 15 millones de personas. En los últimos censos se ha observado que en la Ciudad de México el crecimiento ha sido mínimo pero no en las comunidades aledañas a la ciudad de México donde su crecimiento ha sido exponencial. Se tienen datos que en el año 2000, los habitantes del área metropolitana sumaban 19.1 millones y que en la totalidad de la cuenca había 23.2 millones (TGC, 2005), las proyección para el 2020 por Agustín Porras (2000), deduce que la población del área urbana será de 23 millones; mientras que Garza (2000) estima que será de 26.2 millones en el área urbana y 35.8 millones en toda la cuenca.

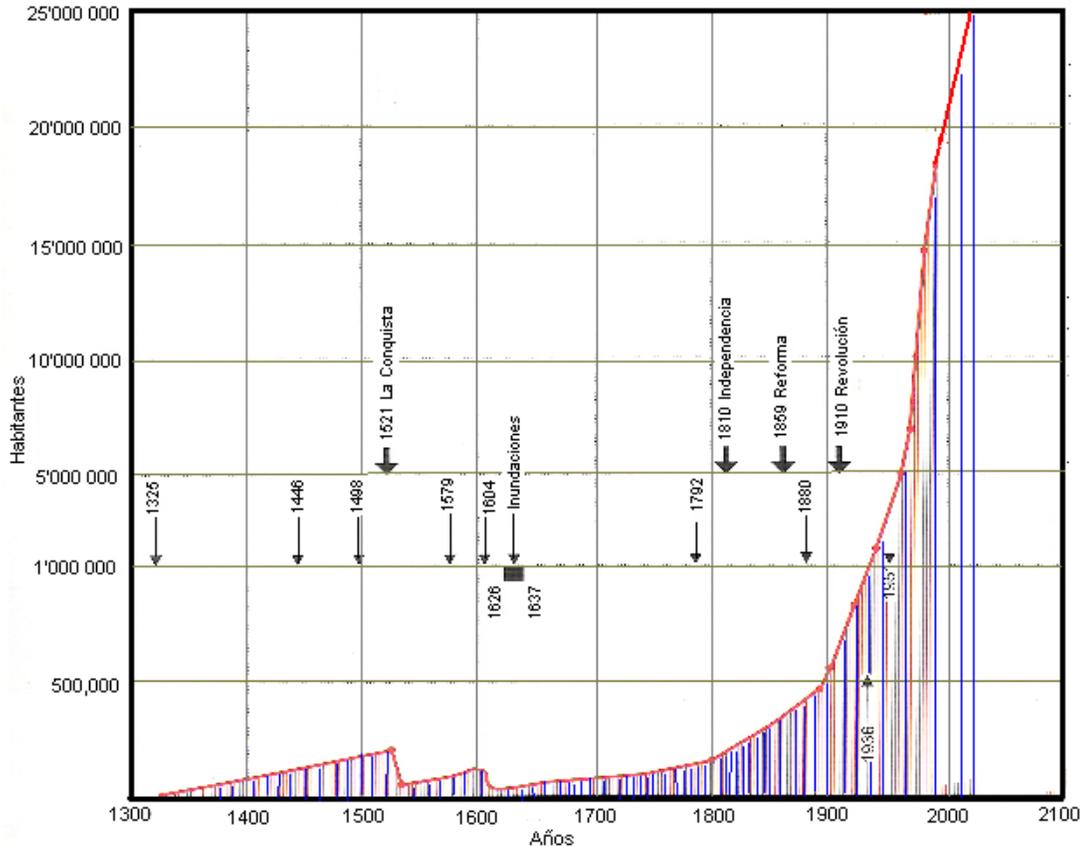


Figura II.1 Crecimiento de la población de la Zona Metropolitana

En la ciudad de México para el año 2002, junto con la zona conurbada del Estado de México, habitaban más de 18 millones de personas, representados por un mosaico de diverso origen cultural, educativo y estrato socio-económico, que confluyen en actividades rurales, industriales y de servicios. El crecimiento acelerado de las últimas cuatro décadas, le dio este carácter complejo y diverso que lo enriquece, pero que a la vez obliga a impulsar estrategias específicas y diferenciadas de políticas públicas. Ello, aunado a un crecimiento caótico y anárquico de la ciudad, generó una serie de problemas ambientales que se manifiestan en la pérdida de biodiversidad, deterioro o escasez de los recursos naturales, acumulación de los desechos, expansión de la mancha urbana, mala calidad del aire con el consecuente efecto negativo en la salud de sus habitantes (SMA, 2006).

Entre las causas del deterioro ambiental en la Cuenca están:

- Un crecimiento urbano acelerado y caótico, sin planeación;
- El desprecio por los servicios ambientales que presta la zona rural al DF, que ha llevado a la disminución de esta zona, la cual incluye las zonas boscosas y las dedicadas a la producción agropecuaria;

- Las políticas económicas que no atribuyen valor a los recursos naturales y al medio ambiente en general; esto se refleja en los escasos presupuestos al cuidado ambiental, y en la exigua política fiscal y financiera;
- La afectación en la recarga del acuífero, por el crecimiento de la mancha urbana asfaltada;
- Patrones de consumo, marcados por el desperdicio;
- La desigual distribución de la propiedad y de la gestión de los recursos naturales;
- La corrupción en altos mandos, los cuales se encargaban de la protección y manejo de los recursos; y
- La alta concentración y crecimiento acelerado de vehículos automotores con una demanda creciente de energéticos.
- La elevada concentración de industrias, sin tecnologías limpias.

Entre otros fenómenos ambientales, cabe destacar que en el DF se consumen 44 millones de litros de gasolina y combustibles al día, entre la demanda del transporte, que genera alrededor del 80% de los contaminantes, y la de los diversos sectores industriales. Por otro lado, la sedienta metrópoli consume un volumen de 65m^3 de agua por segundo, equivalente al consumo promedio de casi 400 litros de agua por persona al día. Aunado a lo anterior, es preciso señalar que sólo un 30% de la población metropolitana se transporta en automóvil particular, externalizando los efectos negativos de su medio de transportación al conjunto de la población; y por otro lado, mientras en algunas colonias residenciales el consumo de agua supera la cifra promedio mencionada, en numerosas colonias de la periferia, el acceso al preciado líquido es apenas suficiente o inexistente (SMA, 2006). En la parte de la generación de residuos sólidos se ha estimado en promedio entre 1.3 y 1.4 kg por habitante al día lo que en suma da el total de más de 21 000 toneladas de residuos sólidos urbanos, de los cuales aunque existe una gestión de residuos sólidos estructurada consistente en separación, reciclado y composta entre otras, aún así la disposición final ha sido un relleno sanitario, el de Bordo Poniente a donde, llegaban 12 500 toneladas de residuos sólidos hasta finales del año 2008. Los sitios de disposición final deben ser propuestos y sustentados por características estructurales.

El relleno sanitario es un método de ingeniería para la disposición final de residuos sólidos en el suelo, mediante el extendido de los residuos en capas delgadas, compactándolas al menor volumen posible y cubriéndolas con tierra al término del día de trabajo, de tal manera que proteja al ambiente y a la salud pública (Hernández, 2004). En él se utilizan principios de ingeniería para depositar de manera permanente los desechos y confinarlos en la menor área posible. Un relleno bien planeado permite su posterior recuperación como área verde, o simplemente mejora la topografía de la zona (Llamas et al., 1994).

Existen tres métodos básicos de operación de relleno sanitario, el de área, de zanja y una combinación de ambos, el método de rampa (González, 1991 y Davis y Masten, 2004).

El método de área (figura II.2) es el de uso más frecuente, se usa un proceso de tres pasos: tender el residuo, compactarlo y cubrirlo con una capa de suelo; rara vez la topografía limita el uso del método de área, son adecuados terrenos planos o estratificados, cañones y otros tipos de depresiones (Davis y Masten, 2004); además se toman en cuenta los depósitos artesianos, si se encuentran muy cercanos a la superficie, se recomienda el método cuyo inconveniente es el transporte del suelo de cubierta final y el suelo para celdas (González, 1991).

El método de zanja (figura II.2) se utiliza cuando no hay problema de cercanía de corrientes subterráneas de agua y se puede cavar una zanja u hoyo donde se depositarán los residuos sólidos, la tierra removida inicialmente se usa como cubierta final (González, 1991).

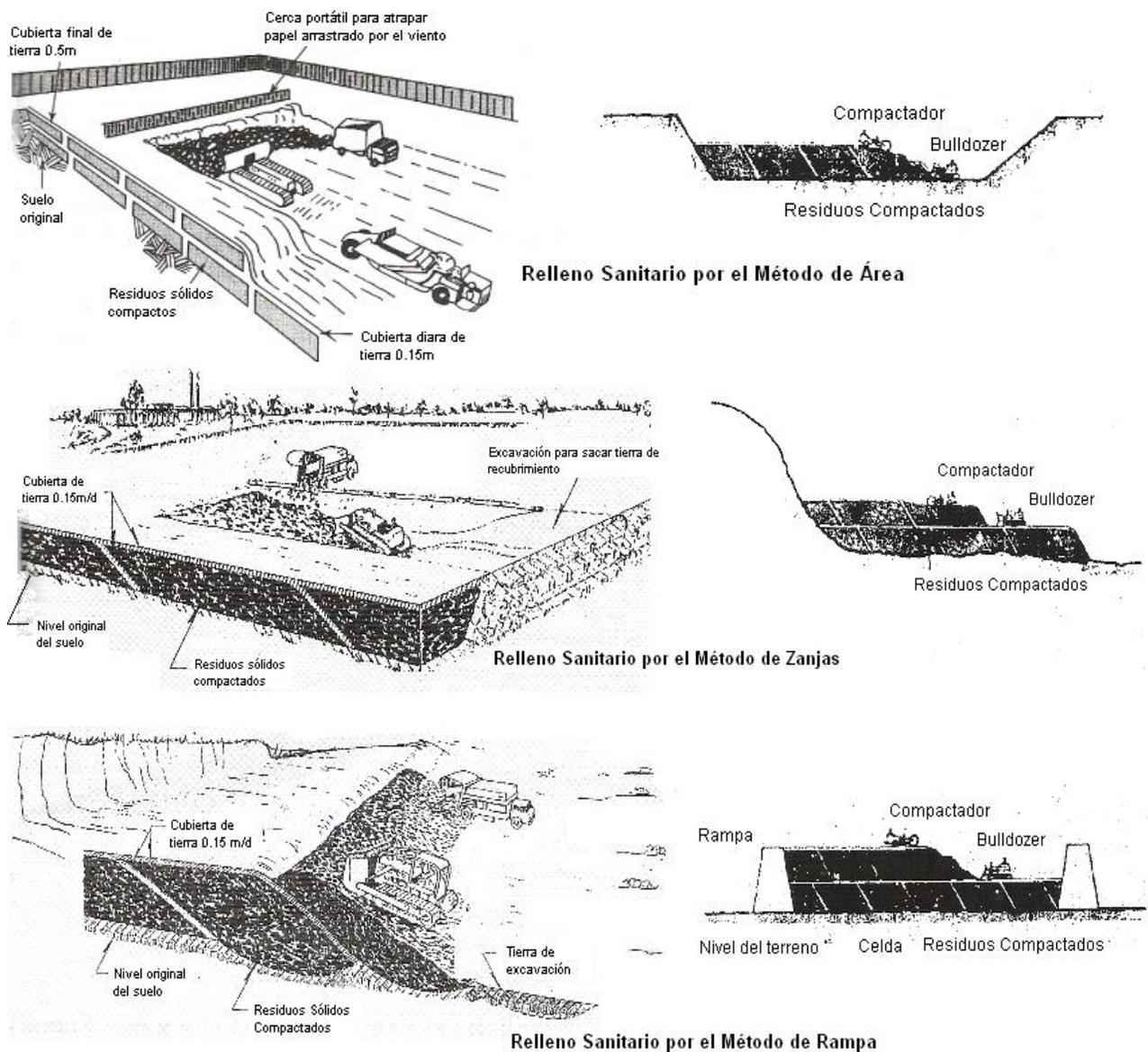


Figura II.2 Métodos básicos de operación de rellenos sanitarios

El método de rampas (figura II.2) se emplea en barrancas u hondonadas existentes en las cuales se colocan los desechos en las pendientes y se cubren con tierra, en estos sitios, por lo general, las partes bajas son inundables por lo que es necesario contar con buenos sistemas de drenado (Jiménez, 2001)

El perfil de un relleno sanitario típico (figura II.3). Los residuos y la cubierta diaria que se colocan en un relleno durante un periodo de operación forman una celda. El periodo de operación suele ser de un día. Los vehículos de recolección y transferencia (transfers: conocidos así, ya que se utilizaban como Unidades de Transferencia, miden 70m² y tienen una capacidad para más de 20 toneladas de basura) lo tiran sobre la superficie del trabajo (frente) se tiende en capas de 0.4 a 0.6 m de profundidad y se compacta. Al final del día se tiene material de cubierta sobre la celda; éste material puede ser suelo nativo u otros materiales aprobados. Las dimensiones de una celda se determinan con la cantidad de residuos y el periodo de operación (Davis y Masten, 2004).

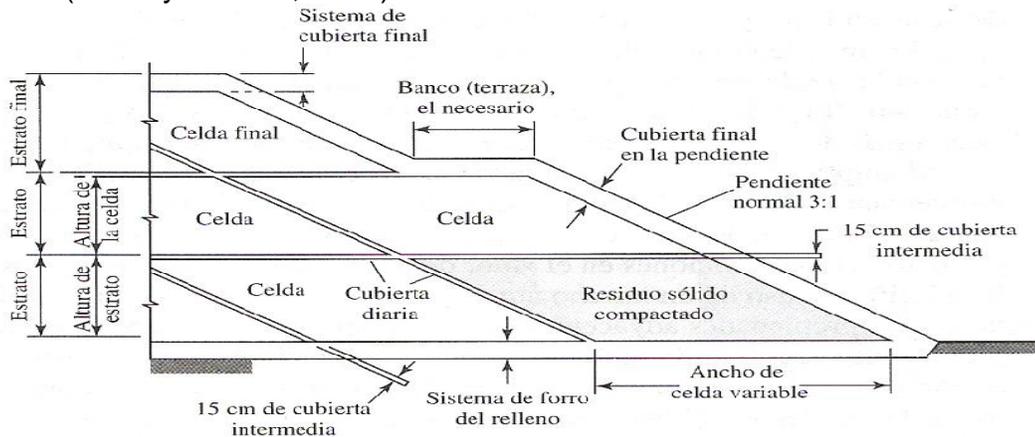


Figura II.3 Corte de un relleno sanitario

Un estrato puede indicar la colocación de una capa de residuo o la terminación de un área activa horizontal del relleno. El primer estrato se llama estrato mullido, porque el residuo no se compacta sino hasta haber depositado 2m de él. Se puede tener una capa adicional de cubierta intermedia si el estrato queda expuesto durante largo tiempo. El área activa puede tener hasta 300m de longitud y ancho. Las zanjas tienen longitudes de 30 a 300m, anchos de 5 a 15m y la profundidad de 3 a 9m.

La estructura del relleno sanitario se conforma por la construcción de la celda, mediante la compactación de residuos sobre una pendiente en capas sucesivas del mismo espesor. Mediante esta técnica, se consigue que los desechos sólidos no representen un peligro para la salud pública y el ambiente; esta definición se debe tener muy en cuenta para el diseño y la operación en todo relleno sanitario.

La cubierta final se aplica a todo el sitio del relleno sanitario después de clausurarlo. La cubierta contendrá varias capas de diferentes materiales que tienen funciones muy específicas.

Los rellenos sanitarios son los sitios donde se depositan estos residuos sólidos, generalmente solo la parte biodegradable, generando también algunas zonas importantes de atención (figura II.4), donde se resaltan la infraestructura necesaria para el biogás, la base del relleno con sus diferentes capas impermeables y los colectores de lixiviados (Bárceñas, 2009).

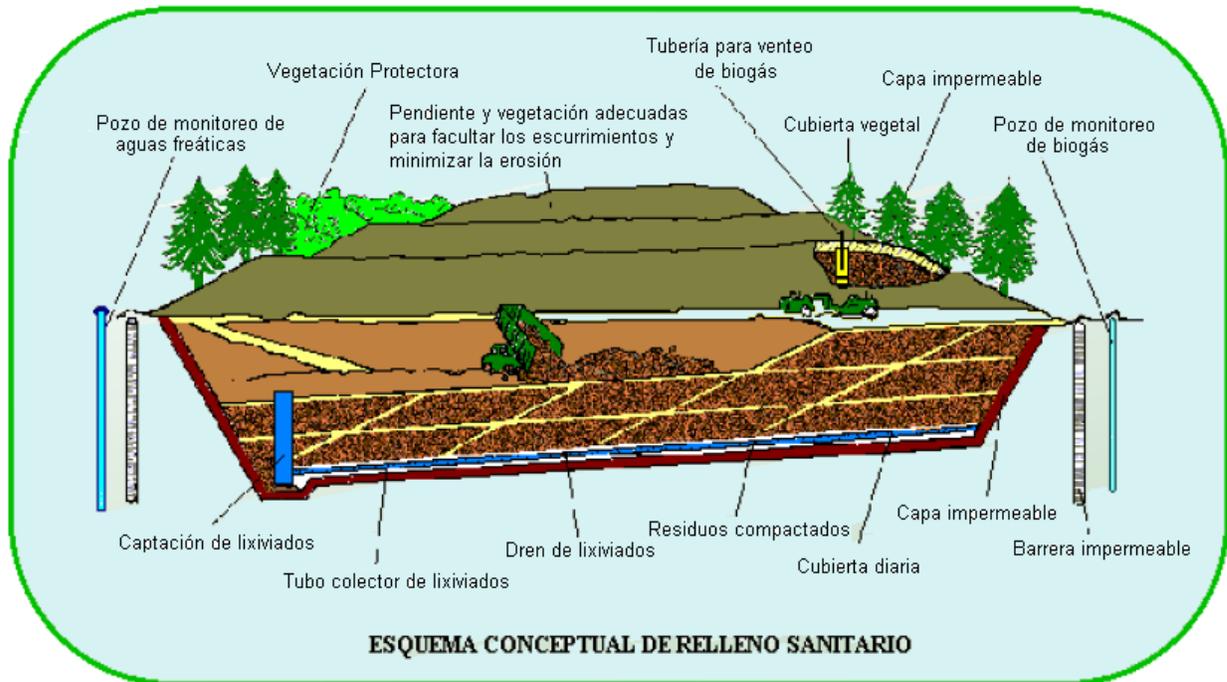


Figura II.4 Relleno sanitario

Es importante señalar que lo interesante de esta figura es que la composición de la misma incluye tanto las características del sitio elegido para relleno sanitario, la infraestructura para la colecta de subproductos, los requerimientos para monitoreo que se pueden identificar plenamente al caracterizar (espesores y tipos de materiales geológicos y de acuíferos, permeabilidades, porosidades, etc.) el sitio adecuado para este fin.

Por otro lado un relleno sanitario es un lugar de disposición de los residuos sólidos domiciliarios o municipales, industriales, material peligroso, residuos de manejo especial y para cada tipo de residuo es importante diferenciar el tipo de relleno sanitario y las normas que los rigen. Para el caso en cuestión se hablará de un relleno sanitario diseñado para residuos sólidos municipales el cual es un área determinada de tierra o una excavación que recibe residuos sólidos domiciliarios, residuos sólidos industriales, comerciales y/o lodos no peligrosos. Según la literatura especializada, cualquier lugar donde los residuos sólidos domiciliarios se encuentran, siendo depositados en grandes cantidades, es en principio, un bioreactor que genera gases y líquidos percolados, lo que dependerá de una serie de variables relacionadas a las características del residuo, del lugar de disposición, de la forma de disposición, al clima entre otras (Davis y Masten, 2005).

Los principales factores que afectan la descomposición de los residuos sólidos en un relleno sanitario (sitio de disposición final), son:

- **Condiciones climáticas y meteorológicas:** comprenden todos los factores ambientales que influyen en los procesos de transformación, tales como la precipitación pluvial, temperatura y vientos, principalmente. La precipitación pluvial, juega un papel determinante en la generación del lixiviado, favoreciendo la solubilización de los componentes tóxicos de los residuos, mientras el efecto de la temperatura y de los vientos prevalece en su influencia sobre las condiciones del balance hídrico. La temperatura externa ejerce su efecto sólo en las capas superiores del relleno, mientras en el perfil interior ésta es afectada por los procesos bioquímicos de la descomposición de los residuos.
- **Propiedades fisicoquímicas:** varían según el sitio, y también en el tiempo, resultando por ende, lixiviados y biogás con características diversas. Por otro lado, el contenido de elementos contaminantes en estos productos depende de la composición química de los residuos, su contenido de humedad, la capacidad de descomposición de los componentes y el calor de reacción de los diversos procesos de transformación, entre otros (Orta et al., 2006).
- **Tecnología aplicada en el sitio de disposición final:** afecta al desarrollo de los procesos de descomposición, influyendo en las condiciones de los factores ambientales, a través de la altura de las celdas, o bien, el perfil total del relleno, la tecnología de compactación y el tipo de cubierta. Existen además algunas prácticas que consisten en recircular el lixiviado al relleno (Orta et al., 2006), con el objeto de acelerar los procesos de degradación en el cuerpo de los residuos, y con el mayor aprovechamiento de la evaporación, la práctica incluso puede ser una opción para el tratamiento de este líquido altamente contaminante.
- **Edad del relleno:** es un factor importante, ya que la composición del lixiviado y biogás depende no sólo de las características de los residuos dispuestos y de las condiciones ambientales y tecnológicas, sino también de la capacidad de reacción de los materiales depositados, la cual a largo plazo va disminuyendo. Las experiencias demuestran que el contenido de elementos contaminantes, o bien la agresividad del lixiviado cambia en el tiempo, manifestando generalmente un rápido incremento inicial y luego una lenta disminución (Johannessen, 1999), que es evidente con los valores obtenidos de la relación DBO/DQO, menor a 0.1 lixiviado estabilizado, 0.35 lixiviado joven (Orta et al., 2006)

En cuanto a los procesos de descomposición de los residuos, su carácter aerobio o anaerobio es determinado por la presencia o falta de oxígeno dentro del relleno. En caso de suficiente oxígeno disponible, los microorganismos presentes en los residuos contribuyen a la descomposición aerobia de la materia orgánica presente que a su vez genera lixiviados que son tratados en las Lagunas Facultativas ubicadas en las cercanías de los rellenos sanitarios (Orta et al., 2006) y en su estabilización por medio de métodos de coagulación-ozonación (Orta et al., 2006).

El proceso es fomentado parcialmente por el aire atrapado en el relleno, mientras las capas superficiales reciben cierta aireación incluso desde la atmósfera. Un factor importante que favorece a los microorganismos aerobios es la humedad, que en esta fase de descomposición debe estar alrededor de 60% (Guerrero, 1996).

Otra forma de clasificar el relleno sanitario es identificando el tipo de compactación presentado en los residuos (tabla II.4), de acuerdo a la densidad alcanzada (Camacho, 2001).

Tabla II.4 Características de los rellenos sanitarios de acuerdo a su densidad

Características	Baja densidad	Media densidad	Alta densidad	Alta densidad sin cobertura
Densidad	500 kg/m ³	800 kg/m ³	1000 kg/m ³	>1100 kg/m ³
Altura de las capas de residuos sólidos	1-5m	1m	1m	0.20m
Capa de cobertura interna	Mano/máquina	máquina	máquina	Máquina
Compactación	Palas	Rodillo compactador	Rodillo compactador	Rodillo compactador
Trituración	No	no	previa	Simultánea
Fermentación	Aerobia/anaerobia	anaerobia	anaerobia	anaerobia

Como generalmente el contenido de humedad de los residuos sólidos municipales es de 20 a 40% del peso total en el mundo, y alrededor de 37% en México (SEDESOL 2005), el agua pluvial que se precipita en el relleno juega un papel importante para alcanzar la humedad necesaria para favorecer los bioprocesos, como muestra la figura II.5 (Robles, 2008), la descomposición de los residuos por causa del contacto con agua. La entrada de escorrentías superficiales y aguas subterráneas, desde luego, queda excluida en un relleno sanitario, con la aplicación de canaletas de desvío y un aislamiento de fondo adecuado

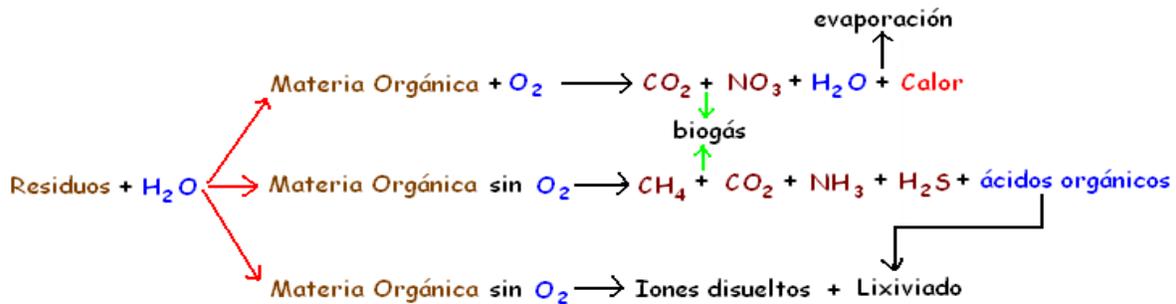


Figura II.5 Descomposición de residuos por contacto con agua

Los productos de la descomposición aerobia generalmente son: dióxido de carbono, amoníaco (el cual después se transforma en nitrato) y agua, así como otros productos de oxidación, en menor proporción. Las reacciones de oxidación generalmente son exotérmicas, por lo que la temperatura interna del relleno puede alcanzar en corto tiempo temperaturas de 60°C o más. Debido a ello, un porcentaje importante de la humedad se evapora, por tanto en esta fase, directamente del

proceso de la descomposición aerobia prácticamente no se genera lixiviado (Robles, 2008).

El relleno sanitario es producto de estudios de planificación regional, con lo que se tendrá un conocimiento del área, por lo que la recopilación de información se centrará en obtener trabajos de detalle realizados en o cerca del área de interés, particularmente de tipo geológico y geofísico. Otro tipo de información que es conveniente recopilar, son los estudios geotécnicos y de bancos de materiales que se hayan efectuado anteriormente. Además, se busca definir la ubicación de bancos de materiales para sellar la base del Sitio de Disposición Final y de cobertura de los residuos, de lo cual se deberá establecer lo siguiente (SEMARNAT-GTZ, 2007):

- Localizar y delimitar su extensión, así como evaluar los volúmenes disponibles.
- Establecer la facilidad que presentan para ser removidos.
- Evaluar la calidad de material a través de exploración directa, empleando perforaciones de pequeño diámetro (tres pulgadas), pozos a cielo abierto, trincheras, etc.

El establecer el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del área en estudio, el cual se fundamenta en los resultados de la geología y la geofísica obtenidos a partir de los estudios de tipo regional; pero referenciándolos al sitio elegido para implementar el sitio de disposición final. Al respecto, las actividades que se deben realizar durante esta etapa son:

- Verificación de las características físicas de las unidades litológicas, así como de las estructuras geológicas que las afectan, en el sitio elegido.
- Censo detallado de obras de captación de aguas subterráneas, como pozos, norias y manantiales, cercanas al sitio seleccionado.
- Identificación del tipo o tipos de acuíferos que existen y la relación hidráulica entre ellos.
- Definición de la trayectoria que sigue el agua en el subsuelo.
- Evaluación de la calidad del agua subterránea.
- Identificación de la forma en que el o los acuíferos se recargan y descargan.

Como señala la NOM-083-SEMARNAT-2003 que establece los requerimientos mínimos necesarios para el diseño, construcción y operación del Relleno Sanitario, es importante señalar que la evaluación no solo se centra en la factibilidad técnica, sino también en la factibilidad social y económica.

La finalidad de esta disposición es la protección de los mantos acuíferos de su contaminación por lixiviado. La protección se puede efectuar por dos métodos o una combinación de estas: el natural y, el artificial, en función del tipo del material geológico donde se emplaza el sitio de disposición final.

La protección o impermeabilización artificial se divide a la vez en dos tipos (SEMARNAT-GTZ, 2007):

- Artificial con material natural. (Adición de suelos externos con características impermeables arcillas o tepetate), (tabla II.5)
- Artificial con materiales externos. (Ej.: Polietileno de alta densidad (HDPE) se sugiere espesor 1.5 mm, geomembrana con bentonita –doble impermeabilización-, aditivos minerales, aditivos químicos, asfaltado, etc.)

Tabla II.5 Tipos de textura de material y sus coeficientes de conductividad hidráulica

K (cm/s)	10 ²	10 ¹	10 ⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
Tipos de materiales	Grava limpia		Arenas limpias, mezcla de grava y arena limpia			Arenas muy finas, limos orgánicos, mezcla de arenas, limo y arcilla, depósitos de arcilla estratificada				Suelos impermeables, arcillas homogéneas		
Propiedad de drenaje	Buen drenaje							Mal drenaje			Prácticamente impermeable	
Porosidad	Elevada							Variable			Muy baja (casi nula)	
Tipo de barrera impermeabilizante recomendada	Geomembrana o impermeabilización artificial							Impermeabilización con el propio suelo natural (desmonte, nivelación, compactación, aditivos, etc.)				

El material que cumple con las características antes descritas es altamente arcilloso, lo que asegura una alta impermeabilización de la base del sitio de disposición final. Independientemente de la impermeabilidad asegurada con este tipo de suelos, en el proyecto y en la construcción del Sitio se debe considerar, tal como se mencionó anteriormente, las obras de desmonte, nivelación, compactación simple y obras de drenaje u otras obras complementarias pertinentes.

Las características físicas y químicas más relevantes que deben cumplir las láminas de HDPE (Polietileno de alta densidad), con un espesor no menor a 1.5 mm o un material equivalente. Las láminas HDPE son las más empleadas y su instalación requiere de algunos cuidados especiales como (SEMARNAT-GTZ, 2007):

- Transporte de los rollos de lámina al lugar de instalación. Se recomienda el transporte de los rollos embalados y que conserven el recubrimiento que los protege de los rayos UV hasta su instalación.
- Durante la colocación de las láminas se recomienda hacerlo sobre una superficie lisa y en un orden que impida que se unan tres láminas en un punto (figura II.6). Se debe considerar en la instalación la dilatación y contracción de la lámina por cambios de temperatura, además de protegerlas contra el viento (se pueden utilizar sacos con arena para la fijación momentánea). Por ningún motivo se debe transitar sobre la lámina con equipo o maquinaria con oruga o cadena, ya que podría dañar la lámina.

Las soldaduras deben ser realizadas por personal técnico especializado con experiencia. Se debe contar además con el equipo adecuado tanto para realizar las soldaduras, como para verificar su sellado.

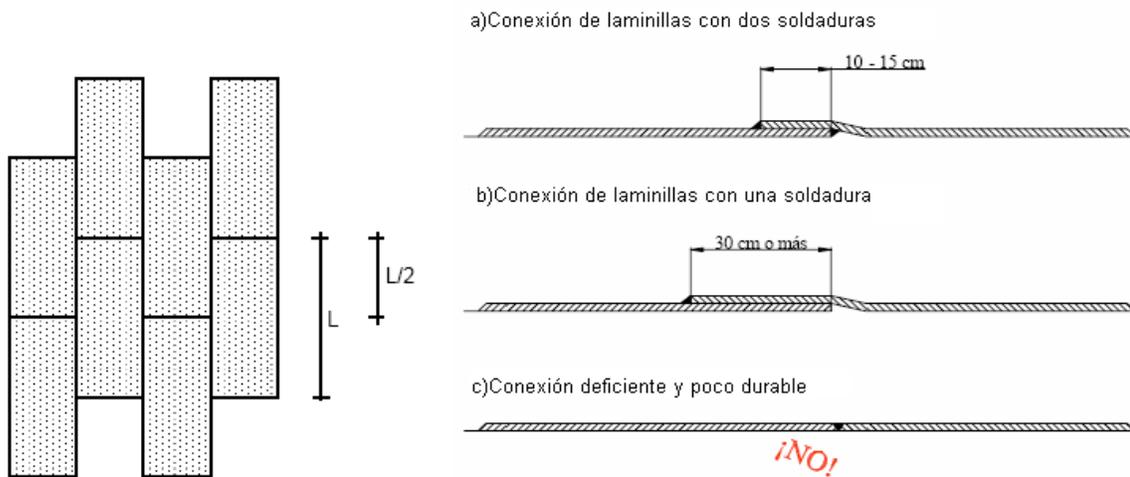


Figura II.6 Instalación y unión de las láminas de HDPE sobre la base.

Otro método de impermeabilización artificial son los aditivos que mejoran las características de los suelos existentes. La mezcla de diferentes tipos de suelo con sales minerales (materiales como anhídrita, hidróxido de calcio, silicato de aluminio hidratado) permite modificar las propiedades físico-químicas del suelo mediante reacciones de intercambio catiónico y floculación – aglomeración, aumentándose la resistencia del suelo y la estabilidad a la humedad. Este método es posible aplicarlo a suelos con índice de plasticidad mayor a 10% y contenido de partículas que pasen la malla 200 exceda el 25%.

II.3 LIXIVIADO

El lixiviado definido en la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, es el líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtración de los materiales que constituyen los residuos y que contienen en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que pueden dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo a la salud humana y de los demás organismos vivos (SEMARNAT-GTZ, 2007).

La materia orgánica de los residuos también se descompone en ausencia de oxígeno (condiciones anaerobias), pero más lentamente que en condiciones aerobias. La descomposición anaerobia prevalece, después del agotamiento del aire atrapado (en lo que se puede considerar los poros del material), en las partes interiores del sitio de disposición final, que están aisladas de la recarga del aire proveniente de la atmósfera. La influencia del ambiente externo es nula; por lo tanto, los procesos bioquímicos del metabolismo microbiano pueden mantener la temperatura elevada. En estos niveles no hay posibilidad de evaporación al ambiente, y además la temperatura de 35 a 50 °C es inferior a la de las condiciones de oxidación (SEMARNAT-GTZ, 2007), y con la descomposición anaerobia se produce cierta cantidad de lixiviado. La degradación da inicio con macromoléculas como proteínas y

aminoácidos, para la generación posterior de ácidos orgánicos, metano y bióxido de carbono, mientras se lleva a cabo una desnitrificación y la reducción de los diversos componentes, sobre todo de sulfatos. Cabe mencionar que en un sitio de disposición final pueden existir condiciones mixtas o bacterias facultativas que respondan a ambos ambientes, favoreciendo al mismo tiempo la descomposición aerobia y anaerobia.

El tiempo, es la variable que en el proceso de descomposición de los residuos puede dividirse en varias fases. Un ejemplo de ello es la clasificación según las cinco fases de descomposición, como se ilustra en la figura II.7 (Johannessen, 1999), en donde el diagrama se refieren a la evolución de las proporciones volumétricas de los principales componentes del lixiviado.

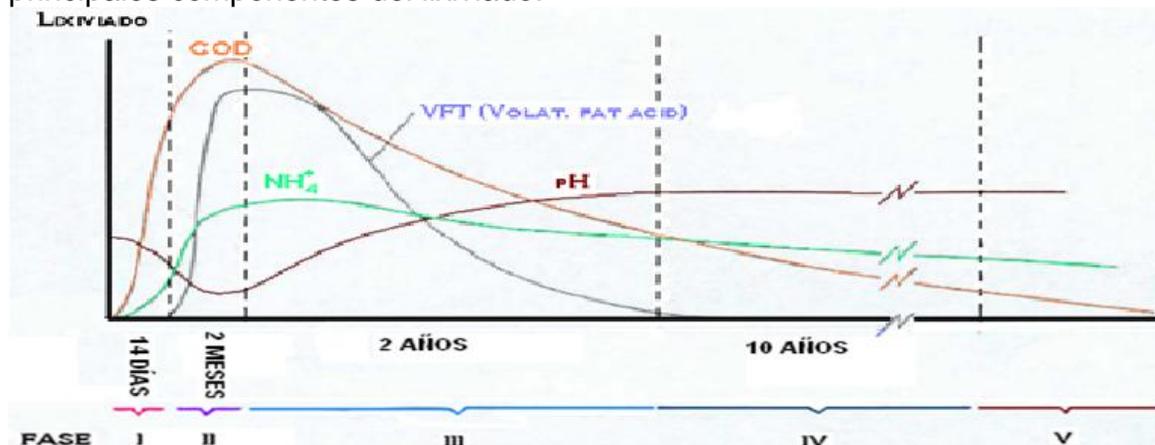


Figura II.7 Fases de descomposición en la evolución idealizada del lixiviado

En todos los procesos de transformación, sea vía aerobia, anaerobia o por lixiviación, un elemento común es el agua, presente en los mismos residuos como contenido de humedad; sin embargo, en su mayor parte proviene de la precipitación pluvial. En la degradación de los residuos el agua desempeña un papel muy importante, ya que cataliza los procesos de degradación a través de la hidrólisis y disolución de componentes tóxicos de la materia orgánica e inorgánica, y da como resultado finalmente la producción del lixiviado.

Las sustancias que se han encontrado en los lixiviados pueden ser reagrupados en varias clases (Robles, 2008):

1. La fracción mineral está constituida esencialmente de cloruros, bicarbonatos, nitratos, iones de amonio, sodio, potasio y de ciertas sales metálicas provenientes de la mineralización biológica de los residuos, los iones son potencialmente oxidables por bacterias aerobias.
2. La fracción orgánica la componen los ácidos grasos volátiles de fácil biodegradación, abundante en sitios jóvenes
3. La fracción orgánica estabilizada, constituida de compuestos fúlvicos y húmicos, que son moléculas complejas de origen natural muy poco biodegradables

4. La fracción orgánica xenobiótica, constituida de compuestos sintetizados por el hombre

Los lixiviados arrastran a su paso material disuelto, en suspensión, fijo o volátil que provoca que tengan elevadas cargas orgánicas, metales pesados, ácidos, sales y microorganismos. Estas últimas características forman una corriente altamente agresiva al ambiente con un potencial contaminante mayor que muchos desechos industriales (NOM-084-ECOL-1997 y SEMARNAT-GTZ, 2007).

Los factores que intervienen en la generación del lixiviado son:

Infiltración de Agua: debido a que la mayor parte del lixiviado en un relleno sanitario es de origen superficial y a su penetración; está en función de tres variables:

Precipitación Pluvial: depende de la temperatura del año y la ubicación geográfica del sitio, la situación más crítica de infiltración de lluvia es cuando se prolongan las lluvias ligeras. En el caso de lluvia intensa durante períodos cortos de tiempo, donde se presenta una rápida saturación del material de cubierta y el remanente de agua escurre fuera del terreno, así la infiltración de agua es menor. La precipitación (directa o en áreas adyacentes al relleno sanitario) se utiliza para representar la totalidad de lluvia que alcanza la superficie del terreno durante un cierto periodo de tiempo y en un lugar determinado. Las características de la precipitación que afectan la generación de lixiviado son: cantidad (mm); intensidad (mm/hr) y frecuencia, que es el período de tiempo que dura una lluvia (minutos u horas). El volumen total de lixiviado se da en base mensual, así como la precipitación pluvial.

Condiciones de la superficie: son aquellas que afectan la generación de lixiviados, incluye: la vegetación, el material de cubierta (tipo, dimensión, compactación, permeabilidades, contenido de humedad, etc.), topografía de la superficie, temperatura, humedad y velocidad del viento sobre el relleno. Las cubiertas Intermedias y cubierta Final, el propósito de la cubierta final es la minimización de entrada de agua en los residuos, por lo que la cubierta debe ser diseñada con base en el espesor, de mínimo 0.30 metros compactado; compactación, recomendado el 90% de la prueba Proctor Standard; permeabilidad, determinada por el tamaño de la partícula, se recomienda emplear arcillas coloidales con valores bajos de permeabilidad menores a 10^{-12} cm/s y hasta 10^{-8} aceptable; capacidad de almacenamiento de agua por el material de cubierta que tiene un efecto determinante sobre la cantidad de agua que se infiltra a los residuos sólidos, su función es la retención de agua de lluvia el tiempo suficiente para que se lleven a cabo los procesos de evaporación, este almacenamiento de agua se reduce con un efectivo escurrimiento por la pendiente de la cubierta final y la pendiente que asegura un escurrimiento del agua donde los valores son entre 2 y 5% para los métodos de trinchera y de área.

Evaporación – evapotranspiración: la evaporación es aplicable cuando está en operación y al cierre, antes de la aparición de una cubierta vegetal, los parámetros que influyen en la evaporación son la temperatura, ubicación geográfica del sitio, temporada del año, humedad, días de insolación y velocidad del viento, etc. La

evapotranspiración sustituirá a la evaporación en cuanto aparezca una cubierta vegetal.

Residuos Sólidos: las características de éstos tienen que ver con la generación de lixiviado y al tipo de residuos confinados en un relleno sanitario de las cuales es importantes señalar:

Tipo: los residuos sólidos con gran contenido de agua (alimenticios), propician la generación de lixiviados aportando una gran carga orgánica, si los residuos sólido se componen de metales, pilas, sustancias químicas, entre otras, sufren lixiviación y contribuyen a la DQO, dureza, metales pesados y otros.

Porcentaje de humedad y capacidad de absorción de agua: los residuos sólidos tienen tamaño y grado de compactación: los procesos a los que pueden estar sujetos los residuos son el triturado, fragmentación y las actividades de embalaje, los cuales representan una alternativa para reducir el volumen en el relleno y la recuperación de materiales (Oviedo, 1991); tiene que ver con el tamaños de los residuos sólidos, si se trituran y se compactan adecuadamente, se reduce la generación de lixiviado; causando los siguientes efectos, un mayor contacto de la masa de residuos con el agua percolada, un decremento en la permeabilidad de los residuos al incrementar su densidad, reduciendo la velocidad de flujo a través de los residuos aumentando la compactación. Se reporta: permeabilidad de 10^{-12} cm/s (Orta y Dávila, 2006); se incrementa la capacidad de campo del relleno y una alta concentración en el lixiviado y una mayor eliminación de contaminantes (Oviedo, 1991)

Composición Química: la cantidad del lixiviado ha sido objeto de diversos estudios e investigaciones, tanto en condiciones controladas como en el campo, y se ha encontrado que las concentraciones de DBO son más altas que en la mayoría de las aguas residuales domésticas y el pH generalmente es ácido; así como también compuestos orgánicos, tales como los ácidos grasos de cadena corta indicativos de la degradación anaeróbica se está realizando. En constituyentes inorgánicos de los lixiviados de rellenos sanitarios se encuentran la dureza, alcalinidad, calcio, magnesio, sodio, potasio, Hierro, Cloro, Sulfatos, fosfatos, nitrógeno, DBO, Zinc y Níquel.

Actividad Microbiana: los residuos sólidos contienen una gran población microbiana y pueden estar altamente contaminados con microorganismos patógenos, debido a que contienen excremento humano y de animales, desechos de hospital y en ocasiones lodos de drenaje lo que representa un peligro a la salud; se pueden constituir de bacterias (estreptococo, coliforme fecal y coliformes totales), virus (presentes en materia fecal en general, difícilmente presentes en lixiviados), hongos (levaduras, hongos saprofiticos y mohos), y parásitos (protozoarios, helmintos y nematoides) (Oviedo, 1992).

Volumen de lixiviado: se aplica el método del balance de agua, que consiste en establecer una relación hidrológica básica, en la cual los cambios en la cantidad de

agua vienen determinados por la diferencia entre las entradas de todas las fuentes posibles así como sus pérdidas (Oviedo, 1992). Para el caso de un relleno sanitario, Fenn en 1975, plantea que las entradas y las salidas de agua están estrechamente relacionadas con el ciclo hidrológico y con la capacidad de almacenamiento de agua de los residuos sólidos y del material de cobertura (figura II.8) y Orta et al., en 2003, propone un modelo matemático de predicción para un balance de agua en rellenos sanitarios, tomando en cuenta la distribución de las celdas y su contribución individual y en conjunto.

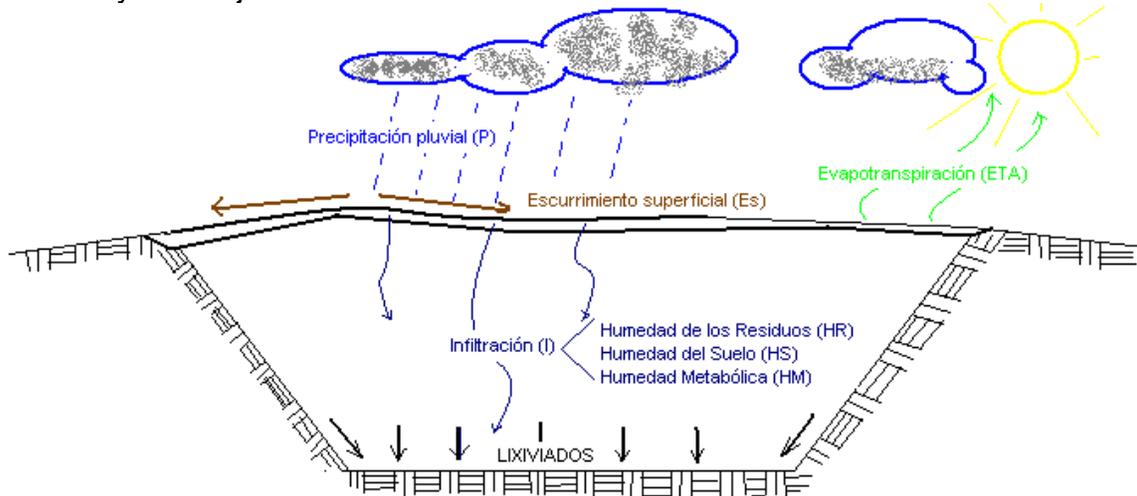


Figura II.8 Balance del sistema en la generación de lixiviados

Tratamiento y control de los lixiviados

Finalmente se contempla darle un tratamiento y control a los lixiviados dentro de la NOM-083-SEMARNAT-2003, debido a que al filtrarse el agua través de los residuos sólidos en descomposición, estos se contaminan y lixivian con soluciones de materiales biológicos y componentes químicos. Los sólidos suspendidos y la turbidez pueden estar presentes en el lixiviado debido al permanente lavado de los materiales sólidos finos presentes en los residuos. Las opciones más conocidas y utilizadas para el control y tratamiento de los lixiviados, se observan en la tabla II.6 (Rojas, 2008) y se describen a continuación:

Tabla II.6 Principales tratamientos a lixiviados de rellenos sanitarios

PRINCIPALES TRATAMIENTOS		
Canalización de lixiviados	Procesos biológicos	Procesos fisicoquímicos
1) Tratamiento combinado con aguas residuales urbanas 2) Recirculación: *Prehumedecimiento con aspesor *Estanques superficiales *Pozos de inyección vertical *Aplicación en zonas con baja humedad 3) Evaporación en lagunas	1) Tratamiento aerobio 2) Tratamiento anaerobio 3) L. aireadas 4) L. facultativa 5) L. estabilización	1) Precipitación química 2) Oxidación química 3) Adsorción/carbón activado. 4) Ósmosis inversa 5) Ultrafiltración 6) Inertización

CANALIZACIÓN DE LIXIVIADOS

1) Tratamiento combinado con aguas residuales

Consiste en evacuar el lixiviado por la red de alcantarillado o transportarlo en unidades motorizadas hasta instalaciones para el tratamiento de aguas residuales, si las normas lo permiten. En este sentido habría que destacar las dificultades en el uso de los conductos del sistema de alcantarillado, ya que en función de la distancia, se podrían producir sedimentaciones de materiales, posibles obstrucciones y producción de gas. Una de las dificultades que puede presentarse es la alta concentración de componentes orgánicos e inorgánicos aportadas por el lixiviado. Solamente cuando los lixiviados constituyen menos del 5% del total de agua residual a tratar en la planta y el contenido de DQO es menor que 1000 mg/l, el tratamiento conjunto es aceptable. De cualquier manera, el lixiviado podría ser diluido antes de ser descargado en las plantas de tratamiento, por lo que el tiempo de retención del agua residual podría aumentarse (Robles, 2008).

2) Recirculación de lixiviado

Si bien es cierto que la reinfiltración de los lixiviados dentro del sitio de disposición final se puede realizar a través de las estructuras de captación del biogás, su descarga en el frente de trabajo o el riego en las superficies expuestas son métodos muy socorridos en nuestro medio para el control de los lixiviados, también es cierto que son los más ineficientes, ya que se hacen sin sustento técnico y sin un control ambiental básico, pudiendo propiciar el deslizamiento de los taludes de residuos al humedecerla en demasía, así como propiciar y fomentar un ambiente cargado de aerotransportables de carácter patógeno. Por lo regular este método va acompañado de una concentración previa de los lixiviados en lagunas de todo tipo.

3) Evaporación de lixiviado

Uno de los sistemas más sencillos para la gestión de lixiviados implica el uso de estanques recubiertos para la evaporación de lixiviados. En lugares lluviosos, la instalación para el almacenamiento de lixiviados se cubre con una membrana sintética, durante la época de lluvias, para evitar que se incremente el volumen de dichos líquidos. Posteriormente, los lixiviados acumulados se mantienen en evaporación durante los meses cálidos del verano, destapando la instalación de almacenamiento y/o regando el lixiviado permanentemente sobre las superficies terminadas del Sitio de Disposición Final.

PROCESOS BIOLÓGICOS

1) Tratamiento biológicos aerobios

Los procesos biológicos aerobios son aquellos que se precisan para la oxidación de la materia orgánica. En este proceso, la materia orgánica es transformada principalmente a CO₂ y a productos biológicos sólidos (lodos). Los tratamientos aerobios que se han utilizado en condiciones limitadas son las lagunas aerobias, los lodos activados y los biofiltros, obteniéndose rendimientos en aproximadamente un 95% en eliminación de DQO; ésto se debe a que para aplicar estos tratamientos con eficacia, se requieren condiciones más o menos estables, situación que evidentemente no puede ser satisfecha por la variabilidad de los lixiviados.

2) Tratamientos biológicos anaerobios

Los tratamientos anaerobios son los más ampliamente utilizados en el tratamiento de lixiviados; esto es debido a que soportan muy bien las sobrecargas puntuales de contaminación que arrastra el lixiviado. En los procesos anaerobios la materia orgánica es convertida en biogás, una mezcla que contiene principalmente CO_2 y CH_4 y en menor medida lodos biológicos.

PROCESOS FÍSICOQUÍMICOS

Los tratamientos físico-químicos, por lo regular requieren poco tiempo para su puesta en marcha, simplicidad de equipamiento y material, fácil automatización y poca sensibilidad a los cambios de temperatura. Entre las desventajas se pueden citar entre otras, un porcentaje de eliminación de la DQO muy bajo (45%), costos de operación elevados por la utilización de productos químicos y posible toxicidad derivada del propio uso de compuestos químicos.

El tratamiento de lixiviados por precipitación química, mejora la eliminación del color, contenido de sólidos en suspensión, amonio y eliminación de algunos cationes pesados. Sin embargo, este tratamiento no obtiene buenos rendimientos en eliminación de materia orgánica (<40% de la DQO), presentando además el inconveniente de la producción de una gran cantidad de sedimentos debido a los reactivos añadidos.

El tratamiento de los lixiviados por oxidación química con Cl_2 , KMNO_4 , y O_3 , obtiene mejores resultados para la eliminación del color, que la propia precipitación química, en donde la reducción de DQO es insuficiente <48%.

El tratamiento de los lixiviados por absorción en columnas de carbón activo en forma de polvo alcanza mejores resultados en la eliminación de la materia orgánica que los métodos químicos (Chian y DeWalle, 1979). El mayor inconveniente que presenta este tratamiento es la necesidad de regenerar frecuentemente las columnas de carbón con un alto consumo del carbón en polvo. La ósmosis inversa presenta una alta eficacia en la eliminación de sales inorgánicas, teniendo además la ventaja adicional de eliminar la materia orgánica disuelta mediante el paso del lixiviado a través de una membrana semipermeable (generalmente acetato de celulosa o nylon), que actúa como un filtro de los iones y de la materia orgánica.

Monitoreo de lixiviado

Se debe elaborar un programa de monitoreo del lixiviado, que tenga como objetivo conocer sus características de Potencial de Hidrógeno (pH), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y metales pesados.

La caracterización de los lixiviados, dada la heterogeneidad de los residuos, implica la medición de una gran cantidad de parámetros físicos y químicos, de los cuales, los más comunes se muestran en la tabla II.7 (SEMARNAT-GTZ, 2007).

Tabla II.7 Parámetros y características de un lixiviado.

PARAMETROS	INTERVALO (mg/l)
*Ph	5.3-8.5
*DQO	3,000-45,000
*cloruro	100-3,000
*nitratos	1-40
*nitrógeno amoniacal	10-800
*conductividad específica	***
*temperatura	***
*cianuros	100-1,500
*sulfatos	<0.10
VOCs	***
DBO	2,000-30,000
COT	1,500-20,000
Sólidos suspendidos totales	200-1000
Fósforo total	1-70
Ortofosfatos	1-50
Alcalinidad como CaCO ₃	1,000-10,000
Dureza Total	300 -10,000
Calcio	200 - 3,000
Magnesio	50- 1,500
Potasio	200-2,000
Sodio	200-2,000
Hierro total	50-600

La caracterización fisicoquímica, para los siguientes casos:

- Conocer el grado de estabilización de los residuos;
- Conocer las características del lixiviado y su grado de estabilización;
- Obtener información para definir su tratamiento o método de disposición final.

Para los primeros dos, se debe determinar: el pH, DQO, DBO₅, COT, AGV (Ácidos grasos volátiles); mientras que para el tercero, se evaluarán los parámetros en función al tipo de tratamiento a diseñar.

II.4 BIOGÁS

El biogás, como lo define la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, es una mezcla gaseosa, resultado del proceso de descomposición anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos, constituida principalmente por metano y bióxido de carbono, cuyos elementos pueden presentar problemas si no son manejados adecuadamente, en la mayoría de los casos, el manejo efectivo del biogás requiere la captación de gas y extracción efectiva en el sitio de disposición final.

Las Fases de descomposición de los residuos sólidos que se llevan a cabo en un relleno sanitario se muestran en la figura II.9 (Johannessen, 1999).

Fase I: es una fase de ajuste inicial, de condiciones aerobias promovida por el aire atrapado en las celdas cubiertas en el relleno o vertedero, se calcula una duración de 14 días (figura II.9). El oxígeno del aire, sin embargo, empieza a consumirse rápidamente, así como el nitrógeno, por los procesos de nitrificación. En consecuencia de la degradación aerobia de la materia orgánica, empieza a producirse dióxido de carbono, que se acompaña de una elevación de la

temperatura, se generan nitritos y nitratos. Esta fase dura hasta el agotamiento del oxígeno, abarcando por lo general un periodo de un par de semanas.

Entre la fase de ajuste y la fase ácida se encuentra la etapa de transición donde los nitritos y sulfatos, se reducen a gas nitrógeno y sulfuro de hidrógeno, respectivamente en lugar de actuar como aceptores de electrones en las reacciones de conversión biológica. En esta fase comienza la etapa anaerobia.

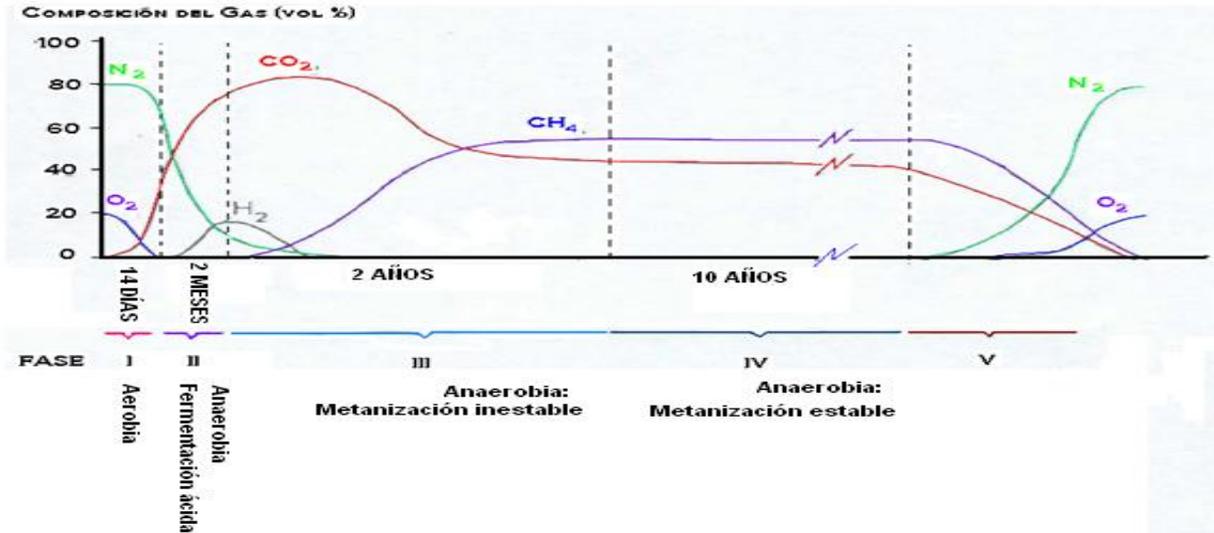


Figura II.9 Fases de descomposición idealizada del biogás

Fase II: es la llamada fase ácida, la cual es una transición a los procesos anaerobios, cuando la fermentación empieza a generar lixiviados con un alto contenido de ácidos orgánicos, lo que da lugar a un descenso significativo en el pH, con una duración de dos meses (figura II.9). Por otro lado, el biogás generado está constituido mayormente de dióxido de carbono y nitrógeno aún no consumido, aunado a la producción de un porcentaje menor de hidrógeno. En esta fase se acelera la actividad microbiana y se puede dividir en dos pasos:

Hidrólisis: Se inicia con la solubilización de la materia orgánica contenida en los residuos sólidos en presencia de agua, por medio de enzimas que desdoblan a los polímeros contenidos en la materia orgánica (largas y complejas cadenas de compuestos orgánicos), tales como: proteínas, carbohidratos y grasas en compuestos solubles como aminoácidos, azúcares simples, glicerol y ácidos grasos de cadena larga, los cuales pueden ser utilizados por los microorganismos como fuente de energía y de carbono celular.

