

LA PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS EN LOS PROBLEMAS DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES. APLICACIÓN EN LA INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE

Alfonso Alvarez-Manilla Aceves
Juan Pablo Valadéz Castro
Paul Garnica Anguas
Guadalupe E. Itandehui Martínez Peña

Publicación Técnica No. 195
Sanfandila, Qro, 2002

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**La permeabilidad de los suelos en
los problemas de transporte de
contaminantes. Aplicación en la
infraestructura del transporte**

Alfonso Alvarez-Manilla Aceves
Juan Pablo Valadéz Castro
Paúl Garnica Anguas
Guadalupe E. Itandehui Martínez Peña

**Publicación Técnica No. 195
Sanfandila, Qro, 2002**

Presentación

Cuando se observa en las vías terrestres algún accidente en el que están involucrados autotranques que transportan sustancias tóxicas, el que recibe los fluidos es el suelo; por ello el área de Geotécnia Ambiental de la División Laboratorios, Coordinación de Infraestructura; decidió realizar este Documento referente a la determinación de la permeabilidad de los suelos ante diferentes sustancias tóxicas.

El Documento fue elaborado para el Instituto Mexicano del Transporte por los investigadores Alfonso Alvarez Manilla Aceves, Paul Garnica Anguas, Guadalupe Evangelina Itandehui Martínez Peña y sirvió para que Juan Pablo Valadéz Castro presentara su tesis de grado de Maestría en Ingeniería, especialidad en Vías Terrestres; además, se le agradece al Técnico Luis Alberto Pérez Cortés su apoyo en las diversas pruebas de campo y laboratorio.

Índice

Índice de figuras.	V
Índice de tablas.	IX
Resumen.	XI
Abstract.	XIII
Resumen ejecutivo.	XV
Introducción.	1
CAPÍTULO 1	
La Contaminación de Suelos Asociada a Problemas en el Transporte Terrestre de Materiales Peligrosos en México.	3
1.1 Antecedentes.	3
1.2 Materiales y residuos peligrosos.	3
1.3 Situación actual del transporte de sustancias peligrosas.	4
1.4 Contaminación de suelos.	7
1.4.1 Causas de contaminación.	8
1.4.2 Derrames.	8
1.4.3 Fugas.	10
CAPÍTULO 2	
Estado del Arte del Flujo de Agua en Suelos.	11
2.1 Introducción.	11
2.2 Fenómeno capilar en suelos.	11
2.2.1 Cohesión y Adhesión.	11
2.2.2 La tensión superficial.	12

2.2.3	Tensión capilar.	13
2.2.4	Ascensión capilar en suelos.	14
2.3	Ley de Darcy y el coeficiente de permeabilidad.	15
2.4	Factores que influyen en la permeabilidad de los suelos.	16
2.5	Métodos de medición de la permeabilidad.	17
2.5.1	Método del Cuerpo de Ingenieros US. Army.	19
2.6	Estado energético del agua en el suelo.	20
2.6.1	Succión.	21
CAPÍTULO 3 Desarrollo Experimental.		25
3.1	Introducción.	25
3.2	Características de los materiales geológicos en estudio.	25
3.2.1	Descripción geológica y ubicación de suelos estudiados.	26
3.2.2	Propiedades índices de los suelos estudiados.	28
3.3	Características y usos de los líquidos utilizados.	29
3.4	Medición de parámetros de conductividad hidráulica <i>in situ</i> .	30
3.4.1	Objetivo de la prueba <i>in situ</i> .	30
3.4.2	Aspectos generales y procedimiento de la prueba de permeabilidad	31
3.4.3	Interpretación de la prueba.	34
3.5	Medición de parámetros de conductividad en laboratorio.	41
3.5.1	Diseño del Permeámetro.	41
3.5.2	Muestreo inalterado para cálculo de permeabilidad en laboratorio	42
3.5.3	Prueba de permeabilidad en laboratorio.	45

CAPÍTULO 4	Resultados experimentales.	51
4.1	Introducción.	51
4.2	Resultados de las Pruebas <i>in situ</i> .	51
4.2.1	Los Álamos.	52
4.2.2	Los Olivos.	53
4.2.3	Banco de Materiales Cuesta China.	54
4.2.4	Sanfandila.	55
4.2.5	Arboledas.	56
4.2.6	Aeropuerto Intercontinental de Querétaro.	57
4.2.7	Resumen general de resultados de campo.	58
4.2.8	Comparación de resultados.	58
4.3	Funcionamiento del Permeámetro.	58
	Conclusiones y recomendaciones.	61
	Bibliografía.	65