Acidogénesis: en esta parte, las moléculas simples, producidas en la etapa anterior, experimentan procesos de fermentación en el caso de los azúcares y aminoácidos sufren oxidación anaerobia como ocurre con los ácidos grasos de cadena larga. Los propiónicos, butíricos y valéricos; ciertos ácidos orgánicos, como el ácido láctico y el succínico, alcoholes, dióxido de carbono e hidrógeno.

Fase III: es una etapa metanogénica intermedia en donde predominan las condiciones totalmente anaerobias, su duración es de dos años (figura II.9). La proporción del metano se incrementa, mientras el contenido de bióxido de carbono decrece. Los ácidos grasos volátiles son transformados a biogás, y su concentración disminuye en el lixiviado. Esto conlleva a un aumento en el pH, mientras que la carga orgánica del lixiviado se reduce considerablemente.

Fase IV: es conocida como la fase metanogénica estable, con una duración aproximada de 10 años (figura II.9). Es un periodo anaerobio durante el cual se alcanza una máxima producción del metano, con una concentración estable en el biogás de alrededor del 55% en volumen. El contenido de dióxido de carbono es algo menor pero también estable, estando entre 40 y 50%. Las bacterias acetogénicas metabolizan los productos terminales de la etapa acidogénica en acetato, CO₂ e hidrógeno. Los microorganismos metanogénicos, convierten el acetato, hidrógeno y dióxido de carbono en metano; en esta etapa el pH interno del relleno es entre 6.8-8.

Fase V: es la etapa final de la estabilización de los residuos, con un carácter anaerobio-aerobio, no se tiene un registro de su duración. Estas condiciones ocurren por lo regular en rellenos recién clausurados. La producción de metano decrece, y también el dióxido de carbono se sustituye por nitrógeno y oxígeno conforme se introduce el aire atmosférico a través de las capas superficiales del relleno.

La composición del biogás depende del tipo de residuos depositados en el relleno, el equilibrio físico-químico alcanzado con los lixiviados, la forma de explotación y la edad del relleno. La tabla II.8, presenta los rangos en la composición del biogás en 20 rellenos sanitarios que se encontraban en operación (Bagchi, 1994).

Tabla II.8 Composición del biogás

SUSTANCIA	CONCENTRACIÓN
Metano	30-53%
Dióxido de carbono	34-51%
Nitrógeno	1-21%
Oxígeno	1-2%
Benceno	32* ppm
Cloruro de vinilo	44* ppm
Tolueno	150*ppm
Trans- 1,2 dicloroetano	59*ppm
Cloroformo	0.69*ppm
1,2 dicloroetano	19*ppm
1,1,1 - tricloroetano	3,1*ppm
Tetracloruro de carbono	0.011*ppm
Tricloroetano	13*ppm
Percloroetano	19*ppm

*concentración máxima medida

Los gases generados en los rellenos sanitarios son principalmente metano, dióxido de carbono, nitrógeno, oxígeno y en componentes traza, los que resultan de la conversión biológica de los desperdicios orgánicos e inorgánicos:

- Hidrocarburos saturados e insaturados de bajo peso molecular
- Ácidos de hidrocarburos y alcoholes orgánicos solubles en agua
- Hidrocarburos aromáticos
- Hidrocarburos halogenados
- Compuestos sulfurados (hidrogeno de sulfuro, mercaptanos)
- Componentes inorgánicos, inertes, metálicos, tóxicos, etc.

La producción de biogás en un Sitio de Disposición Final, está regida por los procesos de estabilización de la fracción orgánica contenida en dichos residuos. Estos procesos, aunque en su mayor parte se llevan a cabo en condiciones anaerobias (sin oxígeno) en principio. Debido al oxígeno que queda atrapado en los intersticios de los residuos, cuando se cubre con tierra también se presenta la degradación aeróbica (con oxígeno) que inhibe el proceso anaeróbico y cancela la producción de gas metano.

Es importante señalar que la producción total de biogás en un instante dado, equivale a la suma de la generación de cada una de las celdas individuales del Sitio de Disposición Final, considerando que se encuentran en diferentes etapas de degradación, ya que cada celda fue construida con algún desfase; siempre que el proceso se halle en la etapa metanogénica estable, que es la de mayor duración en la degradación de los residuos.

Estas consideraciones llevan a concluir que, una vez alcanzada la fase metanogénica estable en las primeras celdas del Sitio de Disposición Final, esto es alrededor de un año después de iniciada su operación, la tasa de generación se hace relativamente constante, mientras se mantenga el ingreso de la misma cantidad de residuos diariamente.

Los factores importantes que tienen que ver con la generación del biogás son al igual que con los lixiviados, el contenido de humedad, la temperatura, el pH y la alcalinidad, la cantidad de oxígeno, los sulfatos y los nutrientes.

Contenido de humedad: dependiendo de las características físicas y químicas de los materiales orgánicos presentes en un relleno, un mismo contenido de humedad puede reflejar situaciones muy distintas respecto a la disponibilidad del agua para los microorganismos.

La producción de metano se incrementa al aumentar el contenido de humedad, un alto contenido favorece el intercambio (transporte y distribución) de substratos, nutrientes, organismos reguladores y bacterias; el exceso de humedad disminuye el contacto entre la materia y se produce una fermentación anaerobia. La limitación en el transporte de oxígeno evita que se inhiba el crecimiento de bacterias; existe un

valor mínimo de humedad necesaria para producir actividad microbiana que, en el caso de desechos municipales, llega a ser de casi 40%.

Temperatura: tanto la degradación aerobia como la anaerobia producen calor, pero la generación de calor en un proceso anaerobio; se puede considerar baja debido a que la tasa de generación rara vez origina temperaturas altas.

En el fondo de un relleno con un flujo moderado de agua, el flujo de calor del relleno a los alrededores es pequeño debido a la capacidad de absorción de los desechos, y el calor generado por el proceso de descomposición anaerobio puede originar temperaturas altas en el relleno. En climas templados es posible que las temperaturas registradas en un relleno se encuentren en un rango de 30 a 45°C.

La formación de metano se presenta durante etapas en las cuales se establecen condiciones anaerobias. Como en todos los procesos microbianos la degradación anaerobia de los residuos es la afectada por la temperatura. La bacteria metanogénica contiene un grupo termofílico al cual favorecen las temperaturas altas (45 a 75°C). En la digestión anaerobia sólo el grupo mesofílico resulta de interés dado que se ha probado, en simulaciones de rellenos, que la producción de metano se da cuando la temperatura se mantiene entre 30 y 40°C.

pH y Alcalinidad: el ecosistema metanogénico en el relleno es bastante delicado y las relaciones balanceadas entre los grupos es crucial para lograr una buena tasa de producción.

La bacteria metanogénica es estrictamente anaerobia y es muy sensible a las condiciones del medio; ésta se desarrolla sólo en un pequeño rango de valores de pH (6.5 a 7.5). Si la bacteria es afectada por otros factores la conversión de hidrógeno y de ácido acético disminuyen, la presión del hidrógeno se incrementa y el pH decrece, llevando a una mayor concentración de ácido butírico y ácido propiónico y una disminución mayor del pH. Eventualmente, la producción de metano se detiene.

Oxígeno: la ausencia de oxígeno libre es una condición necesaria para el crecimiento de las bacterias anaerobias. La bacteria metanogénica es la más sensible al oxígeno ya que requiere un potencial redox menor a -330mV.

Hidrógeno: El hidrógeno es producido tanto por las bacterias fermentativas como las acetogénicas y la presión del hidrógeno generada afecta las rutas bioquímicas. Con bajas presiones de hidrógeno la bacteria fermentativa produce hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético y, con altas presiones de hidrógeno genera hidrógeno, dióxido de carbono, etanol, ácido butírico y ácido propiónico.

En cuanto a su peligrosidad, el biogás y otros productos gaseosos, en teoría podrían ser explosivos por el metano que contienen (tabla II.9), sobre todo si son emitidos a la atmósfera en forma incontrolada. Es sabido, sin embargo, que el riesgo de

explosión existe si el metano está presente en el aire, debido a los límites de flabilidad del metano de alrededor de 5 a 15% en volumen (Robles, 2008). Afortunadamente, estas situaciones son poco probables en los sitios de disposición final, ya que en el interior del relleno la concentración del CH₄ normalmente está a un nivel mayor al límite indicado, mientras que en el exterior, debido al espacio abierto, el riesgo de explosión se reduce considerablemente.

Los niveles de explosividad se expresan como LEL (Lower Explosive Limit – límite bajo de explosividad) y UEL (Upper Explosive Limit – límite alto de explosividad). Estos límites expresan, en porcentaje, la concentración necesaria para que el metano al mezclarse con aire se vuelva inflamable o explosivo. El límite inferior es 5% de concentración de metano y el límite superior es 15% (figura II.11).



Figura II.11 Rango de explosividad del gas metano

La importancia de la generación del biogás, es no solamente porque es un producto de un relleno sanitario, sino porque también representa un posible peligro por la variedad de gases que lo componen, siendo de mayor proporción el metano; por lo que es importante conocer sus características por medio de su hoja de seguridad (tabla II.9), para poder prever posible asfixia en los seres vivos o inflamación de materiales.

Tabla II.9 Hoja de seguridad del metano

HOJA DE SEGURIDA DEL METANO	
NOMBRE COMERCIAL Y SINONIMOS Metano, Metil hidruro, Gas de Pantano	Familia: Hidrocarburo alifático
NOMENCLATURA QUMICA Y SINONIMOS Metano	Fórmula: CH ₄
DATOS FÍSICOS	
PUNTO DE EBULLICIÓN: - 258.6 °F (- 161.4 °C)	DENSIDAD LIQUIDA EN EL PUNTO DE EBULLICIÓN 26.5 lb/ft ³ (424.9 kg/m ³)
PRESION DE VAPOR a 70° F (21.1°C) Encima de la temperatura crítica de -116.6°F (-82.6°C)	DENSIDAD GASEOSA A 70° F (21.1°C).1 atm 0.0416 lb/ft ³ (0.6670 kg/m ³)
% de Evaporación N/A	PUNTO DE CONGELACION - 255.8 °F (-159.9 °C)
SOLUBILIDAD EN AGUA Depreciable	GRAVEDAD ESPECÍFICA (AIRE=1) 70°F (21.1°C) 0.56
APARIENCIA Y OLOR: Gas incoloro e inodoro.	

INFORMACION SOBRE RIESGOS DE FUEGO Y EXPLOSIÓN		
PUNTO DE INFLAMACION - 306 °F (- 188 °C) (C.C.)	TEMPERATURA DE AUTOIGNICION 1076 °F (580 °C)	LIMITE DE INFLAMABILIDAD % en Volumen LEL: 5 UEL: 15
MEDIO DE EXTINCIÓN Dióxido de carbono, polvo químico, agua		CLASIFICACION ELÉCTRICA Clase 1, Grupo D
PROCEDIMIENTOS ESPECIALES PARA COMBATIR EL FUEGO Si es posible, detenga el flujo de metano. Emplee niebla de agua, para enfriar los cilindros que se encontraren en las proximidades.		
RIESGOS INUSUALES DE FUEGO Y EXPLOSION Si al extinguirse la llama, el flujo de gas continúa, aumentar la ventilación para prevenir la formación de mezclas explosivas o inflamables.		
INFORME SOBRE EL RIESGO A LA SALUD		
CONCENTRACIÓN MÁXIMA PERMISIBLE PONDERADA EN EL TIEMPO (CMP-CPT): El metano está definido como un asfixiante simple. "F". El contenido mínimo de oxígeno debe ser del 18% molar, a presión atmosférica normal equivalente a una presión parcial de ($pO_2 > 135$ torr.)		
SINTOMAS DE EXPOSICIÓN: Altas concentraciones de metano de modo tal que impidan un adecuado suministro de oxígeno a los pulmones causa mareos, respiración profunda debido a la falta de aire, posibles náuseas y eventual pérdida de conocimiento.		
CARACTERISTICAS TOXICAS: El metano es inactivo biológicamente y principalmente no tóxico, de esta manera su principal propiedad es la de impedir un adecuado suministro de oxígeno a los pulmones. El metano no está listado en el IARC, NTP, o por OSHA como carcinogénico o potencial carcinogénico. Las personas enfermas, cuya afección podría verse agravada, por la exposición al metano no deben ser autorizadas a trabajar o manipular este producto.		
TRATAMIENTO DE PRIMEROS AUXILIOS - RECOMENDACIONES UNA RÁPIDA ATENCIÓN MÉDICA ES OBLIGATORIA EN TODOS LOS CASOS DE SOBRE EXPOSICIÓN AL METANO. EL PERSONAL DE RESCATE DEBE ESTAR EQUIPADO CON EQUIPOS DE RESPIRACIÓN AUTÓNOMA Y RECONOCER LOS RIESGOS DE FUEGO Y EXPLOSION. Inhalación: Si la persona está consciente, deberá ser trasladada fuera del área contaminada para inhalar aire fresco. Retirla rápido, del área contaminada es lo más importante. Si la víctima estuviera inconsciente, se le deberá trasladar a un área descontaminada, brindar ayuda respiratoria y suplemento de oxígeno. El tratamiento posterior será de soporte y continuará según los síntomas.		
MEZCLAS PELIGROSAS CON OTROS LIQUIDOS, SOLIDOS O GASES Forma mezclas explosivas o inflamables con la mayoría de los oxidantes, (oxígeno, cloro, flúor etc.) Es inflamable en aire en amplio rango.		FECHA DE EMISION Y REVISIONES Revisado en Marzo de 1991 www.aga.com www.fichasdeseguridad.com/definiciones

El monitoreo del biogás se podrá llevar a cabo utilizando equipos especializados de detección de metano y otros compuestos como Monóxido de carbono. Por lo general estos equipos cuentan con alarma cuando la relación entre aire y metano se acerca a los índices de explosividad, indicándolo como porcentaje (1 – 100 %) del LEL (SEMARNAT-GTZ, 2007).

Se debe destacar que el mayor potencial de contaminación o impacto ambiental del biogás se origina de los posibles efectos ambientales de sus dos principales componentes (metano y bióxido de carbono). El CH₄ y CO₂ además de ser contaminantes de la atmósfera a nivel local, son además los gases de efecto invernadero más importantes que contribuyen al calentamiento global del planeta, por lo que la tarea de controlar su emisión se deriva también de diferentes compromisos internacionales; la composición del biogás también difiere dependiendo de la fuente que lo origina (tabla II.10) (Colmenares, 2006).

Tabla II.10 Composición del biogás por fuente

Gases	Desechos Agrícolas	Lodos Cloacales	Desechos Industriales	Rellenos Sanitarios	Propiedades
Metano	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%	Combustible
CO₂	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%	Ácido, asfixiante
Vapor agua	Saturación	Saturación	Saturación	Saturación	Corrosivo
Hidrógeno	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%	Combustible
H₂S	100-7000ppm	0-1%	0-8%	0.5-100ppm	Corrosivo, olor, tóxico
Amoniaco	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	Corrosivo
CO	0-1%	0-1%	0-1%	Trazas	Tóxico
Nitrógeno	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%	Inerte
Oxígeno	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%	Corrosivo
Orgánicos	trazas	trazas	trazas	5ppm	Corrosivos, olores

El valor calorífico del biogás es cerca de 6 kWh por metro cúbico. Es decir que un metro cúbico de biogás es equivalente a aproximadamente medio litro de combustible diesel.

Modelos aplicables para la estimación de la producción de biogás

Los modelos que permiten la estimación de la producción de biogás son en dos sentidos, aquellos que determinan su composición y los que determinan su flujo (Calva, 1995; Guerrero, 1996 y SEMARNAT-GTZ, 2007).

Dentro de los primeros la NOM-083-SEMARNAT-2003, indica que es necesario emplear el estequiométrico que se basa en una reacción química. Para determinar el flujo de producción de biogás en un SDF existen el “Modelo Mexicano de Biogás” desarrollado por la SEDESOL recientemente y que utiliza información generada en el balance estequiométrico. Existen otros modelos como los son el Ham y Barlaz o el presentado por Tchobanoglous y colaboradores. En cualquier caso es necesario evaluar con detalle la memoria de cálculo de la estimación.

- **Balance estequiométrico**

Estos modelos permiten conocer la composición de biogás más que el volumen de generación. Como ya se ha mencionado, la generación de biogás depende de muchas condiciones y no necesariamente se genera todo el biogás que idealmente podría obtenerse. Los modelos estequiométricos se basan siempre en una reacción química y requieren de la determinación de la composición química de los residuos. Este balance se realiza para cada uno de los elementos químicos considerados (C, H, O, N, etc.) y supone la producción de especies químicas “sencillas”. Si bien estos balances pueden hacerse muy complicados aquí se presenta el más sencillo.

- **Modelos cinéticos**

En el modelo de Ham-Barlaz o de cinética de orden cero, la tasa de generación de Metano es independiente de la cantidad de sustrato (c). La cinética de primer orden establece que la tasa de pérdida de materia putrescible, es proporcional a la cantidad de materia putrescible que permanece y el de segundo orden es proporcional al cuadrado de esta cantidad.

$$-\frac{dc}{dt} = k \text{ cinética de orden cero}$$

$$-\frac{dc}{dt} = ck \text{ cinética de primer orden}$$

$$-\frac{dc}{dt} = c^2k \text{ cinética de segundo orden}$$

- **Modelo EPA**

La EPA recomienda el uso de un modelo muy simple de aplicar y que parece predecir con suficiente aproximación la cantidad de biogás generado en los sitios de disposición final. La generación del metano del sitio toma en cuenta la masa de residuos recibida anualmente aceptando la misma tasa anual en el tiempo de operación del sitio de disposición final; sin embargo, si se conocen las entradas de residuos con el tiempo puede establecerse un promedio anual. El modelo es como sigue:

$$Q = L_0 \cdot R(e^{-kc} - e^{-kt})$$

Donde:

Q = Tasa de generación de Metano con el tiempo ($m^3/año$)

L_0 = Capacidad potencial del residuos de generar Metano (m^3/Mg).

R = Tasa de aceptación promedio de residuos durante la vida activa del SDF, ($Mg/año$).

k = Tasa de generación de Metano se supone constante. ($1/año$).

c = Tiempo desde la clausura del Sitio de Disposición Final, (# años).

t = Tiempo desde el inicio de colocación de los residuos en el Sitio de Disposición Final, (# años).

Debe hacerse notar que el biogás generado es el doble del obtenido mediante la fórmula anterior, ya que se acepta que el Metano y Dióxido de Carbono se encuentran en partes iguales.

- **Modelo Mexicano de Biogás**

El modelo toma como base que la reacción química es de primer orden y que la velocidad es lo suficientemente pequeña para considerar todos los residuos de un año como una sola celda. El modelo matemático que se emplea para esta estimación es:

$$Q_M = \sum_{i=1}^n 2k \cdot L_0 \cdot M_i \cdot e^{-k \cdot t_i}$$

donde:

- Q_M = Generación máxima de biogás ($m^3/año$)
- k = Índice de generación de metano (indicador de la velocidad de reacción) ($año^{-1}$)
- L_0 = Generación potencial de metano (indicador de la generación real de gas por unidad de masa de residuos) (m^3/t)
- M_i = Masa de residuos sólidos dispuestos en el año i (Mg)
- t_i = Edad de los residuos dispuestos en el año i (años)

El modelo propuesto por SEDESOL ha sido incorporado en una hoja de Microsoft Excel © para su utilización y cuenta además con un manual explicativo. Otra característica adicional de este modelo es la que permite calcular la cantidad de biogás susceptible de aprovechamiento. Este modelo no ha sido probado completamente en la práctica y existen cuestionamientos respecto a los valores propuestos para los parámetros k y L_0 , y su dependencia de las características climatológicas.

Manejo de biogás

Los gases generados en el Sitio de Disposición Final producto de la descomposición de la materia orgánica, puede evacuarse mediante drenajes **pasivos** o **activos** (figura II.12). El drenaje activo consiste en la succión del biogás mediante la utilización de equipos mecánicos. A diferencia del drenaje activo, el drenaje pasivo controla la difusión de los gases mediante la utilización de chimeneas instaladas a una distancia que varía entre los 15 a 30 m o 2 – 4 chimeneas equidistantes por hectárea. Los costos de este último sistema son mucho más bajos que el primero, sin embargo la eficiencia de drenaje es menor ya que cuando los Sitos de Disposición Final tienen más de 15 m de profundidad, el biogás no tiene la presión interior suficiente para vencer la presión atmosférica y desplazar el aire dentro de la estructura, para emerger por la parte superior de ésta, registrándose importantes migraciones laterales que dificultan la viabilidad de su aprovechamiento, amén de promover situaciones de riesgo en las colindancias del sitio de disposición final (SEMANAT-GTZ, 2007).

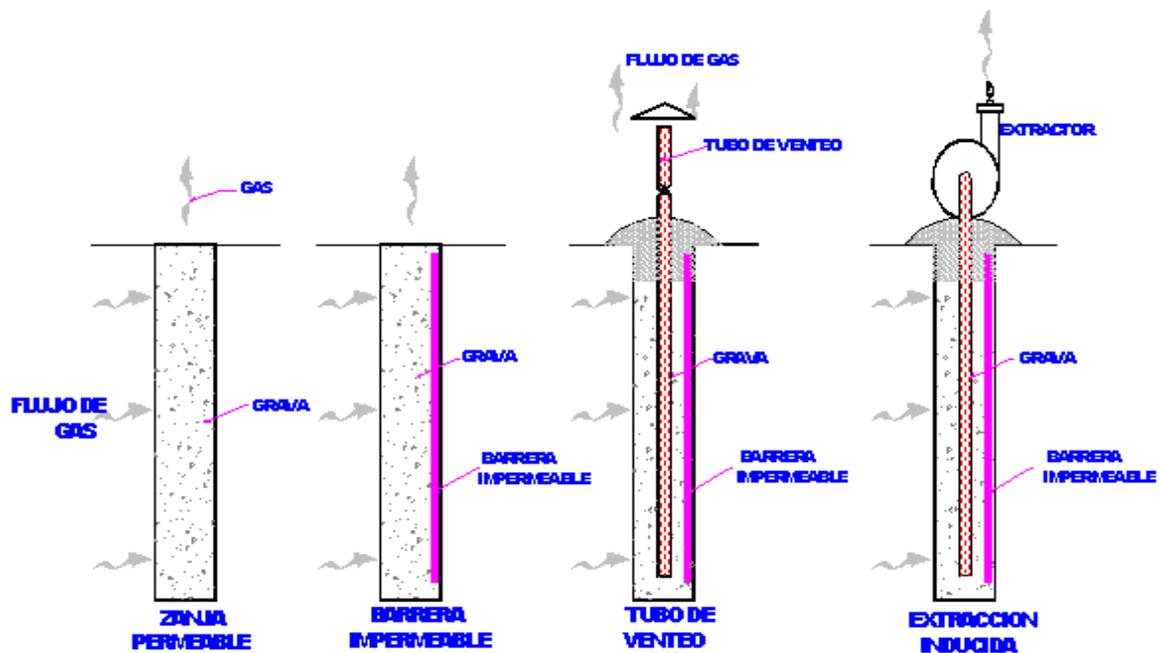


Figura II.12 Sistemas de control para la extracción de biogás

Sistemas de drenaje pasivos

Los drenajes pasivos no requieren de energía externa para su funcionamiento y están basados en las propiedades fisicoquímicas del biogás, así como en el diseño geométrico de la celda. Este drenaje es menos costoso que el activo pero depende de muchas consideraciones durante la construcción de la celda y del sitio de disposición final en sí. El drenaje pasivo del biogás puede dividirse en dos, sin chimenea y con chimenea.

Drenajes pasivos sin chimenea

El drenaje pasivo se basa en la evacuación de los gases generados en la masa de residuos mediante perforaciones realizadas en la cobertura de composta, el cual hace las veces de filtro biológico realizando (SEMANAT-GTZ, 2007), un primer tratamiento a los gases antes de entrar en contacto con la atmósfera (figura II.13).

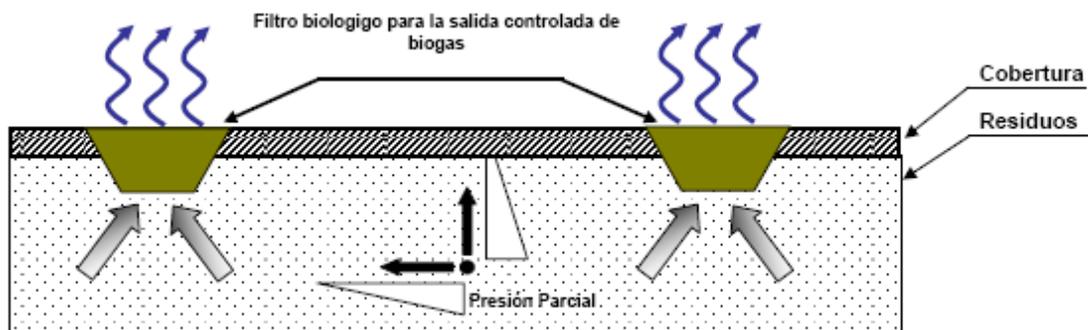


Figura II.13 Modelo de filtro biológico para la evacuación de biogás

Es posible, en el caso que se cuente con una planta de composta y las celdas sean relativamente pequeñas, cubrir las celdas con una capa de 50 cm de espesor de composta. Esta capa servirá como filtro biológico (figura II.14). Como la superficie de este filtro es mayor, la carga de contaminantes por área es sumamente baja, asegurando una eficiencia óptima. Esta alternativa solo se puede plantear para Sitios de Disposición Final manuales o semi- manuales del tipo D con planta de compostaje o residuos estabilizados disponible (SEMARNAT-GTZ, 2007).

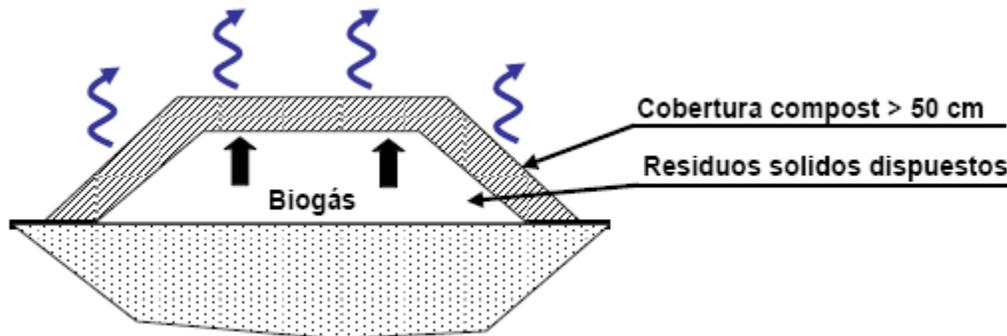


Figura II.14 Cobertura de composta como filtro biológico

Sin embargo, el sistema pasivo sin chimenea tiene las siguientes desventajas:

- Impide un suministro de aire suficiente para permitir el crecimiento de las raíces de la cobertura vegetal, debido a las altas concentraciones de metano bajo la capa de tierra.
- En el caso que se generen fisuras en la cobertura o taludes, los gases se difunden por las fisuras sin pasar por el filtro biológico.
- En condiciones de mucha humedad, disposición de lodos o zonas lluviosas, el filtro biológico pierde su eficiencia.
- Si los residuos generan una gran cantidad de biogás o el biogás se difunde solo en algunos puntos definidos, se produce una carga muy alta para el filtro biológico y éste pierde su eficiencia.
- En la estación fría de la sierra, no ingresa suficiente oxígeno a los microorganismos en la capa de tierra y el filtro biológico no trabaja correctamente.
- Generalmente no se recomienda el uso del sistema pasivo sin chimenea, a excepción de los siguientes casos:
 - Municipios pequeños que no cuentan con personal suficiente para la construcción de chimeneas durante la operación.
 - Sitio de disposición final cerrado que no cuenten con ningún sistema de evacuación de biogás.

Incineración del biogás en chimeneas

Todo el biogás que es evacuado, ya sea de manera activa o pasiva mediante la utilización de chimeneas en los Sitios de Disposición Final tipos A, B o C, debe ser quemado. Lo anterior con el fin de minimizar sus efectos negativos a la atmósfera, minimizar el peligro de explosiones o incendios, y disminuir los contaminantes que afectan negativamente al lugar.

Para incinerar el biogás en las chimeneas es necesaria la instalación de un tubo de hormigón vibrado o tubo metálico, sin dañar la estructura de la chimenea. El tubo debe insertarse dentro de la chimenea al menos a 80 cm. Con el fin de evitar la migración de biogás por el contorno de la chimenea, se debe instalar un poncho o sello plástico y ser cubierto con material de cobertura, figura II.15 (SEMARNAT-GTZ, 2007).



Figura II.15 Instalación de tubo de quema de biogás.

Monitoreo de biogás.

En el programa para el monitoreo del biogás generado en el SDF, se especificarán los parámetros a determinar, equipos y técnicas a emplear, así como la frecuencia de muestreo (tabla II.11). Se recomienda que para la composición del biogás (determinación de metano, bióxido de carbono, oxígeno y nitrógeno) se realicen muestreos y análisis trimestrales, mientras que la determinación de niveles de explosividad, toxicidad y flujo de gases se haga diariamente (Rojas, 2008).

Tabla II.11 Equipos empleados en el monitoreo ambiental

Impactante	Parámetro	EQUIPO EMPLEADO
Biogás	CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , N ₂	Cromatógrafo de gases
	Explosividad, toxicidad	Detector de gases
	Temperatura	Termómetro de mercurio
	Flujo	Flujómetro
Lixiviados	Metales pesados,	Espectrofotómetro
	Conductividad	Conducímetro
	pH	Potenciómetro
	Oxígeno disuelto	Oxímetro
Ruido	Ruido	Sonómetro
Residuos sólidos	Radiactividad, composición	Contador Geiger
Partículas en aire	Partículas suspendidas totales.	Muestreador de Alto Volumen
	Microorganismos en aire.	Muestreador Andersen

CLAUSURA DEL RELLENO

La función principal de la cubierta final es evitar que entre humedad al relleno terminado; debido principalmente a que la producción de lixiviado está sujeta a la cantidad de humedad que ingrese al sistema, reduciendo la probabilidad de contaminar el agua subterránea. Estos sitios se pueden utilizar, posteriormente, para la creación de zonas verdes o campos deportivos. No son recomendados para la construcción, por ser susceptibles de hundimientos y por la producción de biogás (Jiménez, 2001).

II. 5 MARCO LEGAL

Un relleno sanitario es una técnica para la disposición de la basura en el suelo sin causar perjuicios al medio ambiente y sin causar molestias o peligro para la salud y seguridad pública. El objetivo del relleno sanitario es establecer una barrera entre el ambiente y los residuos sólidos, al reducir y controlar las emisiones gaseosas y evitar la infiltración y fugas de los líquidos lixiviados producidos durante la descomposición de los residuos orgánicos. La revisión de la parte legal se realiza con una idea muy abierta de todas las partes involucradas en la generación de un relleno sanitario.

En la tabla II.12 se presentan en forma de listado, las principales leyes que rigen a los Estados Unidos Mexicanos, de las cuales legislan y regulan directamente actividades relacionadas con el manejo y disposición de los residuos así como su clasificación.

Tabla II.12 Leyes Mexicanas. D.O.F. Diario Oficial de la Federación

Leyes Mexicanas	Fecha de Publicación D.O.F	Referencia
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente	28 de enero, 1988	http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148.pdf
Ley de Residuos Sólidos para el Distrito Federal	1º de abril, 2004	http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/125.pdf
Ley de Aguas Nacionales	1º de diciembre, 1992	http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16.pdf
Ley de Conservación del Suelo y Agua	1946	http://200.23.34.9/comcafedata/11/Lecturas/Lecturas_complementarias/conservacion_de_suelo_utoipia.pdf
Ley General de Salud	7 de febrero, 1984	http://www.seguro-popular.salud.gob.mx/descargas/marco_juridico/07_01_lgs.pdf
Ley Federal Sobre Metrología y Normalización	1º de julio, 1992	http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/130.pdf

Las normas listadas en la tabla II.13 tienen que ver con la generación, regulación, manejo y clasificación de algunos residuos importantes que están presentes en el ambiente o los subproductos que se generan en el manejo de los residuos.

Tabla II.13 Normas Oficiales Mexicanas Generales (D.O.F).

N o r m a s
Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Descargas de Aguas Residuales
Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Contaminación Atmosférica
Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Contaminación Atmosférica-Monitoreo
Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Residuos Peligrosos

Normas Oficiales Mexicanas de Carácter Emergente en Materia de Contaminación Atmosférica
Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Ruido
Normas Oficiales en Materia de Seguridad e Higiene en el Trabajo
Normas Oficiales Mexicanas de la Secretaría de Salud
Normas Oficiales Mexicanas de la Secretaría de Energía
Normas Oficiales Mexicanas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes

La tabla II.14 indica las normas oficiales mexicanas que se emplearán para desarrollar la metodología que tiene que ver directa o indirectamente sobre la generación de residuos que requieren o tienen una disposición final.

Tabla II.14 Normas Oficiales Mexicanas

Nomenclatura	Designación	Fecha de publicación DOF
NOM-052-SEMARNAT	Norma Oficial Mexicana, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.	22 de octubre de 1993 23 de junio de 2006 http://www.bordercenter.org/pdfs/MexicanOfficialStandardNOM-052-SEMARNAT-1993.pdf
NOM-083-SEMARNAT	Norma Oficial Mexicana, establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a rellenos sanitarios para la disposición final de los residuos sólidos municipales	3 de diciembre de 1993 2 de febrero de 1999 http://www.secovam-labaind.com/005A.pdf
NOM-084-SEMARNAT	Norma Oficial Mexicana, establece los requisitos de diseño de un relleno sanitario y la construcción de sus obras complementarias.	10 de diciembre 2003 http://www.bordercenter.org/pdfs/MexicanOfficialStandardNOM-010-SCT2-2003.pdf

De la anterior Ley General Del Equilibrio Ecológico y La Protección al Ambiente, Ley de Aguas Nacionales y de la Ley General de Salud, se desprenden los siguientes Reglamentos Federales, tabla II.15.

Tabla II.15 Reglamentos de las Leyes Mexicanas. (D.O.F.)

Reglamentos	Fecha de Publicación D.O.F	Referencia
Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales	12 de enero, 1994	http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LAN.pdf

Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Auditoría Ambiental	29 de noviembre, 2000	http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/MarcoNormativo/Reglamentos/Reg_LGEEPA_MAA.pdf
Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos	8 de octubre, 2003 Última reforma publicada DOF 19 de mayo, 2007	http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/doc/263.doc

Dentro de la Normatividad que tiene que ver con los residuos sólidos se deben destacar la Federal y Local dentro del Distrito Federal. Para la primera se debe revisar la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (8/oct/2003), primero para conocer el objetivo, la terminología que utilizará y propiamente los artículos que se contemplan de donde el Art. 20 y 21 tienen que ver con programas para la prevención y gestión integral de residuos, los planes de manejo, la participación social, se contemplan los residuos peligrosos en el título quinto; se revisa la prevención y manejo integral de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, en el título sexto y finalmente el título séptimo revisa las medidas de control y de seguridad, infracciones y sanciones. Esta Ley contiene 125 artículos, siete títulos y cuatro capítulos. También de ámbito Federal se encuentra el Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (30/nov/2006).

El municipio es, por ley, el responsable del cumplimiento en su jurisdicción de las políticas ambientales nacionales, así como de la prestación del servicio público de aseo, lo que significa que el gobierno del Distrito Federal es el responsable y recae en la Secretaría de Obras y Servicios. Esto significa que cada municipio se hará cargo de los residuos sólidos generados dentro de ella.

Dentro de la normatividad local se tienen a la disposición del público en general y el conocimiento también de las sanciones que se establecen:

1. Reglamento de la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal (nov/2008)
2. Ley ambiental del Distrito Federal (enero/2000)
3. Ley de residuos sólidos del Distrito Federal
4. Sanciones establecidas en la Ley de residuos sólidos del Distrito Federal
5. NADF-007-RNAT-2004, Clasificación y especificaciones del manejo para residuos de la construcción.
6. Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos (oct/2004)

Las leyes y normas que vigilan se cumpla en materia de regulación de los residuos sólidos de interés, su tratamiento y confinamiento en rellenos sanitarios, están:

- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), los artículos relevantes de esta Ley en materia de limpia pública son: el Artículo 6, fracción XII relativo a la preservación y protección ambiental en

centros de población; y los Artículos 110, 117 y 134 referentes a la prevención y control de la contaminación del aire, agua y suelo respectivamente.

- El Reglamento de la Ley Ambiental del Distrito Federal (RLADF), de 1997 su objetivo es reglamentar las disposiciones de la ley en materia de causalidad de las infracciones y los daños ambientales, Título III de la protección y restauración del agua y de las barrancas, artículo 31 referente a asentamientos en barrancas así como acumulación de basura en barrancas; Título IV de la prevención y control de la contaminación ambiental, Capítulo I, artículo 53 referente a la reglamentación de las fuente fijas o móviles que involucran la quema, deposición, descarga o infiltración de residuos que generen contaminación; Sección 2 de la generación y manejo de residuos artículos 66, 67, 68 y 69 referente a la recolección y transporte de residuos así como de la construcción, equipamiento y operación de las unidades de transferencia y de los sitios e instalaciones para la disposición final.
- La Ley de Residuos Sólidos para el Distrito Federal (LRSDF), del 2004 referente a responsabilizar a los generadores de los residuos y la Secretaría de Obras y Servicios y Delegaciones que instrumentará los sistemas de depósito y recolección separada de los residuos sólidos así como la disposición, contempla sanciones (Herrera, et al., 2004).
- Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos para el Distrito Federal, el objetivo principal es disminuir la generación de basura a través de la separación de residuos desde la fuente (Herrera, et al., 2004).
- Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1994, que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a rellenos sanitarios para la disposición final de los residuos sólidos municipales. El sitio seleccionado para la construcción del relleno sanitario del proyecto, cumple cabalmente con las especificaciones de esta Norma, en cuanto a suelo, profundidad del manto freático, vida útil, ubicación con respecto a cuerpos de agua y centros de población, drenaje y topografía.
- Norma Oficial Mexicana NOM-084-ECOL-1994, que establece los requisitos de diseño de un relleno sanitario y la construcción de sus obras complementarias. El diseño del relleno sanitario propuesto se sujetó a los lineamientos y procedimientos que establece esta norma.

Además se le solicita al Instituto Nacional de Antropología, constancia de no afectación a zonas de interés cultural e histórico, y a la Comisión Nacional del Agua su aprobación respecto a la no afectación de cuerpos de aguas superficiales y de las aguas del acuífero. Se caracterizan geológicamente determinando las formaciones rocosas circundantes, así como los accidentes estructurales que pongan en riesgo las obras del relleno sanitario. De los estudios de geotécnica y geofísica realizados, los suelos en el sitio del proyecto, caracterizando el nivel estático de las aguas subterráneas.

CAPITULO III MARCO DE REFERENCIA

El Relleno Sanitario Bordo Poniente en su etapa IV se conceptualizó, diseñó y operó como relleno, con normativa e infraestructura y es de los más importantes debido a los volúmenes que maneja. El desarrollo de Bordo Poniente es importante como parte de la comprensión del sitio, ya que provee información estructural.

El marco geológico regional, abarca la cuenca del Valle de México, ésta es compleja desde el punto de vista estructural debido a la gran actividad en los movimientos de las placas tectónicas que rodean al país (Placa de Norteamérica, Placa del Pacífico, Placa del Caribe y la Placa de Cocos de subducción) y que recaen directamente en las actividades volcánicas por ser parte del Eje Neovolcánico Transversal que atraviesa el país de este a oeste resultando en una serie de eventos geológicos que abarcan un período de tiempo desde el Mioceno Superior Reciente donde la placa de cocos genera al Eje Neovolcánico Transversal.

El desarrollo de la Cuenca y los procesos que la originaron es la parte medular en un estudio; el lugar de estudio es único y se debe conocer plenamente la geología; es decir, los materiales que la conforman de forma regional ya que se enfoca en movimientos de masas y eventos clave que cambian las condiciones originales. La litología y estratigrafía son determinantes para conocer el comportamiento de los materiales del sitio y sus estructuras, con sus respectivos cortes litológicos e información complementaria.

III.1 RELLENO SANITARIO BORDO PONIENTE

Ante la necesidad de contar con un sitio óptimo (seguro e higiénico), donde el Distrito Federal pudiese alojar su basura surge la idea de crear un relleno sanitario en el norte de la ciudad (caracterizado por su alta densidad poblacional y la gran generación de desechos); un documento de la Unidad de Estadísticas Urbanas e Información señala que en 1984 comenzaron los estudios para la construcción y operación de un relleno sanitario en la zona oriente de la ciudad, específicamente en terrenos del Lago de Texcoco (Torres, 2005).

Después de celebrar el convenio con el organismo “Proyecto Lago de Texcoco”, dependiente de la Comisión Nacional del Agua, se asignó una superficie total de mil hectáreas a la construcción del relleno sanitario. A finales de 1984 empezó la construcción del relleno y en febrero de 1985, comenzó a funcionar recibiendo más de mil toneladas de residuos sólidos por día (Torres, 2005). En la figura III.1 (Hernández, 2004), se observan las tres primeras etapas (BP-I, BP-II y BP-III), la etapa en operación (BP-IV) y una quinta etapa que se quedó como proyección (BP-V).

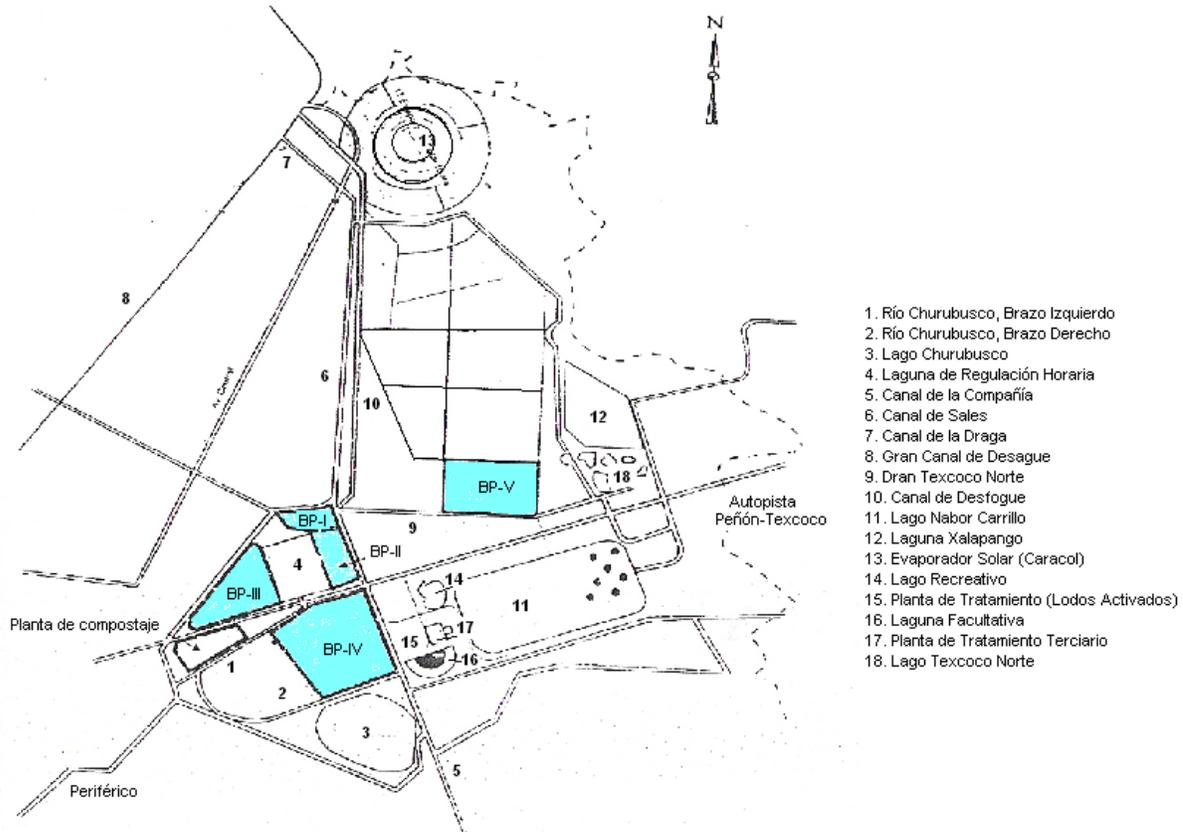


Figura III.1 Etapas del Relleno Sanitario Bordo Poniente en ex - Lago de Texcoco

Debido a su dimensión fue necesario trabajarlo por áreas o etapas. Así, se han operado 75 hectáreas de su primer etapa; 80 hectáreas en la segunda etapa y 105 hectáreas en la tercera etapa; además de clausurarse una zona de 37 hectáreas que era utilizada como sitio de disposición final por las delegaciones Gustavo A. Madero y Venustiano Carranza (Torres, 2005).

Localizada en el noreste de la Ciudad de México, la Zona Federal del Lago de Texcoco es el último reducto del antiguo lago azteca (figura III.2). Al desecarse dio lugar a situaciones ambientales que ocasionaron un deterioro ecológico en la zona, caracterizado por la desertificación y erosión del terreno que derivó en grandes tolvaneras e inundaciones que afectaron a la ciudad y la salud de la población (Torres, 2005 y TGC, 2005).

En 1971 se creó una comisión para estudiar las condiciones hidrológicas y ecológicas del lago, derivando en la formulación del Plan Lago de Texcoco, donde se establecieron programas, proyectos, obras y acciones tendientes al rescate integral de la zona a cargo de la Comisión Nacional del Agua.

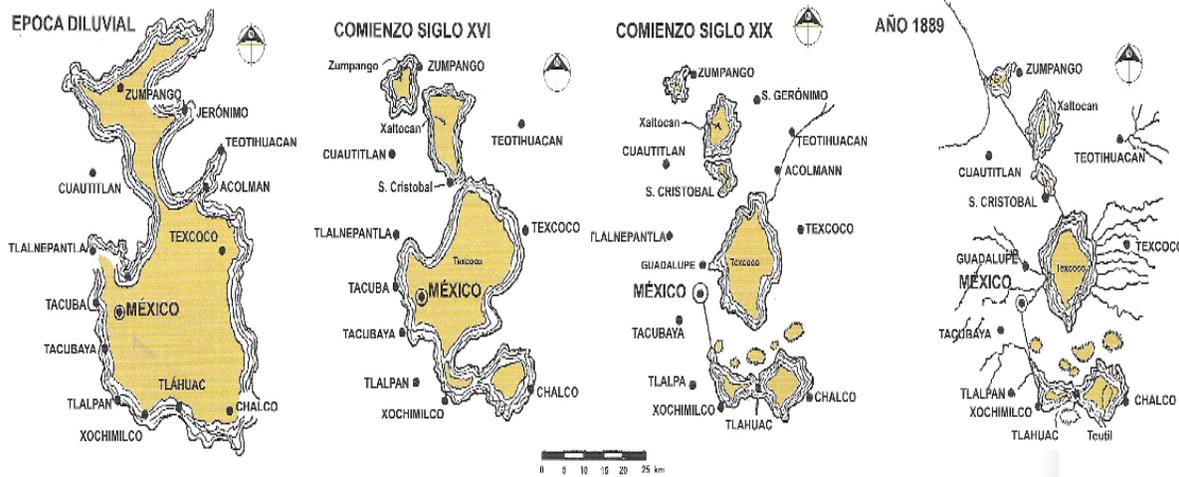


Figura III.2 Evolución de los cinco Lagos

Se pusieron en marcha tres líneas de acción:

- I. Infraestructura hidráulica y de cobertura vegetal para mitigar tolvánicas. Se realizó el encauzamiento de once ríos y dos cauces de desagüe (Canal de la Compañía y Río Churubusco) para evitar inundaciones.
- II. Creación de una zona boscosa, la construcción de la autopista Peñón- Texcoco y el arco norte del Anillo Periférico.
- III. Operación, conservación y mantenimiento del control de la cuenca, lagos, canales, plantas de tratamiento y caminos.

En cuanto a la infraestructura específica, en 1984 la Comisión Nacional del Agua (CNA) autorizó al Departamento del Distrito Federal la construcción y operación de un relleno sanitario, el cual empezó a recibir residuos sólidos a partir de febrero de 1985. Encontrándose en operación la etapa I del relleno sanitario (Torres, 2005).

III.1.1 BORDO PONIENTE, ETAPAS I, II Y III

El método de construcción del Relleno Sanitario de Bordo Poniente en sus Etapas I, II y III (figura III.3), (González, 1991); contempló tres niveles:

- i) Construcción de un primer nivel de desechos sólidos en cada una de las macroceldas divididas por los caminos interiores.
- ii) Construcción de pirámides truncadas con una altura de cinco metros y una pendiente de tres a uno en cada una de las macroceldas
- iii) Llenado de los espacios libres dejados por las pirámides truncadas, incluyendo los caminos interiores.



Figura III.3 Ubicación de las etapas del Relleno Sanitario Bordo Poniente

Este método se seleccionó, con el fin de evitar los hundimientos y afloramientos en el terreno, lo cual repercutiría en la destrucción de los caminos interiores y por tanto en la operación. En base a los estudios preliminares y el método de construcción, se procedió a diseñar el relleno sanitario el cual contempla los siguientes puntos:

Nivel de desplante: Cobra importancia al aumentar la capacidad volumétrica del terreno, obtener material de cubierta y facilitar el trazo de caminos interiores y drenajes. Debido a las características topográficas que presenta el sitio seleccionado para el relleno sanitario no es posible llevar a cabo desplante, ya que el tipo de suelo de la zona (sobresaturación en 400 y 600% de fluidos), la excavación resultó sumamente difícil; además, el material excavado no puede ser utilizado como material de cubierta por sus características de sobresaturación de fluidos.

Diseño de niveles: El primer nivel, consistió en ocupar el volumen disponible de las macroceldas, para esto se estableció una altura aproximada de dos metros, la cual concuerda con el nivel de los caminos interiores. Cabe aclarar que el espesor de capa se considera 0.15 metros de material de cubierta y 1.85 metros de desechos sólidos. En el segundo nivel se planteó construir una especie de pirámide truncada en cada una de las macroceldas, quedando libres los caminos interiores.

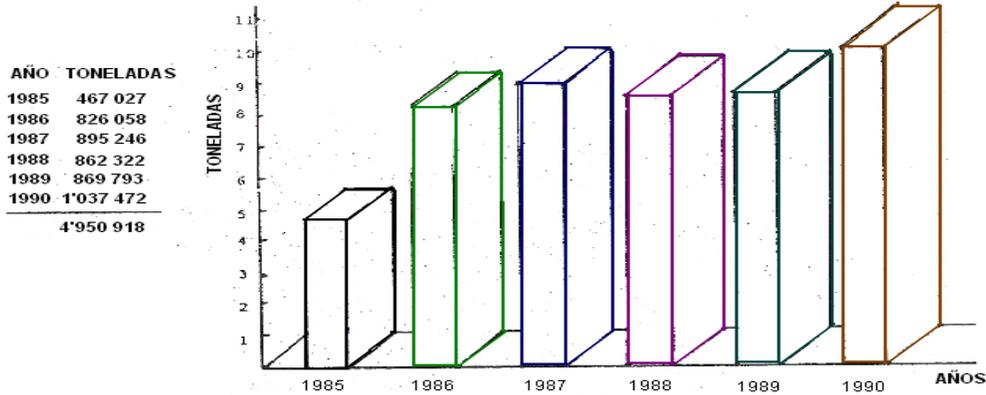
Se consideraron dos capas en donde la primera tuvo un espesor de dos metros, incluyendo material de cubierta y la segunda capa de 2.70 metros sin incluir material de cubierta. Así entonces, para cada pirámide de cinco metros habrá dos capas, a partir de la base de las macroceldas hasta el punto más alto del relleno y la superficie

final de cada pirámide deberá tener una pendiente del 2% para evitar la acumulación de las aguas pluviales que puedan percolarse al interior.

El tercer nivel cuenta con el mismo número de capas que el segundo; sin embargo, la modalidad de su construcción fue diferente, ya que consistió en rellenar los espacios libres existentes en las pirámides truncadas como en el segundo nivel.

Por otra parte, es importante establecer que los residuos sólidos que llegaron al Relleno Sanitario Bordo Poniente en sus primeras tres etapas fueron constantes desde el año 1985 hasta 1990, como se muestra en la tabla III.1, donde se informa que en los seis años se depositaron 4'950 918 toneladas de residuos sólidos (González, 1991).

Tabla III.1 Ingresos Anuales de desechos sólidos



Material de cubierta: Cumple con las siguientes funciones: controla el ingreso de moscas, reduce la entrada de roedores y aves en busca de alimento y reduce los malos olores; asimismo, el material de cubierta con baja permeabilidad evitará la infiltración de agua, evitará riesgos de incendios y venteo de gases. Las características del material de cubierta con baja permeabilidad, cumplieron con las siguientes especificaciones:

- Tierra limo-arcillosa (tepetate)
- Permeabilidad de aproximadamente 3×10^{-7} m/s

El material de cubierta para el relleno sanitario se obtuvo de bancos establecidos en los poblados de la Magdalena y Chimalhuacán en el Estado de México, ya que no es posible utilizar el material de Bordo Poniente, debido al alto contenido de agua existente en el lugar.

Vialidad: su diseño reduce tiempos de recorrido de los camiones recolectores, se evita el daño de los caminos interiores, así como la facilidad de realizar el mantenimiento de los caminos.

Superficie final: está en función del uso futuro que se haya designado para el sitio una vez terminadas las operaciones de disposición final de los desechos sólidos. El uso del sitio lo determinará la Comisión del Lago de Texcoco, de acuerdo a sus intereses. Sin embargo, se deben cumplir los lineamientos para tener una superficie perfectamente sellada, con las pendientes adecuadas para evitar la erosión por lluvia y viento, lo cual puede dejar al descubierto los residuos sólidos provocando, problemas ambientales. Las características de la superficie final son:

- a) El nivel del relleno sanitario debe proporcionar un declive del 2% para permitir el drenaje, se deben evitar declives pronunciados porque se facilita la erosión.
- b) La última capa de tierra debe tener un espesor de 0.40 a 0.60 metros.
- c) La superficie estará cubierta con pasto o algún arbusto que evite el arrastre de la cubierta final.
- d) Se tendrán las instalaciones de venteo de biogás bien acondicionadas.

OBRAS COMPLEMENTARIAS

Caminos de acceso: son fundamentales para que la operación sea eficiente logrando aumentar la eficiencia del tránsito al sitio de disposición, los caminos pueden ser permanentes o temporales dependiendo de la zona que se trate. En el caso de Bordo Poniente se aprovechó gran parte del camino que utilizaban las Delegaciones Venustiano Carranza y Gustavo A. Madero, para depositar sus desechos cerca del sitio.

Captación de biogás: en todos los rellenos sanitarios se efectúa un proceso de degradación de los desechos sólidos, debido a las actividades de microorganismos anaerobios. El metano producido representa riesgos de explosión en el sitio de disposición (González, 1991), por lo que es necesario diseñar un sistema para captación que permita el aprovechamiento o simplemente la eliminación a la atmósfera (venteo). La infraestructura utilizada es con llantas perforadas, sobrepuestas y la segunda utilizar un tambo sin fondo, sin tapa y con asas soldadas en el borde superior (figura III.4).

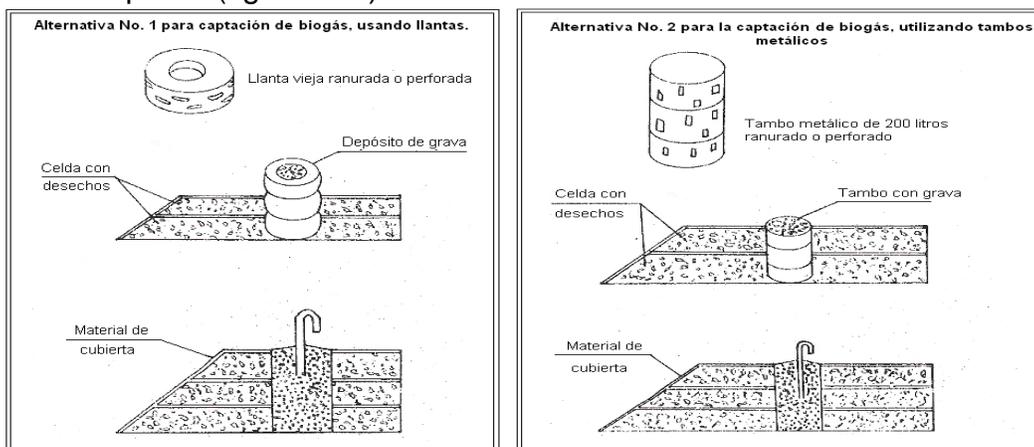


Figura III.4 Captación de biogás usando llantas y tambos

La parte exterior del tambo se impregna con aceite requemado con el fin de evitar la corrosión y de esta forma facilita el deslizamiento ascendente, éste se coloca en el sitio señalado para la captación y se llenará con grava de acuerdo las especificaciones establecidas. Cuando se alcanza a cubrir la mitad del tambo por el exterior con los desechos dispuestos se procederá a llenar nuevamente con grava el mismo tambo y así sucesivamente; sin embargo, cuando se está a dos metros de la superficie final del relleno se colocará en el interior del tambo un tubo ranurado de PVC con un diámetro de 0.10 m. Al finalizar la operación, se tendrá un pozo relleno con grava, en el cual se cubrirá la parte superior con arcilla compactada y se insertará un tubo de PVC ranurado que facilitará la captación del biogás. La parte superior del tubo, se utilizará como la toma para la red de captación del biogás. El diseño incluye los sitios donde se ubicaron los pozos de biogás en la Etapa I (figura III.5).

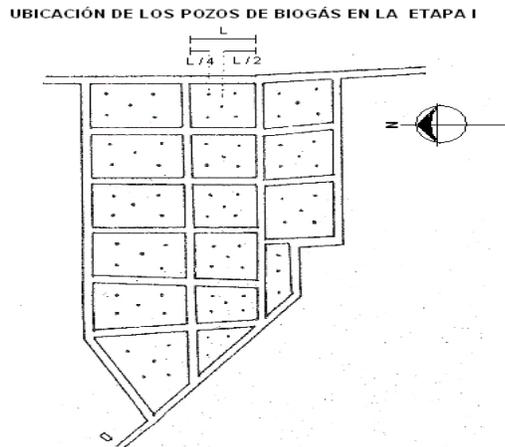


Figura III.5 Ubicación de pozos de venteo de biogás en la etapa I del RSBP

Bardeado: el uso de bardas perimetrales y portátiles en el relleno sanitario tienen como objetivos principales la protección, seguridad del sitio y el control del acceso de los vehículos recolectores, para el caso de las bardas perimetrales y controlar el material de lixiviado susceptible de ser arrastrado por el viento.

Por las características topográficas del sitio, no se requería de bardas perimetrales; sin embargo, se recomendó colocar una barrera de árboles en el lado norte del sitio debido a que en esa dirección se encuentran algunas unidades habitacionales propensas a ser impactadas negativamente por los materiales arrastrados por el viento, pero todo cambió para 1990 cuando se colocó una tela de alambre perimetral. La barrera ayuda en forma eficiente a la estética del lugar y a la reducción de ruidos y polvos provenientes de la operación del relleno sanitario.

CONFINAMIENTO CONTROLADO Y DISPOSICIÓN DE LODOS

Es importante señalar que frente a la etapa III del Relleno Sanitario Bordo Poniente se ubicó un confinamiento controlado para residuos industriales (figura III.6); la

Dirección General de Servicios Urbanos, a través de la Dirección Técnica de Desechos Sólidos ha considerado pertinente iniciar los estudios necesarios para conocer a fondo la problemática y, establecer los mecanismos necesarios para el control estricto, manejo de los desechos industriales principalmente los peligrosos y potencialmente peligrosos (González, 1991).

El sitio seleccionado para la operación del confinamiento controlado, se encuentra delimitado al noroeste por la primera etapa del Relleno Sanitario de Bordo Poniente; al sureste por la Laguna de Regulación Horaria; al noroeste por el camino de acceso al Relleno Sanitario; y al suroeste por el camino de acceso a la zona de Bordo Poniente.

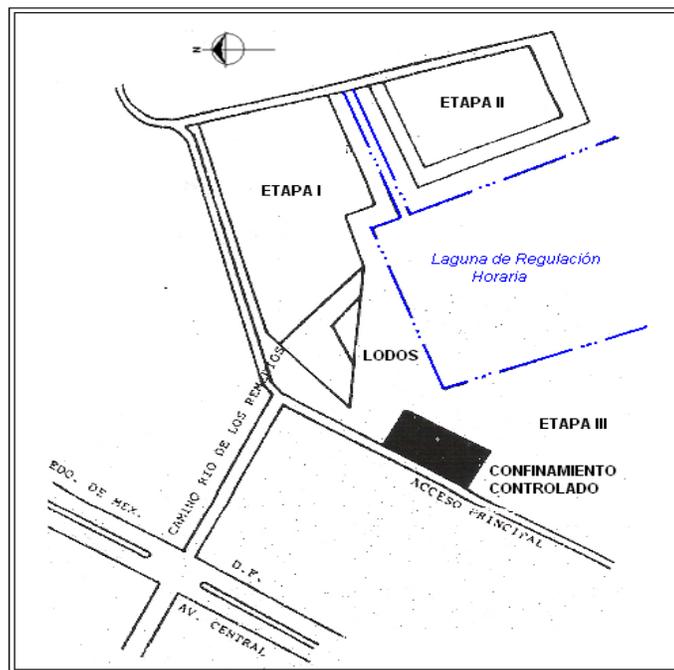


Figura III.6 Confinamiento controlado

De acuerdo con el método de operación y las dimensiones del terreno se estima un volumen de 737 940 m³. La capa final se selecciona con base en el tipo de residuo industrial por depositar, pero por falta de conocimiento de los mismos se ha considerado para todas las macroceldas la colocación de una capa de arcilla cuya permeabilidad sea de 10⁻⁷ cm/s, con un espesor de 0.3 m; posteriormente se colocó material sintético impermeable (polietileno de alta densidad) de 2mm de grosor, el cual será enterrado en sus extremos para su sujeción; finalmente se cubrió con materiales del lugar y pasto con el fin de evitar la erosión del mismo, tendrá una altura máxima de 0.30 m, pendientes bilaterales de 2% para escurrimientos de agua de lluvia hacia el drenaje exterior.

Las instalaciones para la seguridad del personal contaron con una edificación (caseta de control) en la entrada al confinamiento para vigilar el acceso de los vehículos transportadores de desechos industriales, así como la verificación de las características de los residuos a depositar (tipo, volumen, análisis físicos y químicos, etc.), la cual contará con espacio suficiente para un escritorio y área para dos personas, almacén de equipo de seguridad y sanitarios (fosa séptica).

En la operación de los frentes para confinar residuos industriales se puede diferenciar dos frentes, los que se encuentran en contenedores, y los llamados a granel; para el caso de contenedores, éstos se acomodan manualmente, manteniendo un orden para optimizar el espacio, se procede a cubrir los espacios existentes entre los recipientes con material de cobertura y, posteriormente se cubrieron con una capa de 0.15m de material limo-arcilloso (permeabilidad de 10^{-7} m/s), la compactación se llevo a cabo manualmente. Una vez construida la primer celda, se colocaron sobre ésta los recipientes que formaron la siguiente celda procediendo de la misma forma hasta llegar a una altura de 2m aproximadamente. En la construcción de celdas con desechos a granel se utilizaron bulldozer, con los que se esparcieron y compactaron en forma homogénea hasta obtener un espesor de 0.2 a 0.3m, repitiéndose la operación hasta alcanzar los 2m de altura cubriéndolo al término con material limo-arcilloso con un espesor de 0.15m, finalizando el día con el aseo de la maquinaria para evitar el ataque de agentes químicos.

Se manejaron un gran número de residuos industriales, desechos industriales corrosivos, desechos industriales reactivos, desechos industriales explosivos, desechos industriales tóxicos y desechos industriales flamables e inflamables.

Como consecuencia de las obras de desazolve del Gran Canal y Colector Poniente, efectuadas por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, se presentó el problema de disponer un gran volumen de lodo extraído. La Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH), solicitó a la Dirección de Servicios Urbanos la autorización para transportar los lodos a los “Sitios de Disposición Final de Desechos Sólidos”. Se estableció un convenio para coordinar las actividades en torno al manejo de estos lodos.

La zona seleccionada para el depósito de lodos corresponde a una parte de lo que fue el canal que separaba a los tiraderos de las Delegaciones Venustiano Carranza y Gustavo A. Madero (figura III.6). Lugar que cuenta con una superficie de aproximadamente 32 900 m² y una profundidad promedio de 5m.

Debido a que el sitio a utilizar es un canal, se deberá construir un dique por el lado Oriente, donde se encuentra la Laguna de Regulación Horaria, para evitar el paso del agua durante el periodo de lluvias. Se planteó construir un terraplén de 3.8m de altura, ancho mayor a 4m y pendiente del talud de 45% (1:1).

Con base en los vehículos que transportan el lodo se calculó un volumen diario de 1400m^3 aproximadamente. Estimándose un volumen aproximado de $158\,229\text{m}^3$. Al calcularse la vida útil que tendría la zona seleccionada se obtuvieron 9.42 meses. La llegada en promedio fue de 200 camiones por día, que transportaban 7m^3 por unidad obteniendo $1\,400\text{m}^3/\text{día}$.

El método de área en hondonada fue la forma de operación en el sitio por las condiciones topográficas existentes, que consiste en depositar los lodos cerca del borde del canal, en donde posteriormente se empujarán hacia el precipicio, llenando el espacio existente.

Debido a que los lodos llegaban al sitio de disposición final con alto contenido de humedad, fué necesario descargar en un lugar adecuado para que el agua en exceso escurriera o se evaporara por acción del viento y sol; en general se consideró un tiempo de exposición de 24 horas para la época soleada y 48 horas para la época lluviosa. El total de camiones que llegaron al sitio durante 16 días fue de 3204, para dar un total de 200.25 camiones por día.

Para la parte de reforestación de las primeras tres etapas de Bordo Poniente, debe de realizarse una serie de consideraciones, por el tipo materiales que se encuentran en él. La problemática principal son las zonas de relleno debido a los procesos de descomposición (ácidos orgánicos, ácidos sulfhídricos, hidrógeno, modifica el pH alterando la capacidad de absorción de la raíz o produce quemaduras, etc.) y la acumulación de diversos compuestos de iones metálicos y sus sales modifican o anulan la absorción y asimilación de nutrientes.

III.1.2 BORDO PONIENTE, ETAPA IV

En su construcción el Bordo Poniente desde 1995 se viene operando la cuarta etapa del relleno, ocupando una superficie de 472 hectáreas de las cuales 320 se utilizan como área específica de disposición final, en donde se construyeron 42 celdas. Hoy día, en este sitio se recibe diariamente un promedio de 12 500 toneladas de residuos sólidos municipales durante las veinticuatro horas, los 365 días del año (Torres, 2005).

Para ello, se construyeron caminos de penetración de doce metros de ancho y 1.5 metros de alto respecto al nivel del piso, para facilitar el acceso de vehículos; estos caminos conformaron retículas o celdas donde, luego de realizar la limpieza y deshierbe del área, se procedió al tendido de una película de polietileno de alta densidad que funge como impermeabilizante. Posteriormente, esta membrana plástica se cubrió con una capa de treinta centímetros de material limo arcilloso (tepetate) para protegerla de rupturas por el contacto con los residuos.

La Agencia de Cooperación internacional del Japón (JICA), realizó estudios a petición del Gobierno del Distrito Federal donde se señala que se adquirieron compactadores especiales para la disposición final de los residuos sólidos, combinando los dos tipos de maquinaria se alcanzan densidades máximas de 1000 kg/m³ en lugar de los 850 alcanzados con maquinaria para terracería anteriormente empleada. Con esta acción, se logró ampliar un año más la vida útil del relleno sanitario (Torres, 2005).

Para controlar las emisiones del biogás se construyeron en la tercera y cuarta etapas doscientos cincuenta pozos de captación, y se llevan a cabo diversos controles, principalmente respecto a lixiviados, fauna nociva, limpieza y otros impactantes. Concluida la vida útil de la zona de trabajo, se clausura y sanea, propiciando su regeneración y conversión en área verde o de esparcimiento, restituyéndola así a su entorno.

En la actualidad se cuenta con una extensión de 95 hectáreas de terreno saneado, correspondiendo 37 hectáreas al ex tiradero Gustavo A. Madero y Venustiano Carranza y 60 hectáreas a la primera etapa. También cuenta con 101 hectáreas de terreno forestado, de las cuales siete comprenden la barrera forestal de la Colonia Del Sol; 51 al bosque lineal de la zona ocho (Etapa IV), doce a la barrera forestal de acceso a la Etapa IV, 23 la comprenden el bosque lineal paralelo al Periférico; 16 a la barrera forestal paralela a la autopista Peñón-Texcoco, nueve a la barrera forestal localizada en el Canal de Sales y tres hectáreas a zonas diversas dentro del Bordo Poniente.

El Relleno Sanitario Bordo Poniente, etapa IV, se localiza en el área del lago de Texcoco, en donde el acuífero subterráneo es de alta salinidad; ésta situación le da ventajas sobre los otros rellenos sanitarios que se encuentran sobre acuíferos potables, como: Santa Fe que se encuentra sobre la zona de Lomeríos que funciona como una zona de recarga del acuífero; el relleno sanitario de Santa Catarina que se encuentra sobre la pendiente de la caldera de un volcán inactivo, donde hasta el momento no se ha explotado el agua subterránea pero existirá el riesgo ya que se encuentra cerca de un acuífero de agua potable.

El Distrito Federal cuenta con el Relleno Sanitario Bordo Poniente, operando en su Etapa IV, con 472 hectáreas de superficie y un área de disposición de 320 hectáreas. La figura III.7 muestra en primera instancia la ubicación del Relleno Sanitario Bordo Poniente, el trabajo de operación en etapas, su periodo de operación, la superficie ocupada por cada Etapa y la cantidad de residuos depositados, la tabla anexa contiene información técnica del Relleno Sanitario Bordo Poniente (SMA, 2003).



Figura III.7 Relleno Sanitario Bordo Poniente

La estructura del Relleno Sanitario Bordo Poniente en su Etapa IV cubrió la impermeabilización de área con una membrana de polietileno de alta densidad (PEAD) de 1mm de espesor. La membrana se ancla en el borde del camino (figura III.8, derecha); como ejemplo, el sitio de disposición final de Santa Catarina no

contaba con impermeabilización, pero una vez que se le dio la categoría de relleno se impermeabilizó con concreto lanzado en el talud natural y con membrana (PEAD); además se colocaron tuberías para el lixiviado (JICA, 1999).

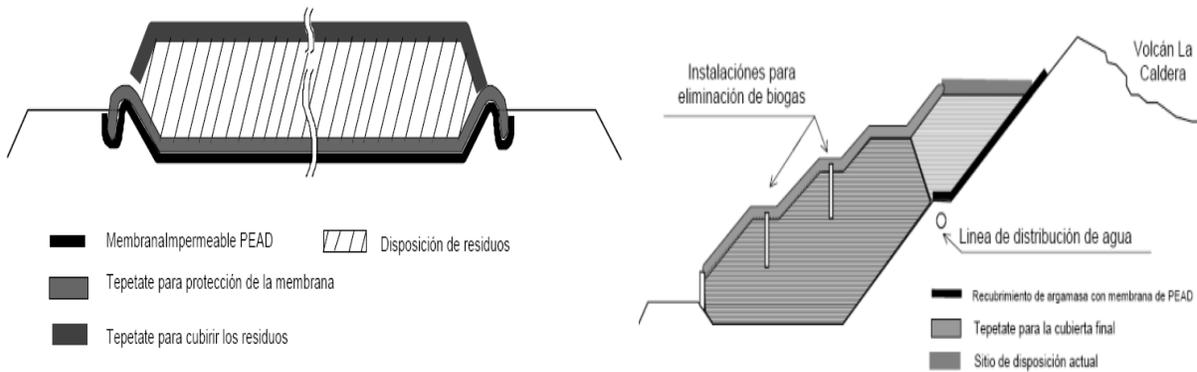


Figura III.8 Estructuras de los RSBP Etapa IV (izquierda) y Santa Catarina (derecha)

En la tabla III.2 se resume la información para los rellenos sanitarios Bordo Poniente (RSBP), etapa IV (BP IV) y Santa Catarina (SC), cabe resaltar que para ese entonces no se contaba con instalaciones para la eliminación del biogás, ni para lixiviados en Bordo Poniente.

Tabla III.2 Infraestructura de los Rellenos Sanitarios Bordo Poniente etapa IV (izquierda) y Santa Catarina (derecha)

Concepto	BP IV	SC
Cubierta impermeable del fondo	Membrana PEAD (1.0 mm de grosor)	Cubierta de concreto lanzado y PEAD (1.0 mm de espesor) únicamente para la pendiente superior
Sistema de recolección de lixiviados	Todavía no	Sí (parcialmente)
Sistema de tratamiento de lixiviados	Transporte a la laguna de evaporación en camiones cisterna	Transporte a la laguna de evaporación de BP en camiones cisterna
Instalación para eliminación de Biogas	Todavía no	Sí
Sello Final	Todavía sin planear	Una capa de tierra vegetal de 20 cm sobre otra capa de 30 cm de tepetate

El Relleno Sanitario Bordo Poniente en su etapa IV, no utiliza un sistema de tuberías internas para la recolección de lixiviados. Los lixiviados gotean de la parte inferior de la pendiente de la celda sin terminar de infiltrarse por los residuos a los diques al lado del camino que la rodea, aunque los camiones cisterna se llevan el lixiviado una parte se filtra al terreno; esta situación crea un problema de operación actual y a futuro próximo las condiciones del camino se deteriorarán, en especial cuando llueva, sin contar con la parte ambiental.

En el caso del relleno sanitario Bordo Poniente, el Gobierno del Distrito Federal contrató en 1999, a la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), para realizar un estudio con miras a resolver varios aspectos. En el informe final de la agencia se encontró que los proyectos de Bordo Poniente son tres:

- Introducción de una nueva planta de compostaje.
- Expansión vertical del sitio de disposición final existente.
- Construcción de un nuevo sitio de disposición final

Respecto a la expansión vertical, el informe señala que, la geomembrana puede asimilar la elongación, de acuerdo con sus propiedades mecánicas. Por lo tanto, la expansión vertical es viable desde la perspectiva de estabilidad de taludes, ya que, la membrana debajo del talud sufrirá el esfuerzo de tensión más pronunciado. La tabla III.3 muestra el diseño conceptual que resulta del análisis realizado por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA).

Tabla III.3 Esquema del diseño conceptual para la expansión vertical

Aspectos	Instalaciones
Capacidad del Relleno	25,849,000m ³ (20,679,000ton) se encuentran disponibles para la disposición de residuos.
Acceso	a 0 m. de elevación camino externo: 8,285m (existente) camino interno: 26,675m (existente) a 8 m. de elevación camino externo: 7,075m camino interno: 19,623m a 16 m. de elevación camino externo: 5,160m camino interno: 6,453m
Manejo de Lixiviados	Pozos para extracción de lixiviados tubería de concreto de 600mm de diámetro: 24 unidades Bomba para la extracción y aspersado de lixiviados: 24 unidades Tubería para recolección de lixiviados a 0m de elevación: 26,675m a 8m de elevación: 26,708m a 16m de elevación: 11,613m
Manejo de gas generado en el relleno	Pozos para la extracción de gases tubería de concreto de 600mm de diámetro: 198 unidades Tubería para la extracción de gases - PVC200 a 8m de elevación: 141 unidades a 16m de elevación: 102 unidades
Manejo de Aguas Superficiales	Diaria/cubierta intermedia de suelo: 30cm (Composta también está disponible.)
Monitoreo	Puntos a monitorearse: -asentamiento del relleno -calidad del lixiviado -calidad del gas extraído
Diseño Estético	Reja movable Cubierta intermedia diaria de suelo: 30cm (“Composta” también está disponible)
Clausura y post-clausura	Cubierta final del suelo: 60cm Crear área verde por medio de la siembra de pasto
Equipo para el Relleno	Bulldozer (de 300hp): 4 unidades Camiones cisternas (de 15,000litros): 2 unidades Excavadora (85hp class): 2 unidades

Se tenía proyectada la construcción de la Etapa V del relleno sanitario Bordo Poniente, contempla un terreno que geográficamente se encuentra dentro del Estado de México. Tiene una superficie proyectada de 849 hectáreas, de las cuales, 484 se autorizarían al Gobierno del Distrito Federal. Finalmente dentro del estudio y evaluación que entregó JICA se señala que la operación de la etapa V, debe cambiar el manejo de los lixiviados pero la operación es la misma que para la etapa IV.

III.2 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El sitio seleccionado para realizar el Relleno Sanitario está localizado en el Estado de México en los terrenos pertenecientes al Vaso de Texcoco, detrás del Aeropuerto de la Ciudad de México, a un costado del Fraccionamiento Bosques de Aragón. Los sitios de la etapa I, II y III, colindan al norte con el Canal de Prolongación del Río de los Remedios, que se une al Dren General del Valle de México, al sur con la parte de la Laguna de Regulación Horaria, al este con el Dren del Valle de México y al oeste con el ex - tiradero de las Delegaciones Gustavo A. Madero y Venustiano Carranza.

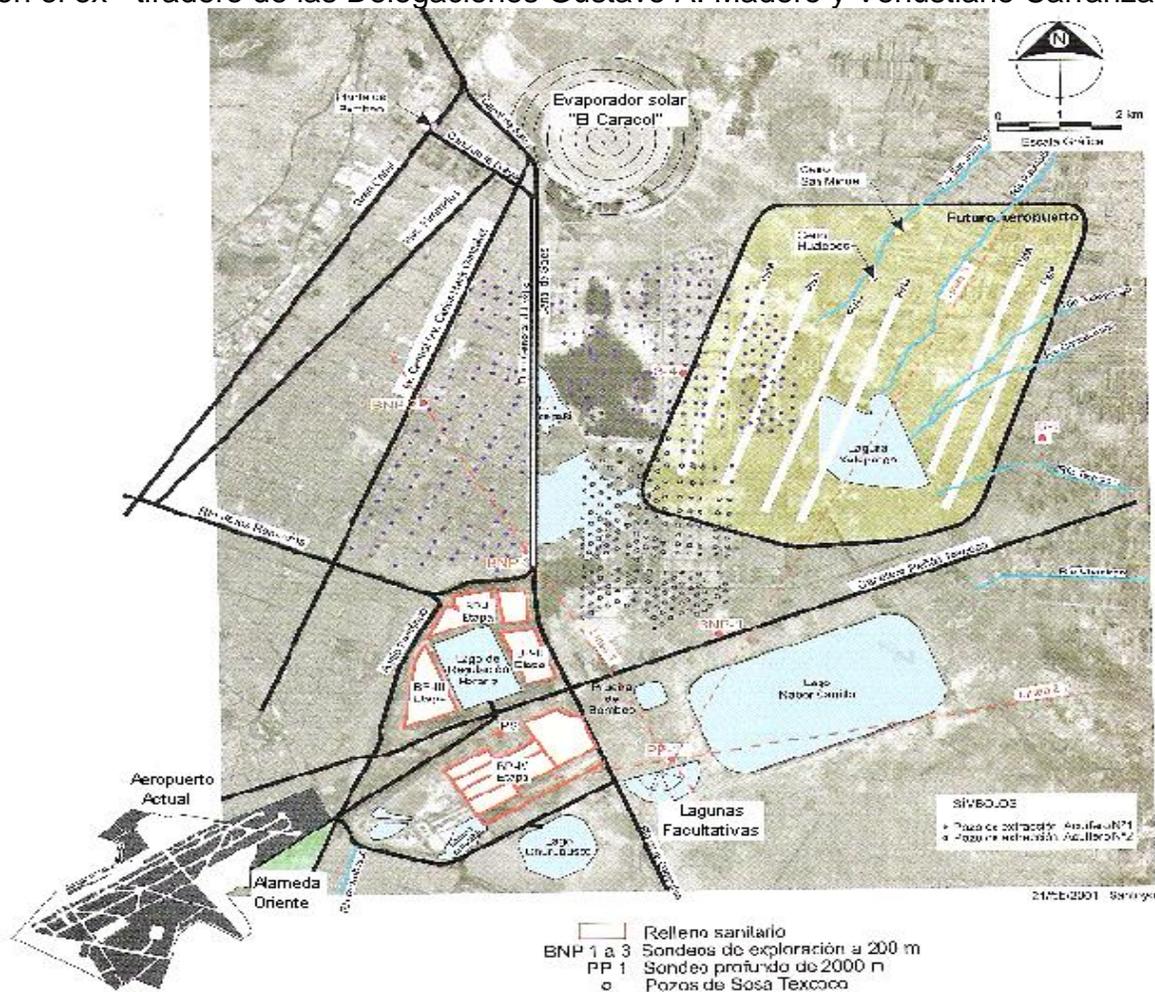


Figura III.9 Localización del Relleno Sanitario Bordo Poniente

El relleno sanitario Bordo Poniente etapa IV, se localiza al noreste de la ciudad de México y se desplantó sobre el antiguo Lago de Texcoco en la parte poniente de éste, lugar correspondiente al Municipio de Nezahualcóyotl, Estado de México (figura III.9) (TGC, 2005). Las zonas aledañas en las porciones sur, norte y oeste, se encuentran ocupadas por asentamientos humanos y por el aeropuerto internacional de la ciudad de México, en tanto que la porción este corresponde a una reserva de proyectos agropecuarios; sin embargo, dicho sitio no presenta incompatibilidad con las zonas aledañas, ya que existe una barrera o delimitación para evitar cualquier impacto.

Los accesos principales para las primeras tres etapas son: el primero es la Vialidad Bordo Poniente la cual se une con el Distrito Federal, por la Vía Tapo, la Avenida Aeropuerto y Boulevard Bosques de América; el segundo, es el camino lateral del Río de los Remedios que entronca con la Avenida Central en el Estado de México, que a su vez se enlaza con la Avenida 608 en el Distrito Federal.

El acceso al Relleno Sanitario Bordo Poniente etapa IV es por una vialidad urbana que accede de la prolongación periférico, por donde entronca a la derecha antes de llegar a la autopista, con la vialidad pavimentada proyectada para su uso exclusivo del sitio de Disposición Final Bordo Poniente, de esta vialidad se derivan los ramales viales respectivos para realizar las operaciones diarias en el conjunto de la infraestructura citada, dichos ramales se diseñaron para soportar las cargas vehiculares pesadas que operan en el lugar (figura III.9).

Estos accesos están controlados por medio de casetas de vigilancia en el inicio de la zona federal, por medio de la cual se evita el paso de vehículos o personas no autorizadas (González, 1991).

Es de interés particular dar un marco al relleno sanitario de Bordo Poniente, pues se entenderá la problemática del sitio dentro de todos los aspectos posibles, su ubicación geográfica es importante porque es determinante en sus características de sitio por facilidad de acceso, importancia económica de la zona, clima, suelo, procesos físico-químicos llevados a cabo en el sitio, así como el manejo del personal del mismo.

Finalmente es interesante la cantidad de residuos sólidos que van a llegar al relleno sanitario y al realizarse una evaluación técnica pero también económica del destino del relleno, una de éstas propuestas evaluó la extracción de biogás en muchos sitios de disposición final y primero se asevera que los espacios para la disposición con la extracción aumenta el volumen de espacio hasta en 50%, además de que el biogás puede ser empleado como combustible doméstico o industrial, para la generación de electricidad, como combustible de vehículos, para la producción de metanol entre otros.

La importancia de la proyección de etapas en el Relleno Sanitario Bordo Poniente en colindancia con colonias densamente pobladas, tiene que ver con los problemas y riesgos ligados a la producción de biogás; siendo el segundo factor de impacto de un sitio de disposición final; sí el biogás no es drenado y si las capas de cobertura intermedia y final se componen de materiales impermeables (arcilla), como es el caso de las cuatro etapas del relleno en revisión, los gases se acumulan bajo la superficie o migran lateralmente. El metano, que es el constituyente mayoritario en la producción de biogás, se toma como referencia en su presencia debido a su carácter de inflamable y por sus características de baja densidad, por ser combustible poco soluble en agua, inodoro e incoloro, pero los riesgos de explosión constituyen el problema más grave precisamente a los límites de flamabilidad; aunque el riesgo de explosión es relativamente bajo debido a que es diluido en el aire o bien fácilmente canalizado para su aprovechamiento. Los factores que favorecen la formación de mezclas detonantes del metano son la presencia de cavidades, debidas a una compactación insuficiente y espacios cerrados (sótanos, edificios vacíos, etc.), Kjeldsen y Fischer (1995) encontraron en el suelo una concentración de metano superior a 5% (en volumen) a una distancia de 90m de un relleno sanitario. Porteus (1988) afirma haber detectado metano a 1 km de un relleno sanitario.

III.2.1 FISIOGRAFÍA Y GEOMORFOLOGÍA

La fisiografía del sitio donde se ubica el Relleno Sanitario Bordo Poniente corresponde a la denominada Cadena Volcánica Transmexicana (IETSA, 2007), la cual abarca desde la costa del Pacífico, hasta una gran porción cercana al Golfo de México, que se caracteriza por ser un arco volcánico discontinuo, de composición química principalmente calcoalcalino, su origen va ligado a la subducción de la Placa de Cocos debajo de la Placa Norteamericana (choque entre dos Placas Tectónicas, en la que una se introduce debajo de la otra) (figura III.10).



Figura III.10 Eje Neovolcánico y placas tectónicas presentes

Dicha cadena se ha dividido en tres zonas, presentando cada una de ellas características vulcanológicas, estructurales y petrológicas propias como:

- Cadena Volcánica Transmexicana Oeste: representada por los grabens de Chapala, Colina y Tepic, que se considera como una zona de punto triple (Luhr et. al, 1985).
- Cadena Transmexicana Central: construida por los estrato-volcanes más altos de México, destacándose El Pico de Orizaba (Citlaltepec), Popocatepetl, Iztacíhuatl y Nevado de Toluca, así como los conos de escoria de Michoacán-Guanajuato y Valle de México.
- Cadena Volcánica Transmexicana Oriental: se trata de una Provincia discontinua, donde se destaca la región de los Tuxtlas con los volcanes San Martín y Chichonal.

En la Cadena Transmexicana Central, se ubica la Cuenca de México, que se caracteriza por ser una depresión sedimentada con una serie de depósitos volcánicos, piroclastos, aluviones y lacustres (zona del antiguo lago de Texcoco), de edad cuaternaria, que sobreyacen al basamento andesítico-pliocénico muy fallado y fracturado. Dicha cuenca presenta una orientación NE-SW, con una dimensión aproximada de 100 km de largo por 30 km de ancho y está rodeada por sistemas montañosos, donde sobresalen por su elevación las Sierras de Pachuca al norte; las Sierras de Río Frío y Nevada al este; la Chichinautzin al sur y la Sierra de las Cruces y el Ajusco al poniente (figura III.11) (CIGSA, 2001), cabe mencionar que en estas últimas se presenta un fuerte fallamiento y fracturamiento, cuya dirección predominante es NE-SW (TGC, 2005).

Geomorfológicamente la Cuenca del Valle de México se sitúa en el bordo sur de la Mesa Central, a 19° 26' de latitud norte y 99°08' de longitud oeste; la superficie total del Valle de México representa 9600 km².

La cuenca está limitada, al norte por las Sierras de Tepotzotlán, Tezontlalpan y Pachuca; al este, la Serranía de Pachuca y la Sierras de Calpulalpan, Río Frío y Nevada; al sur, la Sierra de Chichinautzin (figura III.12); al poniente, por las Sierras de Las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo.

En el interior del Valle se encuentran las Sierras de Guadalupe, situadas al norte de la Ciudad de México, que separa las zonas lacustres de Texcoco y Zumpango y la Sierra de Santa Catarina, formada por una serie de colinas de mediana altura, se localiza entre el Valle de Xochimilco-Chalco y el Lago de Texcoco, en dicha área las elevaciones máximas superan, en general, los 3000msnm; alcanzando alturas menores se sitúan al norte de la Cuenca, entre la Sierra de Tepotzotlán y la de Tezontlalpan, sitio en el cual se han hecho las salidas artificiales de las aguas de la cuenca.

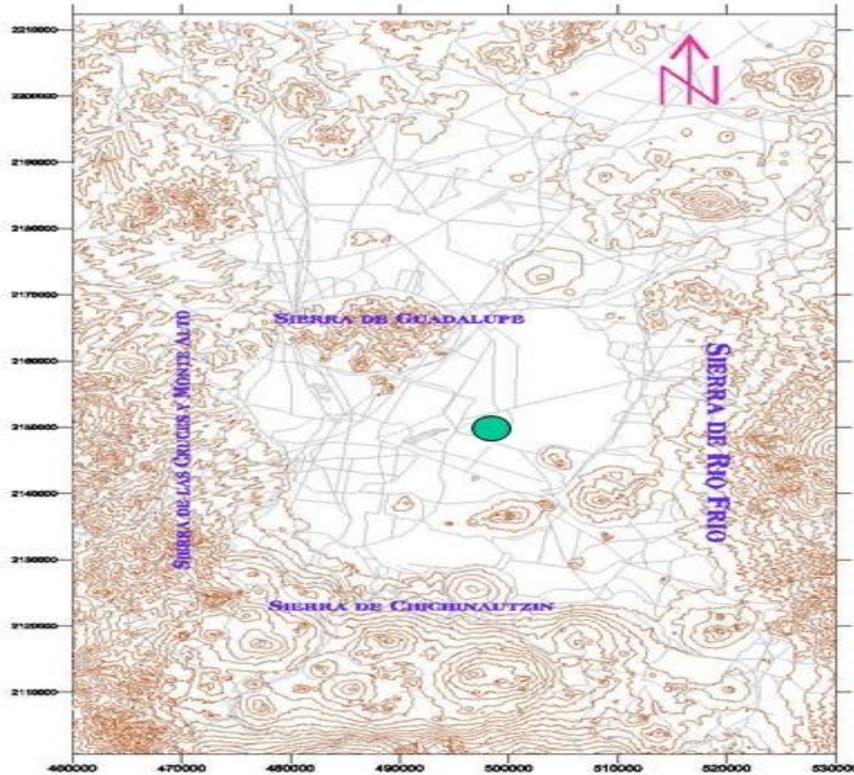


Figura III.11 Sierras que rodean el Valle de México

La zona federal del Lago de Texcoco, se localiza aproximadamente entre las coordenadas $19^{\circ}21'$ y $19^{\circ}35'$ de latitud norte y $98^{\circ}56'$ y $99^{\circ}02'$ de longitud oeste a 2236 msnm con una superficie de 14 500 hectáreas.

El sitio designado es de origen lacustre y cubierto en un 70% por aguas negras debido a fugas en los drenes de la Comisión del Lago de Texcoco.

El saneamiento de la zona se hizo de acuerdo a normas señaladas por la Comisión del Lago de Texcoco, debiéndose hacer movimientos de compuertas y construir algunos bordos para evitar la entrada de agua de los drenes a la zona asignada, estos cambios los coordinó la Comisión del Lago de Texcoco. El sitio tiene características especiales, pues el subsuelo es impermeable hasta 600m de profundidad, aunque en la superficie está saturada como consecuencia de su calidad lacustre.

Una vez drenada el agua superficial, se procedió a hacer el trazo de caminos de calles, tanto primarios como secundarios, así como la construcción de las instalaciones necesarias para control, administración, mantenimiento y sanitarios.

RELIEVE Y PENDIENTE: dentro del área definida de estudio, se presentan pendientes desde prácticamente 0% en la Zona Federal del Lago de Texcoco (ZFLT), hasta pendientes mayores de 60%, en la Sierra Nevada. Las pendientes de la ZFLT son menores del 2%; el terreno plano se extiende por el sur, hasta el Cerro de Chimalhuacán, sitio donde la pendiente aumenta a valores superiores al 20%; por el norte, hasta Chiconautla, lugar donde se registran pendientes del 20%; por el oriente, las áreas planas se extienden ligeramente, al este de Texcoco, región donde se inicia una zona cerril que representa la transición entre la planicie y la Sierra (González, 1991).

Clima: con la información del índice pluviométrico, evapotranspiración, variación estacional de la lluvia efectiva, índice de eficiencia térmica y la concentración de eficiencia en verano, son parámetros tomados por Thornwhite para su clasificación del clima, llegando a la conclusión que se tiene un clima en el sitio semi-seco templado con baja concentración térmica en el verano y sin estación invernal bien definida, la temperatura máxima es de 35°C y la mínima de 7.5°C pero el medio anual es de 15°C.

Pluviografía: con lluvias en los meses de mayo a octubre; precipitación pluviométrica anual de 700 mm.

Evaporación: la evaporación promedio es de 1800 mm por año, observándose que el valor de la evaporación es mayor a los de precipitación pluviométrica.

Vientos: los vientos dominantes que inciden sobre la Ciudad de México, se encuentran sobre un corredor que sopla de Texcoco hacia el Ajusco, en dirección noroeste a suroeste (NW - SW); en un 70% del tiempo, de noviembre a marzo llegan a ser vientos enrachados con velocidades máximas. La velocidad media de los vientos es aproximadamente de 10 km/hora, aunque los más intensos que se han registrado han obtenido velocidades de 94 km/hora (González, 1991 y Oviedo, 1992).

III.3 GEOLOGÍA REGIONAL

La información de estudios realizados en la cuenca, incluyen la que partió de sondeos mecánicos exploratorios, se clasificaron a nueve unidades litológicas de origen volcánico y dos de origen sedimentario (lacustre y aluvial, zona de lagos), dichas unidades se describen por sus características físicas a partir de las más antiguas. En la figura III.12, solo se observan los materiales presentes cerca del sitio de estudio (I.E.T.S.A., 2007).

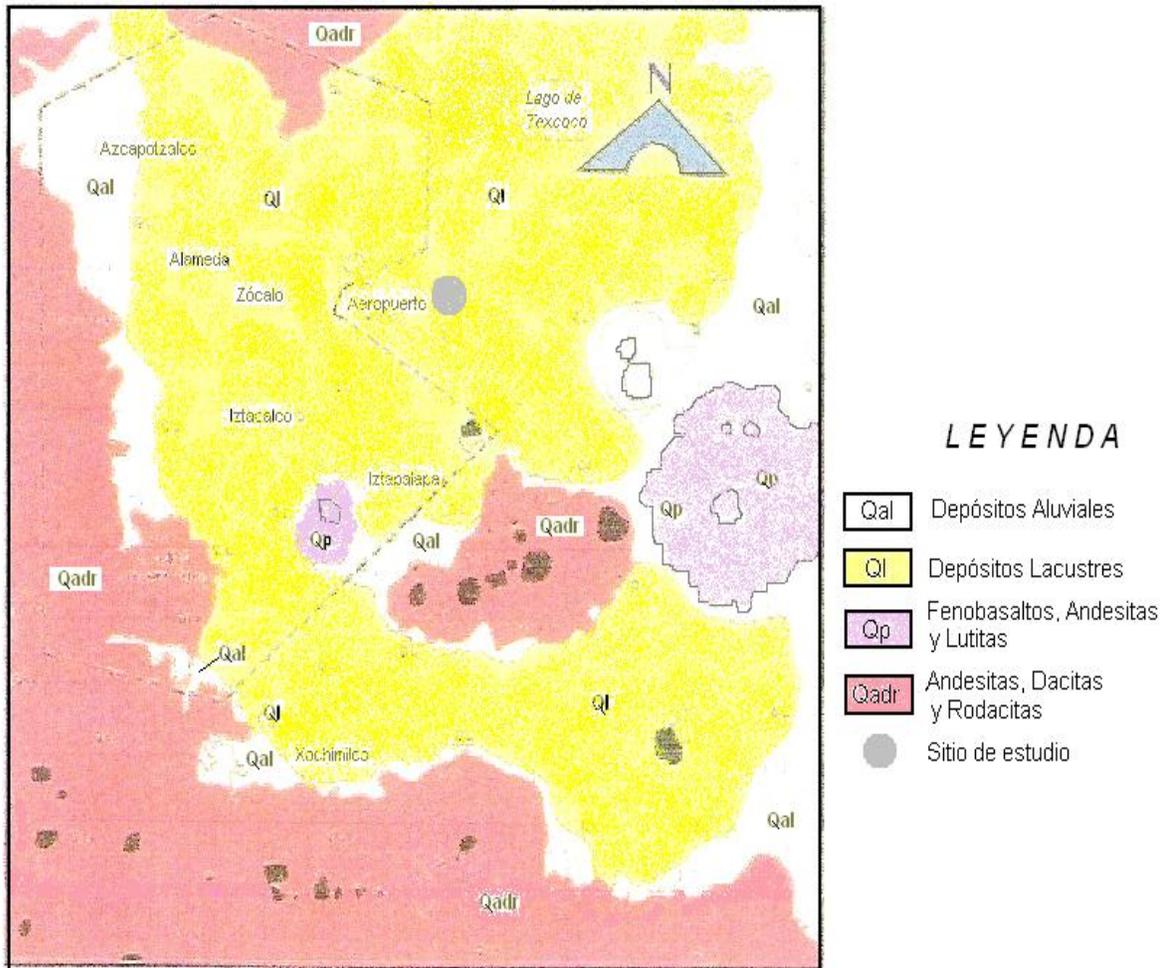


Figura III.12 Geología Regional

Rocas Sedimentarias: Las rocas sedimentarias encontradas en la zona de estudios son las siguientes:

Depósitos Lacustres (Qla): se encuentran contruidos por materiales acumulados en los antiguos lagos de Texcoco, Chalco, Xochimilco, entre otros, cuyos espesores varían de 100 a 300m (en el pozo de Texcoco se cortaron arcillas, limos y arenas de 0 a 180m), y son acumulaciones de materiales derivados de la actividad volcánica, mismos que se fueron depositando en el agua, en consecuencia a lo anterior el proceso de disposición generó una granulometría variable, dándose en el primer caso un predominio de tipo arcilloso (en el caso del antiguo lago de Texcoco las arcillas son del tipo expansivo). Por su granulometría y porosidad heterogénea, los depósitos presentan un predominio de arcillas, con parámetros de permeabilidad bajos en general, tal es el caso del antiguo lago de Texcoco; sin embargo, hay horizontes delgados interdigitados de alta y media permeabilidad.

Aluvión (Qal): se trata de una serie de suelos heterogéneos, de aproximadamente 100m de espesor, provenientes de la erosión por efecto de intemperización y meteorización de todas las rocas anteriormente descritas, la granulometría representativa es del tamaño de la arena, limo y arcilla, el predominio en cuanto a granulometría va en función de la cercanía de las fuentes de origen.

Estos depósitos del Reciente son sedimentos lacustres con predominancia arcillosa en su composición; están dispuestos en capas laminares muy delgadas. Afloran y son el vestigio de las áreas que ocuparon los antiguos lagos, como el de Texcoco.

Residuos Confinados (Rc): El área de celdas (relleno sanitario), se encuentra conformada por materiales residuales, denominados residuos sólidos urbanos, los que se depositan sobre una geomembrana de polietileno de alta densidad de 1mm de espesor, la cual fue colocada o desplantada previamente sobre el terreno natural, mismo que se encuentra constituido por una secuencia de arcillas como las que se describen en el apartado anterior. Para que la disposición se lleve a cabo, se llevan a la par operaciones de instalación infraestructura para la recolección de lixiviados y biogás, proveniente de los procesos de la biodegradación de los materiales residuales.

La litología de la zona es en resumen (I. E.T.S.A., 2007):

- 0-180m** Se detectaron capas de arcillas, limos y arena que disminuye el espesor hacia el norte; el contenido de agua fluctúa entre 200 y 500%.
- 180-505m** Se identificaron arcillas de resistencia dura, arenas, areniscas y calizas lacustres.
- 505-1908m** Se presentaron tobas, rocas ígneas, brechas y conglomerados.
- 1908-2045m** Se detectaron anhidritas arcillosas y margas.
- 2045-2065m** Se identificaron lutitas, margas y conglomerados calcáreos.

III.3.1 PROPIEDADES MECÁNICAS

Las características de compresibilidad resultan ser más desfavorables en la zona del lago de Texcoco que en la Ciudad de México, y se aprecian dos zonas; la virgen y otra en donde las arcillas se encuentran preconsolidadas por bombeo.

Los coeficientes de compresibilidad medios (a_v), en la proximidad de la carga de preconsolidación (r_p), son de $0.042E-1$ y de $0.016E-1$ kPa, para las Formaciones Arcillosas superior e inferior, respectivamente, con máximos de $0.1E-1$ kPa los cuales se presentan en la FAS, en las partes afectadas por secado y disminuyen con la profundidad.

La resistencia de las formaciones arcillosas se presentan en la tabla III.4, resultado de las pruebas de compresión simple no confinada, triaxiales no consolidadas no

drenadas (UU) y de veleta “in situ”, donde se puede observar que las menores resistencias se presentan a poca profundidad, entre la Capa Superficial y el estrato arenoso de la FAS, con valores medios de 10.8 kPa y mínimos de 5 kPa.

Tabla III.4 Resistencia al esfuerzo cortante (Oviedo, 1992)

Formación	Cuq kPa	Cu KPa	Cvmáx kPa	Cvr kPa	St
FAS	12.7	20.9	21.4	6.3	3.17
FAI	26.5	38.5	51.6	-----	-----

Por otra parte, la sensibilidad de las arcillas (St) varía de 2 a 40, con valor medio de 3.17, lo que representa una disminución en las resistencias del terreno, al estar sometido a una excitación (sismo), con lo que se provoque un remoldeo entre sus partículas.

Se ha detectado que después de aumentar la resistencia al esfuerzo cortante por consolidación, al ser aplicadas en la superficie cargas mayores a 49 kPa, esta propiedad puede disminuir un 35% debido a la degradación en la estructura de las arcillas (IETSA, 2007).

En las pruebas triaxiales consolidadas no drenadas (Cu) se determinó que el ángulo de fricción interna aparente (t_u) se reduce de 41° a 34° cuando la velocidad de la deformación cambia de 94 a 0.045%/hora y a largo plazo es de 29° , en términos de esfuerzos efectivos (Alberro, 1990). En pruebas triaxiales consolidadas drenadas (CD), en compresión y tensión, se determinaron ángulos de fricción interna (t') con valores de 45° y 50° , respectivamente (León et. al, 1974).

III.3.2 PROPIEDADES DINÁMICAS

La Cuenca del Valle de México está localizada en la franja volcánica que atraviesa el país de este a oeste; por esta razón se encuentra sometida a grandes esfuerzos tectónicos y a erupciones volcánicas, desde la época Terciaria a la fecha, así como a intensos sismos provocados por la subducción de la Placa de Cocos del Océano Pacífico, bajo la placa Norteamericana.

Los sismos en la Cuenca se amplifican notablemente, por ese motivo las propiedades dinámicas de los suelos lacustres han sido estudiadas ampliamente, sobre todo después de los sismos de 1985.

Este estudio se realizó con el método geofísico de la Sísmica de Refracción, que ayuda a deducir posibles características estratigráficas, partiendo de la interpretación de tiempos de arribo de las ondas refractadas en estratos de características distintas. Con la aplicación de los métodos geofísicos se han podido registrar cuatro capas sísmicas:

Unidad 1: corresponde a la Formación Superficial y la Formación Arcillosa superior, con velocidad de propagación de ondas compresionales de 600 a 900 m/s, con un espesor al centro del Lago de 30m, el cual disminuye hacia el norte.

Unidad 2: corresponde a los depósitos Lacustres y aluviales, los que constituyen la Formación Arcillosa Inferior, los depósitos profundos y la serie Estratificada, encontrándose a una profundidad de 30 a 480m, al centro de la región (PP1), con velocidad de 1700 m/s y su espesor disminuye hacia el norte.

Unidad 3: está formado por las vulcanitas del oligoceno y mioceno, registrando velocidades de 2200 y 3100 m/s; se encuentra localizado de 480 a 1450m de profundidad al centro del lago y su espesor se reduce al norte y aumenta al sur; constituido por corrientes de lava, tobas y aglomerados.

Unidad 4: tiene una velocidad mayor a 4500 m/s y aparece a una profundidad de 700 m en el norte y a 1450m en la parte central.

Es importante contemplar el comportamiento dinámico de los rellenos sanitarios para evitar asentamientos que puedan trascender hasta la formación de asentamientos y fallas frecuentes en suelos blandos ampliamente documentados en las publicaciones de investigación al respecto.

Las características mecánicas de los materiales que conforman un relleno sanitario, proveen de información en los asentamientos y compresibilidad de los residuos sólidos, los investigadores al (1977), han examinado inicialmente las características de capacidad de carga de los rellenos sanitarios, para la construcción en el terreno de soportes. Huic (1981), define tres posibles modos de asentamientos, por consolidación, contracción o por compactación.

La consolidación se refiere al asentamiento resultante producido por la expulsión del agua en los materiales saturados.

La contracción se refiere a los procesos mediante los cuales los sólidos orgánicos y la humedad son convertidos por medio de la acción de los microbios, en dióxido de carbono y metano, dando como resultado una disminución en el volumen del relleno.

La compactación se define como la reorientación de los sólidos en una configuración más densa, debido a una pérdida gradual de la rigidez de suelo, ocasionada por la afluencia de los sólidos sometidos a altos esfuerzos o por la descomposición de estos. Huic (1981) supone que debido a los altos esfuerzos los sólidos inicialmente pueden formar puentes a través de los vacíos, pero eventualmente colapsan y esto puede llegar a jugar un papel significativo en cuanto a los asentamientos en los rellenos sanitarios se refiere.

De acuerdo con los mecanismos primarios que involucran los asentamientos en un relleno sanitario son (Palma et al., 2005):

- Mecánicos: distorsión, corrimiento, ruptura y reorientación; similar a la consolidación de suelos orgánicos.
- Densificación: movimiento de los materiales finos dentro de los vacíos más grandes.
- Cambios físico-químicos: corrosión, oxidación y combustión.
- Descomposición bioquímica: fermentación y descomposición, ambos procesos aerobios y anaerobios.

La densidad de los materiales del relleno varía con la composición, profundidad, método de colocación y edad; los residuos sólidos experimentan una consolidación primaria en los primeros días después de su colocación, pero continúan asentándose y densificándose con el tiempo. En un periodo de varias décadas la descomposición parece tener un efecto despreciable en el aumento de la densidad.

III.3.3 HUNDIMIENTOS REGIONALES Y AGRIETAMIENTOS

La existencia de lagos tenía como efecto un nivel piezométrico superficial; la recarga en las serranías hacía que se presentara artesianismo en la capa dura y depósitos profundos. La continua explotación de acuíferos que desde los años 40's se viene realizando, aunado a la alta evaporación registrada en el Ex lago de Texcoco, han producido fuertes pérdidas piezométricas que manifiestan un abatimiento de 1.1m/año a profundidades mayores de 200m y pérdidas de 0.63m/año para los depósitos profundos superiores; así como, asentamientos de terreno, resultado de la consolidación de la masa arcillosa (Oviedo, 1992).

A partir del año 1972, se estableció la necesidad de tener registros de los movimientos verticales que se presentaran en la región. Estos movimientos son medidos mediante nivelaciones periódicas y referidos al banco de nivel fijo ubicado en el cerro del Peñón. De acuerdo con lo anterior se han registrado velocidades medias de 16.5, 23.6, 22.7, y 27.8 cm/año, para los periodos de 1972-1977, 1977-1982, 1982-1987 y 1988-1991, respectivamente.

El hundimiento regional, la variación de contenido de agua y la variación rápida de esfuerzos horizontales son los principales factores que inducen agrietamientos, los que se presentan en toda la región, dentro y fuera de la zona federal. Dichos agrietamientos, dependen del factor que los induce, presentan ciertas características que se mencionan a continuación:

Las grietas inducidas por *hundimiento regional* son producidas por esfuerzos de tensión, observándose que siguen trayectorias paralelas a las curvas de nivel o bien

a los contornos de formaciones subterráneas de mayor rigidez que el de formaciones arcillosas; por lo general presentan un desnivel hasta de 40cm entre sus labios, quedando así el labio más alto hacia la zona donde aumenta la elevación del terreno. Por lo general varían desde algunos centímetros hasta un metro de ancho y de unos cuantos metros hasta más de 100m de longitud, así como de algunos centímetros hasta alcanzar una profundidad aproximada a los 2.5m.

La variación en el *contenido de agua* causa la formación de un tipo de grietas (microfisuramiento), (Auvinet, 1981) , se puede decir que son ocasionadas por un cambio rápido en el estado de esfuerzos experimentado en las formaciones arcillosas superficiales; es decir, en las superficies expuestas a la evaporación existe una disminución en el contenido de agua, lo que ocasiona una disminución en los esfuerzos de tensión preexistentes y generándose esfuerzos por capilaridad, que son los causantes del conocido agrietamiento (piel de cocodrilo). Se consideran dos tipos de grietas debido a este fenómeno: las originadas por el primer ciclo de secado del suelo, las cuales presentan un patrón más o menos equidistante, muy cercanas entre sí; mientras que el otro tipo, con separaciones mayores e irregulares, ocasionados por el segundo ciclo de secado del suelo, el dual se ve favorecido por el humedecimiento heterogéneo de la superficie, ocasionado por las primeras lluvias.

Los ciclos mencionados anteriormente se refieren a periodos durante el año; es decir, el primer ciclo de secado quedará comprendido al finalizar la temporada de lluvias (finales de septiembre a mediados de octubre), hasta mediados de marzo aproximadamente y a partir de aquí hasta el mes de junio quedará comprendido el segundo ciclo, en donde ya se registran lluvias esporádicas y aisladas. Estos ciclos serán variables en función de algunos factores climáticos (viento, precipitación, temperatura, etc.) y meteorológicos (ciclones, huracanes, tornados, entre otros).

Este tipo de grietas son tradicionales en el ex Lago de Texcoco, que por lo general presentan un trazo irregular con separación de algunos metros o de cientos de metros; además tienen una dirección preferencial (NE-SW), todavía no explicada; su abertura inicial es de unos cuantos centímetros a medio metro, la que disminuye hacia los extremos y con la profundidad.

No existe desnivel entre sus labios y en ocasiones se puede encontrar agua dentro de ellas, cercana a la superficie. Su aparición es repentina azolvándose en pocos meses con materiales arcillosos y limosos, transportados por el viento y escurrimientos, pero además, el material desprendido a causa de la erosión de sus labios contribuye a su relleno. Alcanzan longitudes de varios cientos de metros cuando son amplias en su parte central y generándose pequeñas grietas paralelas que se atribuyen a la pérdida de confinamiento lateral del terreno. La profundidad registrada es de pocos metros (2 a 6) y usualmente se apegan a la ecuación propuesta por Rankine, para el caso de suelos cohesivos:

$$H_c = \frac{4c}{\delta}$$

donde:

H_c = profundidad de la grieta;

c = cohesión y

δ = peso volumétrico de suelo

La variación rápida en los *esfuerzos en sentido horizontal* experimentados por el suelo durante una excavación o bien inducidos por la aplicación de cargas (verticales) producen el tercero y último de los tipos de agrietamiento superficial encontrados en ésta zona, el cual presenta características diferentes dependiendo de la causa que lo origina.

Como se mencionó, durante una excavación se presenta una relajación de esfuerzos horizontales producto de la reducción de confinamiento lateral, lo que tiene como consecuencia una extensión del terreno y por lo consiguiente la formación de grietas, las cuales se presentan en líneas paralelas a la frontera de la excavación y algunas perpendiculares, con abertura de algunos centímetros. En general este tipo de grietas no representa ningún tipo de problema a la estabilidad de la excavación a menos que dentro de ellas se encuentre actuando una presión hidrostática. La aplicación de cargas (verticales) induce desplazamientos en las formaciones superficiales y una expulsión de material en forma de olas, siendo éstos el resultado de la descomposición de la carga en forma radial. Este fenómeno ocasiona daños no solamente a construcciones cercanas sino que también tiene influencia a varios cientos de metros.