Índice de figuras

Figura 1.1	Causas principales de accidentes (PROFEPA 1999-2001).	7
Figura 1.2	Porcentaje de casos con afectaciones ambientales (PROFEPA 1999-2001).	7
Figura 1.3	Tipo de eventos ocurridos en emergencias ambientales (PROFEPA 1999-2001).	8
Figura 2.1	Diagramas que muestran el fenómeno de capilaridad.	14
Figura 2.2	Movimiento del agua por capilaridad en tres tipos de suelo.	15
Figura 2.3	Diagramas de Darcy.	15
Figura 2.4	Pozo excavado para medir la permeabilidad " k_m " del suelo.	20
Figura 2.5	Proceso de osmosis y presión osmótica (Nyle C. Brandy 1990).	22
Figura 2.6	Agua en un suelo parcialmente saturado y sujeta a capilaridad.	23
Figura 3.1	Mapa de localización de los suelos estudiados.	26
Figura 3.2	Unidad Cuesta China, al fondo se observa la Autopista México – Querétaro.	27

Figura 3.3	Unidad Mompaní, terrenos del Aeropuerto Intercontinental de Querétaro.	28
Figura 3.4	Suelo Lacustre, Los Olivos, Ciudad de Querétaro.	28
Figura 3.5	Ubicación de los suelos estudiados en la carta de plasticidad.	29
Figura 3.6	Líquidos usados en pruebas de campo.	30
Figura 3.7	Retiro del material suelto del sitio de prueba.	31
Figura 3.8	Nivelación y limpieza del sitio.	31
Figura 3.9	Excavación y recuperación del material del sondeo.	32
Figura 3.10	Sondeo excavado.	32
Figura 3.11	Vertido del líquido sobre la bolsa plástica.	33
Figura 3.12	Medición del abatimiento en el nivel inicial del líquido.	33
Figura 3.13	Formato de datos de campo.	34
Figura 3.14	Modelo de comportamiento teórico de la prueba <i>in situ</i> .	36
Figura 3.15	Interpretación de la grafica de abatimientos <i>in situ</i> .	38
Figura 3.16	Variación de la velocidad de abatimiento.	39
Figura 3.17	Permeámetro de carga variable. Se muestra en piezas y armado.	41
Figura 3.18	Casco de acero inoxidable y malla No. 100.	41

Figura 3.19	Detalle del filo del casco de acero inoxidable.	42
Figura 3.20	Identificación del estrato de prueba en la zona del Aeropuerto.	43
Figura 3.21	Preparación del sitio para extracción de la muestra inalterada.	43
Figura 3.22	Labrado del cono para colocar el extractor.	43
Figura 3.23	Colocación del equipo extractor sobre el suelo.	44
Figura 3.24	Se muestra la colocación del extractor y el suelo inalterado.	44
Figura 3.25	Colocación de la muestra y líquido en el permeámetro.	45
Figura 3.26	Colocación del sello de parafina sobre la muestra inalterada.	47
Figura 3.27	Formato de prueba de permeabilidad en laboratorio.	48
Figura 4.1	Resultados de pruebas de permeabilidad en Los Álamos.	52
Figura 4.2	Resultados de pruebas de permeabilidad en Los Olivos.	53
Figura 4.3	Resultados de pruebas de permeabilidad en el Banco de Materiales Cuesta China.	54
Figura 4.4	Resultados de pruebas de permeabilidad en Sanfandila.	55
Figura 4.5	Resultados de pruebas de permeabilidad en Arboledas.	56

Figura 4.6	Resultados de pruebas de permeabilidad en El Aeropuerto.	57
Figura 4.7	Comparación de resultados de pruebas de permeabilidad en laboratorio (Arboledas).	59
Figura 4.8	Comparación de resultados de pruebas de permeabilidad en laboratorio (Cuesta China).	60

Índice de tablas

Tabla 1.1	Lugar de ocurrencia de emergencias ambientales (PROFEPA 1993-2001).	4
Tabla 1.2	Distribución de emergencias por modo de transporte (PROFEPA 1993-2001).	5
Tabla 1.3	Estados con mayor incidencia de emergencias ambientales (PROFEPA 1999-2001).	6
Tabla 1.4	Clasificación de acuerdo al tipo de carga que se transporta. (SCT 2000).	9
Tabla 2.1	Valores de la tensión superficial de varios líquidos. (Koshkin, Shirkévich).	13
Tabla 2.2	Valores típicos del coeficiente de permeabilidad.	16
Tabla 2.3	Métodos estandarizados por ASTM para pruebas de permeabilidad en suelos.	18
Tabla 3.1	Propiedades Índice de los suelos en estudio.	31
Tabla 3.2	Variación de los coeficientes ρ y ω por tipo de líquido.	37
Tabla 3.3	Registro de campo y cálculos previos para el ajuste de datos.	37
Tabla 3.4	Evaluación de la ecuación potencial y cálculo de velocidad de abatimiento.	38