El material expulsado forma grietas transversales al desplazamiento, cuyas características son muy semejantes a las inducidas por hundimiento regional.

III.3.4 GEOLOGÍA DE DETALLE

El área del ex Lago de Texcoco donde se ubica el Bordo Poniente es una sub-cuenca endorreica cerrada, que se caracteriza por una gran cantidad de rocas volcánicas andesíticas y diferentes tipos de suelo. El relleno de la cuenca fue en forma de abanicos aluviales, la cual consiste de una serie clástica derivada de material andesítico, de una destrucción rápida y erosión profunda.

Para conocer la estratigrafía y las propiedades mecánicas del sitio se realizaron sondeos por parte del Proyecto Lago de Texcoco y empresas privadas. Los sondeos son de tipo mixto, hasta una profundidad de 40.20m con obtención de muestras inalteradas y alteradas. El muestreo inalterado por tratarse de suelos blandos se llevó a cabo mediante el uso de tubo Shelby de pared delgada, de 10cm de diámetro y 80cm de longitud. Por su parte, el muestreo alterado se efectuó usando tubo de

pared gruesa, correspondiente a la prueba de penetración estándar, de 3.5cm de diámetro interior, 5.08cm de diámetro exterior y 60cm de longitud.

La prueba de penetración estándar consistió en hincar el muestreador metálico mediante el golpeo de una masa de acero de 63.5 kg, cayendo desde una altura de 76cm. De acuerdo con estos sondeos se determinó que en la subcuenca Texcoco, se presentan tres tipos de subsuelo (figura III.13) (I. E.T.S.A., 2007):

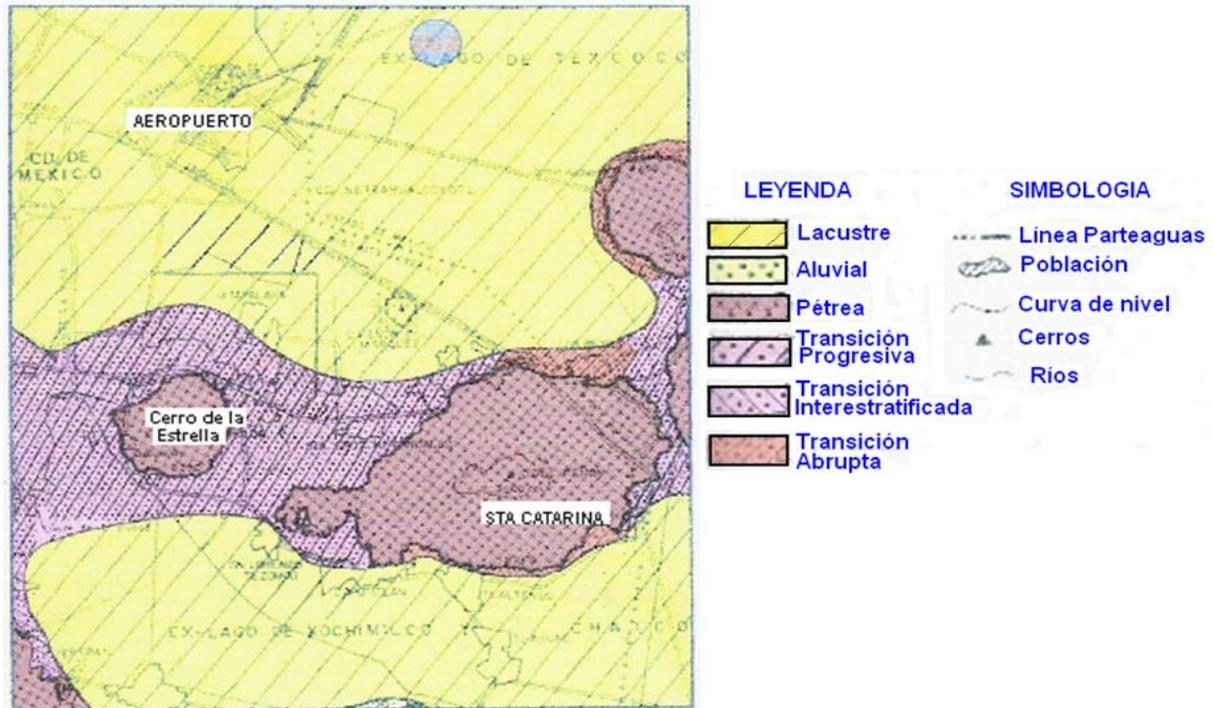


Figura III.13 Zonificación de materiales

Pétreo: caracterizado por las Sierras de Guadalupe, Río Frío, Santa Catarina, Peñones y Chimalhuacán.

Lacustre: el cual corresponde a la parte baja de la subcuenca, con topografía casi horizontal.

Transición: en donde se presentan dos condiciones; la gradual, en donde los estratos lacustres reducen su espesor y se interdigitan paulatinamente con los materiales aluviales y piroclásticos de las Sierras; y la transición abrupta, en donde los rellenos lacustres son interrumpidos horizontalmente por cuerpos volcánicos tal como sucede en Chimalhuacán, los Peñones y parte de la Sierra de Guadalupe.

Las formaciones superficiales del ex Lago de Texcoco resultan ser semejantes en origen y propiedades a las localizadas bajo la Ciudad de México, por lo que

adoptaron los nombres de éstas, a saber: Superficial (FS), Formación Arcillosa Superior (FAS), Capa Dura (CD), Formación Arcillosa Inferior (FAI) y Depósitos Profundos (DP).

Formación Superficial (FS): constituida por arcillas consolidadas por secado, arenas-limosas y limo-arenosas, con un espesor medio de 1.5m, el cual aumenta hacia la Sierra de Guadalupe a 6m, hacia el centro y sur de la región. Disminuye su espesor en las zonas en donde hasta hace algunos años eran de inundación permanente. Su contenido de agua promedio es de 61% y se encuentra surcada por innumerables grietas verticales rellenas con limo y arena fina, su profundidad es superior a los 4m y penetran al estrato subyacente. Existen rellenos, sanitarios localizados al centro del vaso con espesor máximo de 6m y de escombros al oriente del Aeropuerto.

Formación Arcillosa Superior (FAS): tiene un espesor de 17m en el norte y más de 40m al sur; en dirección este-oeste su espesor varía de 17 a 38m. Está conformada por arcillas más deformables intercalada por lentes y estratos arenosos, limo-arenosos y de vidrio volcánico, entre los que destaca un estrato de arena volcánica en estado suelto con espesor de 0.2 a 2m, localizado a una profundidad de 3m en el norte y oriente profundizándose hacia el sur hasta 12m. Sobre ésta se encuentran arcillas con contenidos de agua máximos de 600%. En la zona norte la FAS tiene un contenido de agua promedio de 303% y se encuentra intercalada con estratos limo-arenosos de mayor espesor que los encontrados al centro y sur (figura III.14).

Capa Dura (CD): esta capa corresponde a un horizonte geológico de desecación, en el cual se depositaron cenizas volcánicas. Tiene espesores de 3.5m al norte y oriente, desapareciendo hacia el sur lo que proporciona evidencias de la existencia de niveles permanentes de agua durante el relleno de la cuenca. La profundidad de su frontera superior varía de 16m al poniente del caracol, hasta cerca de 48m en Chimalhuacán, y de 16m en el oriente, hasta 30m en las inmediaciones de la Sierra de Guadalupe. Este estrato está constituido por materiales limo-arenosos, arenosos y limosos intercalados en ocasiones por arcilla. Su contenido de agua es de 59% y su resistencia a la penetración estándar (SPT) es muy variable, con valores de 8 hasta más de 50 golpes dentro de una misma zona (figura III.14) (Oviedo, 1992).

Formación Arcillosa Inferior (FAI): tiene el mismo origen lacustre que la FAS. Se distingue por su menor contenido de agua, que es de 255%, su mayor resistencia al esfuerzo cortante y menor compresibilidad. En esta formación se presentan con mayor frecuencia la presencia de estratos limo-arenosos y de vidrio volcánico, que en la FAS. Su espesor máximo es de 20m al centro del Lago y disminuye hasta desaparecer en la periferia.

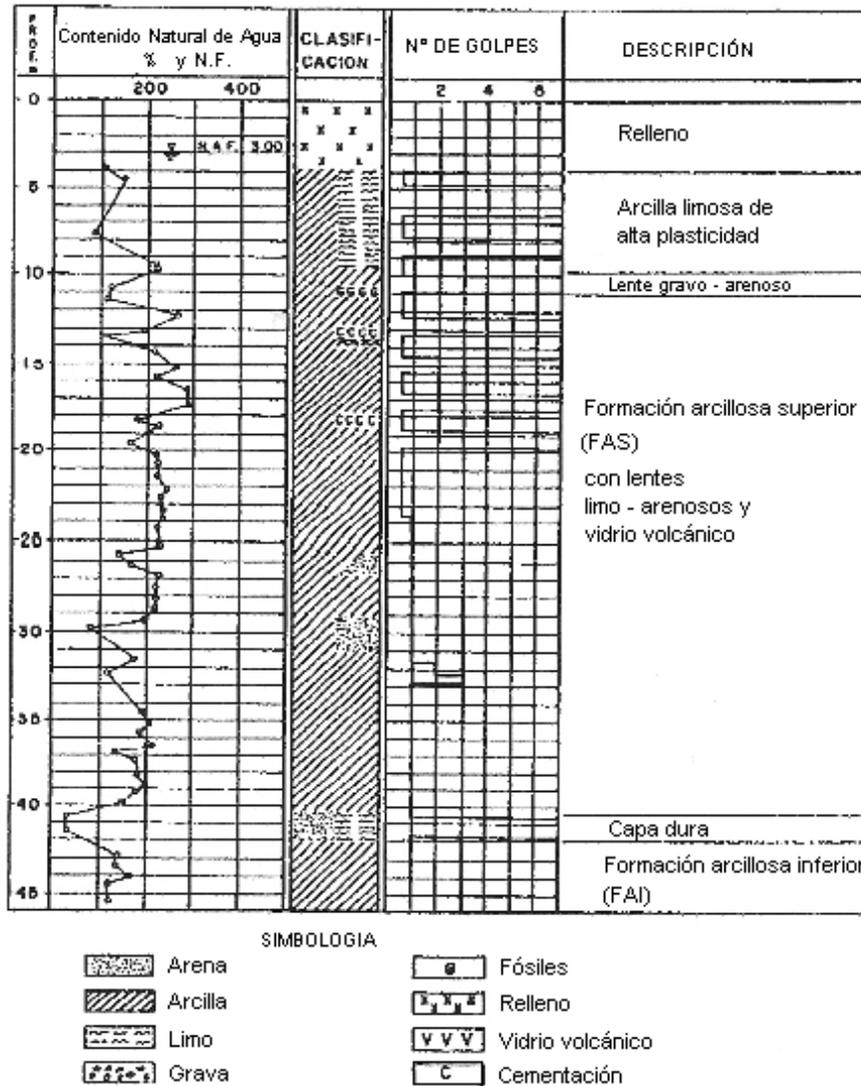


Figura III.14 Estratigrafía del sitio

Depósitos Profundos (DP): también conocidos como segunda capa dura, los cuales están formados por limos, arenas finas y limosas en estado muy compacto; su horizonte superior se encuentra a 24m de profundidad en el oriente y se profundiza hasta 70m en el sur; su contenido de agua promedio es de 50%. Dentro de estos depósitos se encuentra incluida la **Tercera Formación Arcillosa (TFA)**, localizada a una profundidad de 52m al centro de la región, con espesor máximo de 6m y contenido de agua de 147%. Bajo esta formación se encuentran depósitos aluviales similares a los encontrados en la parte superior, cuyo contenido de agua es de 37% y una mayor cantidad de gravas.

Existe también una **Cuarta Formación Arcillosa (CFA)**, comprendida entre los 150 y 160m de profundidad, la cual no ha sido explorada con los métodos

convencionales, pero sí detectada a través de exploraciones geológicas, sondeos para la instalación de piezómetros y para la explotación de pozos profundos.

De acuerdo a los resultados obtenidos de las pruebas y sondeos realizados se presentan los valores medidos para cada formación, en la tabla III.5, donde se observan los valores obtenidos para el contenido de agua (W) y límite plástico (LP) son similares a los registrados en la zona metropolitana al realizar las correcciones por contenido de agua; en la zona pétreo los valores medios del límite líquido (LL) y densidad de sólidos resultan ser mayor y menor respectivamente a los registrados en las otras zonas (Lomas y Transición). Los valores obtenidos para la relación de vacíos son semejantes a los registrados en la Ciudad de México en zonas donde los suelos son poco afectados por bombeo y no existen cargas superficiales. Los valores medios de la densidad de sólidos, relación de vacíos y resistencia a la compresión no confinada, para la Capa Dura, Depósitos Profundos Superiores y Tercera Formación Arcillosa, no son respectivos debido al escaso número de muestras obtenidas (Oviedo, 1992).

Tabla III.5 Valores medios de las propiedades índice

Propiedad	Contenido de agua W (%)	Límite líquido V _l (%)	Límite plástico V _p (%)	Densidad de sólidos Kg/m ³	Relación de vacíos e	Resistencia al corte C _u (Kpa)
Formación						
* S	61	99	44	2500	1.7	14.7
FAS	303	101	71	2460	7.3	12.7
CD	59	71	37	2530	1.2	86.3
FAI	255	242	66	2450	5.9	31.4
DPS	49	94	47	2420	1.5	51.0
TFA	147	182	68	2270	3.5	47.1
DPI	37	48	25	—	—	—

* S: Superficial

La estratigrafía de la parte superior a la inferior cuenta primero con una arcilla compresible alternada con material orgánico y limo. Estos sedimentos se encuentran altamente intemperizados, de color café oscuro a negro. La arcilla limosa es de tipo montmorillonita y el suelo es lacustre de color verde a café oscuro.

Posteriormente, hasta donde termina el nivel freático se tiene la presencia de una arcilla limosa, intercalada con arena y arcilla bentónica de color verde olivo a café rojizo, gran parte de este material es lítico de grano fino con alto grado de compresibilidad y baja resistencia.

A continuación se encuentra con mayor predominación una arcilla de color gris amarillento, blanda y plástica sus propiedades varían debido a la concentración de sales de agua intercalado con estos sedimentos tenemos la presencia de lentes de arena y de moluscos que van graduándose desde arcillas, limos y bentoníticas.

Intercaladas con mayor frecuencia hacia su base, tenemos vidrio volcánico, tobas arenosas de color gris verdoso o por andesitas y basaltos, con un grado medio de intemperismo y entre los cuales se encuentra una arena ligeramente cementada, entre los cuales tenemos la presencia de agua metéorica y estratos de moluscos y arcilla limosa. Hacia su base se tiene la roca madre que son toba andesíticas y basálticas.

III.4 HIDROLOGÍA

La problemática real de la Cuenca del Valle de México es que su forma es endorreica o cerrada, según geólogos e historiadores, el fondo del Valle estaba cubierto en su mayor parte por un gran lago, donde fluían las corrientes ubicadas en la Cuenca. De acuerdo con los hidrólogos una Cuenca es el área de la superficie terrestre por donde el agua de lluvia escurre y transita o drena, a través de una red de corrientes que fluyen hacia una corriente principal y, por ésta, hacia un punto común que puede ser un almacenamiento de agua interior, en cuyo caso se llama cuenca endorreica.

En la tabla III.6, se muestra la evolución del Lago de Texcoco, en sus diferentes épocas, dicha evolución es producto de las acciones que se han llevado a cabo para modificarlo.

Tabla III.6 Evolución del Lago de Texco.

Año	Área (m ²)	Capacidad (miles de m ³)
1608	41 000	-----
1774	18 200	-----
1856	35 000	-----
1861	27 217	-----
1865	43 858	-----
1904	26 691	170 884
1931	17 113	100 920
1945	13 500	97 500
1966	14 000	165 000

En el área convergen 10 ríos de origen pluvial y 2 de aguas negras, razón por la cual se tenía proyectado la construcción de 20 plantas potabilizadoras como alternativas y dejarían recargarse los mantos acuíferos.

Hidrología del sitio

La subcuenca de interés está rodeada por sistemas montañosos constituidos en general por derrames volcánicos ígneos extrusivos, que tienen un fracturamiento heterogeneo que va de mediano a alto, típico del tectonismo del Eje Neovolcánico; estas características físicas en los materiales dan lugar a parámetros de permeabilidad alta en general, y son las áreas más importantes por donde se

recargan las unidades acuíferas que se explotan mayormente en los valles, los cuales están formados por mantos arcillosos con interdigitaciones granulares que dan lugar a las unidades de los diferentes acuíferos que se explotan (figura III.16).

Las fuentes de abastecimiento de agua potable más importantes en la zona metropolitana de la Ciudad de México, se extraen de los mantos acuíferos subterráneos, los cuales se recargan en áreas como son las sierras circundantes a la ciudad. En la zona de Santa Catarina Yacahuizotl se encuentra el acuífero que abastece a la Delegación de Tlahuác, Chalco, Los Reyes La Paz, San Miguel Teotongo y parte de Ciudad Nezahualcoyotl; sin embargo, cabe señalar que los acuíferos superiores considerados como acuitardos son altamente salinos, con 5000 a 10 000 mg/L por lo que no son aprovechados o explotados (TGC, 2005).

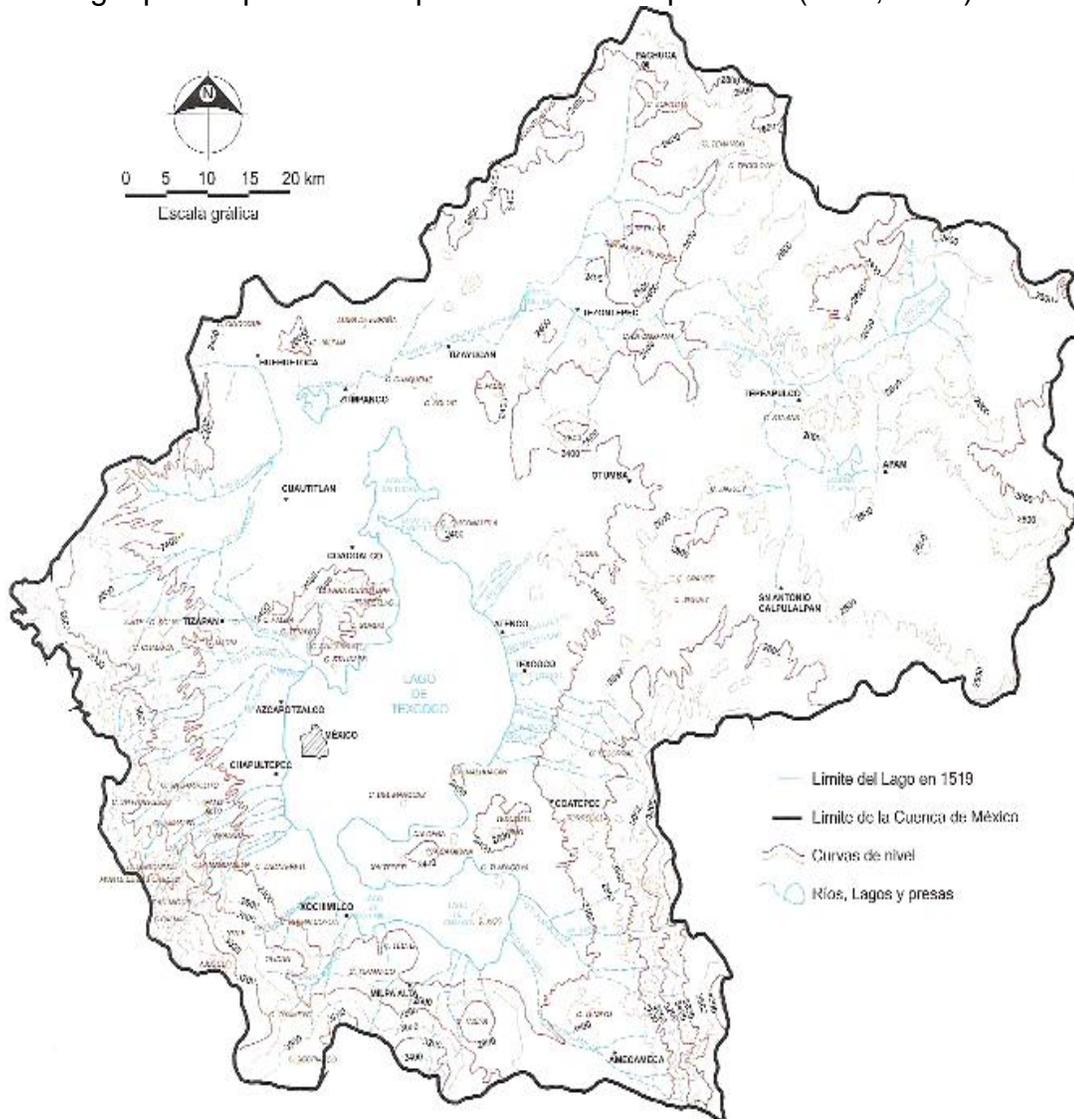


Figura III.16 Topografía e hidrología de la Cuenca del Valle de México

El régimen del flujo subterráneo, a nivel regional, se caracteriza por tener una dirección, resultante de las recargas provenientes de las sierras, que se comportan como zonas preferenciales de recarga del sistema, este flujo alimenta directamente al material granular, los piroclastos y rocas fracturadas que constituyen el acuífero en explotación y que se encuentran bajo los depósitos lacustres, tal es el caso del área de estudio, pero esto se encuentra a gran profundidad (figura III.17) (I.E.T.S.A., 2007).

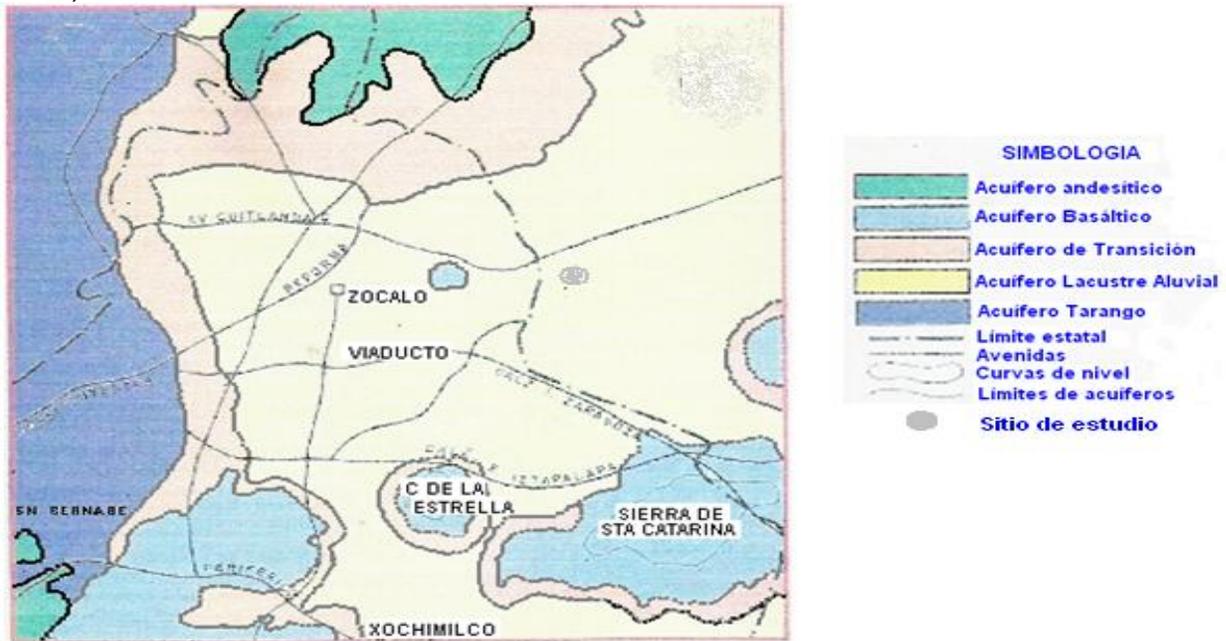


Figura III.17 Clasificación de Acuíferos en la Ciudad de México

El flujo subterráneo, dado sus características hidrológicas, se ha mantenido en una sola dirección norte a sur, superficialmente es una cuenca cerrada en donde la acumulación del agua estática solo puede evaporarse y concentrarse las sales.

Las arcillas en el ex Lago de Texcoco presentan contenidos de sales disueltas en el agua intersticial con valores medio de 54 000mg/L en los primeros 60m. Estos contenidos se reducen gradualmente a 1 620 mg/L a profundidad de 213 y 1844m, así como al alejarse hacia la periferia en donde la concentración salina queda comprendida entre 232 y 1613 mg/L para profundidades menores a los 200m

La concentración máxima de sales en el agua subterránea es de 18% y se reduce al 1% hacia la metrópoli y alrededor de la zona lacustre.

Además al centro y sur del ex vaso se ha detectado la presencia de gases, entre lo que predomina el metano, el cual se encuentra en suspensión en el agua de los depósitos profundos (entre FAI y TFA), con una presión máxima de 370 kPa.

CAPITULO IV METODOLOGÍA

La exploración geofísica es toda una expresión de conocimientos físicos, matemáticos, computacionales y empíricos del profesional, lo que aunado al conocimiento de la geología, litología, cortes estratigráficos y/o cualquier otra herramienta son determinantes para determinar y localizar problemas de carácter estructural del subsuelo. En contraste, con los sondeos (perforación de pozos), que determinan información significativa, pero que se limita a valores puntuales; pero al combinarse se obtienen resultados de mayor cobertura porque los métodos geofísicos son rápidos, económicos (en comparación de los sondeos) y permiten tener modelos más precisos del subsuelo con profundidades y materiales específicos lográndose una calibración de la respuesta instrumental en automático; la finalidad de éstos es la detección de estructuras a través del análisis de sus propiedades físico-químicas como son: resistividad, densidad, magnetismo, conductividad, radioactividad entre otras. La relevancia de los métodos geofísicos en la aplicación a problemas ambientales, es poder llegar a localizar, delimitar y monitorear fugas de fluidos, como en el caso presente el biogás y los lixiviados (Rellenos Sanitarios, 2008).

Una vez que ha sido definida la distribución espacial y la composición de los materiales en la zona de estudio, se tiene el planteamiento no solo de la litología, sino también de las estructuras existentes; este conocimiento es certero en superficie, pero hipotético en el subsuelo, por esta razón es necesario llevar a cabo actividades complementarias, que nos permitan corroborar el modelo geológico conceptual para el subsuelo. La forma de hacerlo, es mediante la información litológica de pozos cercanos, aún siendo información puntual es certera porque ofrece un corte litológico vertical del subsuelo. La exploración geofísica en el levantamiento de perfiles sobre un relleno sanitario debiera ser obligado debido a los subproductos generados en éste (biogás y lixiviado principalmente) y como monitoreo en la parte estructural del relleno (mecánica y dinámica).

IV.1 MÉTODOS GEOFÍSICOS

Los métodos geofísicos se pueden separar en por lo menos cuatro ámbitos: la básica que se limita a la revisión de conceptos como estructura académica; la aplicada, que establece con base en observaciones las condiciones internas y externas de la tierra; la ingenieril, del estudio de porciones restringidas y superficiales de la corteza terrestre con fines prácticos y la prospectiva, que es la exploración del subsuelo, basada en el análisis de las características físicas del terreno y de las variaciones superficiales de los campos naturales de la Tierra, encaminada a descubrir los recursos naturales y minerales del subsuelo (Del Valle, 1986).

La finalidad de la prospección geofísica, es la detección de texturas y estructuras a través del análisis de sus propiedades físico-químicas como son resistividad, densidad y magnetismo, entre muchas más; si bien el número de éstas puede ser

muy variado, los métodos desarrollados para estudiarlas lo son igualmente y se clasifican de acuerdo a la fuente o la propiedad física (tabla IV.1), los más conocidos son:

TablaIV.1 Métodos Geofísicos

PROPIEDAD FÍSICA	CAMPO TERRESTRE	MÉTODO GEOFÍSICO
Densidad	Gravedad terrestre	Gravimetría
Susceptibilidad magnética	Campo geomagnético	Magnetometría
Conductividad eléctrica	Campos eléctricos	Eléctrico
Inducción electromagnética	Campos electromagnéticos	Electromagnético
Elasticidad	Propagación sísmica	Sísmico
Variación de temperatura	Gradiente geotérmico	Geotérmico
Radioactividad	Radioactividad terrestre	Radioactivo

Magnético. Este método utiliza el magnetismo de las rocas de la corteza terrestre, que consta de dos partes, el magnetismo inducido y el magnetismo remanente; el primero es debido al campo magnético de la Tierra y el segundo es el que fue adquirido cuando se formaron las rocas. Es el método de exploración más antiguo y poco usado en estudios hidrogeológicos; en el caso de estudios de índole ambiental, se utiliza cuando se sabe que el contaminante puede tener o está asociado a alguna propiedad magnética.

Gravimétrico. Se basa en las variaciones de gravedad causadas por un contraste de densidad entre una estructura o roca y la del medio que la envuelve; este método estudia las anomalías de la gravedad en la superficie terrestre, para deducir la estructura y forma del basamento; normalmente se utiliza en estudios regionales. Es útil también para determinar la existencia de grandes fallas, que pongan en contacto rocas de diferentes densidades. Sus alcances en la hidrogeología son limitados, por lo que se usa poco.

Electromagnético. Estudia la influencia del terreno sobre un campo electromagnético artificial. Es un método costoso pero con buena resolución para explorar de forma rápida el subsuelo. Debido a que sus resultados dependen de las características físicas de los materiales y de los fluidos que contienen, son aplicados para el reconocimiento de las condiciones hidrogeológicas y para la identificación de fuentes de contaminación.

Sísmico. La sismología de exploración, se basa en el análisis del comportamiento de las ondas sísmicas, las cuales son registradas a partir de sismógrafos. Las fuentes de energía que generan las ondas sísmicas son controladas y móviles; las distancias entre la fuente y los puntos de detección son relativamente pequeñas. El objetivo de la exploración sísmica es deducir información acerca de las rocas, especialmente sobre la posición de las capas. Es una técnica muy empleada en la exploración petrolera, aunque también se usa en la ingeniería civil, sobre todo para medir la

profundidad del substrato rocoso; debido a que es una técnica más costosa que la eléctrica resistiva, con una definición equiparable a ella, es poco empleada en Geohidrología y en estudios ambientales.

Eléctrico Resistivo. Todos los métodos eléctricos funcionan a partir de la emisión de una corriente eléctrica a través de dos o más electrodos puntiformes y de su recepción a través de otros dos electrodos adyacentes receptores del potencial inducido, la combinación entre ellos marca la diferencia del arreglo, utilizándose para la prospección de agua subterránea los sondeos eléctricos verticales (SEV) y los sondeos de polarización inducida; para la determinación de cavernas y para la definición de zonas contaminadas, las calicatas y los arreglos dipolares; mientras que para la prospección de irregularidades físicas, el arreglo Wenner o el Lee; y finalmente, para la prospección minera, los sondeos de polarización inducida o de bloques. Ahora bien, aunque es cierto que existe un buen número de métodos eléctrico-resistivos, los sondeos eléctricos verticales (SEV) son los más usados para la prospección de agua, debido a que presentan una mejor definición en las anomalías verticales; es por ello que dicho método, representa el arreglo mayormente usado para el estudio de sitios propicios donde establecer sitios de disposición final.

Una vez seleccionado el método geofísico, la información geofísica obtenida, tiene que depurarse en gabinete a través de paquetes computacionales, hechos expresamente para ello; resulta en gráficas con valores, perfiles de contornos, imágenes, curvas, etc., las que el especialista correlacionará con la parte geológica de la región, para poder dar una interpretación de lo que se obtiene. En un sentido amplio, la geofísica proporciona las herramientas para evaluar el modelo geológico subterráneo.

Como resultado de los estudios geofísicos y de su correlación con la exploración geológica, inicialmente se establece un modelo geológico solo en superficie y un modelo geoeléctrico en el subsuelo, este último se calibra a través de los cortes litológicos obtenidos con la perforación de algunos pozos (dependiendo del tipo de material y área) en diámetro reducido (se recomienda entre 2 a 3 pulgadas). De esta forma, las secciones geoeléctricas realizadas durante la fase de interpretación geofísica son fácilmente calibradas y transformadas en secciones geológicas y finalmente en hidrogeológicas, permitiendo establecer un modelo conceptual geológico más detallado, pues se integra al previamente formulado, el conocimiento del tipo y comportamiento de los materiales en el subsuelo.

IV.1.1 ESTUDIOS GEOFÍSICOS PRELIMINARES

Los estudios preliminares en el ex Lago de Texcoco son de toda índole y con diversos objetivos; en el caso de la aplicación de los métodos indirectos se tiene conocimiento de la aplicación de sísmica de refracción, métodos gravimétricos, métodos electromagnéticos y eléctricos resistivos. El método sísmico se utilizó para determinación de módulos dinámicos valorando el tipo y cantidad de carga que

soporta un sitio (figura IV.1); el método gravimétrico se utilizó para ubicar la cuenca (figura IV.2); y el método electromagnético para monitoreo de un relleno sanitario (figura IV.3) (CIGSA, 2001).

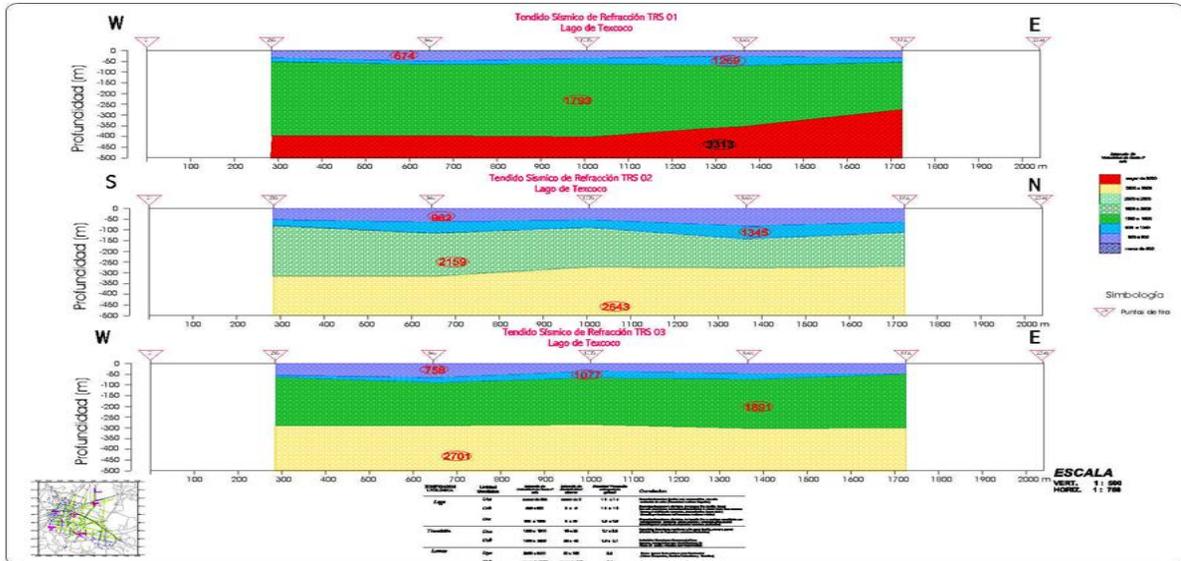


Figura IV.1 Perfiles de Sísmica de Refracción en ex Lago de Texcoco

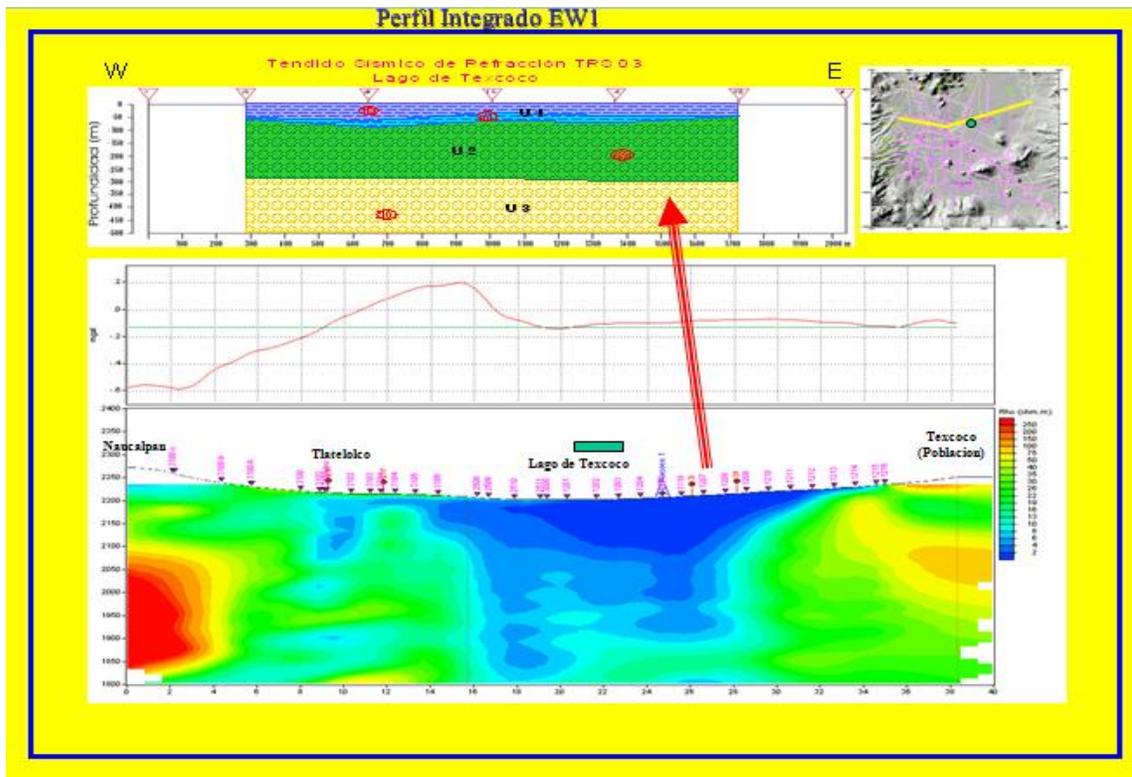


Figura IV.2 Estudio gravimétrico E-W de la Cuenca de México

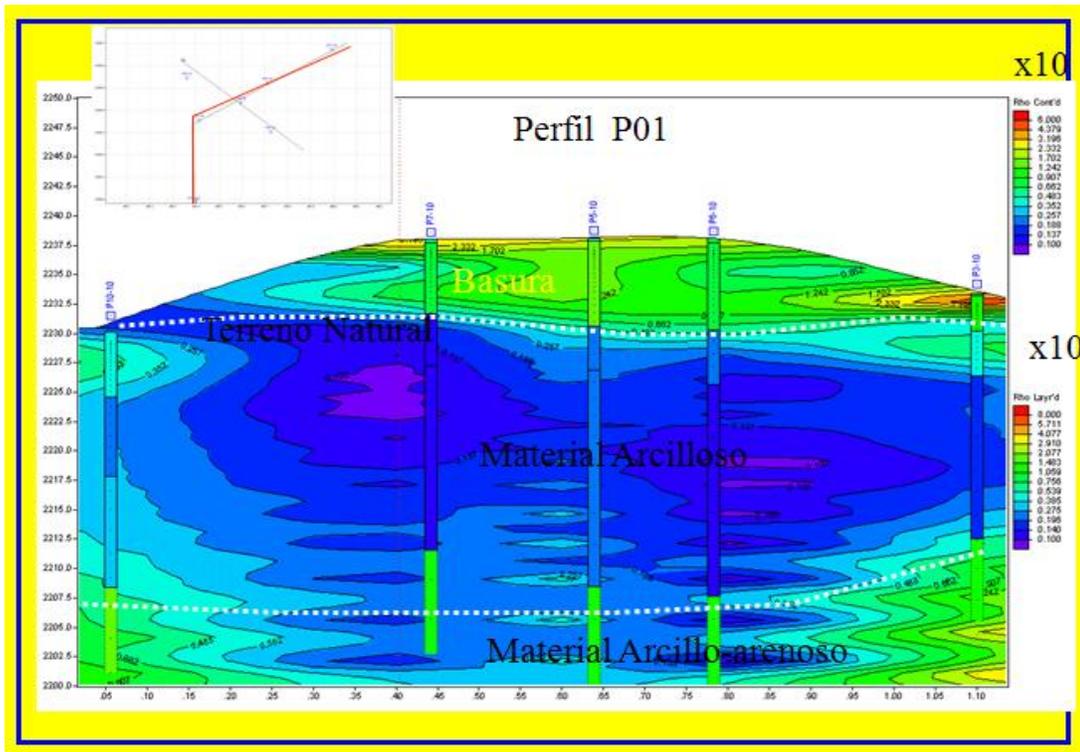


Figura IV.3 Estudio electromagnético (TEM) en un relleno sanitario

Todos los estudios mencionados se han llevado a cabo en diferentes momentos y con diferentes objetivos; sin embargo, el estudio que solicitó la Dirección de Operación del Relleno Sanitario que depende de la Dirección de Obras del Gobierno del Distrito Federal, tiene que ver directamente con el sitio en estudio.

El Informe se titula “Sondeo geofísico anual 2007 para el monitoreo de macroceldas en la IV etapa de relleno sanitario Bordo Poniente”, realizado por la empresa Investigaciones Electrofísicas de la Tierra S. A. de C.V., su objetivo es el monitoreo de los materiales residuales confinados en el sitio de disposición final con el propósito de evitar que dichos procesos pudiesen generar impactos nocivos al terreno natural, acuíferos y medio ambiente. Este monitoreo se ha realizado desde el año 2004.

Se programaron tres perfiles que cubren las ocho macroceldas, empleando parámetros similares a los monitoreos de años anteriores, para el levantamiento de información y la comparación entre los informes. El plano que se utiliza es con este fin (figura IV.4), los perfiles se ubicaron con dirección NW-SE, la profundidad de investigación fue de 90m(I.E.T.S.A., 2007)



Figura IV.4 Ubicación de los perfiles de Monitoreo

Los resultados se detallan en la figura IV.5, y se concluye que la estructura presenta horizontes litoeléctricos a partir de la superficie (I.E.T.S.A., 2007):

A: suelos de cubierta constituidos por limo-arcillosos,

B: materiales residuales de características físicas y físico-químicas heterogéneas;

C: suelos correspondientes al paquete de arcillas expansivas superiores, alteradas en la porción superior por el efecto de movimiento de tierra, para el desplante de las celdas; sobre estas arcillas se colocó la geomembrana.

D: secuencia de arcillas, con algunos lentejones delgados de ceniza volcánica, altamente saturada de agua salina. Dicha estructura correspondiente al terreno natural, presenta ondulaciones debido, entre otros aspectos a los efectos de la estructura del subsuelo característicos del eje neovolcánico y como consecuencia a las variaciones piezométricas durante las diferentes etapas del año.

Se reportó: no se detectaron migraciones de lixiviado y con respecto a la carga solo se menciona la posibilidad de que únicamente en sitios donde se recibe residuo de construcción o similares existe deformación (peso volumétrico alto).

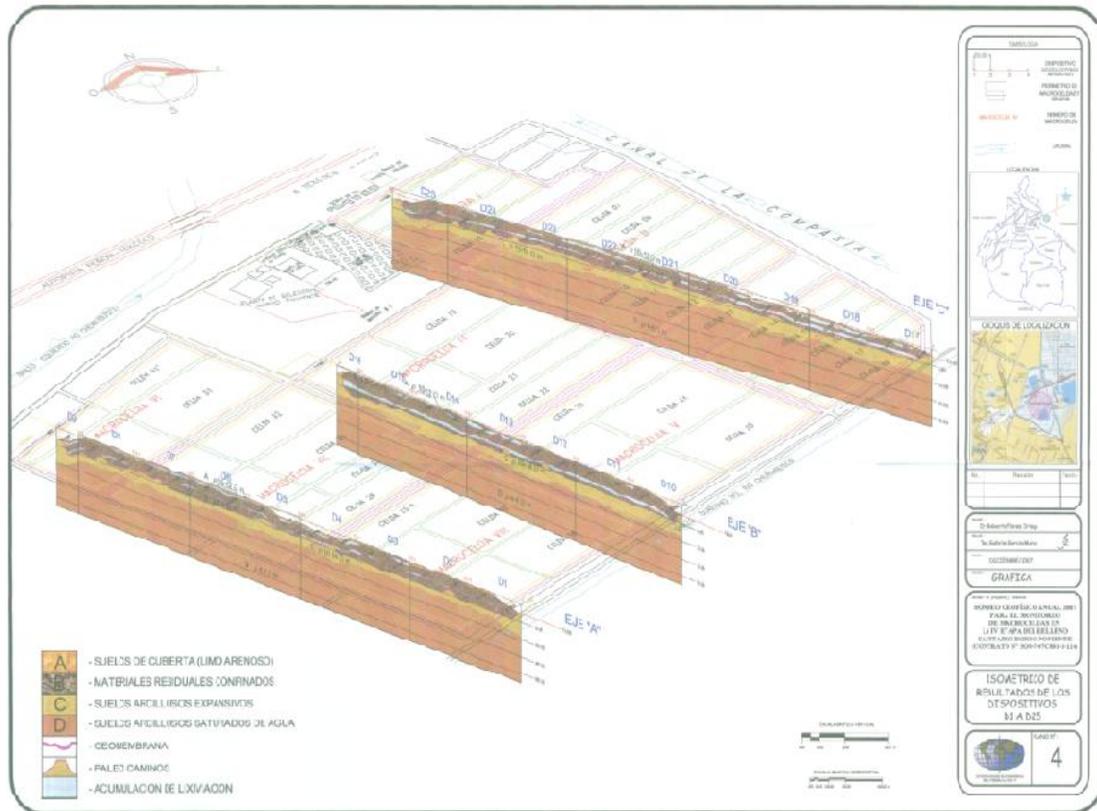


Figura IV.5 Isométrico de resultados

Estos resultados obtenidos por ITESA, serán tomados en cuenta para la etapa IV, donde se realizaron levantamientos geofísicos; aunque, se tendrán diferencias debido a que son distintos, mientras la empresa realizó prospección geoelectrica con dispositivo de barrido de alta densidad de medidas BF-63, en el desarrollo de esta tesis se realizaron Transitorios electromagnéticos y prospección sísmica en dos modalidades, refracción y reflexión; la otra gran diferencia es el intervalo entre sensores, la empresa ITESA empleo 40m y la utilizada en el presente estudio fue de 1.5m entre geófonos (sensor sísmico), y 36.5 a 40m para TEM's. Con estas características se puede observar que el estudio de la empresa ITESA es regional pues cubre hasta tres macroceldas (2km aproximadamente), con una profundidad de investigación de 80m; y el presente estudio es a detalle, la máxima longitud cubierta es de 200m por perfil con una profundidad de investigación de más de 100m.

IV.2 DESARROLLO DE LOS TRABAJOS GEOFÍSICOS

Los perfiles de Exploración Geofísica realizados en el Relleno Sanitario Bordo Poniente se ubican en las Etapas II y IV (figura IV.6), cubriendo un área de 10694.25 m² en cada una. Se diseñó un levantamiento de datos geofísicos representativo, sin tener en mente cubrir toda una etapa.

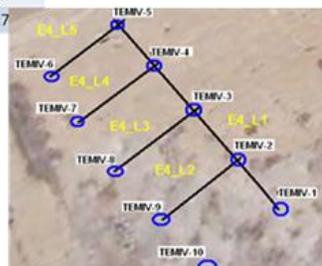


Figura IV.6 Sitios explorados con métodos geofísicos

Para tener una idea de las características del relleno sanitario en sus dos etapas, se debe manejar una geometría del levantamiento, en donde al aplicarse más de un método geofísico existan coincidencias totales o parciales; en este caso, en el levantamiento se buscó ambas coincidencias; es decir, en el caso de el método sísmico, se maneja cada tendido de 24 canales como un tramo de 36m debido a que los geófonos se extienden con una separación de 1.5m y para el caso de los Transitorios Electromagnéticos (TEM's), se programaron en cada intersección de las líneas sísmicas (figura IV.7); es importante señalar que el cubrimiento por parte de los métodos electromagnéticos es mayor, debido al principio de funcionamiento de su circuito donde se originan voltajes variables con respecto al tiempo, que se traducen en una mejor cobertura y penetración del terreno.

Línea	Tramos	Distancia (m)	Archivos
L1	4	145.5	37
L2	2	73.5	15
L3	2	73.5	17
L4	2	73.5	17
L5	2	73.5	17

Tramo: 24 sismodetectores en línea



Método Electromagnético

Línea	TEMs
L1	TEM-1 a TEM-5
L2	TEM-2 y TEM-9
L3	TEM-3 y TEM-8
L4	TEM-4 y TEM-7
L5	TEM-5 y TEM-6

Figura IV.7 Geometría general del levantamiento geofísico.

IV.2.1 TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS

A principios de la década de los 80 se inicio el desarrollo de este método, el cual se basa en el fenómeno de relajación o transición, que se desarrollan en el terreno cuando se elimina o anula un campo físico artificialmente producido (campo controlado) (figura IV.8).

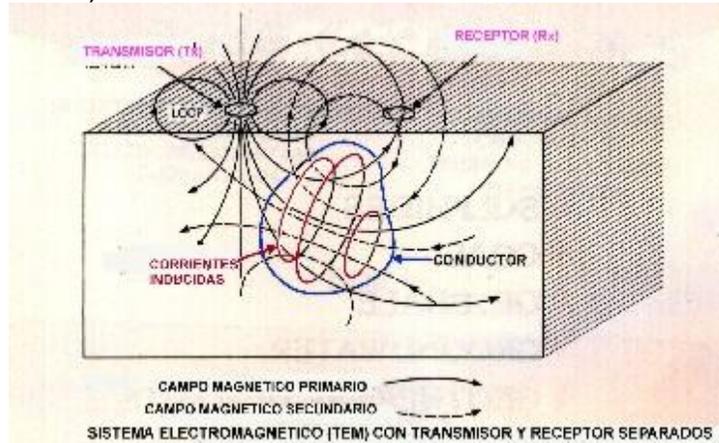


Figura IV.8 Transitorio electromagnético, transmisor y receptor

La señal que normalmente se induce es de tipo escalón (figura IV.9), a través de un generador del campo electromagnético (transmisor), que consiste de un circuito de forma seleccionada (círculo, cuadrado, etc.), por la que circula la señal. Al interrumpir la corriente se origina un campo magnético, que se amortigua y desaparece rápidamente. La bobina (receptor), puede estar formada por el mismo circuito primario que originó el campo magnético u otro receptor de características previamente seleccionadas y situados en el interior o próximo al primario (CIGSA, 2001).

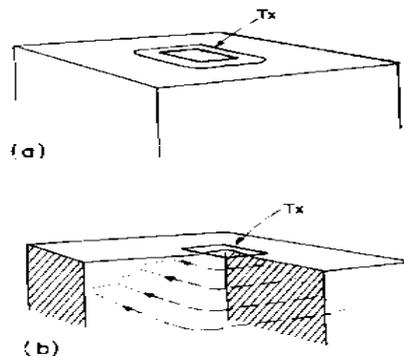


Figura IV.9 Circuito (bobina) seleccionada (a) y su funcionamiento (b)

La rápida variación del campo magnético, originado al interrumpir el paso de la corriente, origina a su vez voltajes variables con el tiempo en el circuito o bobina (receptor). El proceso se repite varias veces, almacenando las lecturas con un proceso sumatorio, que destaca los voltajes creados y tiende a anular el ruido de fondo de la zona (figura IV.10).

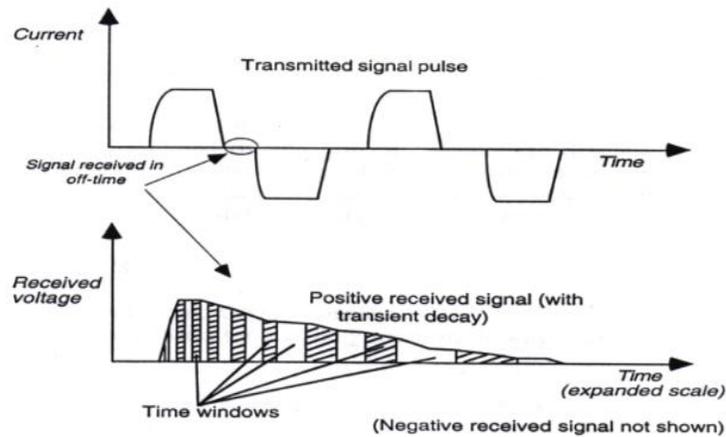


Figura IV.10 Señal del transmisor y señal del receptor

Terminado el proceso, el equipo facilita los potenciales medidos en función del tiempo y el registro de la curva medida del potencial en función del tiempo.

En este caso se pondrá especial interés en el comportamiento del campo electromagnético en la parte temprana (Early Time) y en la ecuación de la resistividad aparente para el arreglo de loop coincidente (Coincident Loop), que está definida por:

$$ra = 6.32 \times 10^{-12} \times b \frac{8}{3} \times \left(\frac{V}{I}\right)^{-\frac{2}{3}} \times t^{-\frac{5}{3}}$$

donde:

- ra – resistividad aparente [Ohm-m]
- b - longitud del lado del loop [m]
- V/I – medición transitoria [Volts/Amp]
- t – tiempo de decaimiento a partir de la interrupción de la señal

El equipo de transitorios electromagnéticos empleado es el *SIROTEM*, equipo Australiano el cual es de fácil operación y traslado, tiene un peso de 6 kg además de sus cables conectores y su batería que lo hace un equipo portátil (figura IV.11).

Especificaciones:

- Receptor y transmisor de bajo poder:** Sirotem-3S
- Capacidad de memoria:** 400 registros
- Ventanas de medición:** 53 en 3 series de tiempo
- Rango de medición:** 50 microsegundos a 2 s.
- Señal promedio:** 1-9999 apilamientos
- Retraso inicial:** 0-9999 microsegundos
- Filtros:** 50/60 Hz y anti-aliasing pasivo de 4 grados
- Peso:** 7Kg



Figura IV.11 Equipo Sirotem y especificaciones

La geometría de levantamiento para los TEM's, fue construir un circuito cuadrado (bobina), con longitud del lado del loop de 25m y con una selección de 30 ventanas (lecturas) por cada TEM con un filtro de 67HR; en la figura IV.12, se observa la geometría; la estrella central simboliza el punto de atribución de las lecturas y por lo tanto es el señalado en superficie como el TEM. En total se obtuvieron 22 Transitorios electromagnéticos.

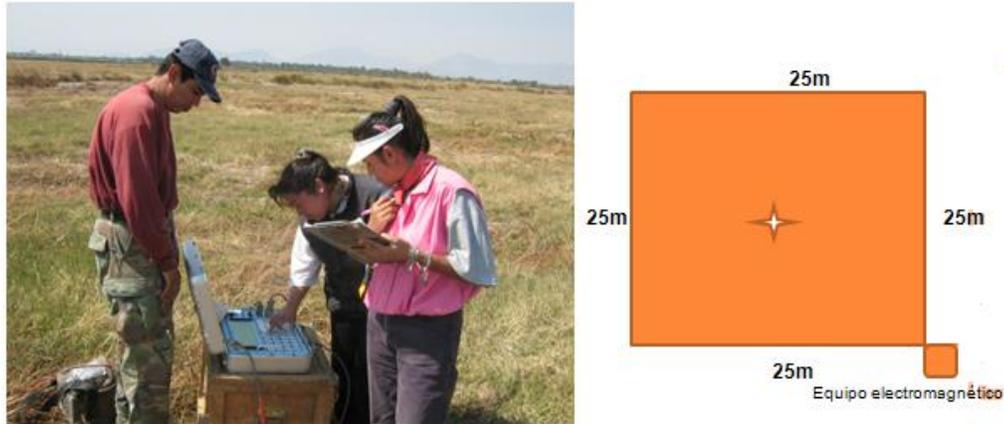


Figura IV.12 Levantamiento de Transitorios Electromagnéticos (TEM's)

El procesamiento se realizó empleando el software WinLink de Geosystem, en el cual se puede desplegar la información individual en curvas 2D o bien se pueden generar perfiles con corrección topográfica al realizarse el levantamiento con un GPS; es importante tener en cuenta el tipo de procesado que se puede realizar para la inversión de los datos y los resultados, la malla que se emplea para realizar las iteraciones (figura IV.13) y obtener un perfil con resultados reales.

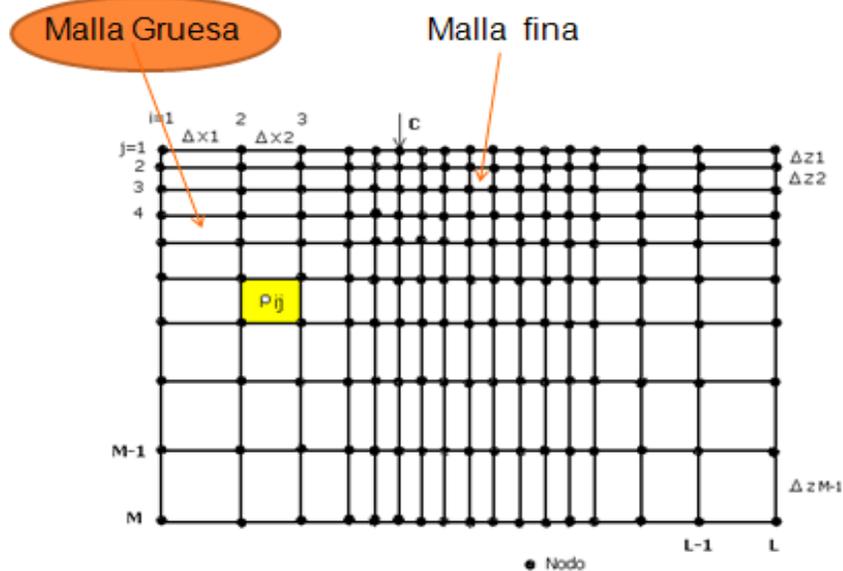


Figura IV.13 Malla de selección en el procesado de datos eléctricos

La ubicación de las líneas para el sitio de la etapa II del Relleno Sanitario Bordo Poniente (figura IV.14), en donde los Transitorios Electromagnéticos del TEM-1 al

TEM-10 forman los perfiles TEM-I y TEM-II, y las líneas sísmicas de refracción y de reflexión por E2_L1 al E2_L5. La ubicación está en formato UTM (Universal Transversal de Mercator), unidades en metros.

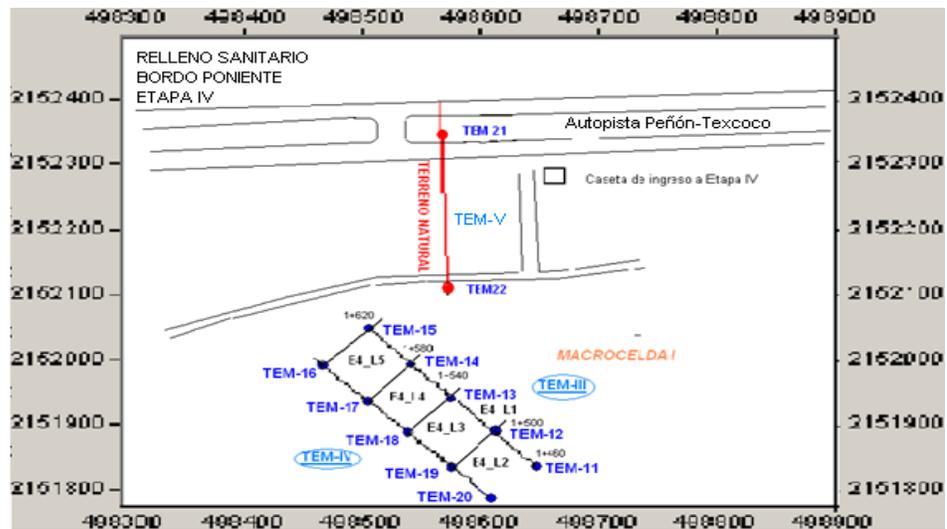
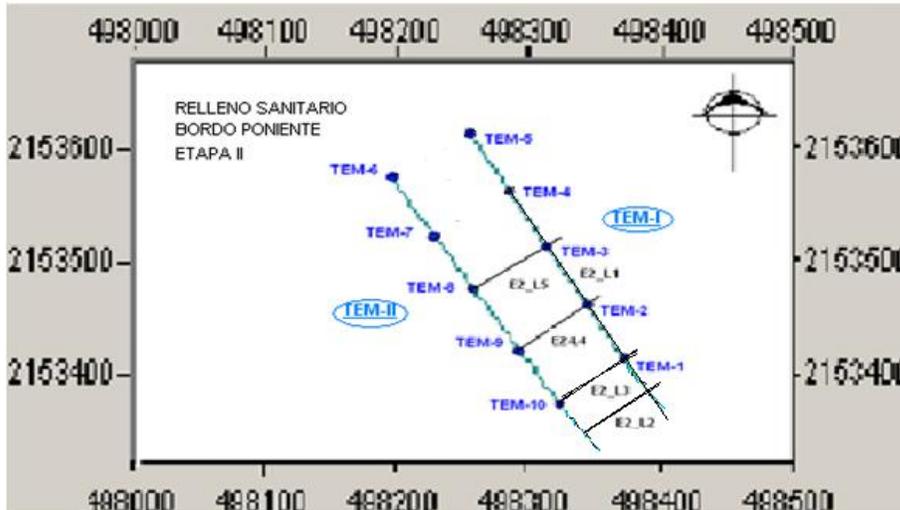


Figura IV.14 Perfiles Geofísicos en las Etapas II y IV del RSBP

En el caso del sitio en la Etapa IV del Rellenos Sanitarios Bordo Poniente (figura IV.14), de igual forma se ubican los Transitorios Electromagnéticos del TEM-11 al TEM-20, los cuales cuentan con TEM's en terreno natural (TEM-21 y TEM-22), para formar los perfiles TEM-III, TEM-IV y TEM-V; los perfiles sísmicos de E4_L1 a E4_L5.

El perfil de Transitorios electromagnéticos TEM-I, se encuentra constituido por los primeros cinco TEM's (del TEM-1 al TEM-5); se visualiza de oeste a este con una orientación de N30°W, el cual cubre 180m, pero la cobertura de las bobinas se amplía a 270m de longitud del perfil (figura III.15); la coincidencia con el perfil de sísmica es ubicando el TEM-1 en 36m del perfil sísmico, el TEM-2 en 72m, el TEM-3

en 108m, el TEM-4 en 144m y el TEM-5 en 182m, que fue modificado por malas condiciones del terreno.

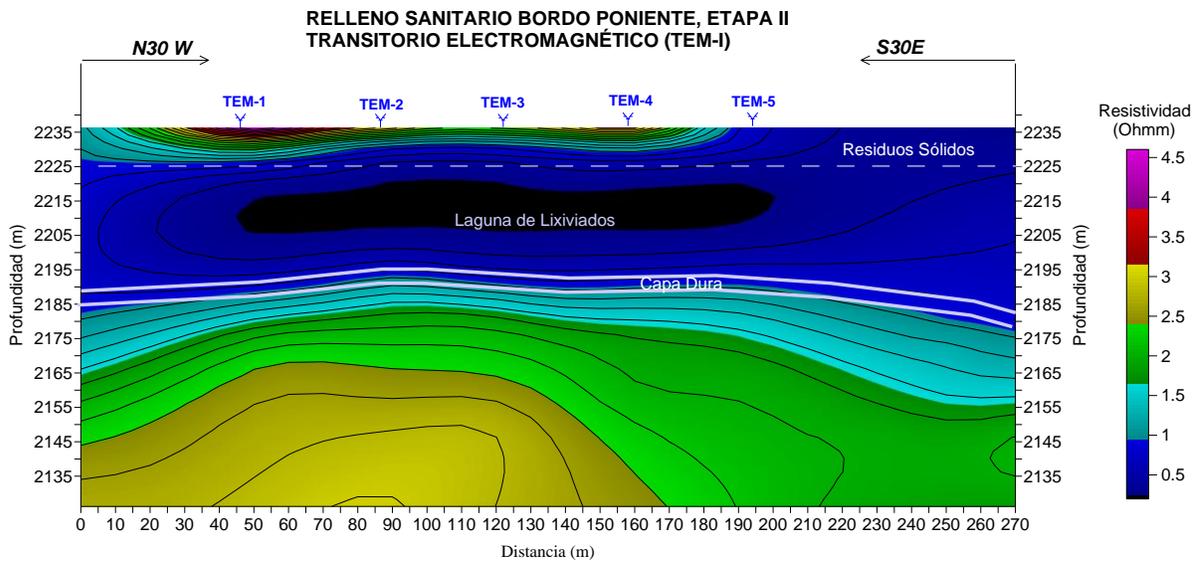


Figura IV.15 Transitorio electromagnético TEM-I, Etapa II

En el caso del TEM-II (figura IV.16), formado por los TEM's del 6 al 10 los cuales corresponden al perfil paralelo al TEM-I con una separación de 64.5m entre ellos, se observa de igual forma de oeste a este, con una separación de 36m entre cada TEM. Lo que se observa es una aproximación en la interpretación de este TEM

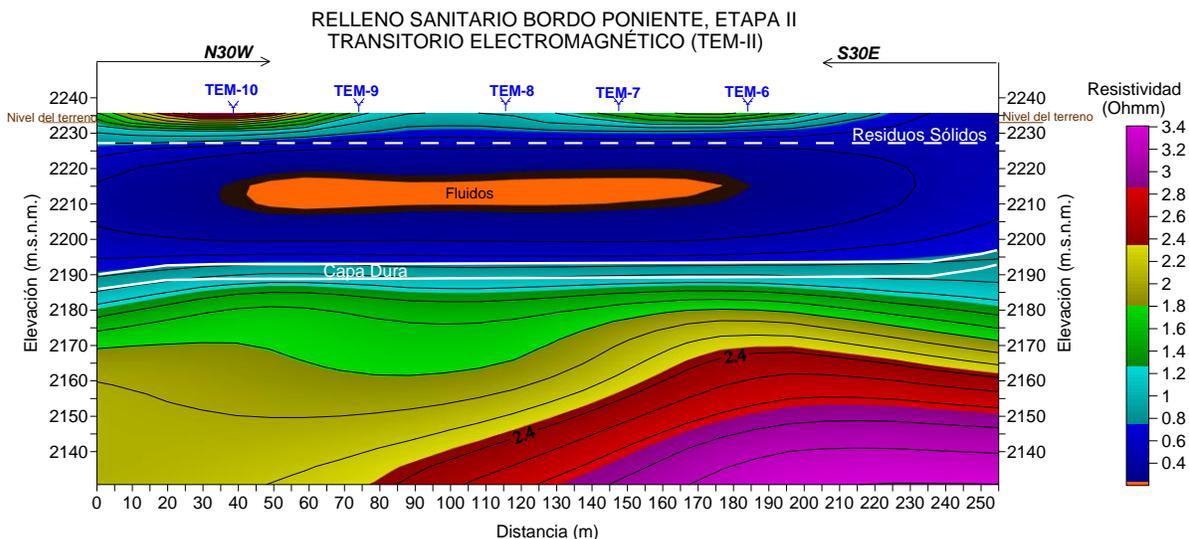


Figura IV.16 Perfil TEM-II de transitorios electromagnéticos

El perfil TEM-III de transitorios electromagnéticos (Figura IV.17), pertenece a la Etapa IV del relleno sanitario Bordo Poniente, ubicado sobre la Macrocelda I donde el nivel del terreno esta a los 2233m.s.n.m. llegando a un nivel de 2241.5m.s.n.m

(diferencia de 8.5m)., en la parte mas alta de la Macroelda, que se encuentra inmersa en una zanja de 3.5m de profundidad completando 12m del espesor de los residuos sólidos. Este perfil se compone de cinco TEM's del 11 al 15, donde tienen una separación entre ellos de 40m, se observa de este a oeste, con una longitud total de 270m y como dato extra se encuentra sobre el "eje C" (Investigaciones electrofísicas de la Tierra S.A. de C.V.) de monitoreo que realiza la Subdirección Técnica del Distrito Federal a cargo de la operación del relleno sanitario en la sección de 1+460 a 1+620. El perfil TEM-III tiene un rumbo N35°W, se observa de este a oeste cubriendo una profundidad total de 100m.

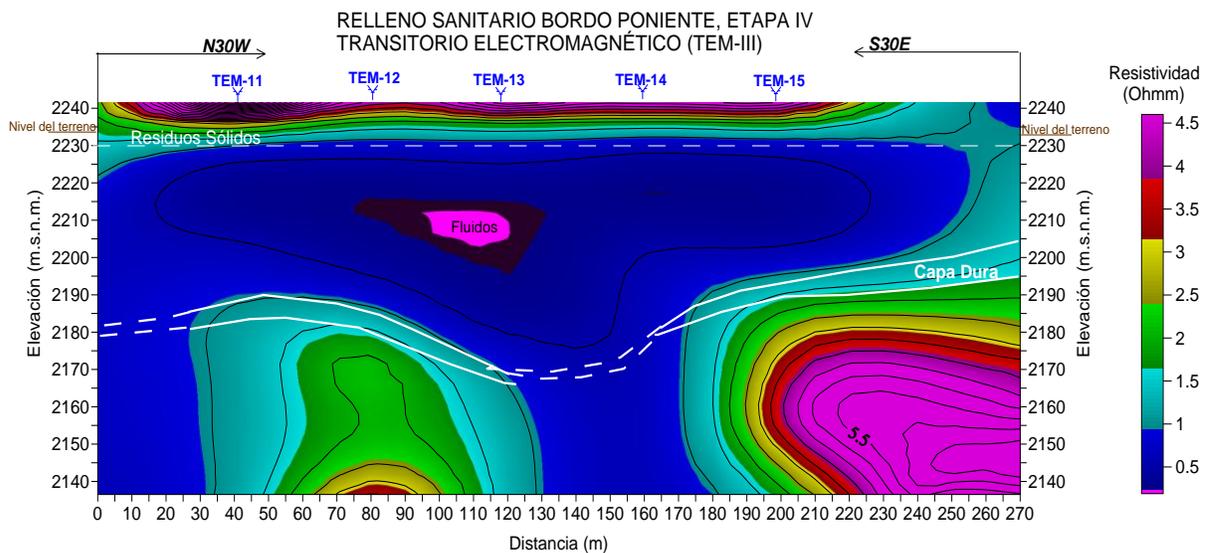


Figura IV.17 Perfil TEM-III de Transitorios electromagnéticos

El perfil TEM-IV de transitorios electromagnéticos (figura IV.18), se compone de cinco TEM's del 16 al 20 presentando un perfil paralelo al TEM-III a una distancia de 64.5m al oeste; el perfil presenta una altura menor al perfil anterior con 2240m.s.n.m., pero el espesor del relleno sigue siendo de 12m, la longitud total del perfil es de 300m y la separación de los TEM's es de 40m.

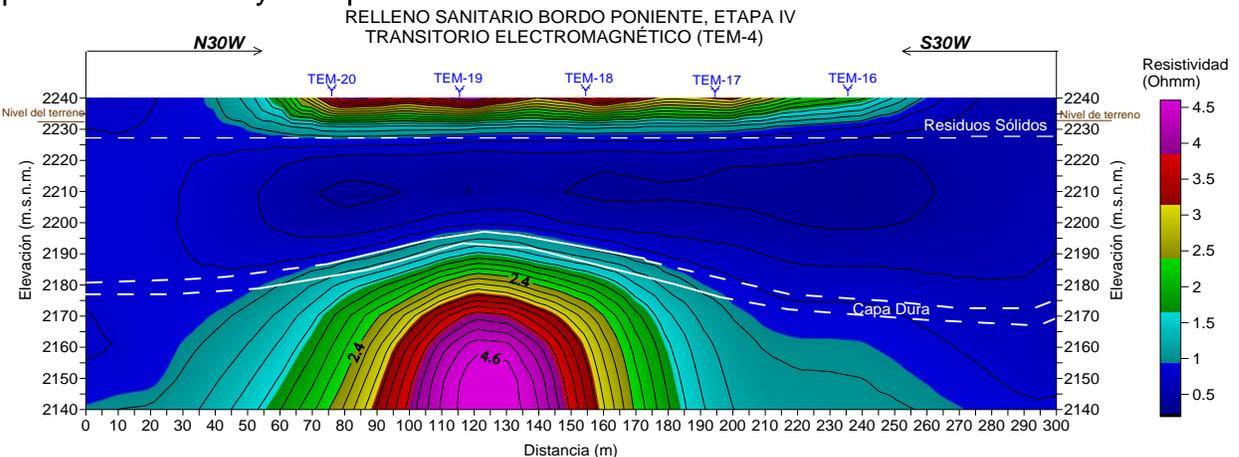


Figura IV.18 Perfil TEM-IV de Transitorios electromagnéticos

El transitorio electromagnético en el terreno natural (figura IV.19), es de suma importancia debido a que se busca un sitio lo menos alterado por la construcción del relleno sanitario, el cual no debe alejarse significativamente de los TEM's realizados. El perfil T-Natural se ubicó prácticamente norte-sur y se observa de este a oeste (de derecha a izquierda), la distancia entre los TEM's es de 260m, y el perfil tuvo una cobertura total de 400m de longitud, es posible observar la diferencia de alturas de los TEM's, el TEM-21 se ubica en la cuneta del camellón de la Autopista Peñón- Texcoco que se encontraba en zona baja de altitud, mientras que el TEM-22 se ubica en la base de la Macrocelda I del Relleno Sanitario Bordo Poniente; como observación adicional todos los caminos fuera de la Autopista son caminos de terracería con muy poca cubierta vegetal.

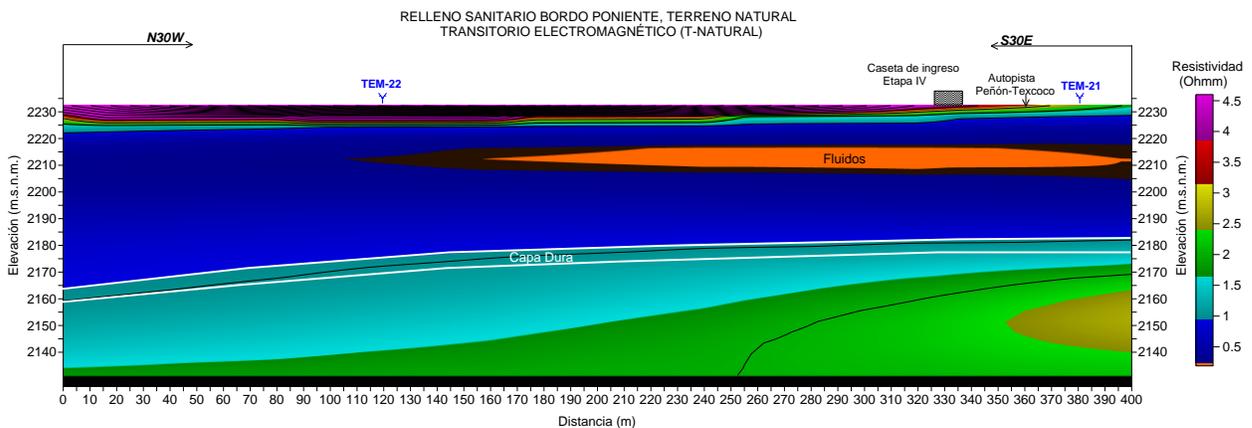


Figura IV.19 Transitorios electromagnéticos en terreno natural

IV.2.2 MÉTODOS SÍSMICOS.

La sismica se emplea para encontrar rasgos en el subsuelo, usando una fuente de ondas sísmicas y un grupo de sensores que grabarán los movimientos provenientes del subsuelo (figura IV.20).

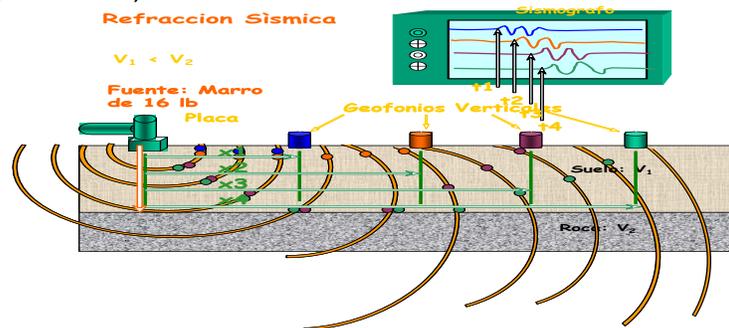


Figura IV.20 Equipo sísmico

Estas perturbaciones sísmicas, originan los diferentes tipos de ondas que conocemos, entre las cuales destacamos las ondas Love, ondas Rayleigh, ondas S y ondas P. Estas últimas son también conocidas como ondas longitudinales las cuales resultan de interés fundamental en la prospección con sismica de refracción.

Los principios y leyes principales, que rigen la propagación y trayectoria de las ondas sísmicas durante el proceso de refracción, son:

Principio de Huygens: se basa en una construcción geométrica simple que permite calcular, a partir de una posición determinada, la posición futura del frente de onda. Establece que: “todos los puntos de un frente de onda actúan como puntos de origen para la producción de nuevos frentes de ondas que se extienden en todas las direcciones. El nuevo frente de ondas será la envolvente de todos los pequeños frentes de onda”

Principio de Fermat: establece que: “un rayo luminoso que va de un punto a otro sigue una trayectoria tal que, comparada con otras trayectorias cercanas, el tiempo que requiere para recorrerla es mínimo”

Ley de Snell: Se fundamenta en los procesos de transmisión y reflexión de las ondas a través de interfases; superficies, que separan medios cuyas propiedades elásticas son distintas. A través de las ecuaciones de Snell es posible determinar el comportamiento de las reflexiones y refracciones de las ondas. Se representa un primer medio con α_1 , β_1 y ρ_1 (α es la velocidad de onda P y β velocidad de onda S) y un segundo medio con α_2 , β_2 y ρ_2 . El ángulo de incidencia del rayo de ondas P sobre la interfase de los dos medios es θ_1 , el ángulo de refracción de la onda P en el segundo medio es θ_2 , el ángulo de reflexión de la onda S es ϕ_1 y el ángulo de refracción de la onda de cizalla en el segundo medio es ϕ_2 . Snell demostró entonces que el ángulo de incidencia de la onda es igual al ángulo de reflexión de esa onda en el primer medio. Las ecuaciones de Snell requieren entonces la siguiente condición:

$$\frac{\sin \theta_1}{\alpha_1} = \frac{\sin \phi_1}{\beta_1} = \frac{\sin \theta_2}{\alpha_2} = \frac{\sin \phi_2}{\beta_2} = p$$

Con p como el parámetro de rayo.

En el caso del levantamiento sísmico se empleó un Sismógrafo de 24 canales en pantalla, escalado hasta 96, diseñado para levantamientos de refracción, reflexión levantamiento CDP y pozo; además de emplear 72 geófonos de componente vertical y como fuente un marro de 16 libras, naturalmente con sus cables conectores y accesorios.

STRATAVIEW Exploration Seismograph

La señal proveniente de los detectores es amplificada y procede a muestrearla a ciertos intervalos de tiempo (2-4 milisegundos) para grabarse.

Tipos básicos de sistemas de grabación digital.

Con amplificadores sísmicos de ganancia binaria.

Con amplificadores sísmicos de ganancia instantánea de punto flotante.

Ventajas: rango dinámico amplio, recupera la verdadera amplitud de la señal y el ruido instrumental es mínimo (0.1 microvolt).



Especificaciones:

Peso: 17 kg.

Dimensiones: 43x25x46 cm.

Monitor: Cristal líquido, 15x20 cm., con luz interna.

Impresión: 11 cm., impresión térmica de alta resolución.

El levantamiento de datos de sismica de refracción en las etapas II y IV del relleno Sanitario Bordo Poniente, se desarrolló empleando una geometría a detalle con la distancia entre los geófonos de 1.5m, se obtuvieron un total de 50 sismogramas por cada etapa, con el objetivo de obtener la mayor cantidad de información del subsuelo, en la figura IV.21 se observa el levantamiento y el arreglo para un tramo de 24 canales (perfil).

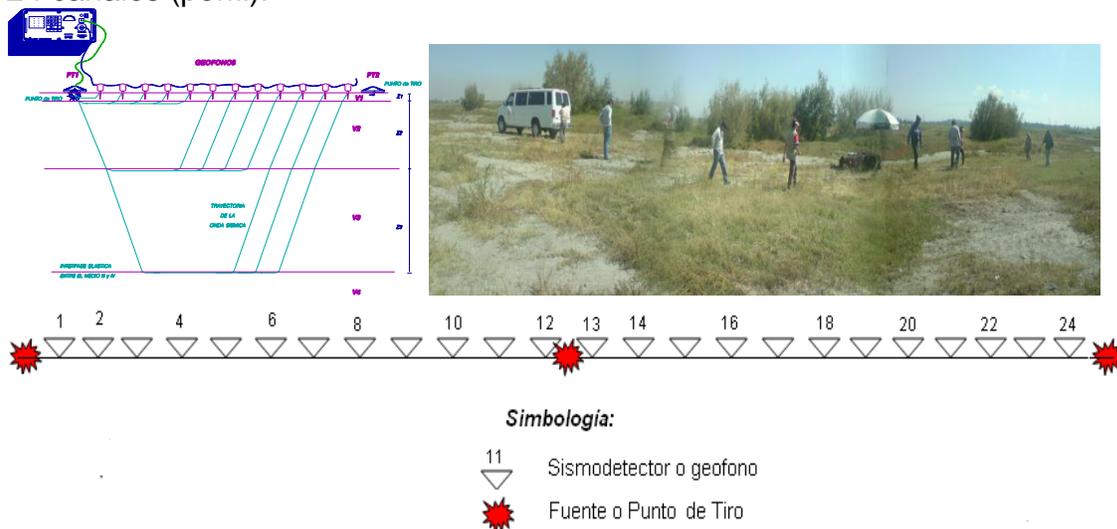


Figura IV.21 Geometría del levantamiento de sismica de refracción

Los sismogramas se obtienen uno por cada fuente o punto de tiro que se establece, una vez que se revisa que la geometría de los sismogramas es correcta se realiza una representación grafica de los primeros arribos en tiempo (milisegundos) contra la distancia de cada canal (metros), con la información de primeros arribos de cada sismograma; en la figura IV.22, se ilustra la generación del diagrama tiempo contra distancia a partir de un levantamiento tradicional que consiste en colocar las fuentes en los extremos del tendido de geófonos.

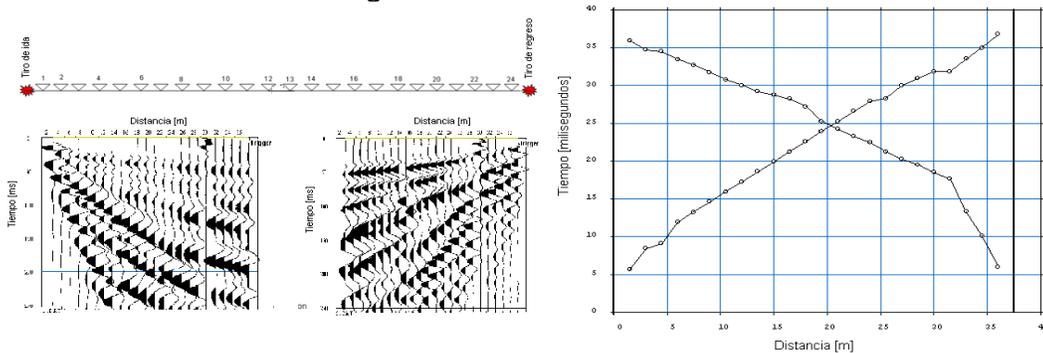


Figura IV.22 Diagrama tiempo contra distancia (derecha), de los sismogramas (izquierda)

Se realiza el análisis de cada capa propuesta respecto al arribo y su cambio de inclinación (inflexión) para obtener un modelo de capas por diferencia de velocidades. El modelo de capas responde a los contrastes en las características del terreno como son el tipo de material, su compactación, su densidad, su porosidad, contenido de fluido en sus poros, entre otros. Finalmente se realiza una inversión de las velocidades por medio de los atributos sísmicos de cada canal y su respuesta de viaje para cada material y su trayectoria realizando una reconstrucción de esta respuesta, su representación gráfica es a color y delimita las diferentes velocidades en metros/segundos y las profundidades en metros. Estas presentaciones se logran con el apoyo de software especializado, uno de los más sencillos y el utilizado es el *Seisimager* de *Oyo Corporation*, con sus módulos *Pickwin*, para la parte de reflexión y para la refracción además el módulo *Plotrefa*.

La parte de adquisición de reflexión, se obtuvo al mismo tiempo del levantamiento de sísmica de refracción, esto quiere decir que la geometría de los geófonos es la misma 1.5m entre cada geófono, el ajuste fue realizar un levantamiento continuo y sistemático a cada 9m (6 geófonos) se generó un sismograma iniciando en el geófono 1. En el capítulo V se presentan los resultados del estudio.

El levantamiento de datos de sísmica de refracción se realizó con la geometría de distancia entre los geófonos de 1.5m, se obtuvieron hasta cuatro sismogramas por tramo de 24 geófonos, tratando de obtener la mayor cantidad de información del subsuelo, en la figura IV.33 se observa el arreglo para un tramo de 24 canales (de forma visual) y geófonos (sismodetectores en el levantamiento en campo).

Los sismogramas se obtienen uno por cada fuente o punto de tiro que se establece, una vez que se revisa que la geometría de los sismogramas es correcta se realiza una representación gráfica (diagrama de distancia contra tiempo) de los primeros arribos en tiempo (milisegundos) contra la distancia de cada canal (metros). Se realiza el análisis de cada capa propuesta respecto al arribo y su cambio de inclinación (inflexión) para obtener un modelo de capas por diferencia de velocidades de cada capa. El modelo de capas responde a los contrastes en las características del terreno como son el tipo de material, su compactación, su densidad, su porosidad, contenido de fluido en sus poros, entre otros. Finalmente se realiza una inversión de las velocidades como en la parte de refracción, pero solo se llega a la representación de los sismogramas procesados y a partir de ahí se identifican y marcan los reflectores que por medio de la forma y comportamiento de la ondícula se puede asociar a fluidos (líquido o gas), lo que se vincula como el metano atrapado en entre las capas impermeables formando lentes, esto se observa al cambiar la ondícula visiblemente de un valle a una cresta o viceversa.

La revisión de la parte sísmica se lleva de forma similar a la parte electromagnética, en este caso se visualizará el primer perfil E4_L1, aunque la etapa IV tiene 5 perfiles, que presentan los tres análisis, el Diagrama tiempo contra distancia (dromocrona), el modelo de capas y el perfil con inversión. El perfil E2_L1 con rumbo N35°W cubre una longitud de 144.5m, observándose el perfil de este a oeste (figura IV.23). Es la

respuesta de todo el análisis de la sísmica de refracción que se llevó a cabo para cada perfil (para ver todos los perfiles de sísmica de refracción referirse al Anexo A).

Analizando el diagrama tiempo contra distancia (dromocrona), de la figura IV.24 (parte superior), se compone de cuatro tramos de 24 canales, sumando 145.5 metros de longitud (con sus respectivas fuentes en los extremos) es posible observar las fuentes empleadas al graficarse forman una “V”; es importante señalar que ésta presenta huecos intermedios visibles a partir de los sismogramas generados con fuentes más alejadas para cada tramo, lo que significa que en el subsuelo se tiene una discontinuidad estructural; el diagrama tiempo contra distancia refleja por lo menos tres inflexiones y para cada una de ellas una velocidad y capa diferentes, los cambios de colores en los círculos representan las diferentes capas; para este perfil se obtuvieron pseudo-velocidades de 122, 172, 142 y 312 metros/segundos.

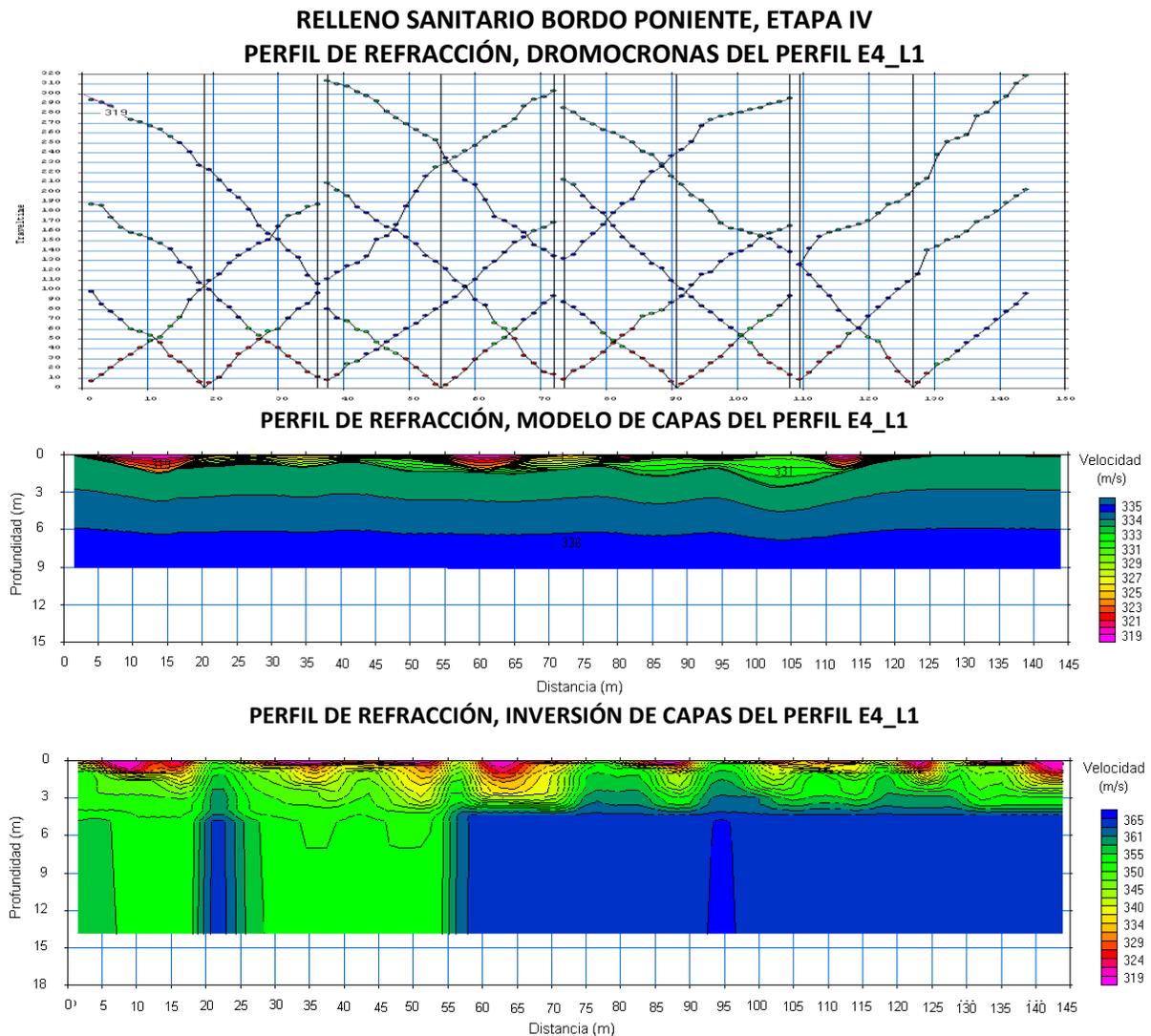


Figura IV.23 Sísmica de Refracción del Perfil E4_L1

El perfil donde se representan las pseudo-velocidades es el perfil de modelo de capas en la figura III.23 (parte intermedia), se puede observar que las capas con las velocidades anteriormente mencionadas se representan con colores, los rosas representan los valores más bajos de velocidades entre 318-320 m/s, los tonos amarillos valores intermedios de velocidades entre 324-327 m/s y los azules valores altos de velocidades entre 334-336 m/s; en donde se observa un material de bajas velocidades superficialmente con un espesor variable máximo de hasta 2 metros mostrándose discontinuo a lo largo del perfil, posteriormente se observan pseudoestratos de velocidades muy cercanas, entre 334 a 336 m/s cercanas a 3 metros de cada pseudoestrato pudiendo establecerse cuatro, y una profundidad de investigación de 9 metros.

El perfil de inversión del modelo anterior, figura IV.23 (parte inferior), donde se lleva a cabo un procesamiento numérico de los datos de campo para la reconstrucción del modelo con valores reales muestra que se pudo obtener información máxima de 6 metros de profundidad, debido principalmente a la presencia de fluidos en gran cantidad que para este método de investigación atenúan el viaje de las ondas por tratarse de una capa no elástica que altera la velocidad, además de que los residuos sólidos, aunque las densidades de compresión son del orden de hasta 1000 kg/m^3 , se comportan como un medio que disipa (alta porosidad); si se pone en perspectiva el suelo tiene una densidad de $1.55\text{-}1.96 \text{ gr/cm}^3$ ($1.55\text{-}1.96 \text{ kg/m}^3$). Los valores de baja velocidad aparecen superficialmente y distribuidos a lo largo del perfil con velocidades de 318 m/s y espesores variables de centímetros hasta 2 metros; a profundidad, se observan capas en tonalidades verdes con velocidades entre 340 y 350 m/s con un máximo de 5m, establece estructuras de reacomodo de los residuos sólidos de forma lateral.

SÍSMICA DE REFLEXIÓN

Los sismogramas de reflexión y su procesamiento, debe considerarse la técnica de adquisición para el tratamiento de los datos, en este caso se utilizó la técnica CDP (Common Depth Point), el levantamiento (figura III.24), se realizó contemplando puntos de tiro continuos y aprovechando el tendido de refracción; se esquematiza con dos tramos de 24 canales; para este caso se obtienen nueve sismogramas a los cuales se les realiza una corrección estática (eliminación de los primeros arribos), un apilado, control de ganancia y corrección dinámica (migración).

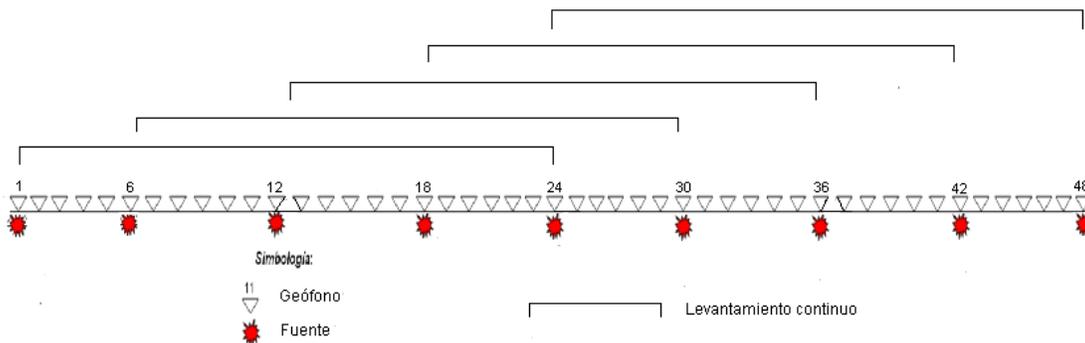
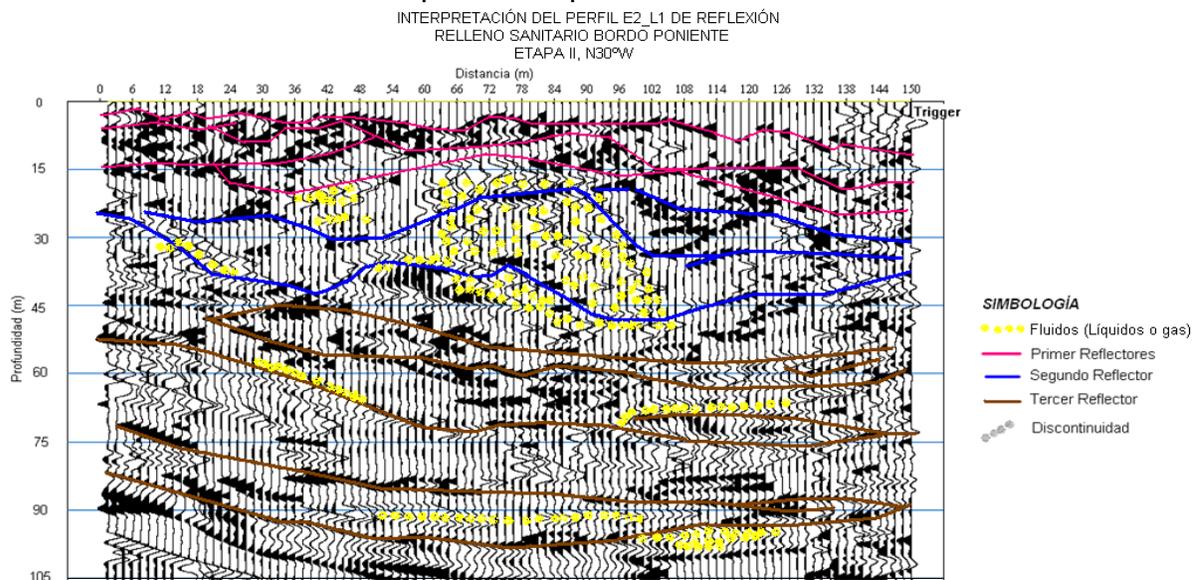


Figura IV.24 Levantamiento continuo de la sísmica de reflexión

En el resultado del procesamiento, donde se eliminaron los efectos de refracción, se suprimió el sobretiempo contra distancia, se aplicó el control de ganancia automático (después de cada proceso), se realizó el apilamiento vertical y se realizó la migración en tiempo para corregir el tiempo en reflectores, se muestra en las figuras IV.25 y IV.26 en presentación americana, (parte superior o cima iluminada) con delimitación de los reflectores presentes visibles con líneas sólidas y la presencia de fluidos (líquidos o gases). Los sismogramas presentan información sísmica de calidad regular a buena debido a la alta porosidad, la falta de consolidación superficial, la situación general de los rellenos sin homogeneidad en sus residuos sólidos; con respecto al registro de tiempo se grabaron 1024 milisegundos, que al realizarse todo el procesamiento se obtiene una profundidad que relaciona la velocidad media que para esta zona fue de 375m/s por el tiempo con una doble reflexión.

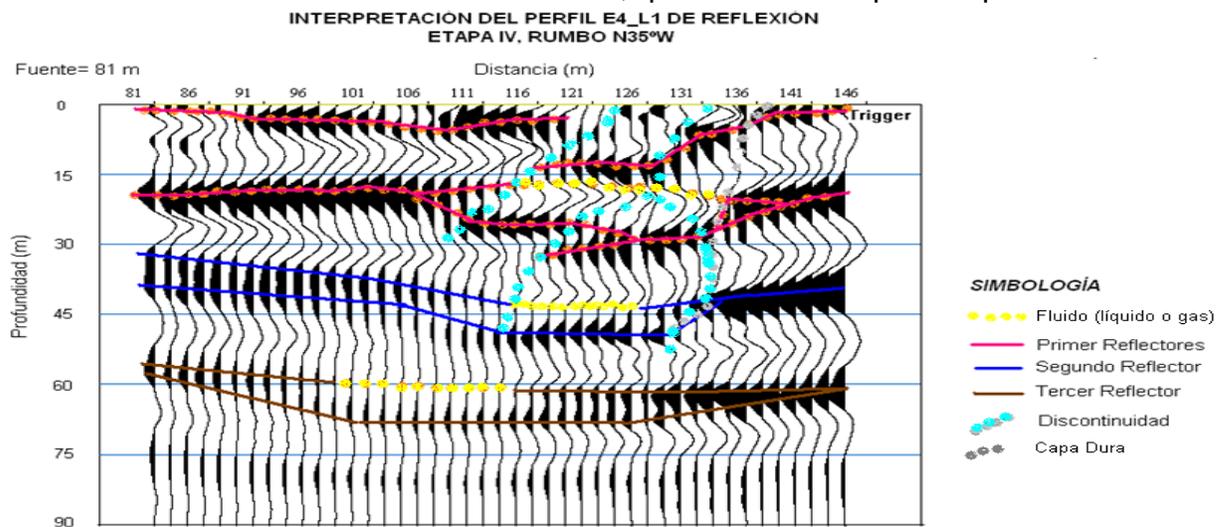


Los resultados de los perfiles de reflexión, se hacen como en los casos previos, primero la Etapa II y después de la Etapa IV, aclarando que se cubren los mismos perfiles que en la parte de refracción, solo se observarán los perfiles E2_L1 para la etapa II y el perfil E4_L1 para la etapa IV, para visualizar los resultados de los demás perfiles, ver Anexo A.

En la Etapa II se presenta una profundidad máxima de los perfiles de 105m; el perfil E2_L1 tiene un rumbo N30°W, una longitud total de 144m y para la interpretación se establecen tres tipos de reflectores el primero que se establece como el más superficial entre 0 a 25m, que en general es el más irregular debido al relleno sanitario y parte de la formación arcillosa superior (FAS) de materiales arcillosos con alto contenido de agua; el segundo reflector es de profundidad intermedia de 26 a 70m, que cubre parte de la formación arcillosa superior (FAS), la capa dura (CD) y la formación arcillosa inferior (FAI), donde se observan fluidos en color amarillo a una

profundidad de 16 hasta 52m extendiéndose longitudinalmente de 36 a 105m y finalmente el tercer reflector desde 65 a 105m, que cubre los depósitos profundos.

En la Etapa IV se presenta una profundidad máxima de los perfiles de 90m; el perfil E4_L1 tiene un rumbo N35°W, una longitud total de 65m (perfil incompleto) y para la interpretación se establecen tres tipos de reflectores el primero que se establece como el más superficial entre 0 a 35m, que en general es el más irregular debido al relleno sanitario y parte de la formación arcillosa superior (FAS) de materiales arcillosos con alto contenido de agua; el segundo reflector es de profundidad intermedia de 32 a 50m, que cubre parte de la formación arcillosa superior (FAS), la capa dura (CD) y la formación arcillosa inferior (FAI), donde se observan fluidos en color amarillo a una profundidad de 16m hasta 44m extendiéndose longitudinalmente de 110 a 135m y finalmente el tercer reflector desde 51 a 90m, que cubre los depósitos profundos.



En el siguiente capítulo se integra toda la información obtenida en campo para dar la interpretación final de las estructuras obtenidas con los métodos electromagnéticos y los métodos sísmicos.

CAPITULO V RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

V.1 RESULTADOS

Los perfiles de Exploración Geofísica en el Relleno Sanitario Bordo Poniente se ubican en las Etapas II y IV (figura V.1), cubriendo un área de 10694.25 m² en cada etapa, se contempló un levantamiento de datos geofísicos cubriendo los sitios seleccionados de la mejor forma en ambas etapas; es importante señalar, que el muestreo es representativo para cada etapa, como se presenta en la figura V.1, la Etapa II cuenta con 80 hectáreas y la Etapa IV con 375 hectáreas.



Figura V.1 Sitios explorados con métodos geofísicos.

Para obtener las características del relleno sanitario se debe manejar una geometría del levantamiento adecuada y en donde al aplicarse más de un método existan coincidencias totales o parciales; en el levantamiento de datos Geofísicos del Relleno Sanitario Bordo Poniente se buscó ambas coincidencias, la geométrica y la de ubicación; en el primer caso la sísmica tiene separación entre sensores de 1.5m y para el caso los Transitorios Electromagnéticos (Temas) se levantaron en cada intersección de las líneas sísmicas, y para el segundo caso, se ubicaron y direccionaron en el mismo sentido para facilitar la logística.

Los resultados se presentarán por Etapa y perfiles, iniciando con la Etapa II y continuando con la Etapa IV, presentando los perfiles de los Transitorios Electromagnéticos (Temas), seguido por el de sísmica de refracción y finalmente el de la sísmica de reflexión, en su longitud y cobertura real. Una vez revisada y analizada toda la información obtenida se procede a conjuntarla para obtener una interpretación de las zonas estudiadas para dar las conclusiones.

La ubicación de los levantamientos geofísicos se muestra en la figura V.2, en donde se esquematizan los perfiles realizados de Transitorios electromagnéticos y de sísmica.

Los perfiles comunes para la Etapa II y Etapa IV de los trabajos de Geofísica son el TEM-I (electromagnética) con E2_L1 (sísmica) y el TEM-III (electromagnética) con E4_L1 (sísmica); para los casos de perfiles perpendiculares se emplea la información puramente estructural que provee la sísmica (refracción y reflexión) y finalmente se presentan los TEM-II y TEM-IV que son paralelos y correspondientes a los primeros. En el análisis de la información se presentan las longitudes cubiertas con los métodos aplicados, aprovechando las características que cada método provee.

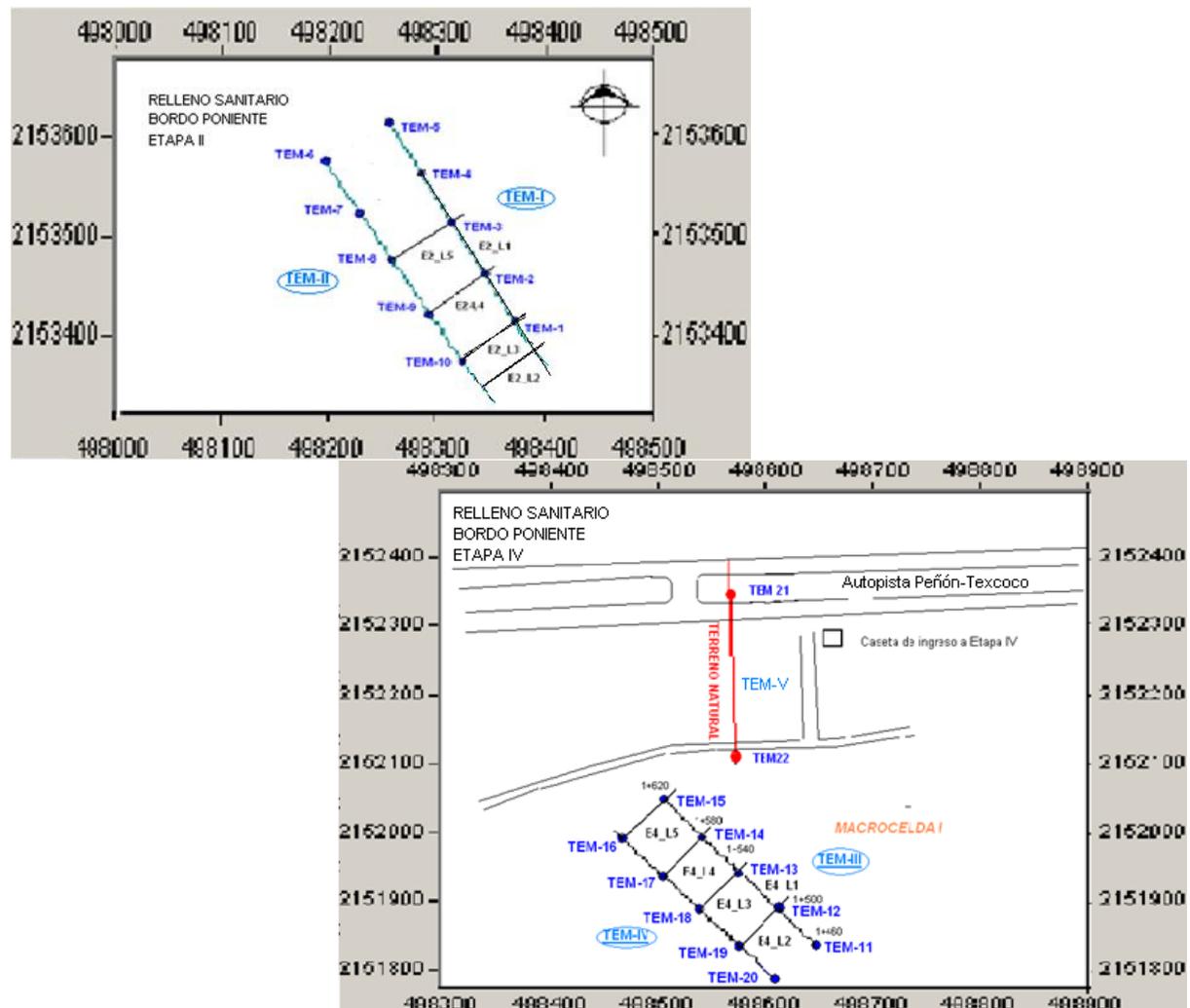


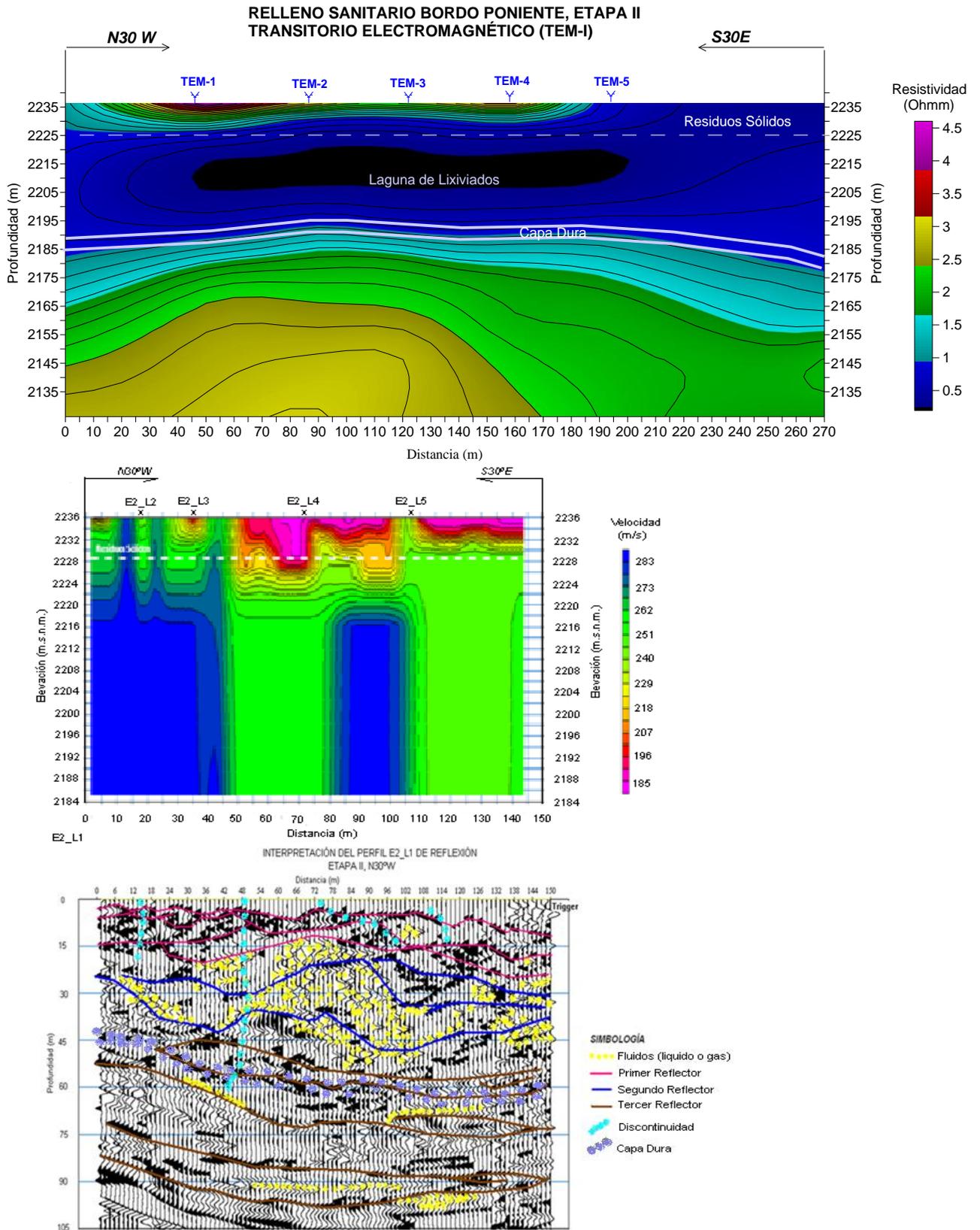
Figura V.2 Perfiles de Métodos Geofísicos en las Etapas II y IV

El perfil del TEM del terreno natural (T-natural), es el perfil inicial debido a que presenta la información del terreno y su cambio de un área fuera de la celda pero cercana a la macro celda I (TEM-22) de estudio y a otra sobre la Autopista Peñón-

Texcoco (TEM-21). La distancia entre los TEMs es poco más de 250m, aunque el perfil tiene una longitud total de 400m, con rumbo N-S.

El TEM en terreno natural (figura V.3), muestra la disposición general de los materiales identificados con las resistividades visualizadas. El TEM-21, que se encuentra sobre el camellón de la Autopista Peñón-Texcoco y el TEM-22 ubicado en la periferia de la macrocelda I de la Etapa IV, el perfil se establece como el sitio virgen, donde se observa una capa superficial de resistividad intermedia, que se asocia a un lugar con suelo y plantas de raíces cortas; enseguida a profundidad se observa una capa que se asocia a la formación superficial (FS), que en este caso no ha sido removida y puede alcanzar una profundidad hasta 5m incluyendo el suelo formado; bajo esta se observa una capa de mayor espesor (43m), pero de menor resistividad (color azul) que contiene un lente conductor de 13m de espesor y 290m de longitud asociado a fluidos; a profundidad (46m) se visualiza la capa dura (CD) con espesor de 4m y finalmente se observan capas asociadas a la formación arcillosa inferior (FAI), con espesor de 15-18m y los depósitos profundos con un espesor variable.

La zona de residuos sólidos para la etapa II del Relleno Sanitario Bordo Poniente (figura V.4), inicialmente contaba con un espesor de 8m, pero el terreno se ha compactado hasta tener a la fecha un espesor entre 7.2 y 6.2m (línea discontinua), el perfil TEM-I presenta la respuesta en la superficie de una anomalía conductora en tonos oscuros, cuya longitud abarca 170m y un espesor máximo de 7m; el comportamiento indica que la meteorización debido al flujo y acarreo de materiales por el agua permitió la integración del relleno al terreno habiendo dos zonas de anomalías conductoras superficiales donde posiblemente el material es de difícil descomposición debido a lo heterogéneo de los residuos sólidos depositados, por esta misma razón se observa una anomalía de valores conductores menores a 0.5 Ohmm a una profundidad de 12m con un espesor de 18m y una longitud de 155m, con un alto contenido de fluidos, situación observada en el perfil de sísmica de reflexión (E2_L1), ya que la presencia de fluidos se visualiza en tonos amarillos ubicado dentro del segundo reflector antes de llegar a la capa dura, presumiblemente ubicado en un estrato de arena volcánica en estado suelto con espesor variable reportado de hasta 2m; el cual, pertenece a la formación arcillosa superior (FAS) con un contenido de agua de 600% y es altamente deformable. A 45m se observa la capa dura (CD), con un espesor variable de 2 a 3.5m que presenta deformación y no en un estrato horizontal como se establece en la geología; posteriormente aparece una capa de espesor variable entre 7m en el centro hasta 22m en la periferia del perfil que corresponde a la formación arcillosa inferior (FAI), con contenido de 255% de agua y finalmente a los 60m de profundidad en la parte central se observa en tonos verde y café los depósitos profundos (DP), que incluye a la tercera y parte de la cuarta formación arcillosa (TFA y CFA), en las cuales disminuye el contenido de agua de 147% y 37%, observándose valores de resistividad mayores. El perfil sísmico de reflexión evidencia discontinuidades (línea punteada azul) que se corroboran con la sísmica de reflexión al visualizarse como bloques de colores arrastrados a profundidad, las discontinuidades van de la superficie hasta los 60m.



El TEM-II (figura V.4), se ubica paralelo al TEM-I con una separación de 64.5m entre ellos, y perpendicular a los perfiles sísmicos E2_L2, E2_L3, E2_L4 y E2_L5, los TEMs que lo conforman cubren una longitud de 144m (TEM-1 al TEM-10), pero la longitud total del perfil electromagnético es de 255m, se observa de este a oeste; siguiendo el análisis por zonas para este caso solo se puede describir la parte de resistividad diferenciando la zona del relleno de 0 a hasta los 20m, la zona intermedia de los 20m a 45m y la zona no alterada de los 45 a 100m.

La zona del relleno conformada por residuos sólidos (línea punteada hasta 7.2m) y la formación arcillosa superior (FAS). El perfil ubica el relleno de residuos sólidos resaltando dos anomalías resistivas en el TEM-10 y entre el TEM-7 y TEM-6, se ubica una laguna superficial a 20m de sus centros de atribución, lo que se asocia a escurrimientos en el sitio. La zona establece el inicio de una anomalía eléctrica conductora de valores <0.5 Ohmm, a 12m de profundidad, con un espesor de 14m y 140m de longitud (tonos naranja).

La zona intermedia conformada por materiales de la formación arcillosa superior y la capa dura (CD), presenta una zona conductora donde se observa un lente de fluidos de 12m de espesor y de 140m de longitud a una profundidad de 13m, seguido de la capa dura (CD) de espesor 3m que se encuentra a una profundidad de 43m.

La zona no alterada pudiera ser conformada por la formación arcillosa inferior (FAI) y depósitos profundos (DP) la cual presenta una variedad de tonalidades a profundidad estableciendo diferencias de resistividad de los materiales encontrados.

El perfil E2_L2 corresponde solo a la parte de sísmica (figura V.5), perpendicular a los TEM-I y TEM-II en la intersección de los TEMs 1 y 10; el análisis de los perfiles, se visualiza de este a oeste, la profundidad de las tres zonas observables son: la zona del relleno (0-22m), la zona intermedia (22-75m) y la zona no alterada (75-105m).

En el perfil de la zona del relleno reportado entre 6.2 y 7.2m, se observa que el relleno ha sido en gran parte reintegrado al terreno natural, existen estructuras menores a los 5m, y estructuras aisladas que reflejan un tipo de residuo más compacto o de mayor densidad en los primeros 5m con espesor de 2.8m (entre 15 y 48m, con espesor de 4m y entre 60 a 72m con espesor de 3.5m). Los agrietamientos presentes como alineamientos son vinculados a regímenes distensivos de esfuerzos, es decir, un adelgazamiento del relleno que al parecer se colapsa hacia el interior por cargas verticales diferenciadas. Para la parte del perfil de reflexión se observan los primeros reflectores sin continuidad clara asociadas a la zona de relleno con una parte de la formación arcillosa superior (FAS), hasta 22m. La presencia de discontinuidades asociadas a agrietamiento y fracturamiento, visibles en el sitio que son superficiales y la presencia de fluidos se limita a una franja de 48-52m, a una profundidad de 7m y de 7m de espesor, pero no se asegura sea biogás debido a la falta de información de resistividad.

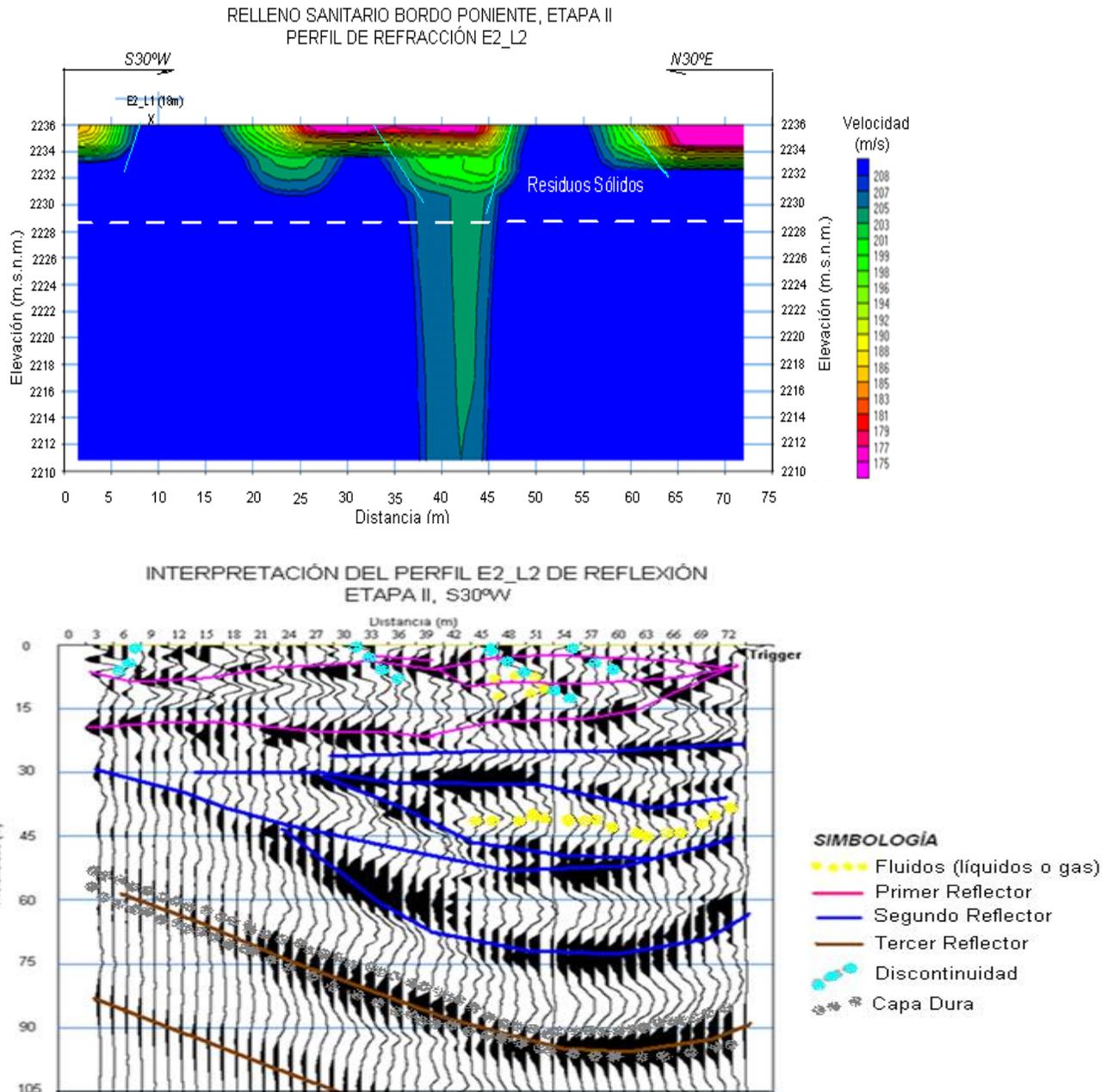


Figura V.5 Perfil sísmico (E2_L2) de refracción y reflexión de la Etapa II

La zona intermedia visible solo en el perfil de reflexión, que se encuentra ubicada en la otra parte de la formación arcillosa superior (FAS), con el segundo reflector (línea azul), dentro de este reflector se aprecia un receptáculo (lente) con fluido dentro (línea amarilla discontinua) ubicada entre los 32 y los 50m, a una profundidad de 38m y con un espesor de 8m, que corresponde a lentes y estratos arenosos, limoarenosos, formando una pequeña cuenca o receptáculo. El reflector más profundo de esta zona se observa con mayor continuidad y forma parte de la zona no alterada.

La zona no alterada inicia con la última línea azul del segundo reflector completándose con el tercero (línea café), de los 45m hasta los 105m, que reflejan una continuidad en capas y en donde se asocia la presencia de la capa dura (CD), a los 50m la que presenta una deformación hacia el oeste, como una cuenca.

El perfil E2_L3 (figura V.6), de 72m de longitud total; se analiza como los anteriores por zonas: la zona del relleno que abarca de 0 a 20m, la zona intermedia de 22 a 65m y la zona no alterada de 50 a 105m.

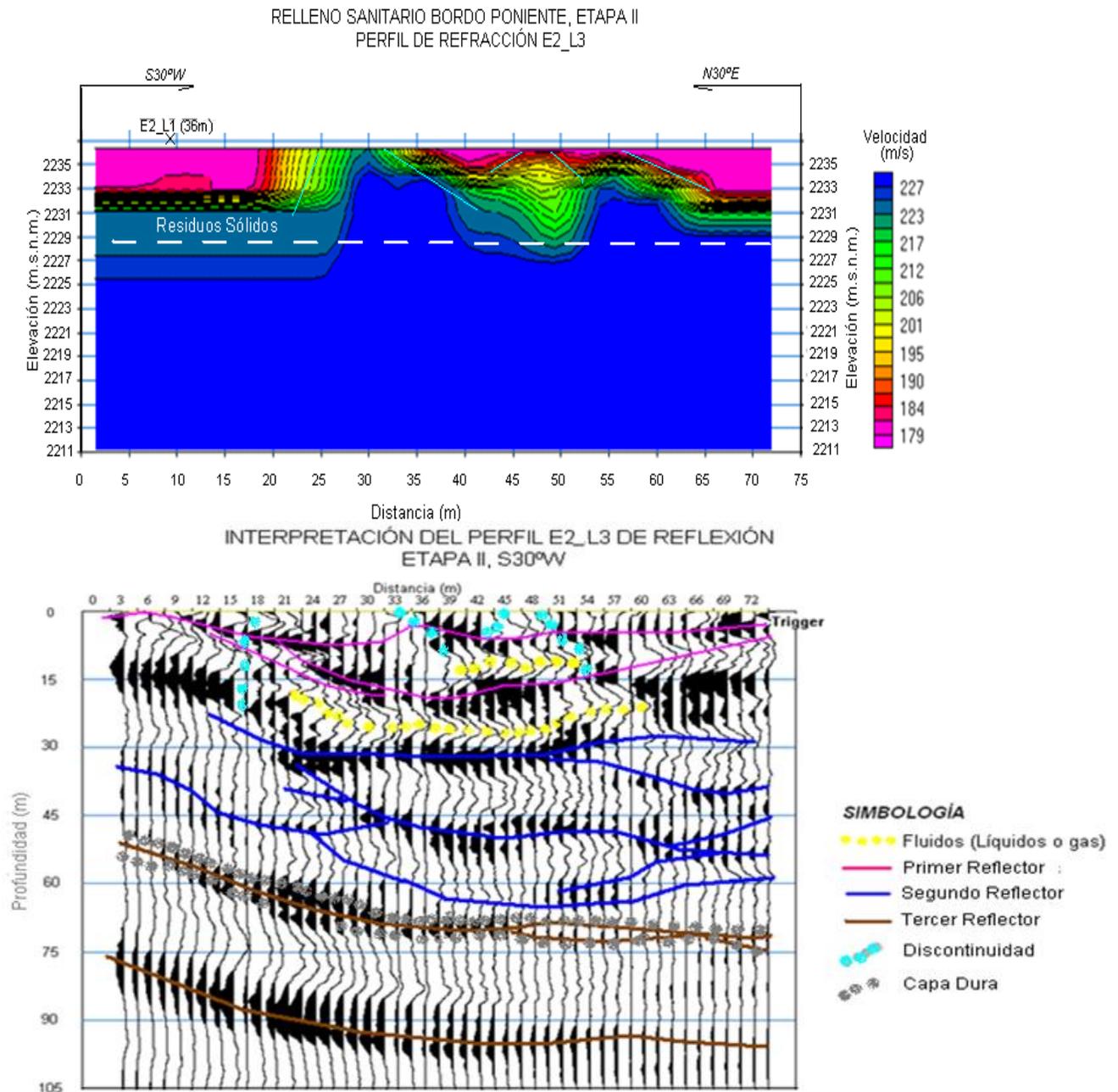


Figura V.6 Perfil sísmico (E2_L3) de refracción y reflexión de la Etapa II

La zona del relleno (0-20m), la conforma el relleno sanitario (línea punteada a 7.2m) y parte de la formación arcillosa superior (FAS), se concentra dentro del primer reflector (línea rosa) del perfil de reflexión en donde se observan dos reflectores que en general tienen una continuidad y describen un patrón lenticular o depósito de fluidos presentes en la reflexión en las zonas donde la refracción pierde definición de las anomalías (perfil superior). Además, esas anomalías presentan velocidades bajas, de 179 a 200m/s, que son interrumpidas por fracturas o agrietamientos presentes en ambos perfiles; la presencia de fluidos se observa en el perfil de reflexión entre los 37 y 52m del perfil a una profundidad de 12m y un espesor de 3m.

La zona intermedia (21-65m) solo determinada con el perfil de reflexión, está conformada por la formación arcillosa superior (FAS) y la capa dura (CD), y delimitada por el segundo reflector (línea azul); la presencia de fluidos se encuentra entre el primer y segundo reflector y entre los 20 y 60m del perfil, a una profundidad de 17m y con un espesor de 10m, fluidos presentes entre reflectores con forma de cuenca o depósito.

La zona no alterada (50-105m), inicia a partir de la capa dura (CD), a los 50m de profundidad que presenta una deformación en forma de depósito hacia el oeste, la formación arcillosa inferior (FAI) y parte de los depósitos profundos se encuentran delimitados por el tercer reflector (línea café).

En el perfil E2_L4 por ser perpendicular al E2_L1, se analizan los 72m de longitud de la parte sísmica (figura V.7), en este caso la zona de relleno comprende de 0 a 25m, la zona intermedia de 23 a 62m y la zona no alterada de 63m a 105m.

La zona de relleno (0-25m), está conformada por el sitio de disposición de residuos sólidos (línea punteada, hasta 7.2m de profundidad) y parte de la formación arcillosa superior (FAS), en el perfil de refracción las velocidades se observan de forma discontinua tanto horizontal como verticalmente. El perfil de reflexión presenta reflectores y para esta zona la presencia de fluidos entre los 15-33m y 42-56m del perfil a una profundidad de 12 y 20m respectivamente con un espesor de 3-5m; además, se observan discontinuidades desde la superficie que atraviesan el primer reflector, esto vinculado a grietas y fracturas visibles en campo.

La zona intermedia (23-62m), se establece dentro de la parte de la formación arcillosa superior (FAS) y la capa dura (CD), que solo puede ser observada en el perfil de reflexión con el segundo reflector (línea azul), en el último reflector de esta zona (línea azul) se ubica la capa dura (líneas grises discontinuas) a los 55m de profundidad manteniéndose prácticamente horizontal. La presencia de fracturas se observan hasta estas profundidades y la presencia de fluidos se ubica entre los 12 32m a una profundidad de 32m y con un espesor de 3m.

La zona no alterada (63-105m), los fluidos se presentan de 0-15m y de 52-70m en el perfil, a una profundidad de 65 y 72m respectivamente con un espesor de 3m; dentro de la formación arcillosa inferior (FAI) y los depósitos profundos; además, el tercer

reflector (línea café), por la deformación que presenta entre los 46 y 55m del perfil se pueden asociar a una dislocación de las capas sin poder asegurar sea reciente o estuviese presente antes del relleno.

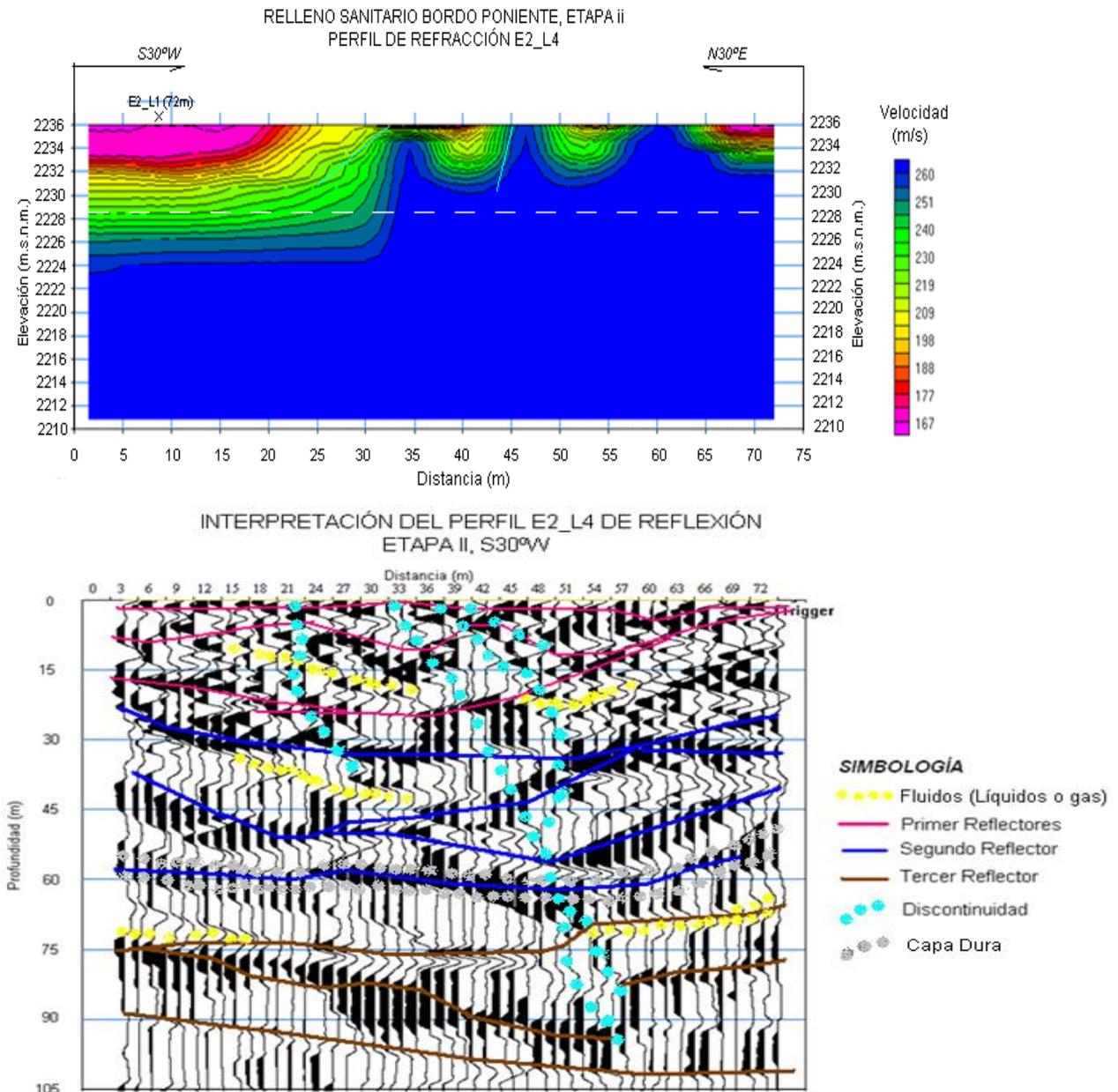


Figura V.7 Perfil sísmico (E2_L4) de refracción y reflexión de la Etapa II

El perfil E2_L5 (figura V.8), con una longitud de 72m, del que se analizan la parte de refracción y reflexión, en tres zonas de interés, la zona de relleno de 0 a 25m, la zona intermedia de 26 a 50m y la zona no alterada de 50 a 105m.

La zona de relleno (0-25m), conformada por los materiales del relleno sanitario (línea punteada en 7.2m) y parte de la formación arcillosa superior (FAS); el perfil de

refracción muestra un comportamiento de la variación de velocidades muy superficial (3m), lo que refleja una asimilación de los residuos sólidos al terreno natural, con algunos sitios que reflejan los residuos de difícil degradación y que se han densificado manteniéndose presentes, además de algunas discontinuidades en el perfil. Los fluidos identificados en el perfil de reflexión se encuentran de 26 a 56m del perfil a una profundidad entre 15 y 25m y con un espesor de 3m, los que se encuentran delimitados por reflectores en forma de receptáculo, se observan discontinuidades de 0 a 15m.

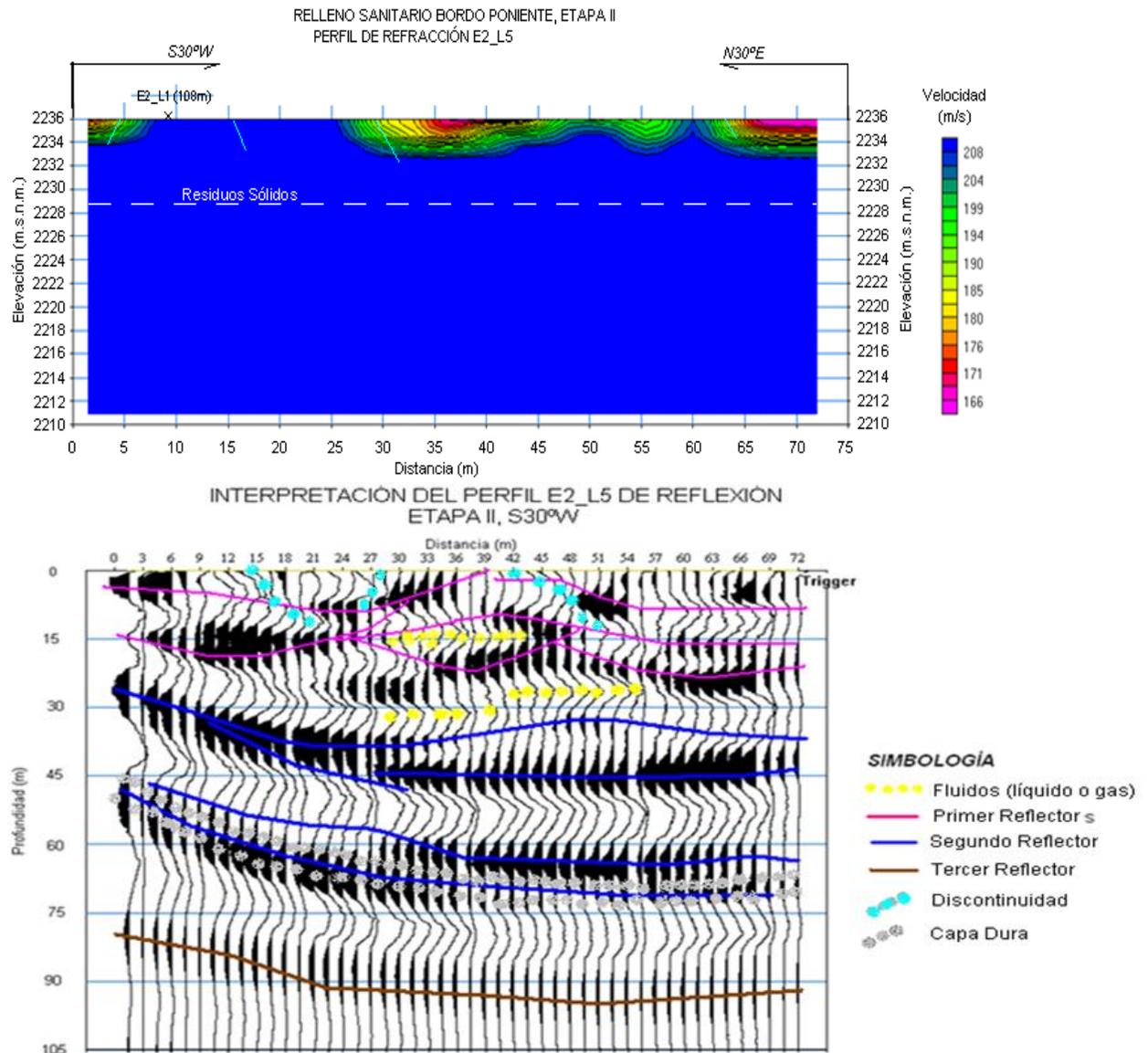


Figura V.8 Perfil sísmico (E2_L5) de refracción y reflexión de la Etapa II

La zona intermedia conformada por los materiales de la formación arcillosa superior (FAS), no es visible en el perfil de refracción pero en el de reflexión, se ubica a partir del segundo reflector (línea azul), la inclinación de los reflectores indican una deformación en los materiales del subsuelo.

La zona no alterada incluye los materiales de la formación arcillosa superior (FAS), la capa dura (CD) y la formación arcillosa inferior (FAI) tocando un poco de depósitos profundos (DP). Los reflectores observados (líneas azul y café), presentan inclinación suave, cierto paralelismo y pocas inflexiones, la capa dura (línea gris punteada) se ubica de los 46 a 65m de profundidad.

En el caso del sitio de levantamiento en la Etapa IV del Relleno Sanitario Bordo Poniente (figura V.9), los Transitorios Electromagnéticos (TEM-11 al TEM-20), integran los perfiles TEM-III y TEM-IV; mientras que los perfiles sísmicos de E4_L1 a E4_L5 de refracción y reflexión.

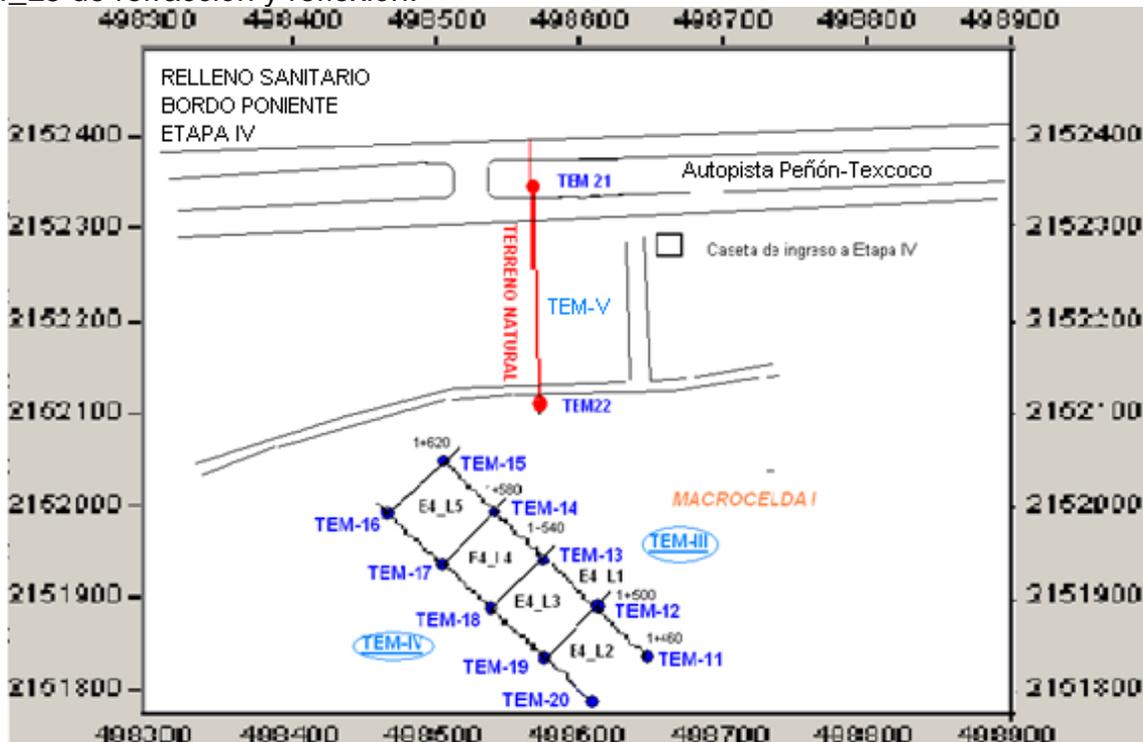


Figura V.9 Etapa IV del Relleno Sanitario Bordo Poniente

El perfil TEM-III de transitorios electromagnéticos (Figura IV.10), se llevó a cabo sobre la macrocelda I donde el nivel del terreno esta a los 2233m.s.n.m., llegando a un nivel de 2241.5m.s.n.m., el relleno se inicio por el método de zanja con una profundidad de 3.5m, completando 12m de espesor de los residuos sólidos. Este perfil se compone de cinco TEMs del 11 al 15, con una separación de 40m, se presenta de este a oeste (derecha a izquierda), con una longitud total de 270m y como dato extra se encuentra sobre el “eje C” (Investigaciones Electrofísicas de la Tierra S.A. de C.V.) de monitoreo que realiza la Subdirección Técnica del Distrito Federal a cargo de la operación del relleno sanitario en la sección de 1+460 a 1+620, con un rumbo de N35°W, cubriendo una profundidad total de 100m.

El perfil del TEM-III, presenta claramente la presencia de fluidos a los 3m de profundidad a partir del nivel del terreno, se observa a lo largo del perfil, con un espesor aproximado de 40m, en donde se ubica la formación arcillosa superior;

posteriormente se observa la capa dura que presenta una deformación por compresión, con un espesor de 3 a 4m, pero adelgazándose en el centro a una profundidad entre 33 y 38m; por debajo de la capa dura se ubica la formación arcillosa inferior (FAI) en tonos azul claro y verde a una profundidad de 33 y 38m con un espesor variable desde 16 hasta 42m el cual tiene un contenido de agua de 255%.

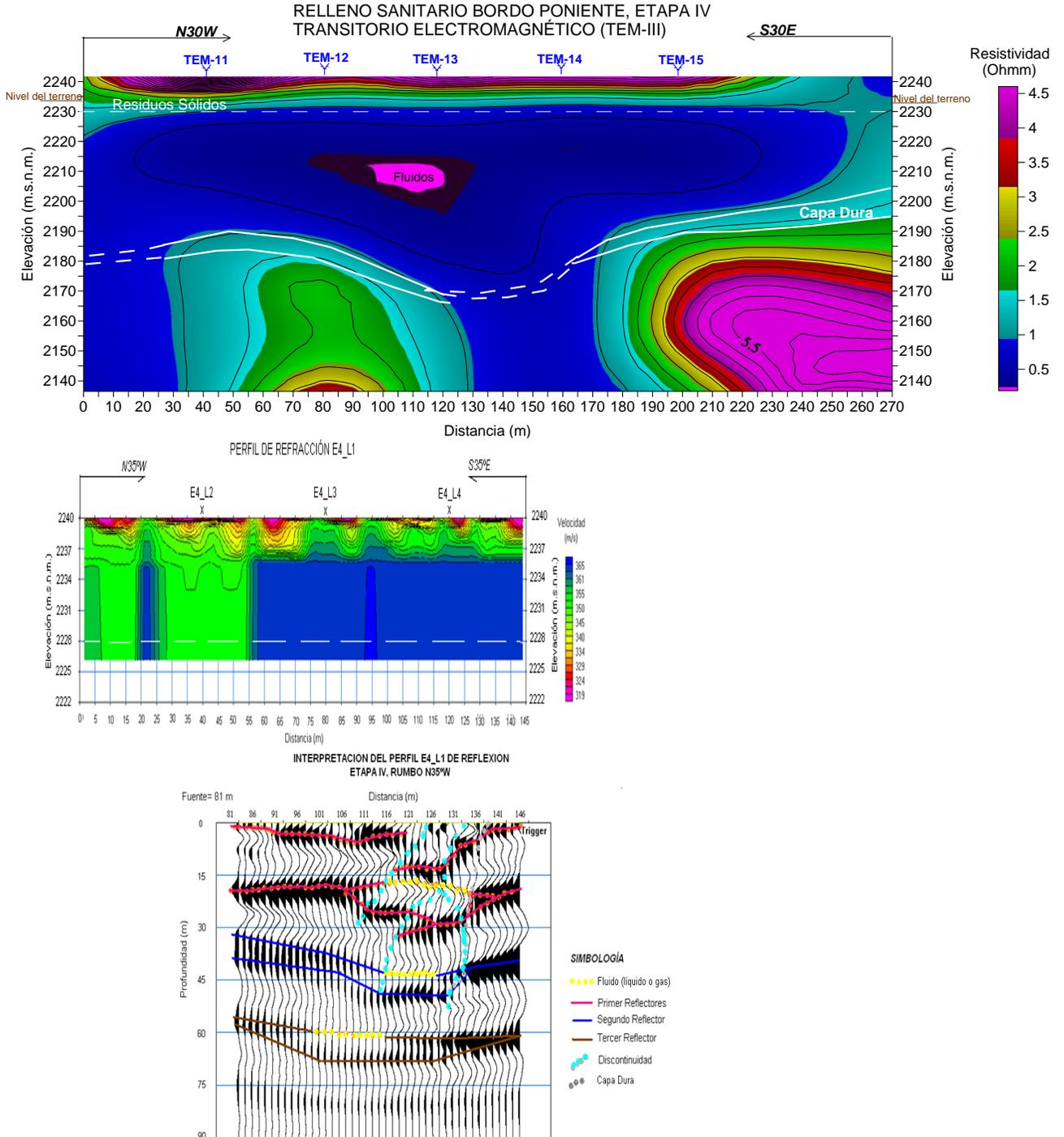


Figura V.10 Perfil de transitorio electromagnético (TEM-III) con sísmica (E4_L1) de la Etapa IV

Los perfiles sísmicos E4_L1, se quedaron cortos en la longitud total que se cubrió con los TEMs, el de refracción con 145.5m de longitud total solo establece anomalías de velocidades muy superficiales, solo puntualizando los materiales densos; mientras que el perfil de reflexión aunque más corto, con 109.5m de longitud total, presenta tres niveles en la presencia de fluidos, el primero de 98-130m del perfil, con una profundidad de 17m y un espesor de 3 a 5m; el segundo entre 100-115m del perfil, a una profundidad de 43m con un espesor de 3m y el tercero de 80-98m del perfil, a una profundidad de 60m y un espesor de 3m; los dos primeros dentro de discontinuidades presentes desde superficie hasta los 45m. Al comparar la información del TEM y la parte sísmica, es posible hablar de biogás

El TEM-IV (figura V.11), paralelo al TEM-III con una separación entre ellos de 63m. El análisis se realiza revisando por zonas; la zona de relleno de 0 a 15m, la zona intermedia de 16 a 42m y la zona no alterada de 43 a 100m de profundidad.

La zona de relleno (0-15m), está conformada por los materiales del relleno sanitario y de la formación arcillosa superior (FAS); la aplicación del TEM en zonas de borde se traduce en presentar efectos laterales, se observan las anomalías superficiales resistivas, en contraste con un material con comportamiento conductor por encima y debajo del límite del relleno (línea punteada a 12m).

La zona intermedia (16-42m), constituida por la formación arcillosa superior (FAS) y la capa dura (CD), los fluidos presentes a lo largo del perfil, a una profundidad de 5m a partir del nivel del terreno y con un espesor de 52m.

La zona no alterada (43-100m), constituida por los materiales de la formación arcillosa inferior (FAI) y los depósitos profundos (DP), la cual presenta cierta alteración en los valores de resistividad.

Los perfiles de sísmica de refracción y de reflexión restantes, son perpendiculares a los previos, con un rumbo S35°E y una longitud total de 72m. El análisis se realiza por zonas como se ha realizado en los perfiles previos.

El perfil E4_L2 (figura V.12) se analiza con la delimitación de zonas, la zona de relleno de 0-25m, la zona intermedia de 26 a 45m y la zona no alterada de 45 a 90m.

La zona de relleno (0-25m), se encuentra conformada por los materiales del relleno sanitario (línea discontinua a 12m) y la formación arcillosa superior (FAS), se observa el relleno delimitado con velocidades bajas (301-340 m/s) y las velocidades altas (420 m/s) dentro del relleno, lo que evidencia la heterogeneidad de los residuos sólidos dispuestos (plásticos de baja densidad, gran cantidad de PET, textiles, metales, entre otros), que presentan densidades extremas (bajas y altas); aunque la compactación se realice bien las densidades prevalecen las discontinuidades entre los 15 y 38m las tonalidades de velocidades en los primeros 10m (refracción) y en los reflectores en los primeros 20m en las mismas distancias; además la reflexión muestra un desplazamiento de capas entre los 36 y 42m a una profundidad entre 6 y

22m; los fluidos se ubican de 0-72m del perfil, a una profundidad de 8-14m con un espesor de 6m.

La zona intermedia (26-45m), conformada por materiales de la formación arcillosa superior (FAS), presente en el segundo reflector (línea azul) del perfil de reflexión, muestra una zona de amortiguamiento; es decir, los reflectores son continuos y no presentan discontinuidades lo que retiene a los fluidos permeados a través de las discontinuidades hasta antes de la capa dura.

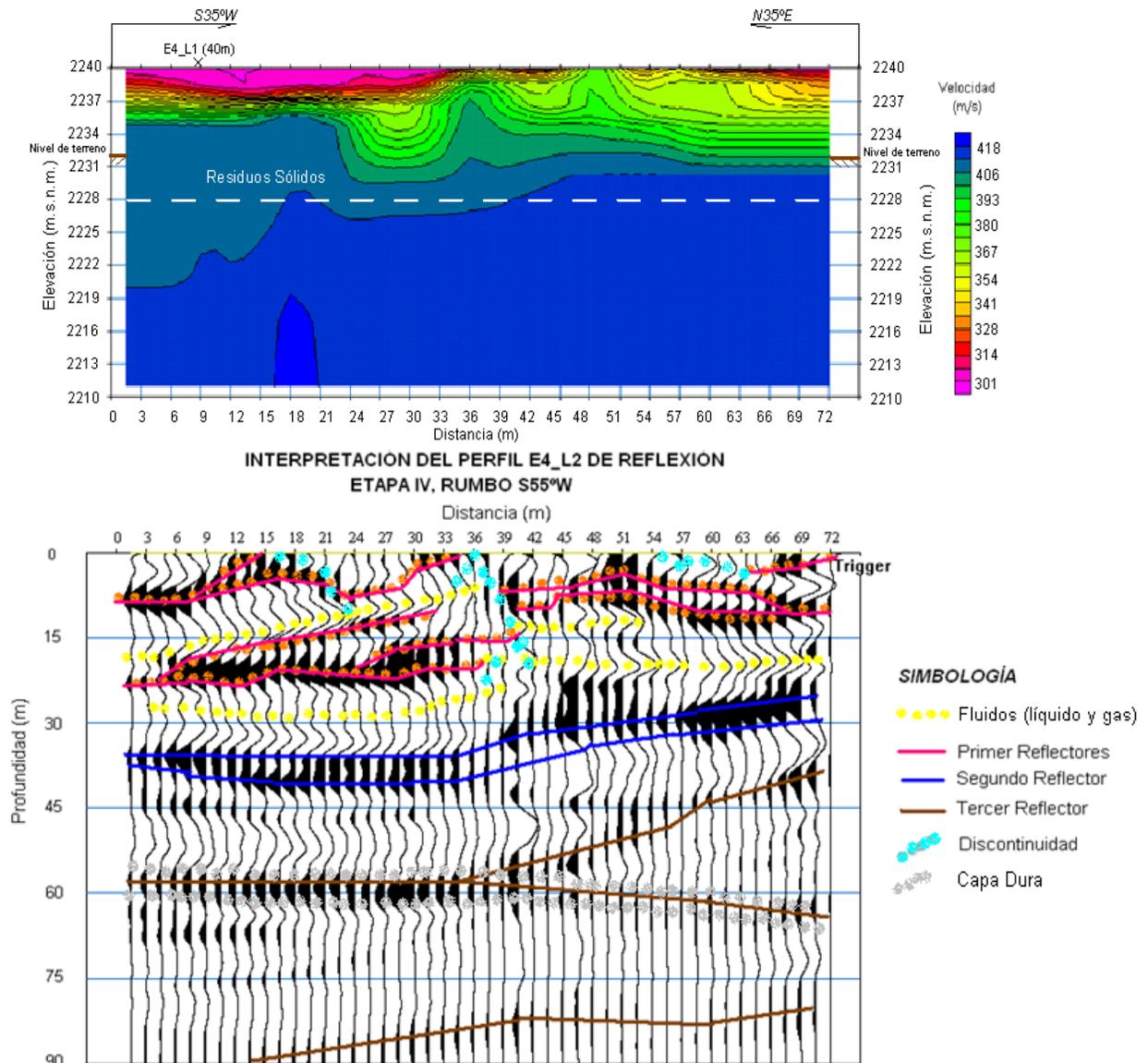


Figura V.12 Perfil sísmico (E4_L2) de refracción y reflexión de la Etapa IV

La zona no alterada (45-90m) que se conforma de la capa dura (CD) y la formación arcillosa inferior (FAI), presenta el tercer reflector (línea café), que muestra capas inclinadas y la capa dura (línea gris discontinua) a 60m, continuando las estructura de las capas suaves y continuas.

El perfil E4_L3 (figura V.13), se analiza designando zonas con la ayuda del perfil de reflexión, la zona de relleno de 0-25m, la zona intermedia de 20 a 50m y la zona no alterada de 50 a 90m.

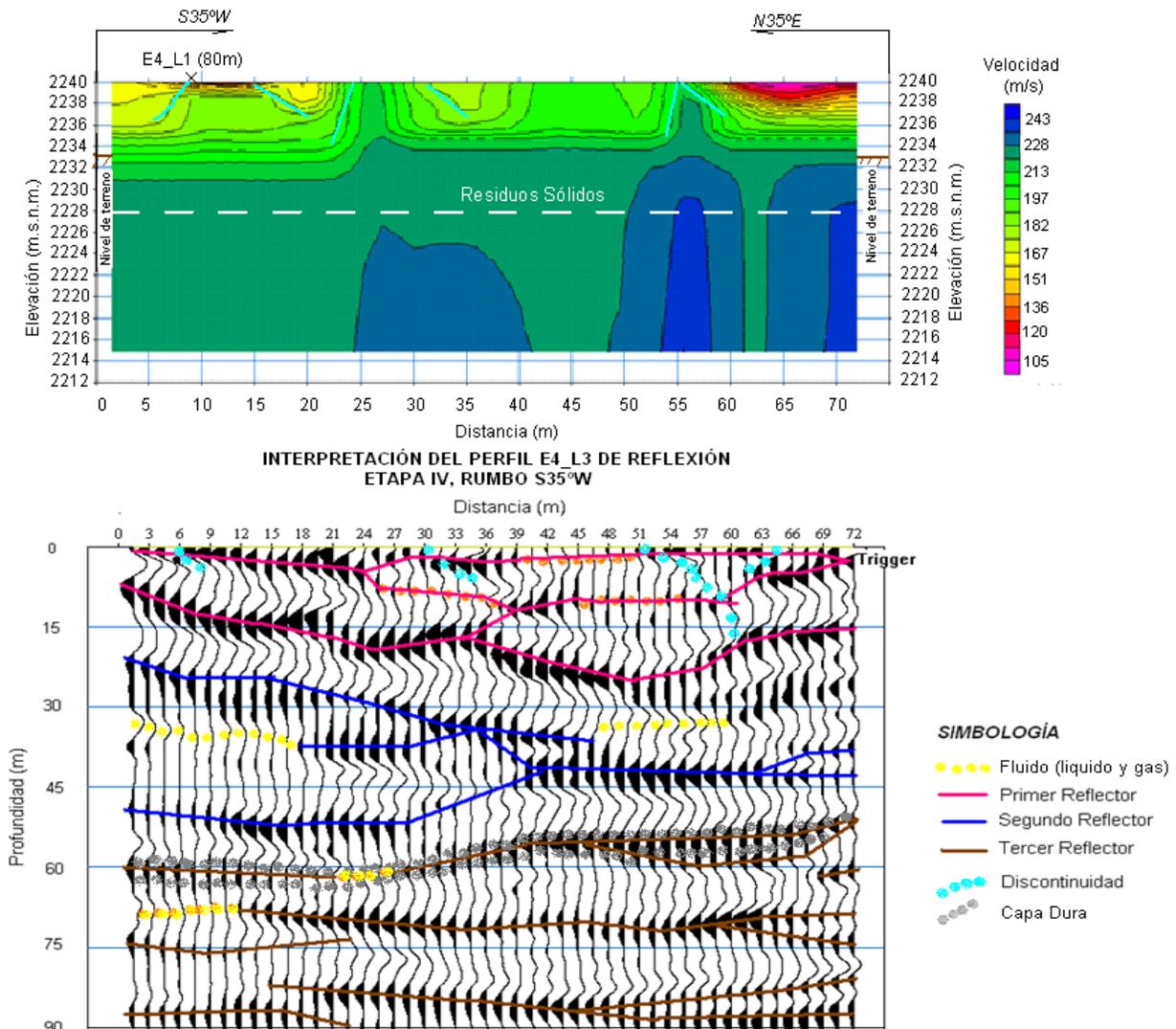


Figura V.13 Perfil sísmico (E4_L3) de refracción y reflexión de la Etapa IV

La zona de relleno (0-25m), se encuentra conformada por los materiales del relleno sanitario (residuos sólidos) y la formación arcillosa superior (FAS); el perfil de refracción delimita tres áreas separadas con velocidades medias de 200 m/s y bajas en la superficie, de 100 m/s, ubicando heterogeneidades en los extremos (10m y 65m), se observan discontinuidades someras máximo, hasta 6m de profundidad.

La zona intermedia (20-50m), comprende la formación arcillosa superior (FAS), que se observa con el segundo reflector (línea azul), la presencia de fluidos se ubican de 0-18m y de 46-60m del perfil, a una profundidad de 33m con un espesor de 3m.

La zona no alterada (50-90m) se integra de la capa dura (CD), la formación arcillosa inferior (FAI) y los depósitos profundos (DP); la continuidad de los reflectores determina la capa dura (línea gris discontinua) y los demás reflectores se comportan suaves, homogéneos y continuos. Los fluidos se ubican de 0-12m y de 22-27m, a una profundidad de 70 y 60m respectivamente y un espesor de 3m.

El perfil E4_L4 (figura V.14), se analiza de igual forma por zonas con la ayuda del perfil de reflexión; la zona de relleno de 0 a 25m, la zona intermedia de 25 a 45m y la zona no alterada de 45 a 90m.

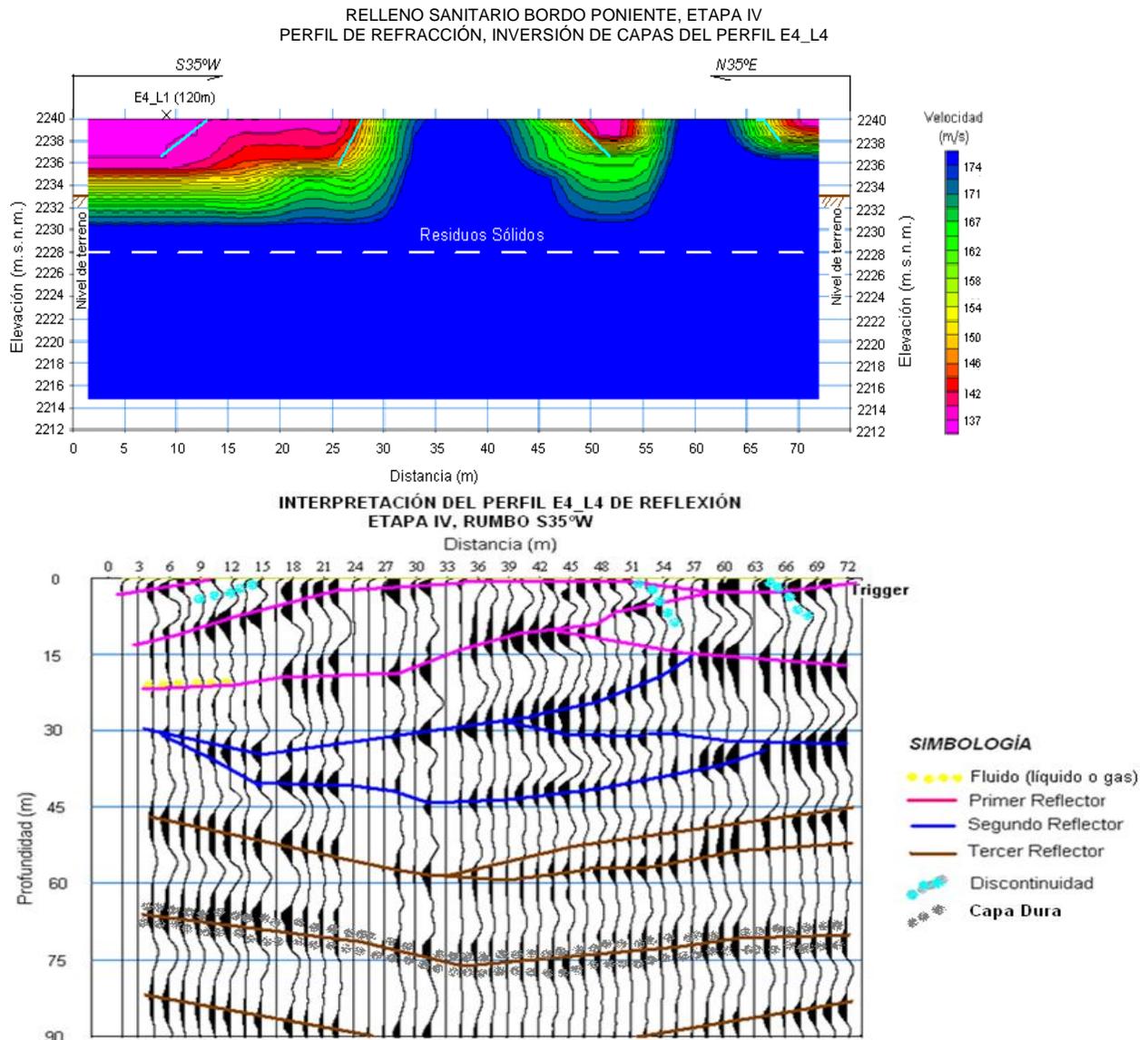


Figura V.14 Perfil sísmico (E4_L4) de refracción y reflexión de la Etapa IV

La zona no alterada (45-90m) constituida por la formación arcillosa superior (FAS), la capa dura (CD) y formación arcillosa inferior (FAI), se mantienen los reflectores suaves y continuos, la capa dura (línea gris discontinua) a los 65m de profundidad y la observación de que los reflectores son paralelos desde los 45m a profundidad.

El perfil E4_L5 (figura V.16) se analiza con la delimitación de zonas; la zona de relleno de 0-25m, la zona intermedia de 26 a 45m y la zona no alterada de 45 a 90m.

RELLENO SANITARIO BORDO PONIENTE, ETAPA IV
PERFIL DE REFRACCIÓN, INVERSIÓN DE CAPAS DEL PERFIL E4_L5

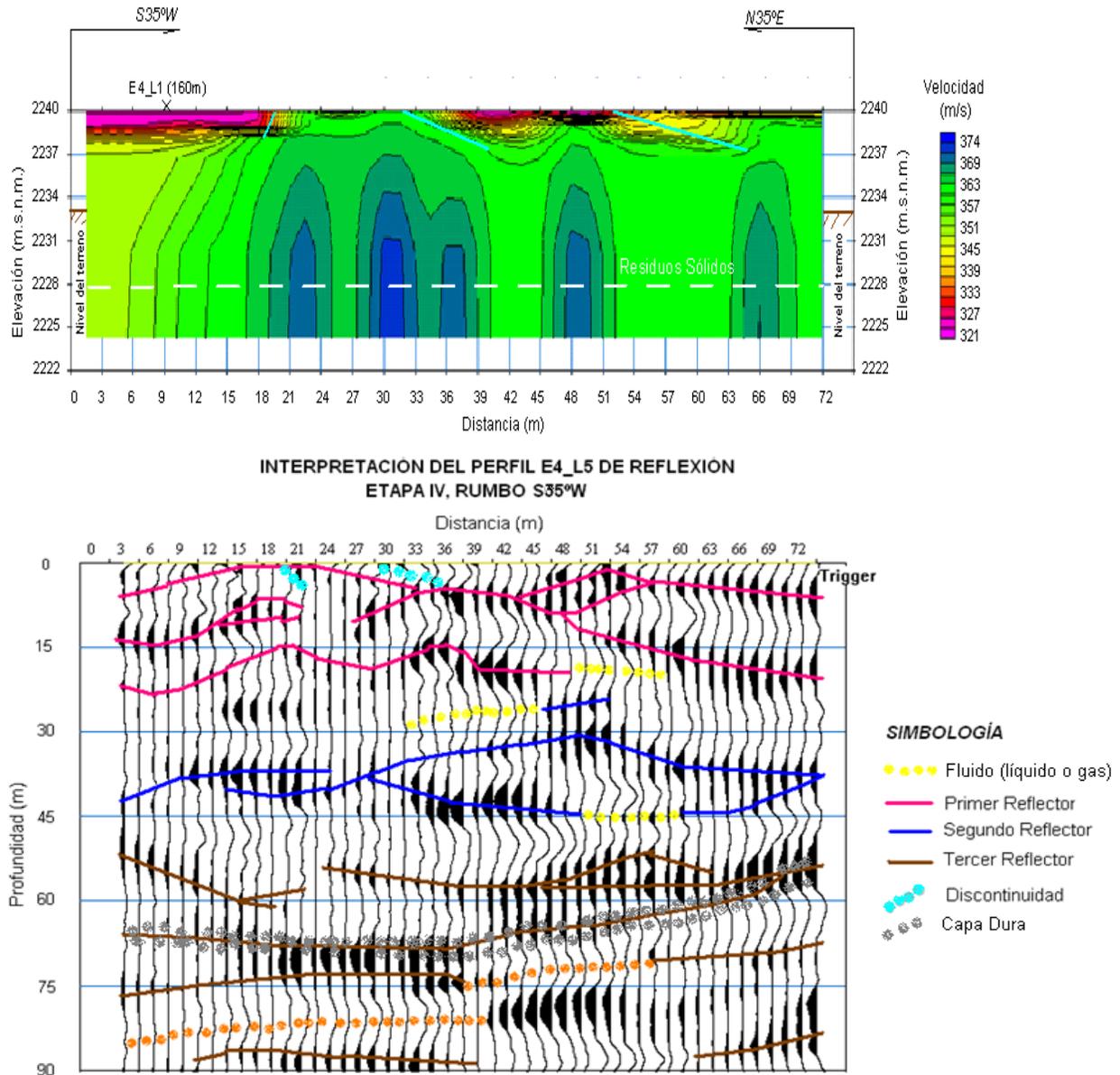


Figura V.16 Perfil sísmico (E4_L5) de refracción y reflexión de la Etapa IV

La zona de relleno (0-25m) se encuentra conformada por los materiales del relleno sanitario y la formación arcillosa superior (FAS). Se observa el relleno limitado (línea discontinua a 12m) y la variación de las velocidades bajas (321-340 m/s) con las velocidades altas (374 m/s) dentro del relleno, lo que evidencia la heterogeneidad de los residuos sólidos, que presenta diversidad en las densidades (bajas medias y altas). Precisamente la diferencia de densidades se advierte en el primer reflector, en donde se interrumpe sin presentar evidencias de discontinuidad en los primeros 20m

de los reflectores; la reflexión muestra fluidos entre los 33 y los 60m, a una profundidad de 18m con un espesor de 3m.

La zona intermedia (26-45m), conformada por materiales de la formación arcillosa superior (FAS), presente en el segundo reflector (línea azul), los fluidos presentes se ubican entre los 32 y 62m, a una profundidad de 28 y 45m con un espesor de 3m.

La zona no alterada (45-90m) que se conforma de la capa dura (CD) y la formación arcillosa inferior (FAI), presenta el tercer reflector (línea café) que muestra capas inclinadas pero continuas y la capa dura (línea gris discontinua) a 65m, prosiguiendo la estructura de las capas suaves y continuas a profundidad.

V.2 INTERPRETACIÓN

Los perfiles geofísicos en la Etapa II del Relleno Sanitario Bordo Poniente, se ubican a la orilla oriente de la etapa, cerca de una zona de arbustos; el pozo de venteo más cercano se encontraba a 200m. La información de la clausura de la etapa en cuestión (1991), permite analizar la fase de descomposición en la que se encuentran los residuos, y lo que es posible encontrar. Debido a que se clausuró hace más de 10 años, la etapa de producción de biogás se ha desacelerado y solo se pueden localizar lentes de biogás.

La distribución de los materiales litológicos de la zona en estudio, se resume en formación arcillosa superior (FAS), la capa dura (CD), la formación arcillosa inferior (FAI) y los depósitos profundos (DP). Los fluidos (biogás y lixiviados), se concentraron en la formación arcillosa superior (FAS) constituida por arcillas deformables intercaladas por lentes y estratos arenosos, limoarenosos y de vidrio volcánico (17-40m de espesor). Las discontinuidades (agrietamiento y fracturas), se hicieron presentes en todos los perfiles, debido a la erosión que presenta gran parte de la cubierta y algunos casos hasta 100m.

La identificación de zonas con presencia de fluidos se resume (tabla V.1), a los perfiles TEM-I y E2_L1 (amarillo), que conforman el mismo perfil y que se presume es biogás debido a los valores de resistividad (anomalías conductoras), y al comportamiento de los reflectores. Los perfiles perpendiculares E2_L3 y E2_L5 (color crema) tienen altas posibilidades de que el fluido sea biogás debido a la estructura de los reflectores (en forma de depósito) y al comportamiento de la ondícula. El resto de los perfiles tiene presencia de fluidos, sin especular el tipo.

Tabla V.1 Resultados de los Estudios Geofísicos, RSBP etapa II

PERFIL	LONGITUD (m)	FLUIDOS	DISCONTINUIDADES	FORMACIÓN
TEM-I	270	Long.:45-200m Prof.: 12m Espesor: 18m <0.5 Ohmm	0-45m	FAS
TEM-II	255	Long.:35-180m Prof.: 12m Espesor: 14m <<0.5 Ohmm		FAS
E2_L1	145.5	Long.: 0-145.5m Prof.: 8-100m Espesor: 92m	0-60m	FAS, CD y FAI
E2_L2	72	Long.: 48-52m Prof.: 7m Espesor: 7m	0-14m	FAS
		Long.: 32-50m Prof.: 38m Espesor: 8m		
E2_L3	72	Long.: 37-52m Prof.: 12m Espesor: 3m	0-22m	FAS
		Long.: 20-60m Prof.: 17m Espesor: 10m		
E2_L4	72	Long.: 15-33m y 42-56m Prof.: 12 y 20m Espesor: 3-5m	0-96m	FAS
		Long.: 12-32m Prof.: 32m Espesor: 3m		
		Long.: 0-15m y 52-70m Prof.: 65 y 72m Espesor: 3m		FAI
E2_L5	72	Long.: 26-56m Prof.: 15 y 25m Espesor: 3m	0-15m	FAS

Los perfiles de prospección geofísica de la etapa IV del Relleno Sanitario Bordo Poniente, se ubicaron sobre la macrocelda I donde el nivel del terreno esta a los 2233m.s.n.m. llegando a un nivel de 2241.5m.s.n.m., en la parte más alta, el espesor total del relleno sanitario para esta macrocelda es de 12m. Esta etapa cuenta con geomembrana, a partir de que entró en operaciones (1995), hasta el levantamiento geofísico (2008), no había una fecha de clausura del relleno sanitario; pero si una preparación en la cubierta de las macroceldas, postergada debido al monitoreo anual por parte de la empresa IETSA.

Debido a que las operaciones de la etapa IV, tienen más de 10 años y la fase de descomposición probablemente se sitúe en la parte final de la etapa metanogénica y principios de la etapa final, debido al volumen de residuos sólidos dispuestos, los productos esperados son fluidos (biogás y lixiviados), distribuidos en la parte central

del relleno; algunos de ellos cumplen esta premisa pero, no todos. Además, la macrocelda I tiene un espesor inicial de 8.5m, lo que la hace muy heterogénea en la composición de residuos sólidos dispuestos, los 3.5m de la celda superior (2000), son relativamente recientes y es probable que se encuentre en la parte media de la fase metanogénica de descomposición de residuos.

Para la Etapa IV del Relleno Sanitario Bordo Poniente, la identificación de zonas con presencia de fluidos se resume (tabla V.2), a los perfiles TEM-III y E4_L1 (amarillo) que conforma el mismo sitio y aumenta la probabilidad de que sea biogás debido a los valores de resistividad (anomalía conductora) y al comportamiento de los reflectores. Los perfiles perpendiculares E4_L2 y E4_L3 (color crema) tienen altas posibilidades de que el fluido sea biogás debido a la forma de los reflectores (estructura de depósito) y al comportamiento de la ondícula. El resto de los perfiles tiene presencia de fluidos sin poder asegurar sea biogás.

Tabla V.2 Resultados de los Estudios Geofísicos, RSBP etapa IV

PERFIL	LONGITUD (m)	FLUIDOS	DISCONTINUIDADES	FORMACIÓN
TEM-III	270	Long.:0-250m Profund.: 3m Espesor: 40m <<0.5 Ohmm	-----	FAS
TEM-IV	300	Long.:0-300m Profund.: 5m Espesor: 52m <0.5 Ohmm	-----	FAS
E4_L1	145.5	Long.: 98-130m Profund.:17m Espesor: 3-5m	0-50m	FAS
		Long.: 100-115m Profund.:43m Espesor: 3-5m		CD
		Long.: 80-98m Profund.:60m Espesor: 3m		FAI
E4_L2	72	Long.: 0-72m Profund.: 8-14m Espesor: 6m	0-14m	FAS
E4_L3	72	Long.: 0-18m y 46-60m Profund.: 33m Espesor: 3m	0-18m	FAS
		Long.: 22-27m Prof.: 60m Espesor: 3m		
		Long.: 0-12m Prof.: 70m Espesor: 3m		FAI
E4_L4	72	Long.: 0-12m Prof.: 20m Espesor: 3m	0-12m	FAS
E4_L5	72	Long.: 32-62m Prof.: 18, 28 y 45m Espesor: 3m	0-6m	FAS

Las discontinuidades encontradas son someras, pero en este caso son de mayor cuidado debido al volumen (30'002,556 tons) que es diez veces el volumen de la etapa II, en consecuencia la parte estructural del relleno en conjunto con la integridad de la geomembrana se ven comprometidas al observarse fluidos por debajo es estas.

CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VI.1 CONCLUSIONES

Las conclusiones de esta tesis se emiten después de la revisión, el análisis y la interpretación de la información preexistente, de la obtenida y de la procesada del sitio de estudio, el Relleno Sanitario Bordo Poniente en el Estado de México, con la firme intención de proponer la metodología aplicada y se contemple el uso de los métodos geofísicos como parte importante en el monitoreo; además, de hacer propuestas y recomendaciones en la parte de diseño y operación de un relleno sanitario.

El objetivo general, se cumple al poder identificar la presencia del biogás por lo menos en dos de los diez perfiles realizados con los métodos geofísicos de alta resolución, al combinarse tres técnicas geofísicas de dos diferentes campos (electromagnética y sísmica). Es importante aclarar que no se emplearon muestreos en campo, ni análisis en laboratorio de muestras, tampoco se realizaron perforaciones de los resultados obtenidos en esta tesis.

Los objetivos particular de identificación de fluidos (biogás y lixiviados) en los perfiles geofísicos, y localización de los mismos se complementa al señalar que se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- Las “anomalías” presentes en los perfiles con altas posibilidades de contenido de fluidos (biogás y lixiviado), son aquellas donde en el TEM se resaltan zonas conductoras y en el perfil de sísmica de reflexión, disminuye la velocidad y existe un cambio de la polaridad en la ondícula de reflexión (la cresta cambia a valle o viceversa), lo que se interpreta como una zona de alta porosidad. Si aumenta la porosidad se ubica dentro de una estructura tipo cuenca conformado sobre un horizonte sísmico continuo cuya conductividad aumenta, se asocia a la presencia de líquidos que se concentran en esta zona de depocentro.
- Si la conductividad aumenta en el TEM y no se observa un horizonte sísmico continuo, entonces no está asociado a estructuras de cuenca o reservorios por gravedad; pero está delimitado en la parte superior por un horizonte sísmico continuo o una capa de resistividad homogénea, ésta funciona como sello reteniendo un líquido que tiende a subir naturalmente, lo cual se asocia a la presencia probable de lentes de biogás.
- Se encontró fracturamiento somero con desplazamiento en los perfiles de refracción-reflexión con fuertes cambios de amplitud entre bloque y bloque lo que indica diferentes niveles de compactación lateral a lo largo de la zona de investigación lo que establece como evidencia sustentable que el terreno presenta diferentes densidades laterales y esto invita a revisar la normatividad sobre la disposición lateral de los residuos sólidos. Esto en comparación con

los modelos de gravedad terrestre invita a diseñar técnicas de distribución de los residuos para que sean como un modelo isostático terrestre; es decir, para que las densidades laterales y verticales se deformen uniformemente con el relieve de la roca dura se sugiere que antes de realizar el diseño de relleno se realicen estudios geofísicos sísmicos y eléctricos para predecir las topografías y discontinuidades del terreno natural y mejorar la distribución de los residuos sólidos de acuerdo a su densidad y forma de compactación, esto mejoraría notablemente las condiciones de confinamiento, permitiendo una degradación adecuada.

- En la parte profunda de todos los perfiles se encontraron discontinuidades asociadas al terreno natural evidenciado por la continuidad de los reflectores profundos que al no ser consideradas previo a las operaciones del relleno estas discontinuidades funcionan como zonas de reservorios profundos provenientes de las capas someras o zonas de migración de fluidos provenientes de fuera del área de estudio, no pudiendo asegurar que la presencia de fluidos en esta zona se deba a un mal manejo del relleno en la parte somera o que provengan de otra zona contaminada y que se hayan acumulado en esta zona por tener las mejores condiciones de zona de confinamiento. Para poder definir el origen de los fluidos más profundos es necesario diseñar un estudio geofísico más regional así como estudios hidrológicos para saber de donde podrían provenir estos fluidos.

Las etapas estudiadas en el Relleno Sanitario Bordo Poniente son la Etapa II y la Etapa IV de las que se llega a las siguientes conclusiones:

La Etapa II con una vida útil de 5 años (1986-1991) y poco más de tres millones y medio de residuos sólidos depositados para las ochenta hectáreas de operación, con un espesor de 8m y que a la fecha se reporta entre 7.2 y 6.2m; parte del relleno ha pasado a formar parte del terreno natural pero el estudio evidencia una gran heterogeneidad en los residuos sólidos depositados, la variación de las densidades de los materiales tiene que ver con cargas verticales que sobre materiales menos densos provocan inestabilidad superficial pero también a profundidad, lo que se traduce en grietas más profundas y fracturas con desplazamiento. La situación de los fluidos entre lixiviados y biogás han migrado a través de las discontinuidades mencionadas al parecer a profundidades mayores de 60m

La Etapa IV en operación desde 1995 y mas de treinta millones de toneladas de residuos sólidos depositados en 375 hectáreas en operación, con un espesor de 12m; la situación es diferente ya que se encuentra en operación y próximamente en fase de clausura, las discontinuidades encontradas bajo el nivel del relleno preocupa en la seguridad de la geomembrana, ya que aunque por lo menos en tres de cinco perfiles se presentan discontinuidades que se deben a las cargas diferenciadas y a distribución de los residuos sólidos de forma arbitraria no balanceando estas cargas verticales. La situación de los fluidos se presenta en niveles bajos a medios a una profundidad máxima de 45m aún dentro de la formación arcillosa superior (FAS),

pero con la cantidad de residuos sólidos dispuestos es cuestión de tiempo para que se vuelva una problemática fuerte.

El biogás siendo un producto de la degradación biológica (en condiciones anaerobias), de componentes como el metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2) y nitrógeno (N_2) principalmente determinada por la porción biodegradable de la biomasa (composición, densidad, humedad y temperatura), por las condiciones físico-químicas (pH, humedad, temperatura, etc.) de las condiciones de construcción y operación del sitio de disposición final. Por tratarse de una relación 60/40% de metano y dióxido de carbono en general, es importante señalar que el comportamiento de los gases determinan la ubicación en los perfiles geofísicos realizados; si se compara el gas natural que contiene un 97% de metano con respecto al gas de los yacimientos petrolíferos con 98%, se observa una gran disparidad en su producción.

El metano es un gas menos denso que el aire y en estado líquido es menos denso que el agua, de baja solubilidad, de su combustión se obtiene agua, dióxido de carbono y calor, estas características determinan la posición en los perfiles de reflexión visualizando los fluidos (línea amarilla discontinua) ya que el metano se ubicaría en la parte superior de la localización en estado gaseoso o líquido; por el contrario el dióxido de carbono se ubicaría como una fracción mas pesada en estado gaseoso y su alta solubilidad puede formar ácidos débiles de soluciones corrosivas; además, la peligrosidad de ambos gases se presenta cuando en presencia de aire con un volumen de metano de 5 a 15% resulta altamente explosivo (provocada por una fuente de calor encendida) y el dióxido de carbono si se presenta en concentraciones de 10% en oxígeno puro causa envenenamiento, inconsciencia o desmayo, por lo que deben manejarse ambos gases de forma adecuada en un relleno sanitario

El objetivo particular de revisión del marco geológico, mecánico, complementa la hipótesis de discontinuidades propias de los materiales, debida principalmente a hundimientos y agrietamientos.

El llamado estrato arcilloso completa un espesor de 60m sobre materiales aluviales del cuaternario que descansan en rocas ígneas del terciario; los “mantos” sísmicos caracterizados en la parte central del lago desde 1969 corresponden a litologías complementarias (materiales parecidos):

- Primer manto: que se compone de dos formaciones la superficial (FS) y la arcillosa superior (FAS) con velocidad de ondas compresionales entre 600 a 900 m/s y con un espesor en el centro del lago de 30m disminuyendo al norte. Es importante aclarar que las velocidades obtenidas en el estudio para este manto son menores debido al primer medio. al relleno en donde varía la velocidad entre 140 y 280 m/s lo que enmascara las velocidades a profundidad; además de las grandes cantidades de fluidos y de la poca penetración que se obtuvo con la fuente (marro).

- Segundo manto: se compone de la formación arcillosa inferior, los depósitos profundos y la serie estratificada que corresponde a los depósitos lacustres y aluviales, encontrándose a una profundidad de 30 a 480m con una velocidad de 1700 m/s. En este caso las velocidades que se obtuvieron no se reflejan en la parte de refracción, pero se pudieron obtener las expresiones en la reflexión.

Con los materiales arcillosos en particular el tema de agrietamiento y hundimiento de la zona obtiene relevancia, el cual se agudiza por la extracción de agua de la capa dura (CD) y los depósitos profundos (DP) a un ritmo acelerado lo que provoca hundimientos regionales, variación del contenido de agua y variación de esfuerzos horizontales que incrementan los agrietamientos presentes en toda la zona. Con la puesta en operación de los rellenos presentes (Bordo Poniente y Bordo Xochiaca), se acentuaron los microfisuramientos debidos a un cambio rápido en el estado de esfuerzos que experimentaron las formaciones arcillosas superficiales, principalmente durante la construcción de las zanjas de las celdas, los esfuerzos en sentido horizontal varían rápidamente, primero se relajan por la reducción de confinamiento lateral lo que genera una distensión del terreno formando grietas en la frontera de la excavación y algunas perpendiculares; posterior a la construcción en la parte de operación del relleno sanitario se inducen agrietamientos por cargas verticales debido a que se induce desplazamiento en las formaciones superficiales y una expulsión de material en forma de olas, resultado de la descomposición de la carga en forma radial, el material desplazado forma grietas transversales al desplazamiento. Estos agrietamientos se deben estudiar y monitorear para que no se produzcan afectaciones estructurales en el relleno y a terceros, porque se pueden generar fallas estructurales de rellenos sanitarios ya documentadas y publicadas.

Las grietas tradicionales en el ex Lago de Texcoco con un trazo irregular con separación de algunos metros o de cientos de metros, presentan una dirección preferencial NE-SW, lo que quiere decir que los perfiles geofísicos se ubicaron con rumbo perpendicular al rumbo preferencial del agrietamiento, encontrando su expresión discontinua en todos los perfiles sísmicos.

El análisis de toda la información responde a la interrogante de una operación adecuada o no del relleno sanitario en estudio; lo que resulta en que se diseñó, se construyó y se operó conforme a la normatividad (NOM-083-SEMARNAT-2003), ya que se cuenta con una serie de medidas de impermeabilización al terreno además la geomembrana de alta densidad y la litología de la zona de forma general 480 m de arcillas siendo el sitio ideal para disposición final al minimizarse los riesgos ambientales; sin embargo, faltó complementar la información característica en este caso de las arcillas y su comportamiento bajo regímenes extremos, por su peculiaridad y amplia distribución en toda la zona; además no se deben considerar materiales homogéneos en el sitio, en gran parte las heterogeneidades determinan la inestabilidad del sitio.

Finalmente, como último objetivo se propone una combinación de métodos geofísicos sísmicos de reflexión con un método eléctrico llevando la misma cobertura, debido a la facilidad de complementar ambas respuestas.

VI.2 RECOMENDACIONES

El ex Lago de Texcoco es un sitio de estudio muy especial por su origen, evolución y uso actual, siendo parte importante del florecimiento de la Ciudad de México y regulador de la hidrología, clima, desarrollo económico y hoy en día sitio solución a problemas ambientales de tipo hidráulico, geotécnico y como sitio de disposición final principalmente; sin embargo las características de una zona lacustre en donde normalmente se muestran formas de gradación textural de arena fina a limo y arcillas con material orgánico en las áreas tranquilas, son más variadas de lo esperado; precisamente la evolución de la laguna en su desecación creó canales sin relleno de materiales, agrietamientos estacionales debidos a la intercalación de materiales arcillosos, con arenas y limos que en la actualidad se observan con mayor frecuencia.

- Se recomienda revisar la dinámica del relleno; es decir, evaluar el comportamiento de los asentamientos y su monitoreo, evaluando la capacidad de carga del relleno; lo que resulta en tres modos de asentamiento, la consolidación (por expulsión de agua en materiales saturados), la contracción (fases de descomposición de lixiviados y biogás, disminución del volumen) y la compactación (reorientación de los sólidos en una configuración más densa).
- Para poder definir el origen de los fluidos más profundos es necesario diseñar un estudio geofísico más regional así como estudios hidrológicos para saber de donde podrían provenir estos fluidos.
- Se recomienda mejorar la distribución en futuros rellenos por carga o peso, para obtener un modelo isostático que no provoque asentamientos diferenciados tan pronunciados los que puedan provocar inestabilidad estructural del relleno sanitario.
- Se recomienda una etapa de exploración geofísica para la determinación a nivel regional (todo el relleno) de las estructuras que se encontraron en la presente tesis, para que no generen problemas en la clausura y manejo del sitio a futuro.
- Se recomienda la exploración directa con perforaciones y muestreos a la Subdirección técnica del Distrito Federal de las anomalías donde se obtienen fluidos y discontinuidades.
- Se recomiendan dos métodos geofísicos de diferentes campos, para corroborar los resultados que se obtienen.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aguirre B. M., Filsinger T. y Pérez I. L. (2005). Evolución de la gran Tenochtitlán, México historia, entorno lacustre, templo mayor, Tlatelolco.
2. Alberro J. (1990). Génesis de la grietas de tensión en el Valle de México. Memorias del Simposio El subsuelo de la Cuenca del Valle de México y su relación con la Ingeniería de Cimentación a cinco años del sismo (E. Ovando, ed.) México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
3. Aranda, J., Decide Corte que el DF puede seguir usando relleno sanitario. La Jornada. 17 de noviembre de 2007.
4. Auvinet G. (1981). Agrietamiento de las arcillas del Valle de México. Informe interno, Instituto de Ingeniería, UNAM.
5. Bagchi A. (1994). Leachate and Gas generation. *Design, Construction and Monitoring of Landfills*, NY, USA, John Wiley and Sons inc, 2da. edic.
6. Bárcenas, R.H. (2009). Curso: Operación de rellenos sanitarios y rellenos de alta eficiencia. FEMISCA
7. Calva L. C. M. (1995). Aplicación del Método diferencias finitas para la modelación de flujo de biogás en rellenos sanitarios. Tesis de Licenciatura Facultad de Ingeniería, UNAM.
8. Chian E.S.K. y DeWalle F.B. (1979). Effect of moisture regimes and temperature on MSW stabilization. *Municipal Solid Wastes: Land Disposal*, Proceedings of the Fifth Annual Research Symposium, Orlando Florida, USA, marzo 26-29
9. Camacho R. I. (2001). Estimación de emisiones de rellenos sanitarios en México. Tesis de Licenciatura en Facultad de Química, UNAM.
10. Camacho R. I. (2003). Análisis costo-beneficio ambiental de la incineración de residuos sólidos municipales en la ciudad de México. Tesis de Maestría, DEPMI, UNAM.

11. CIGSA (2001). Estudio de TEM's en Rellenos Sanitarios. Consultores en Ingeniería Geofísicas S. A. de C.V.
12. Davis M.L y Masten S.J. (2004). Ingeniería y ciencias ambientales. McGraw-Hill/Interamericana editores 1ª ed. Español, México, pp 517-600.
13. Deffis C.A. (1993). La basura es la solución. Edit. Concepto, S.A.
14. Del Valle T. E. (1986). Apuntes de introducción a los métodos geofísicos de exploración. Publicaciones de la Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
15. EMCON ASSOCIATES (1980). Methane generation and recovery from landfills. Ann arbor science, Publisher inc. pp 102.
16. González M.F.D. (1991). Proyecto de Relleno Sanitario en el Bordo Poniente ex Lago Texcoco. Tesis de Licenciatura ENEP-Aragón, UNAM.
17. Guerrero L. M.R. (1996). Generación, control y aprovechamiento del biogás en sitios de disposición final de residuos sólidos municipales. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.
18. Johannessen L. M. (1998). Leachate Management for MSW Landfills. Banco Mundial.
19. Hernández A. M. A. (2004). Recuperación energética de residuos sólidos que desarrollan reacciones de biodegradación en rellenos sanitarios. Maestría en ingeniería y Administración de Proyectos, Fac. de Química, UNAM.
20. Herrera M.R., Chávez C.Y., Sánchez F.M., Hernández F.C., Nuñez L.L., Cuellar R.S., Montiel G., Hernández D. y Díaz A. (2004). Cómo y porqué separar la basura, una solución al problema de los residuos sólidos en la Ciudad de México. Servicios Industriales Peñoles, S.A. de C. V.
21. INEGI Anuario estadístico del Estado de México 1995. Nezahualcóyotl monografía municipal 1999, García Luna Ortega, Margarita/Pedro Gutiérrez Arsaluz, Gobierno del Estado de México/AMECROM, en prensa.
22. Instituto Nacional de Ecología (1999), SEMARNAP. Minimización y manejo de los residuos sólidos. Diciembre.
23. IETSA, Investigaciones Electrofísicas de la Tierra S.A. de C.V. (2007). Sondeo geofísico anual 2007 para el monitoreo de macroceldas en la IV Etapa

- de Relleno Sanitario Bordo Poniente. Informe no. 277, (contrato No. SOS-7-07C001-1-114)
24. ISEF (2005). Ley General de equilibrio ecológico y la protección al ambiente. Agenda Ecológica 2006, Estado de México.
25. Jaramillo, J (1991). Residuos sólidos municipales. Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Programa de salud ambiental serie técnica No. 28. OPS-OMS. Pp 15-150.
26. JICA, KOKUSAI KOJIO CO., LTD (1999). El estudio sobre el manejo de residuos sólidos para la ciudad de México de los Estados Unidos Mexicanos. Vol. I, Informe Ejecutivo final. Gobierno del Distrito Federal, México.
27. Kjeldsen P. y Fischer E.V. (1995). Landfill Gas Migration-Field Investigations at Skellingsted Landfill, Denmark. *Waste Management and Research*, Vol. 13, núm. 5, pp 467-484
28. Llamas F. R. (1994). Evolución de la ingeniería Sanitaria en México. Edición Instituto de Ingeniería, UNAM, DGCOH, Secretaría de Obras del Departamento del Distrito Federal. Capítulo VI. Siglo XX, pp.222-322.
29. Luz Adriana Santacruz L.A., La basura inunda la Ciudad de México. Univision, 22 de Mayo de 2003.
30. Miranda C. M. L. (2006). Tomografía de polarización inducida en dos dimensiones. Tesis de licenciatura. Fac. de Ing., UNAM.
31. Oliver y Agelet (2000). "Mecánica de Medios Continuos para ingenieros", Ediciones UPC.
32. Organización Panamericana de la Salud/Organización Mundial de la Salud (OPS/OMS) (2002). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales.
33. Orta V.M.T., Cruz-Rivera R., Rojas-Valencia N., Monje-Ramírez I. y Sánchez-Gómez J. (2003). Serial water balance method for predicting leachate generation in landfills. *Waste Management & Research*, 21:127-136.

34. Orta V.M.T., Rojas-Valencia M.N., Yañez I., Monje I. y Londoño W.J. (2006). Alternativa de tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios en plantas de aguas residuales urbanas. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*. Vol. 1, núm. 1 año 2006
35. Orta V.M.T. y Monje-Ramírez I (2006). Combined Pre-treatment of Coagulation-ozonation for saline-stabilized landfill leachates. *Ozone: Science and Engineering*. 28: 309-316.
36. Oviedo H. E. (1992). Influencia de las características de las arcillas y factores operacionales, en el diseño y comportamiento del relleno Sanitario "Bordo Poniente". Tesis de Licenciatura Facultad de Ingeniería, UNAM.
37. Palma G. J.H., Espinace A. J., Valenzuela T. P., Aguilera A. K., Galeas C. E. (2005). Evaluación de la estabilidad mecánica de Rellenos sanitarios en Chile. XVI Congreso de ingeniería sanitaria y ambiental AIDIS – Chile, II Simposio Latinoamericano de lodos y biosólidos. Viña del Mar, 23 al 26 de Octubre de 2005.
38. Porteus A. (1988). Landfill Gas. An explosive Issue. *Warmer Bull*, Vol. 13, núm. 18. junio.
39. Robles M.F. (2008). Generación de biogás y lixiviados en los rellenos sanitarios. Instituto Politécnico Nacional, México.
40. Rojas V.M.N. (2008). Curso de Tratamiento y Disposición de residuos sólidos municipales. Maestría en Ingeniería, Fac. de Ing. UNAM, México
41. Sánchez G. J. (2009). Operación de Rellenos Sanitarios, Biorellenos Metanogénicos y de Rellenos de Alta Eficiencia. FEMISCA, abril de 2009.
42. SEDESOL (2005). Manual de Rellenos Sanitarios. Publicación interna. México
43. SEDESOL-INE (1994). Normas Oficiales Mexicanas en materia de protección ambiental 1993-1994. México.
44. SEDUE (1984). Curso sobre manejo y disposición final de residuos sólidos municipales. Subsecretaría de ecología. Tomo I, pp. 1-5.

45. SEMARNAT-GTZ (2007). Guía para la elaboración de proyectos ejecutivos, planes de regulación o evaluación de la conformidad según la NOM-083-SEMARNAT-2003. Primera Edición. México.
46. SMA (2006). Reporte anual de la Secretaría del Medio Ambiente, residuos sólidos, Gobierno del Distrito Federal, México.
47. TGC (2005). Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México (20 años). Santoyo V.E., Ovando S.E, Mooser F. y León P.E. TGC geotecnia S.A. de C.V. y TGC ingeniería S. A. de C.V., México.
48. Torres G. L. (2005). Si contaminamos, pero no tanto, reportaje de los tiradero de Nezahualcóyotl y el Relleno Sanitario Bordo Poniente. Tesis de Licenciatura en periodismo y Comunicación Colectiva. FES-Acatlán, UNAM.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

1. Bravo, M, E. Riesgos Químicos 2007
<http://www.cenapred.gob.mx/es/Investigacion/RQuimicos/>
2. Colmenares M. W. y Santos B.K. Generación y manejo de gases en sitios de disposición final (consultado el octubre de 2008)
http://www.ingenieriaquimica.org/articulos/relleno_sanitario
3. *J.H. Palma G., R. Espinace A., P. Valenzuela T., K. Aguilera A., E. Galeas C.*(2005). Evaluación de la estabilidad mecánica de Rellenos sanitarios en Chile. XVI congreso de ingeniería sanitaria y ambiental aidis – Chile, II simposio latinoamericano de lodos y biosólidos. Viña del Mar, 23 al 26 de Octubre de 2005
http://icc.ucv.cl/geotecnia/05_publicaciones/public_prop/evaluacion_de_la_estabilidad_mecanica_de_rs_aidis.pdf
4. Historia de la ciudad de México. "La ciudad más grande del mundo, México 1988"
<http://www.df.gob.mx/ciudad/historia/3.html>
5. INEGI, 2007. Mapa digital de México.
<http://www.inegi.gob.mx>
<http://www.obras.df.gob.mx> consulta el 26 de enero de 2008.
6. Instituto de investigaciones jurídicas de la UNAM, 9 a 14 de febrero de 2004
<http://www.juridicas.unam.mx/inst/evacad/eventos/2004/0902/mesa12/341s.pdf>
7. Ley de Aguas Nacionales. última reforma 24 de abril 2004
<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16.pdf>

8. Ley de Conservación de Suelo y Agua
http://200.23.34.9/comcafedata/11/Lecturas/Lecturas_complementarias/conservacion_de_suelo_utoipia.pdf
9. Ley de Sanidad Vegetal última reforma 26 de julio de 2007
<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/117.pdf>
10. Ley Federal sobre Metrología y Normalización última reforma 28 de julio de 2006
<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/130.pdf>
11. Ley General de Asentamientos Humanos última reforma 5 septiembre 1994
<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/133.pdf>
12. Ley General de Bienes Nacionales última reforma 31 de agosto 2007
<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/267.pdf>
13. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente. última reforma 5 de julio de 2007
<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148.pdf>
14. Ley Minera última reforma 26 de junio de 2006
<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/151.pdf>
15. Ley Orgánica de la Administración Pública Federal 2003
<http://www.funcionpublica.gob.mx/leyes/loapf2000.htm>
16. Evolución de la Gran Tenochtitlán, México. Junio de 2005.
<http://www.mexicomaxico.org/introTenoch.htm>
17. Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT
<http://www.bordercenter.org/pdfs/MexicanOfficialStandardNOM-052-SEMARNAT-1993.pdf>
18. Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Descargas de Aguas Residuales
<http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Pages/normasoficialesmexicanasvigentes.aspx>
19. Rellenos Sanitarios (29 de enero de 2008)
http://sabersinfin.blogspot.com/2008_01_01_archive.html
20. Secretaría del Medio Ambiente Gobierno del Distrito Federal, programa de acción climática de la ciudad de México 2008-2012/resumen
http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/paccm_resumen.pdf
21. Secretaría de obras y servicios, ciudad de México, 2008.
<http://www.obras.df.gob.mx/>
22. Reglamento de la Ley de aguas Nacionales, última reforma 29-08-2002
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LAN.pdf
23. Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/compi/r251188.html>

24. Reglamento de la Ley General del para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/doc/263.doc>
25. Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos <http://www.schenker.com.mx/upload/attachments/154/15409/Reglamentoparatransporteterrestredematerialespeligrosos.pdf>
26. Reglamento para la Protección del Ambiente contra la Contaminación Originada por el Ruido <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Estatal/DISTRITO%20FEDERAL/Reglamentos/DREG93.pdf>
27. UNAM en el tiempo http://www.unam.mx/acercaunam/unam_tiempo/unam/antecedentes.html

ANEXO A RESULTADOS DEL MÉTODO SÍSMICO

Los sismogramas se obtienen uno por cada fuente o punto de tiro que se establece, una vez que se revisa que la geometría de los sismogramas es correcta se realiza una representación grafica de los primeros arribos en tiempo (milisegundos) contra la distancia de cada canal (metros), con la información de primeros arribos de cada sismograma; en la figura A.1, se ilustra la generación del diagrama tiempo contra distancia a partir de un levantamiento tradicional que consiste en colocar las fuentes en los extremos del tendido de geófonos.

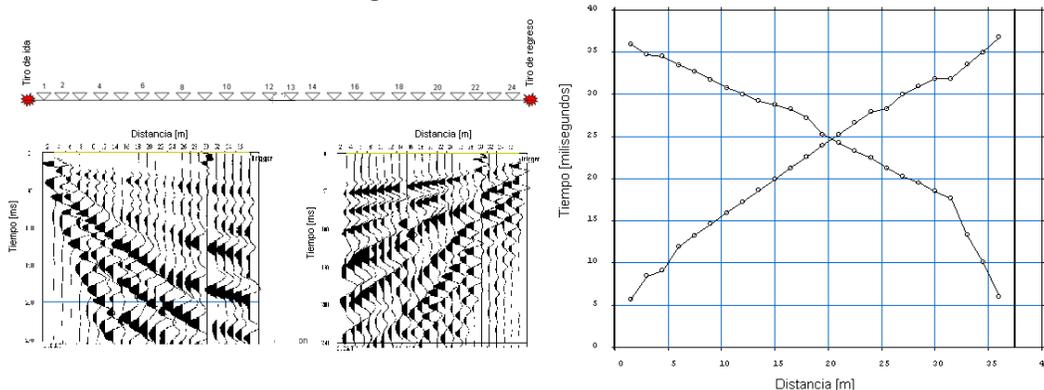


Figura A.1 Generación del diagrama tiempo contra distancia (derecha), a partir de los sismogramas (izquierda)

Se realiza el análisis de cada capa propuesta respecto al arribo y su cambio de inclinación (inflexión) para obtener un modelo de capas por diferencia de velocidades. El modelo de capas responde a los contrastes en las características del terreno como son el tipo de material, su compactación, su densidad, su porosidad, contenido de fluido en sus poros, entre otros. Finalmente se realiza una inversión de las velocidades por medio de los atributos sísmicos de cada canal y su respuesta de viaje para cada material y su trayectoria realizando una reconstrucción de esta respuesta, su representación gráfica es a color y delimita las diferentes velocidades en metros/segundos y las profundidades en metros. Estas presentaciones se logran con el apoyo de software especializado, uno de los más sencillos y el utilizado es el *Seisimager* de *Oyo Corporation*, con sus módulos *Pickwin*, para la parte de reflexión y para la refracción además el módulo *Plotrefa*.

La parte de adquisición de reflexión, se obtuvo al mismo tiempo del levantamiento de sísmica de refracción, esto quiere decir que la geometría de los geófonos es la misma 1.5m entre cada geófono, el ajuste fue realizar un levantamiento continuo y sistemático a cada 9m (6 geófonos) se generó un sismograma iniciando en el geófono 1. En el capítulo IV se presentan los resultados del estudio.

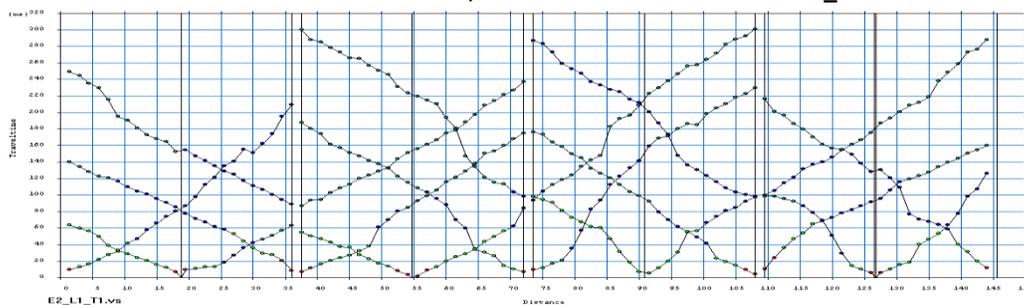
El levantamiento de datos de sísmica de refracción se realizó con la geometría de distancia entre los geófonos de 1.5m, se obtuvieron hasta cuatro sismogramas por tramo de 24 geófonos, tratando de obtener la mayor cantidad de información del

subsuelo, en la figura III.36 se observa el arreglo para un tramo de 24 canales (de forma visual) y geófonos (sismodetectores en el levantamiento en campo).

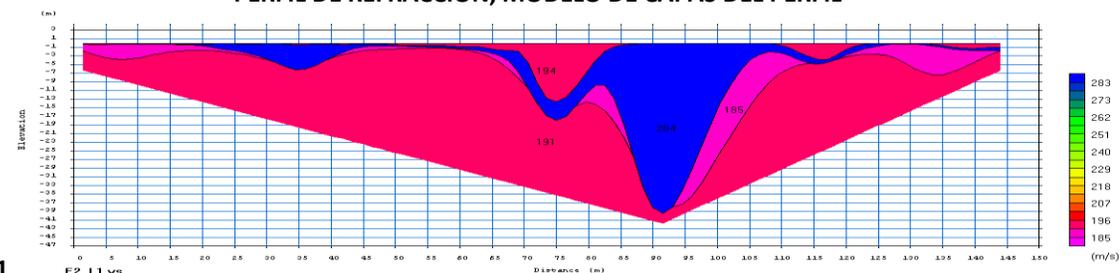
Los sismogramas se obtienen uno por cada fuente o punto de tiro que se establece, una vez que se revisa que la geometría de los sismogramas es correcta se realiza una representación grafica (diagrama de distancia contra tiempo) de los primeros arribos en tiempo (milisegundos) contra la distancia de cada canal (metros). Se realiza el análisis de cada capa propuesta respecto al arribo y su cambio de inclinación (inflexión) para obtener un modelo de capas por diferencia de velocidades de cada capa. El modelo de capas responde a los contrastes en las características del terreno como son el tipo de material, su compactación, su densidad, su porosidad, contenido de fluido en sus poros, entre otros. Finalmente se realiza una inversión de las velocidades por medio de los atributos sísmicos de cada canal y su respuesta de viaje para cada material y su trayectoria realizando una reconstrucción de esta respuesta, su representación gráfica es a color y delimita las diferentes velocidades en metros/segundos y las profundidades en metros.

La revisión de la parte sísmica se llevará de la misma forma que en la parte electromagnética, la Etapa II seguida de la Etapa IV. En la Etapa II se presentan 5 perfiles E2_L1, E2_L2, E2_L3, E2_L4 y E2_L5, que presentan las tres revisiones el Diagrama tiempo contra distancia (dromocrona), el modelo de capas y el perfil con inversión. El perfil E2_L1 con rumbo N30°W cubre una longitud de 144.5m, observándose el perfil de este a oeste.

**RELLENO SANITARIO BORDO PONIENTE, ETAPA II
PERFIL DE REFRACCIÓN, DROMOCRONAS DEL PERFIL E2_L1**



PERFIL DE REFRACCIÓN, MODELO DE CAPAS DEL PERFIL



E2_L1

PERFIL DE REFRACCIÓN, INVERSIÓN DE CAPAS DEL PERFIL E2_L1

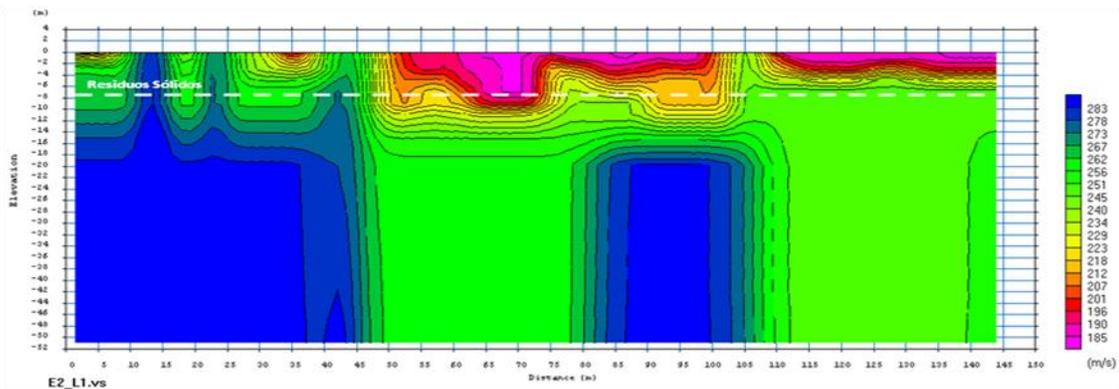


Figura A.2 Resultados de Sísmica de Refracción del Perfil E2_L1

El perfil E2_L2 tiene un rumbo S30°W (figura A.3), perpendicular al perfil E2_L1, con coincidencia del geófono 6 (9m) del perfil E2_L2 y el geófono 12 (18m) del perfil E2_L1 con una longitud de 73.5m y la vista es de norte a sur; el diagrama tiempo contra distancia (dromocrona) se compone de 7 sismogramas (7 fuentes), el cual muestra saltos en sus primeros arribos que se reflejaran en la parte final de inversión (figura III.39); se muestran en color rojo los primeros arribos de la primer capa, en color verde claro los primeros arribos para la segunda capa, azules los primeros arribos para la tercera capa y verde olivo los primeros arribos para la cuarta capa; además, el tiempo manejado es poco mas de 300 milisegundos refleja un material de poca compactación.

El modelo obtenido del diagrama distancia contra tiempo (dromocrona), se observa en la parte media de la figura III.37, presenta un modelo de cuatro capas iniciando con un pseudoestrato discontinuo de velocidad 209m/s en azul, espesor máximo de 4.3m, el segundo pseudoestrato presenta una velocidad de 175m/s en rosa con espesor máxima de 3.2m continua los primeros 54m, el tercer pseudoestrato con una velocidad de 196m/s en color verde apareciendo de forma discontinua, con un espesor máximo de 2m y para el cuarto pseudoestrato la velocidad es de 193m/s y se extiende a lo largo del perfil y hasta 8m de profundidad.

El perfil de inversión muestra el relleno sanitario reportado entre 6.2 y 7.2m; sin embargo en el perfil se observa que esta vista perpendicular al perfil anterior el relleno ha sido reintegrado al terreno natural existiendo una estructura de menor a los 5m y que existen estructuras aisladas que reflejan un tipo de residuo mas compacto o de mayor densidad en los primeros 5m con espesor de 2.8m.

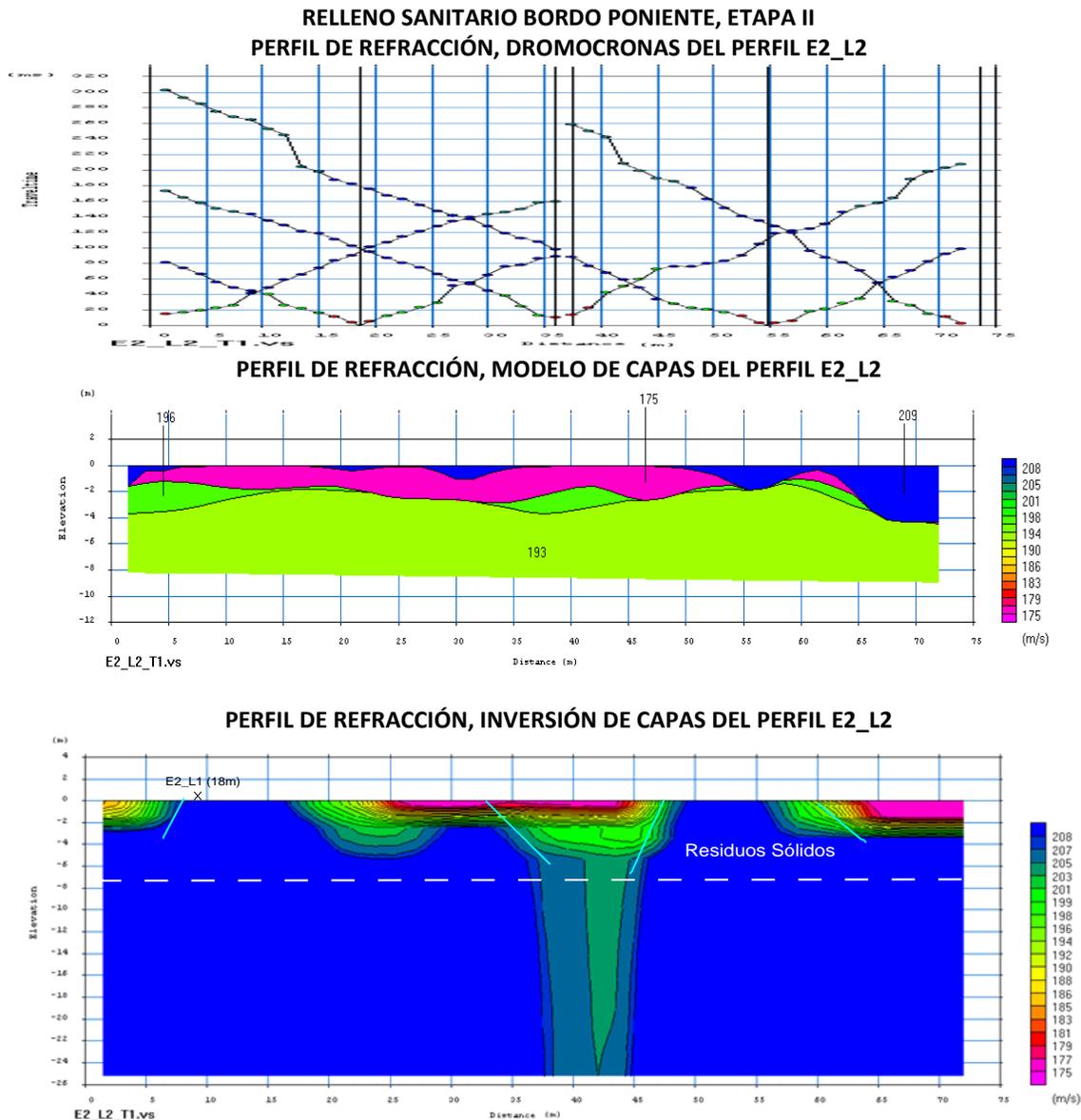
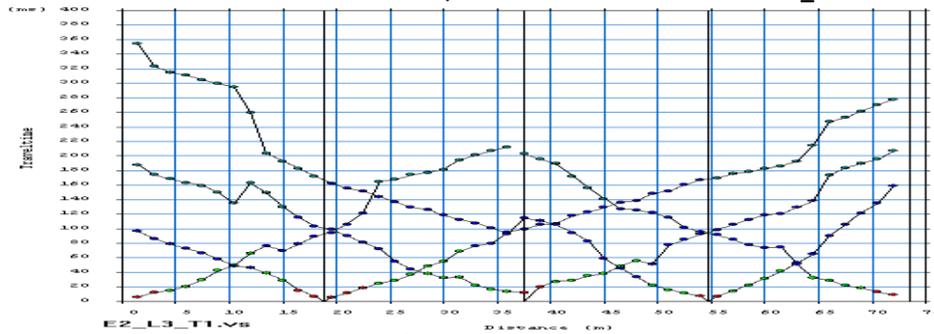


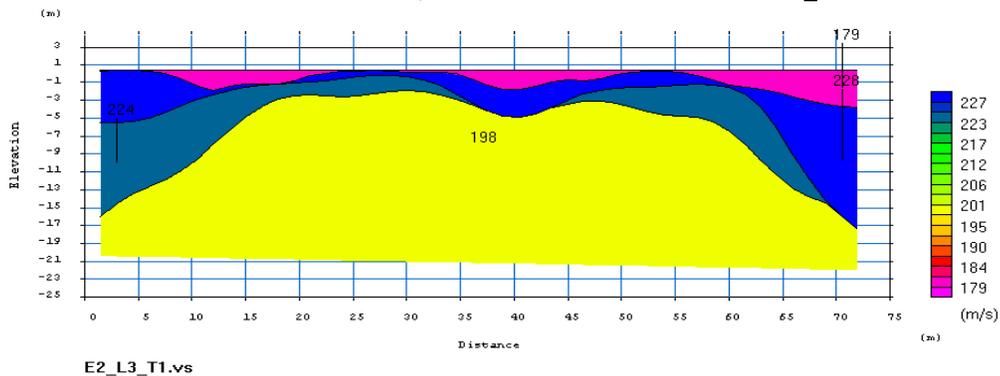
Figura A.3 Resultados de Sísmica de Refracción del Perfil E2_L2

El perfil E2_L3 es de igual forma perpendicular al perfil E2_L1 y paralelo al perfil E2_L2 con una distancia con este último es de 18m, con un rumbo S30°W y con coincidencia del geófono 6 (9m) y el geófono 24 (36m) del perfil E2_L1. El perfil E2_L3 tiene una longitud total de 73.5m se compone de ocho sismogramas (8 fuentes) con arribos menores de 360 milisegundos, que presenta saltos de los primeros arribos que al igual que el perfil proveen información estructural (figura A.4). Se obtuvieron tres inflexiones que determinan cuatro capas. El modelo de capas muestra cuatro capas a diferentes colores. El perfil de inversión del modelo de capas ya mencionado, presenta el relleno sanitario a la profundidad máxima que se reporta de 7.2m, se observa de igual forma que en perfil anterior que el relleno se ha integrado en gran parte al terreno natural.

**RELLENO SANITARIO BORDO PONIENTE, ETAPA II
PERFIL DE REFRACCIÓN, DROMOCRONAS DEL PERFIL E2_L3**



PERFIL DE REFRACCIÓN, MODELO DE CAPAS DEL PERFIL E2_L3



PERFIL DE REFRACCIÓN, INVERSIÓN DE CAPAS DEL PERFIL E2_L3

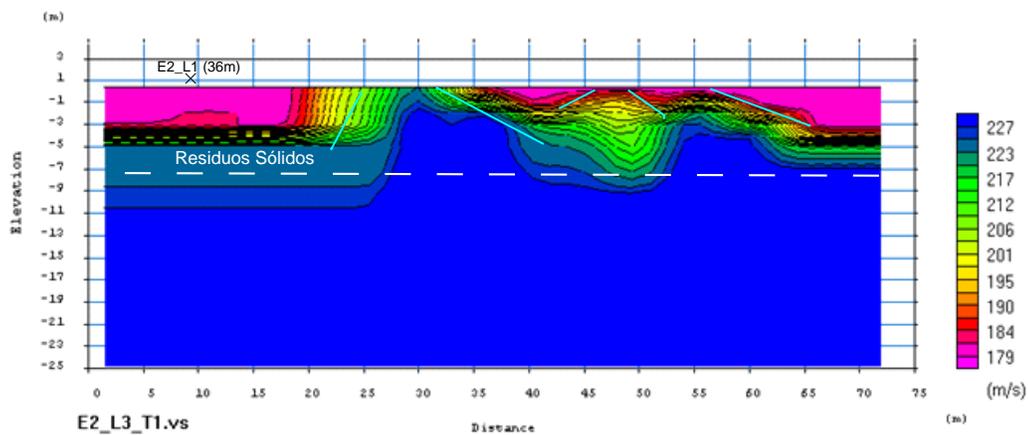
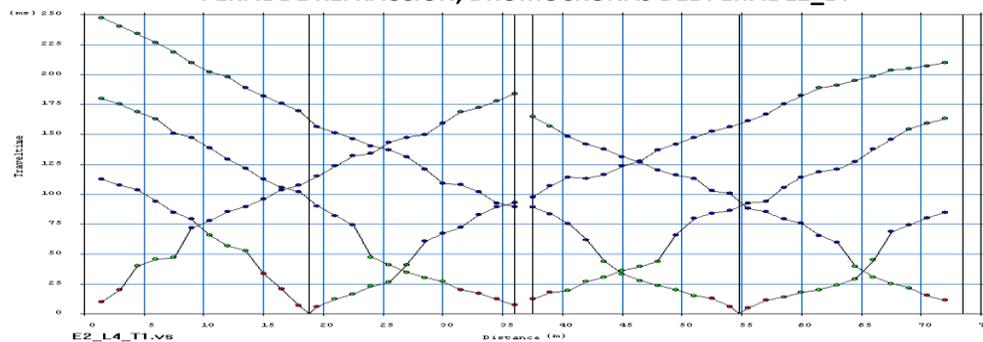


Figura A.4 Resultados de Sísmica de Refracción del Perfil E2_L3

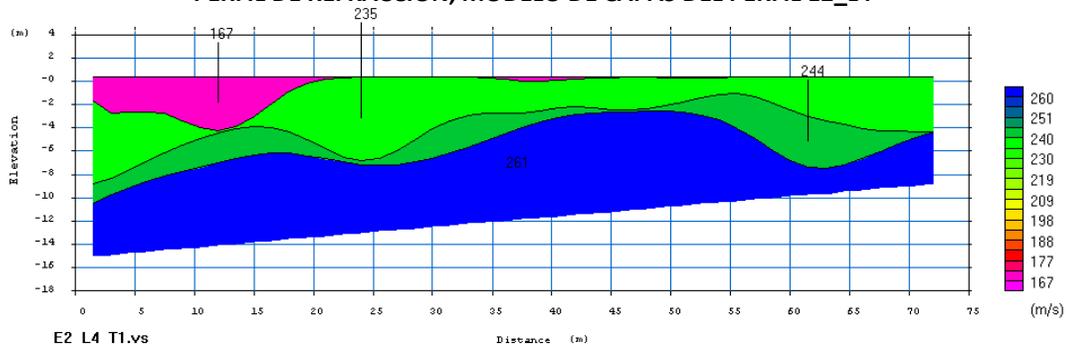
El perfil E2_L4 es de igual forma perpendicular al perfil E2_L1 y paralelo a los perfiles E2_L2 y E2_L3 con una distancia con este último es de 36m, con un rumbo S30°W y con coincidencia del geófono 6 (9m) y el geófono 48 (72m) del perfil E2_L1. El perfil E2_L4 tiene una longitud total de 73.5m (figura A.5) y se conforma con ocho sismogramas (8 fuentes) con arribos menores a los 250 milisegundos, que presentan solo dos saltos de los primeros arribos que al igual que en los perfiles previos esto provee información estructural. Se obtuvieron tres inflexiones que determina cuatro capas, El modelo de capas muestra cuatro pseudocapas, el primero tiene una velocidad de 167m/s en color rosa discontinuo de 1.5 a 24m con espesor máximo

4.5m, en donde es importante señalar corresponde a una zona de arbustos de más de 1.5m de altura que termina 6m hacia el norte; el segundo tiene una velocidad de 235m/s en color verde claro a lo largo del perfil con espesor máximo de 7m; el tercero con una velocidad de 244m/s en color verde opaco a lo largo del perfil con un espesor máximo de 4m y finalmente el cuarto con velocidad de 261m/s en color azul que se extiende a lo largo del perfil que aparece desde 3m hasta 15m de profundidad. El perfil de inversión del modelo de capas ya mencionado, presenta el relleno sanitario a la profundidad máxima que se reporta de 7.2m, se observa de igual forma que en los perfiles previos parte del relleno se ha integrado al terreno natural, se aprecian estratos que van aumentando en velocidad hasta la máxima para este perfil las diferentes consolidaciones y destrucción del terreno debido al efecto de las raíces de los arbustos y de animales de subsuelo, la capa de baja velocidad 167m/s con un espesor de poco mas de 3m se extiende de los 1.5 a 20m y de 66 a 72m, y las anomalías sísmicas aisladas a los 35 a 45m y de 48 a 58m son cerradas con materiales consolidados y residuos sólidos difíciles de degradar

**RELLENO SANITARIO BORDO PONIENTE, ETAPA II
PERFIL DE REFRACCIÓN, DROMOCRONAS DEL PERFIL E2_L4**



PERFIL DE REFRACCIÓN, MODELO DE CAPAS DEL PERFIL E2_L4



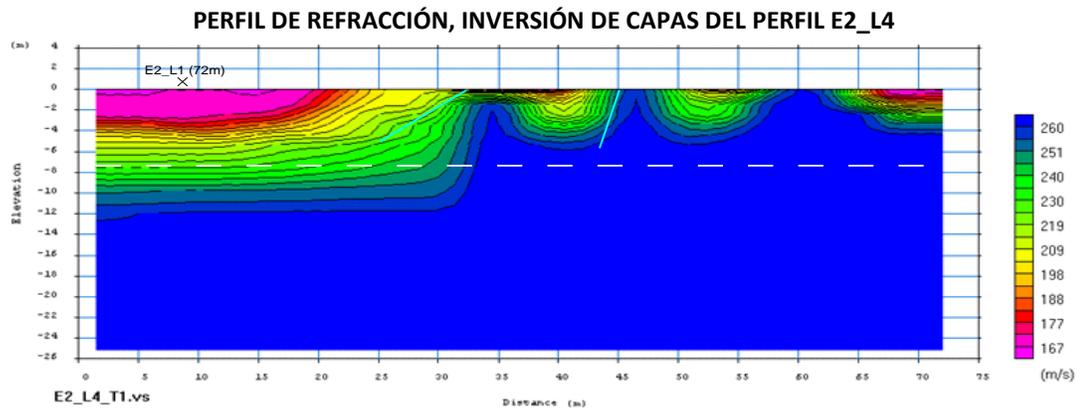


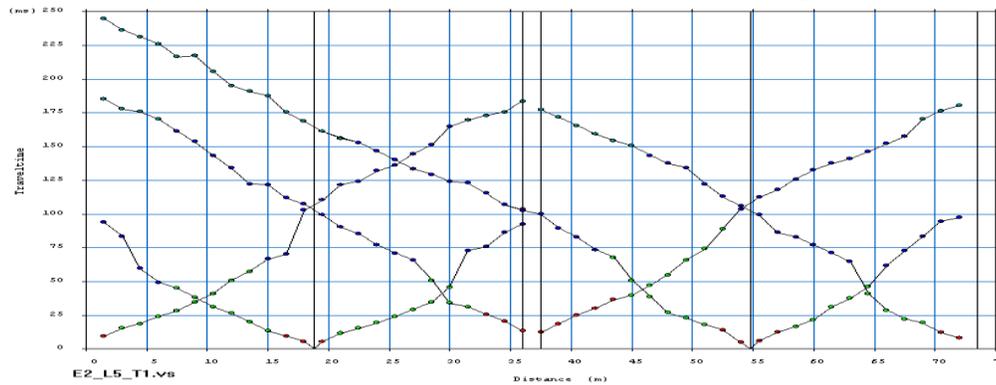
Figura A.5 Resultados de Sísmica de Refracción del Perfil E2_L4

El perfil E2_L5 es de igual forma perpendicular al perfil E2_L1 y paralelo a los perfiles E2_L2, E2_L3 y E2_L4 con una distancia con este último es de 36m, con un rumbo S30°W y con coincidencia del geófono 6 (9m) y el geófono 72 (108m) del perfil E2_L1. El perfil E2_L5 tiene una longitud total de 73.5m (figura A.6) y se conforma con siete sismogramas (7 fuentes) con arribos menores a los 250 milisegundos, que presentan cuatro saltos de los primeros arribos que al igual que en los perfiles previos esto provee información estructural. Se obtuvieron tres inflexiones que determinan cuatro capas.

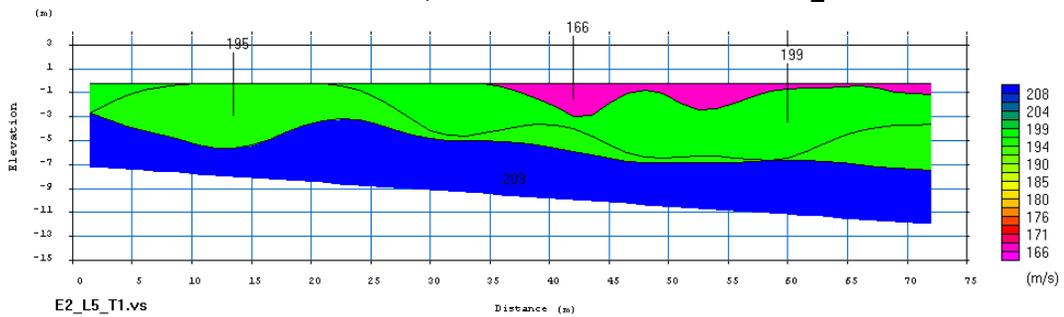
El modelo de capas muestra cuatro capas, el primero tiene una velocidad de 166m/s en color rosa a partir de 35 a 72m con espesor máximo 3.3m, en donde es importante señalar corresponde a una laguna superficial a 6m del último geófono; el segundo tiene una velocidad de 199m/s en color verde claro a lo largo del perfil con espesor máximo de 7m; el tercero con una velocidad de 195m/s también en color verde claro a lo largo del perfil con un espesor máximo de 5.5m y finalmente el cuarto con velocidad de 209m/s en color azul que se extiende a lo largo del perfil que aparece desde los 3m hasta 12m de profundidad.

El perfil de inversión del modelo de capas, presenta el relleno sanitario a la profundidad máxima que se reporta de 7.2m, se observa de igual forma que en los perfiles previos pero en mayor grado la integración del relleno al terreno natural, la observación de una laguna al lado derecho del perfil también ilustra la anomalía de baja velocidad en ese extremo con materiales consolidados y residuos sólidos difíciles de degradar.

**RELLENO SANITARIO BORDO PONIENTE, ETAPA II
PERFIL DE REFRACCIÓN, DROMOCRONAS DEL PERFIL E2_L5**



PERFIL DE REFRACCIÓN, MODELO DE CAPAS DEL PERFIL E2_L5



PERFIL DE REFRACCIÓN, INVERSIÓN DE CAPAS DEL PERFIL E2_L5

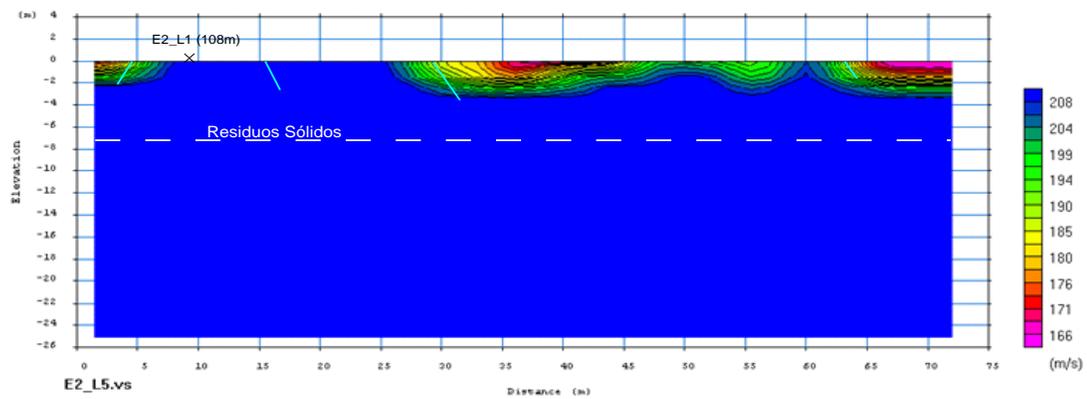


Figura A.6 Resultados de Sísmica de Refracción del Perfil E2_L5

El perfil E4_L1 como se entiende se llevó a cabo en la Etapa IV del Relleno Sanitario Bordo Poniente con un rumbo N35°W con una longitud total de 145.5 metros, generándose el modelo con ocho sismogramas, los canales se localizan en el eje horizontal y sobre la misma posición se puede observar hasta cinco datos para un solo canal. La figura III.43 muestra el diagrama de Distancia contra Tiempo (Dromocrónas), el modelo de capas y la inversión del modelo de capas.

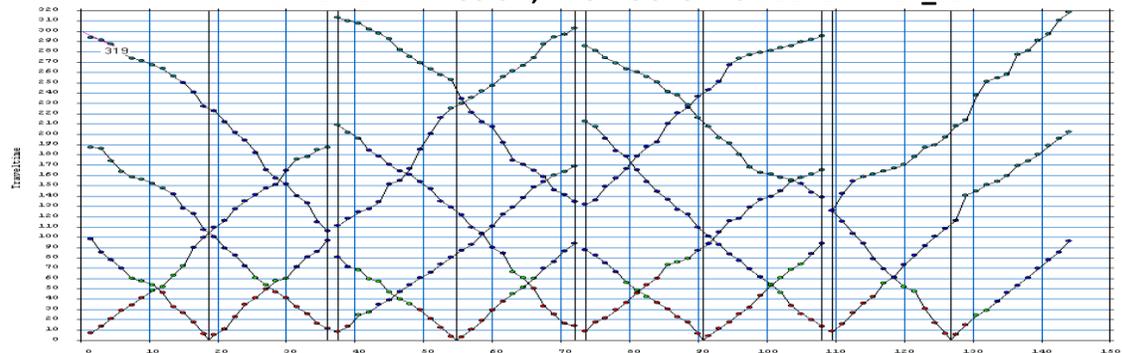
Analizando el diagrama tiempo contra distancia de la figura A.7 (parte superior), se compone de cuatro tramos de 24 canales, sumando 145.5 metros de longitud (con sus respectivas fuentes en los extremos) es posible observar las fuentes empleadas

al graficarse forman una “V”; es importante señalar que ésta presenta huecos intermedios visibles a partir de los sismogramas generados con fuentes más alejadas para cada tramo, lo que significa que en el subsuelo se tiene una discontinuidad estructural; el diagrama tiempo contra distancia refleja por lo menos tres inflexiones y para cada una de ellas una velocidad y capa diferentes, los cambios de colores en los círculos representan las diferentes capas; para este perfil se obtuvieron pseudo-velocidades de 122, 172, 142 y 312 metros/segundos.

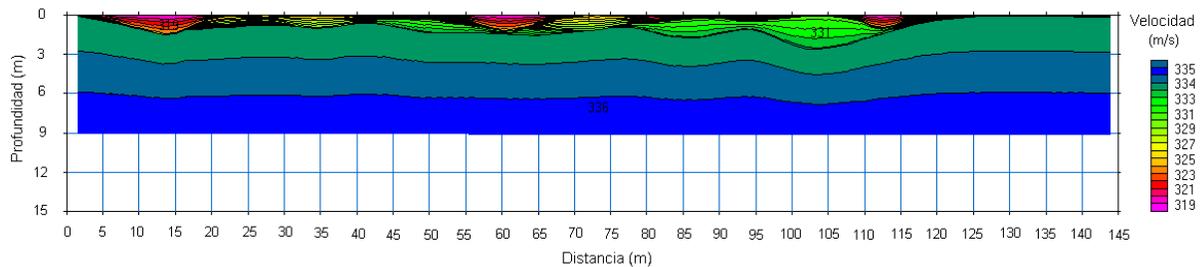
El perfil donde se representan las pseudo-velocidades es el perfil de modelo de capas en la figura A.7 (parte intermedia), se puede observar que las capas con las velocidades anteriormente mencionadas se representan con colores, los rosas representan los valores más bajos de velocidades entre 318-320 m/s, los tonos amarillos valores intermedios de velocidades entre 324-327 m/s y los azules valores altos de velocidades entre 334-336 m/s; en donde se observa un material de bajas velocidades superficialmente con un espesor variable máximo de hasta 2 metros mostrándose discontinuo a lo largo del perfil, posteriormente se observa unos pseudoestratos de velocidades muy cercanas entre 334 a 336 m/s cercanas a 3 metros cada pseudoestrato pudiendo establecerse cuatro, y una profundidad de investigación de 9 metros.

El perfil de inversión del modelo anterior figura A.7 (parte inferior), donde se lleva a cabo un procesamiento numérico de los datos de campo para la reconstrucción del modelo con valores reales muestra que se pudo obtener información máximo de 6 metros de profundidad debido principalmente a la presencia de fluidos en gran cantidad que para este método de investigación atenúan el viaje de las ondas por tratarse de una capa no elástica que altera la velocidad, además de que los residuos sólidos aunque las densidades de compresión son del orden de hasta 1000 kg/m^3 se comporta como un medio que disipa (alta porosidad); si se pone en perspectiva el suelo tiene una densidad de $1.55\text{-}1.96 \text{ gr/cm}^3$ ($1.55\text{-}1.96 \text{ kg/m}^3$). Los valores de baja velocidad aparecen superficialmente y distribuidas a lo largo del perfil con velocidades de 318 m/s y espesores variables de centímetros hasta 2 metros posteriormente se observan capas en tonalidades verdes de velocidades entre 340 y 350 m/s hasta máximo 5 metros estableciendo estructuras de reacomodo de los residuos sólidos de forma lateral.

**RELLENO SANITARIO BORDO PONIENTE, ETAPA IV
PERFIL DE REFRACCIÓN, DROMOCRONAS DEL PERFIL E4_L1**



PERFIL DE REFRACCIÓN, MODELO DE CAPAS DEL PERFIL E4_L1



PERFIL DE REFRACCIÓN, INVERSIÓN DE CAPAS DEL PERFIL E4_L1

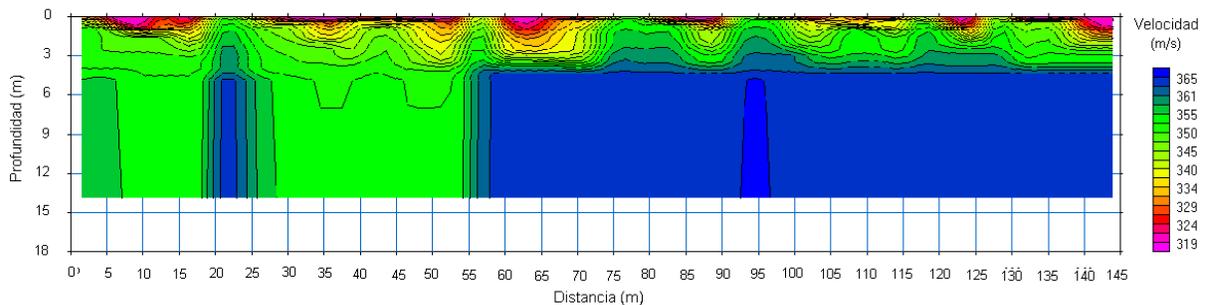


Figura A.7 Resultados de Sísmica de Refracción del Perfil E4_L1

El diagrama distancia contra tiempo, modelo de capas y la inversión que se encuentra en las figuras posteriores se omitirá la descripción del diagrama tiempo contra distancia debido a que el modelo de capas contiene la información de éste.

El perfil E4_L2 de la Etapa IV del Relleno Sanitario Bordo Poniente, se planeó perpendicular al perfil E4_L1, cruzándolo en el metro 40 con el metro 9 del perfil 2 cubriendo una longitud total de 73.5 metros y para generarse la información concerniente a este se utilizaron ocho sismogramas (figura A.8).

El modelo de capas del perfil 2 muestra una inclinación en las pseudocapas observables, donde se observa la capa de mas baja velocidad (301 m/s) con un espesor de cm a 11 metros limitado a 47 metros siendo superficial solamente 12 metros, la que se encuentra entre pseudocapas de velocidades mayores hasta la profunda de 412 m/s llegando hasta 23 metros de profundidad. El perfil E4_L2 en la

parte de inversión presenta la misma problemática que el perfil E4_L1, pero se puede observar información estructural hasta 9 metros de los cuales es importante identificar tres capas; la de baja velocidad de 301 m/s cubre solo los primeros 35 metros y se extiende desde la superficie hasta 3 metros; la de velocidad media de 380 m/s que se encuentra por debajo de la anterior y cubriendo el resto del perfil con profundidad variable de 0.4 hasta 9 metros y por último la capa de mayor velocidad de 418 m/s que cubre el resto del perfil donde es probable no llegue hasta los 29 metros que se observan.

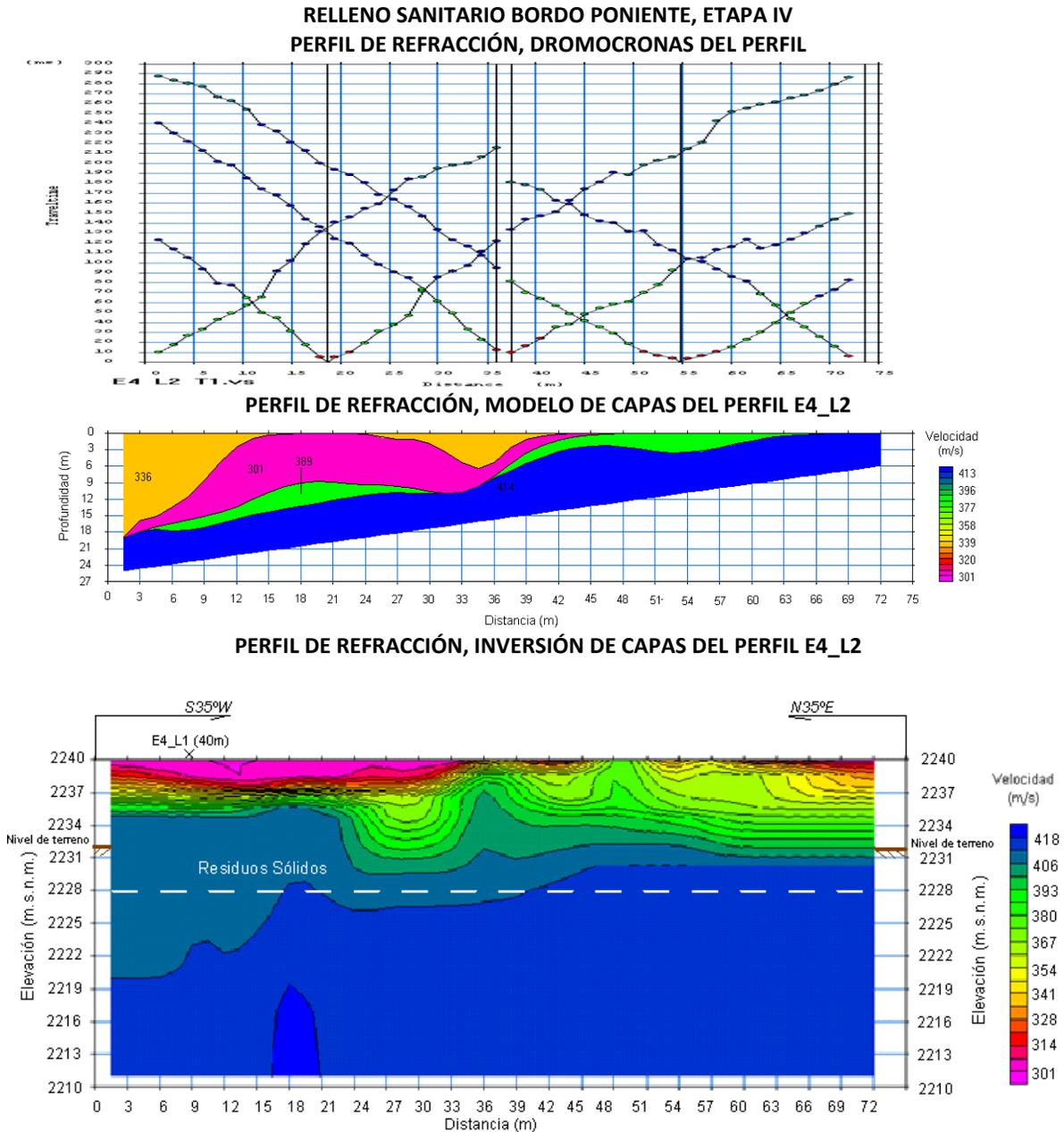


Figura A.8 Resultados de Sísmica de Refracción del Perfil E4_L2

El perfil E4_L3 de la etapa IV, se observa en la figura A.9 en donde el modelo de velocidades muestra una variación mayor en velocidad observándose bajas velocidades de 105, 200 y 243 m/s; la aparición de las velocidades cambia al observarse secciones superficiales de capas con velocidad de 243 m/s con extensión no mayor a 20 metros y profundidad menor a 3 metros; intercalándose las otras dos velocidades, para finalmente encontrársela ultima capa con una velocidad de 219 m/s hasta llegar a una profundidad de 18 metros. El perfil de inversión presenta un modelo parecido al perfil 2, solo llegando a una profundidad de 8 metros pero definiendo pequeñas celdas de aproximadamente 25 metros y una separación de 2 metros delimitado por curvas con velocidades de 213 m/s.

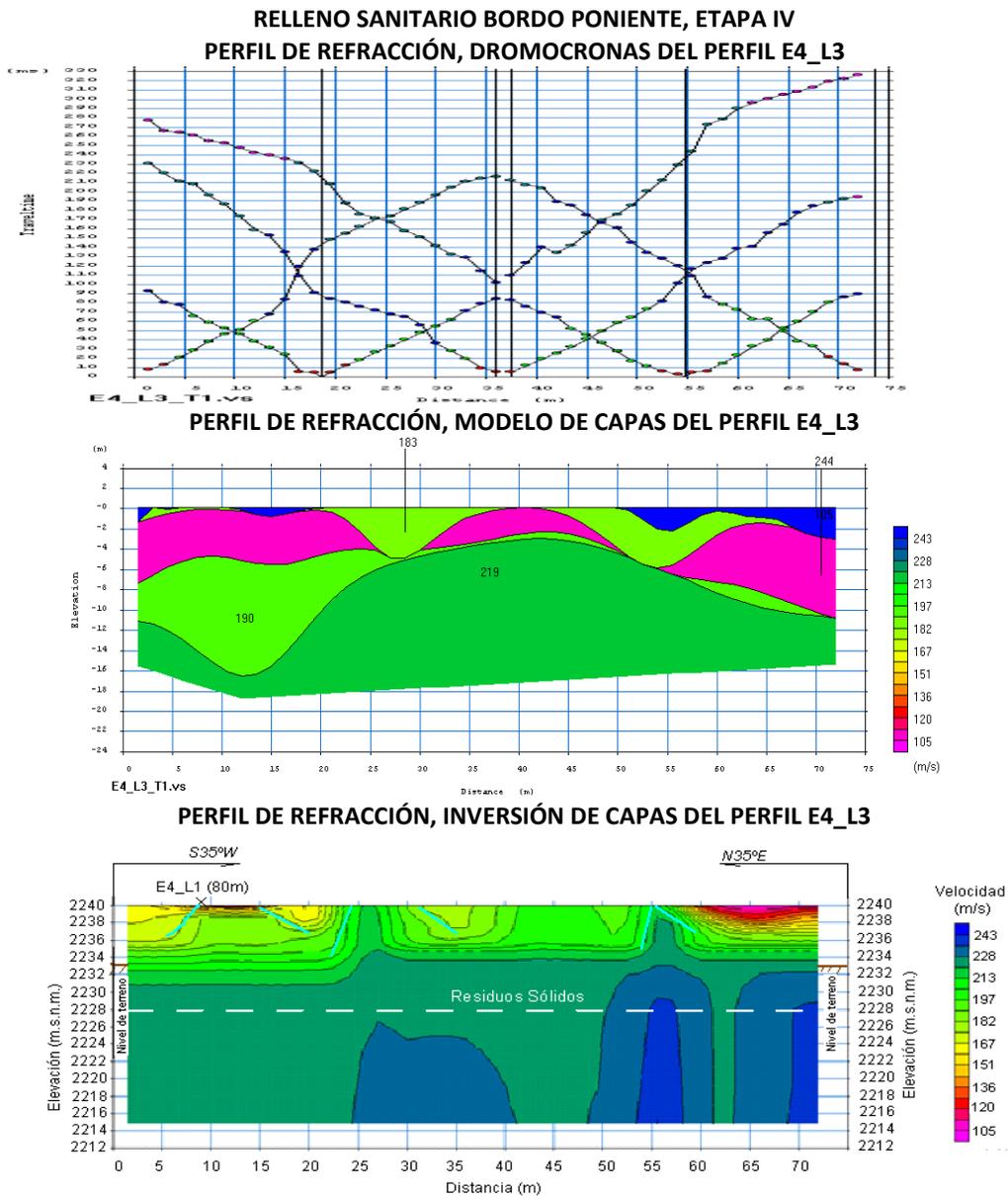


Figura A.9 Resultados de Sísmica de Refracción del Perfil E4_L3

El perfil E4_L4 de la etapa IV, se muestra en la figura A.10 con un rumbo de S35°W, cubre una longitud total de 73.5m y al observarse el modelo de capas es importante establecer que de igual forma aparecen velocidades superficiales altas de 175 m/s, esto es debido a que atraviesa maquinaria los perfiles E4_L3, E4_L4 y E4_L5, además de señalar que los perfiles E4_L2, E4_L3, E4_L4 y E4_L5 son paralelos y hay una distancia entre ellos de 40 metros; las siguientes capas del modelo aparentemente son paralelas pero no regulares.

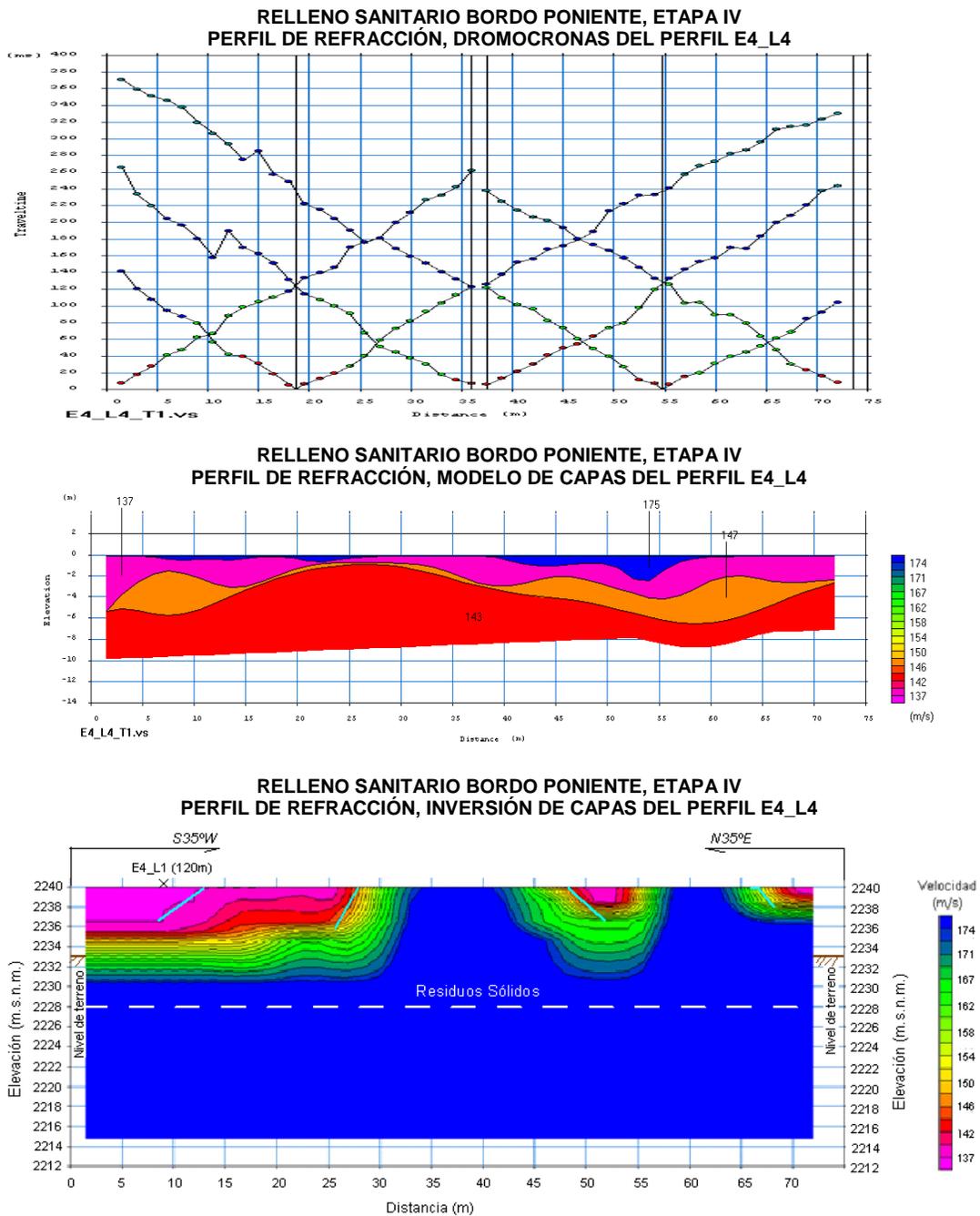


Figura A.10 Resultados de Sísmica de Refracción del Perfil E4_L4

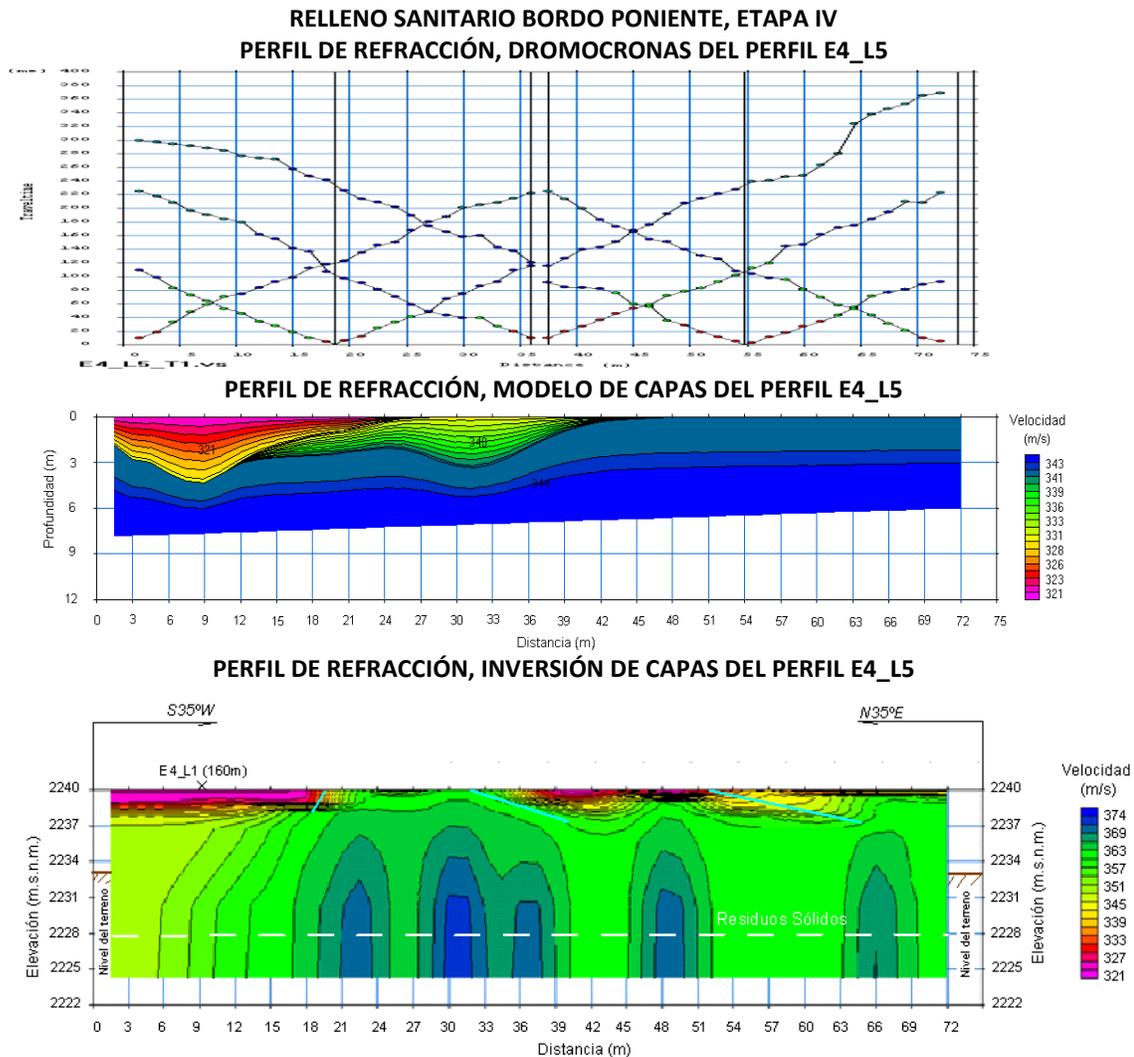


Figura A.11 Resultados de Sísmica de Refracción del Perfil E4_L5

La inversión arroja un modelo que continúa al del perfil E4_L3, pero con una separación mayor de cuerpos entre 5 y 8 metros, con un espesor de 8 metros como máximo, El perfil E4_L4 se intercepta en el geófono 6 (9m) con el perfil E4_L1 en el geófono 80 (120m), como se puede observar en la figura III.45, la profundidad a la que se reporta el relleno (línea punteada), además se observa el nivel del terreno (líneas fuera de la información central del perfil), con la información de la elevación del perfil; la falta de información refleja un gran contenido de lixiviados observados en campo . El perfil E4_L5 de la etapa IV

SISMICA DE REFLEXIÓN

Dentro del procesamiento de los sismogramas de reflexión cabe señalar que tiene mucho que ver la técnica de adquisición para el tratamiento de los datos, en este caso se utilizó la técnica CDP (Common Depth Point), la esquematización del levantamiento se muestra en la figura A.12, en donde se observan los puntos de tiro

y el tendido de los geófonos con dos tramos de 24 canales y 72 metros de longitud total; para este caso se obtienen nueve sismogramas a los cuales se les realiza una corrección estática (eliminación de los primeros arribos), un apilado, control de ganancia y corrección dinámica (migración).

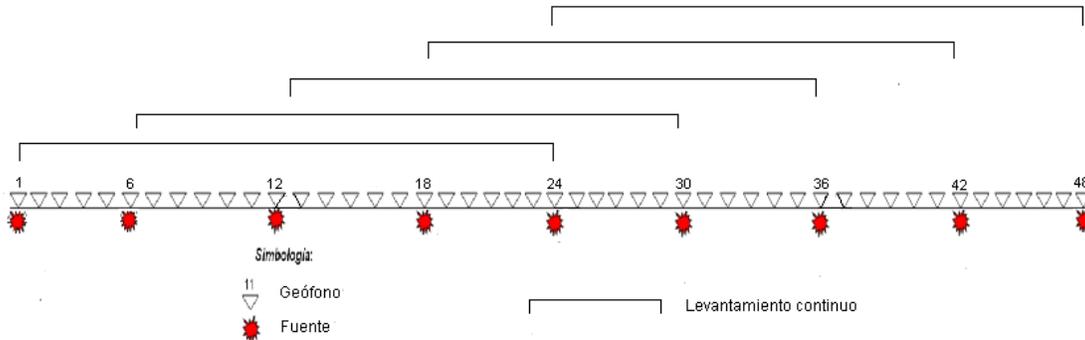


Figura A.12 Levantamiento continuo de la sísmica de reflexión

El resultado del procesamiento, donde se eliminaron los efectos de refracción, se suprimió el sobretiempo contra distancia, se aplicó el control de ganancia automático (después de cada proceso), se realizó el apilamiento vertical y se realizó la migración en tiempo para corregir el tiempo en reflectores se muestra en las figuras de la III.49 a la III.52 en presentación americana (parte superior o cima iluminada) con delimitación de los reflectores presentes visibles con líneas sólidas y la presencia de fluidos (líquidos o gases). Los sismogramas presentan información sísmica de calidad regular a buena debido a la alta porosidad, la falta de consolidación superficial, la situación general de los rellenos sin homogeneidad en sus residuos sólidos; con respecto al registro de tiempo se grabaron 1024 milisegundos, que al realizarse todo el procesamiento se obtiene una profundidad que relaciona la velocidad media que para este medio fue de 375m/s por el tiempo con una doble reflexión.

Los resultados de los perfiles de reflexión, se hacen como en los casos previos, primero la Etapa II y después de la Etapa IV, aclarando que se cubren los mismos perfiles que en la parte de refracción.

En la Etapa II se presenta una profundidad máxima de los perfiles de 105m; el perfil E2_L1 tiene un rumbo N30°W, una longitud total de 144m y para la interpretación se establecen tres tipos de reflectores el primero que se establece como el más superficial entre 0 a 25m, que en general es el más irregular debido al relleno sanitario y parte de la formación arcillosa superior (FAS) de materiales arcillosos con alto contenido de agua; el segundo reflector es de profundidad intermedia de 26 a 70m, que cubre parte de la formación arcillosa superior (FAS), la capa dura (CD) y la formación arcillosa inferior (FAI), donde se observan fluidos en color amarillo a una profundidad de 16 hasta 52m extendiéndose longitudinalmente de 36 a 105m y finalmente el tercer reflector desde 65 a 105m, que cubre los depósitos profundos.

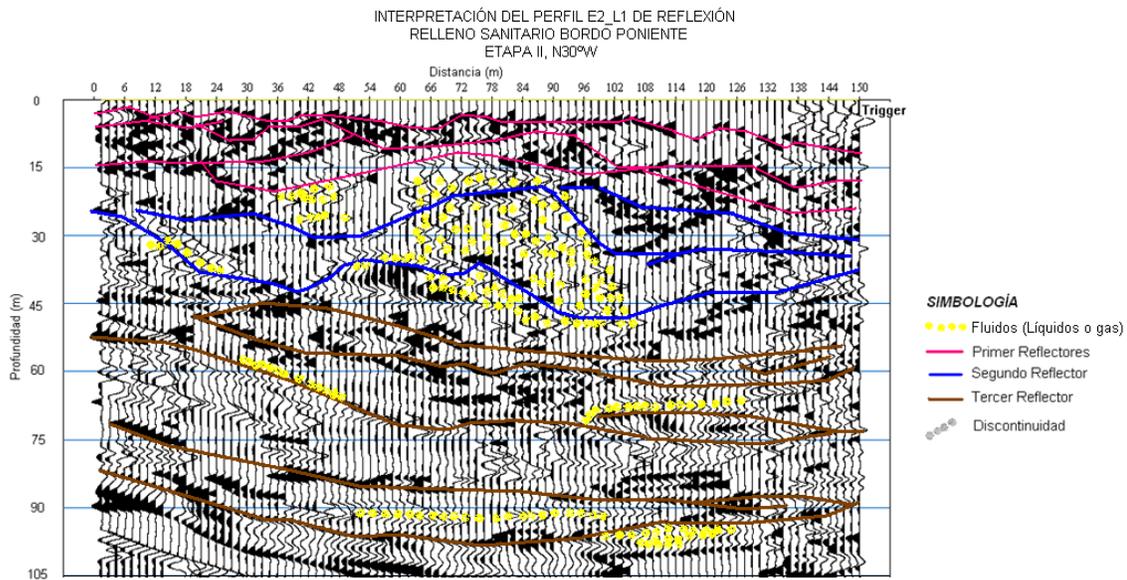


Figura A.13 Perfil E2-L1 de sísmica de reflexión

El perfil E2_L2 tiene un rumbo S30°W, una longitud total de 72m y para la interpretación se establecen tres tipos de reflectores el primero que se establece como el más superficial entre 0 a 27m, que en general es el más irregular debido al relleno sanitario y parte de la formación arcillosa superior (FAS) de materiales arcillosos con alto contenido de agua; el segundo reflector es de profundidad intermedia de 28 a 74m, que cubre parte de la formación arcillosa superior (FAS), la capa dura (CD) y la formación arcillosa inferior (FAI), y finalmente el tercer reflector desde 75 a 105m, que cubre los depósitos profundos.

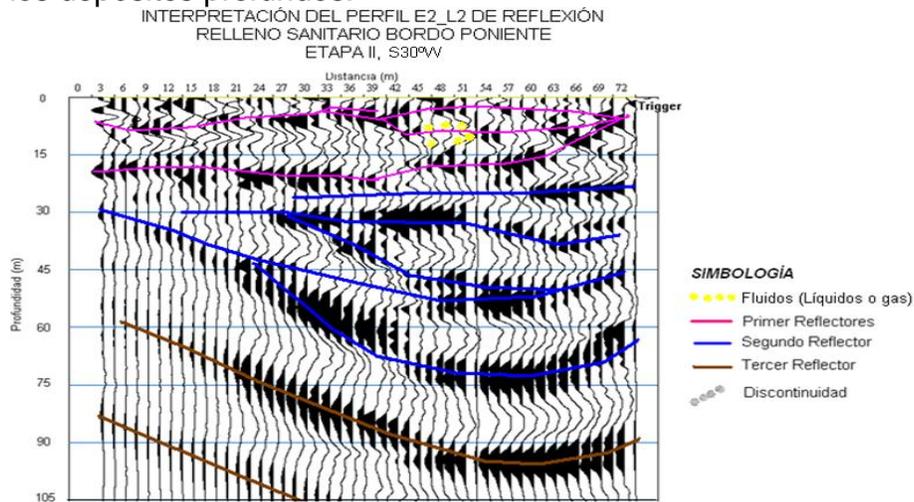


Figura A.14 Perfil E2-L2 de sísmica de reflexión

El perfil E2_L3 tiene un rumbo S30°W, una longitud total de 72m y para la interpretación se establecen tres tipos de reflectores el primero que se establece como el más superficial entre 0 a 20m, que en general es el más irregular debido al relleno sanitario y parte de la formación arcillosa superior (FAS) de materiales arcillosos con

alto contenido de agua; el segundo reflector es de profundidad intermedia de 21 a 65m, que cubre parte de la formación arcillosa superior (FAS), la capa dura (CD) y la formación arcillosa inferior (FAI), y finalmente el tercer reflector desde 66 a 105m, que cubre los depósitos profundos.

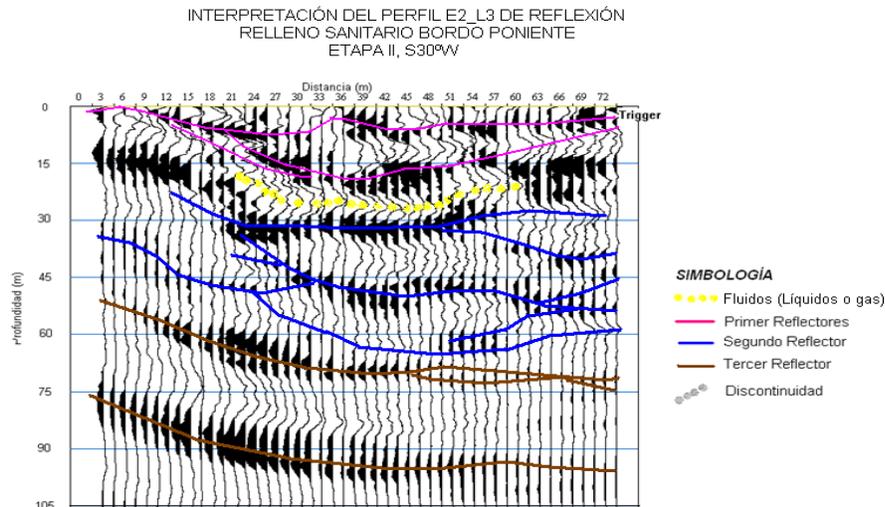


Figura A.15 Perfil E2-L3 de sísmica de reflexión

El perfil E2_L4 tiene un rumbo S30°W, una longitud total de 72m y para la interpretación se establecen tres tipos de reflectores el primero que se establece como el más superficial entre 0 a 25m, que en general es el más irregular debido al relleno sanitario y parte de la formación arcillosa superior (FAS) de materiales arcillosos con alto contenido de agua; el segundo reflector es de profundidad intermedia de 26 a 63m, que cubre parte de la formación arcillosa superior (FAS), la capa dura (CD) y la formación arcillosa inferior (FAI), y finalmente el tercer reflector desde 63 a 105m, que cubre los depósitos profundos.

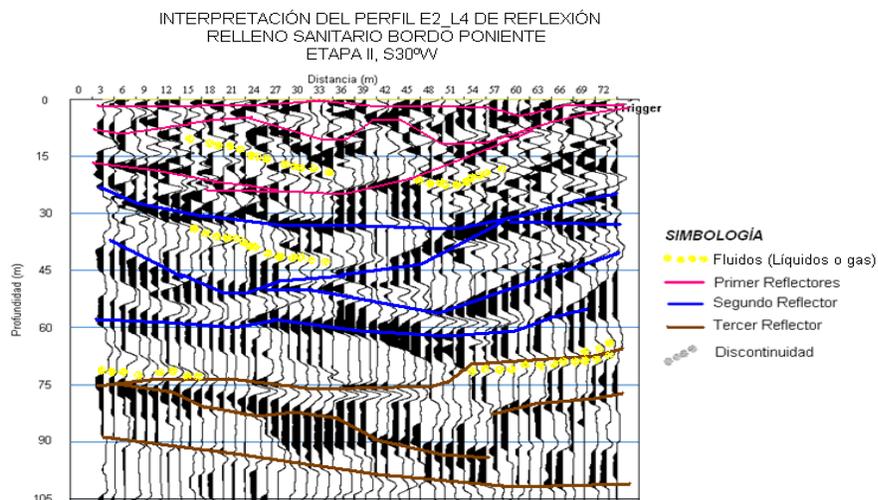


Figura A.16 Perfil E2-L4 de sísmica de reflexión

El perfil E2_L5 tiene un rumbo S30°W, una longitud total de 72m y para la interpretación se establecen tres tipos de reflectores el primero que se establece como el más superficial entre 0 a 25m, que en general es el más irregular debido al relleno

sanitario y parte de la formación arcillosa superior (FAS) de materiales arcillosos con alto contenido de agua; el segundo reflector es de profundidad intermedia de 26 a 74m, que cubre parte de la formación arcillosa superior (FAS), la capa dura (CD) y la formación arcillosa inferior (FAI), y finalmente el tercer reflector desde 75 a 105m, que cubre los depósitos profundos.

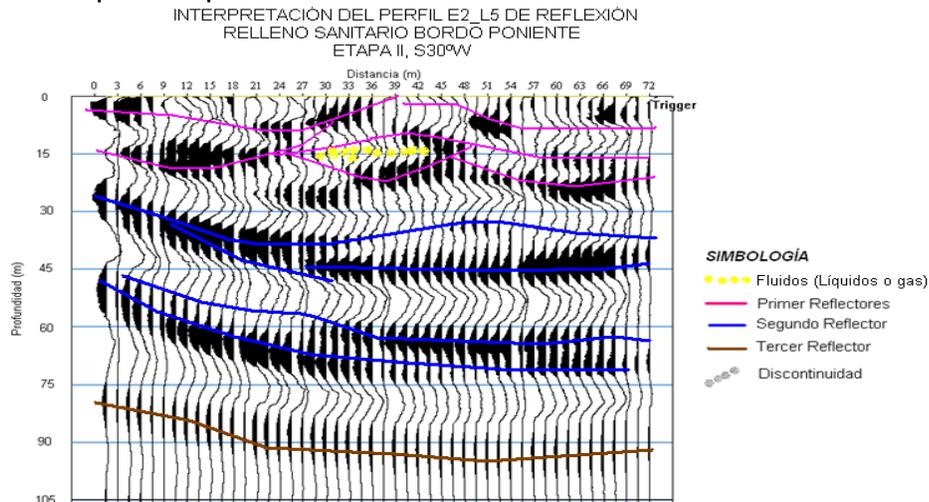


Figura A.17 Perfil E2-L5 de sísmica de reflexión

En la Etapa IV se presenta una profundidad máxima de los perfiles de 90m; el perfil E4_L1 tiene un rumbo N35°W, una longitud total de 65m (perfil incompleto) y para la interpretación se establecen tres tipos de reflectores el primero que se estable como el más superficial entre 0 a 35m, que en general es el más irregular debido al relleno sanitario y parte de la formación arcillosa superior (FAS) de materiales arcillosos con alto contenido de agua; el segundo reflector es de profundidad intermedia de 32 a 50m, que cubre parte de la formación arcillosa superior (FAS), la capa dura (CD) y la formación arcillosa inferior (FAI), donde se observan fluidos en color amarillo a una profundidad de 16m hasta 44m extendiéndose longitudinalmente de 110 a 135m y finalmente el tercer reflector desde 51 a 90m, que cubre los depósitos profundos.

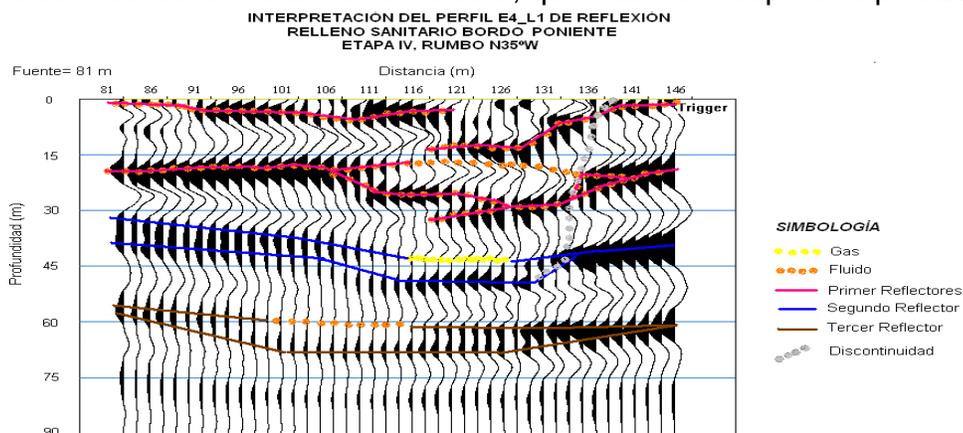


Figura A.18 Perfil E4-L1 de sísmica de reflexión

El perfil E4_L2 tiene un rumbo S35°W, una longitud total de 72m y para la interpretación se establecen tres tipos de reflectores el primero que se estable como el más superficial entre 0 a 25m, que en general es el más irregular debido al relleno

sanitario y parte de la formación arcillosa superior (FAS) de materiales arcillosos con alto contenido de agua; el segundo reflector es de profundidad intermedia de 26 a 42m, que cubre parte de la formación arcillosa superior (FAS), la capa dura (CD) y la formación arcillosa inferior (FAI), donde se observan fluidos en color amarillo a una profundidad de 8m hasta 28m extendiéndose longitudinalmente por todo el perfil y finalmente el tercer reflector desde 42 a 90m, que cubre los depósitos profundos.

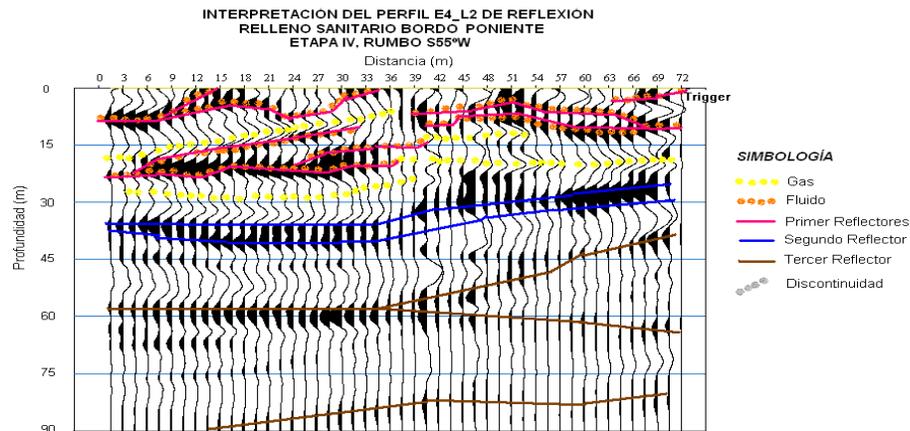


Figura A.19 Perfil E4-L2 de sísmica de reflexión

El perfil E4_L3 tiene un rumbo S35°W, una longitud total de 72m y para la interpretación se establecen tres tipos de reflectores el primero que se establece como el más superficial entre 0 a 25m, que en general es el más irregular debido al relleno sanitario y parte de la formación arcillosa superior (FAS) de materiales arcillosos con alto contenido de agua; el segundo reflector es de profundidad intermedia de 26 a 54m, que cubre parte de la formación arcillosa superior (FAS), la capa dura (CD) y la formación arcillosa inferior (FAI), donde se observan fluidos en color amarillo a una profundidad de 2m hasta 40m extendiéndose longitudinalmente de 0 a 62m y finalmente el tercer reflector desde 55 a 90m, que cubre los depósitos profundos.

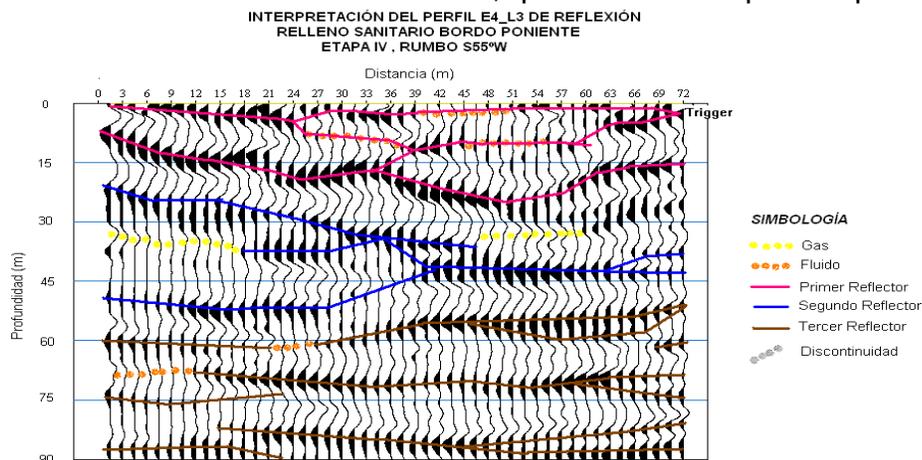


Figura A.20 Perfil E4-L3 de sísmica de reflexión

El perfil E4_L4 tiene un rumbo S35°W, una longitud total de 72m y para la interpretación se establecen tres tipos de reflectores el primero que se establece como el más superficial entre 0 a 25m, que en general es el más irregular debido al relleno

sanitario y parte de la formación arcillosa superior (FAS) de materiales arcillosos con alto contenido de agua; el segundo reflector es de profundidad intermedia de 26 a 45m, que cubre parte de la formación arcillosa superior (FAS), la capa dura (CD) y la formación arcillosa inferior (FAI), y finalmente el tercer reflector desde 46 a 90m, que cubre los depósitos profundos.

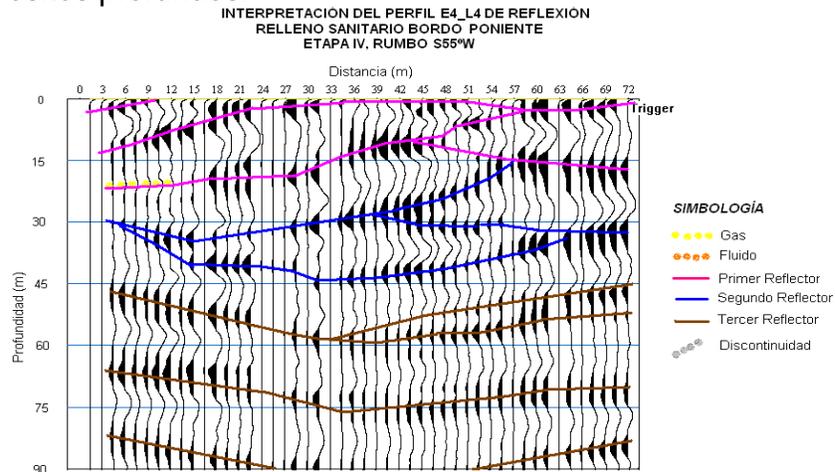


Figura A.21 Perfil E4-L4 de sísmica de reflexión

El perfil E4_L5 tiene un rumbo S35°W, una longitud total de 72m y se establecen tres tipos de reflectores el primero que se establece como el más superficial entre 0 a 38m, que en general es el más irregular debido al relleno sanitario y parte de la formación arcillosa superior (FAS) de materiales arcillosos con alto contenido de agua; el segundo reflector es de profundidad intermedia de 39 a 45m, que cubre parte de la formación arcillosa superior (FAS), la capa dura (CD) y la formación arcillosa inferior (FAI), y finalmente el tercer reflector desde 46 a 90m, que cubre los depósitos profundos.

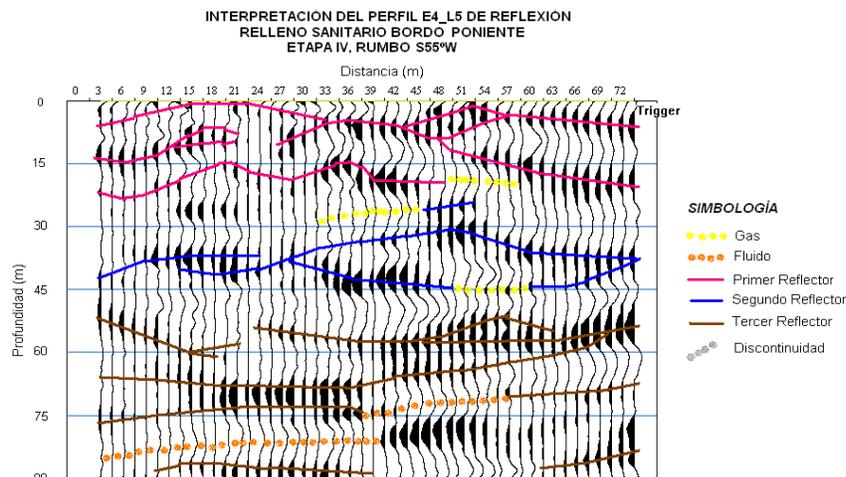


Figura A.22 Perfil E4-L5 de sísmica de reflexión