Tabla 3.5	Calculo de las velocidades promedio.	39
Tabla 3.6	Calculo de la permeabilidad con la formula del Cuerpo de Ingenieros.	40
Tabla 4.1	Velocidades de Humedecimiento (V_h), Saturación (V_s) y Transporte (V_t), en cm/min.	58
Tabla 4.2	Valores de permeabilidad media k_m , calculados por el método propuesto (K_{mp}) y el del Cuerpo de Ingenieros (K_{mc}).	58
Tabla 4.3	Resultados de las pruebas de permeabilidad en laboratorio (ARBOLEDAS).	59
Tabla 4.4	Resultados de las pruebas de permeabilidad en laboratorio (CUESTA CHINA).	60

Resumen

Los accidentes más comunes tanto en la infraestructura carretera como en la ferroviaria son las volcaduras, donde de manera accidental y dependiendo de la naturaleza de los estratos del suelo, los contaminantes pueden viajar hasta el acuífero contaminándolo.

Algunas de estas sustancias son cancerígenos y representan un peligro para la salud. El tiempo de respuesta para aislar el derrame está supeditado a la velocidad de filtración de las sustancias tóxicas en los suelos, por ello, en este trabajo de investigación se evaluó, para los suelos del Valle de Querétaro, la permeabilidad a diferentes fluidos tales como: gasolina, diesel, agua, acetona, ácido acético, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, entre otros.

Abstract

A several variety of different organic or inorganic chemicals compounds are moving across the highways and rail roads, some of that chemicals possess a health hazard. Some times, there are spillage adding those substances to soil. The spill can be accidentally or deliberately as it happen in agriculture. There are another kind of spills, like leaking where compounds migrates downward to reach the aquifer.

Overtuns are the most common spills in highway engineering and it is necessary to know the response time before the spill spread, this is the point why the necessity to evaluate the permeability of the soil facing toxic chemical compounds.

Resumen ejecutivo

El primer contacto que tienen los derrames accidentales de sustancias tóxicas en la infraestructura del transporte es con el suelo.

Otros procesos en los que las sustancias tóxicas llegan al suelo son la aplicación de pesticidas en la agricultura, fugas por corrosión tanto en tanques como en ductos, fuga de lixiviados de algún confinamiento, o por la mezcla de algún elemento y el agua.

En esta publicación se analiza de manera general el concepto de materiales y residuos peligrosos, presenta estadísticas de las emergencias ambientales, y describe los procesos de contaminación de los suelos por derrames, fugas y otros.

El transporte de sustancias tóxicas a través del suelo se da dependiendo de la naturaleza de los materiales geológicos, de las fuerzas de superficie, de la granulometría, de la adsorción, de la capacidad de intercambio catiónico, de la actividad de la arcilla, etc. Primeramente el fenómeno capilar regula el viaje de las sustancias y posteriormente las fuerzas gravitacionales llevan a los fluidos a un estado de equilibrio.

Utilizando la ecuación de Darcy para evaluar la permeabilidad de los suelos ante las sustancias tóxicas, se presentan los resultados evaluando los potenciales energéticos de los diferentes fluidos en el subsuelo.

Se desarrolló una metodología para las pruebas de campo y laboratorio, para la medición de la permeabilidad en el laboratorio se diseñó un permeámetro que permite tomar una muestra inalterada en campo y probarla en el laboratorio.

Para el estudio de permeabilidad ante las sustancias tóxicas, los suelos del Valle y Zona Metropolitana de Querétaro fueron seleccionados por su accesibilidad.

De los resultados de las pruebas de laboratorio y de campo se llegó a la conclusión de que el fenómeno de transporte se da en tres etapas: Etapa 1, Procesos de Humedecimiento; Etapa 2, Tiempo de Saturación y Etapa 3, Transporte.

Las etapas quedan reguladas por los fenómenos capilares y de succión, que sin tener finalizada esta investigación, los valores de velocidad de filtración o permeabilidad obtenidos en campo, tienen acoplados estas influencias.

Introducción

Una afectación ambiental importante en la etapa de operación de una obra lineal, además del ruido y la contaminación del aire, son los daños provocados al suelo producto de un derrame o fuga durante el transporte de materiales peligrosos.

En todos los derrames se registran filtraciones importantes ya sea a través del pavimento o del suelo.

La lluvia y la permeabilidad intrínseca del suelo, permiten a los contaminantes llegar hasta los acuíferos, y más aún si estos están cercanos a la superficie, como sería el caso en las costas o Valle de México.

Este trabajo se enfoca a estudiar la permeabilidad de suelos cuando suceden los derrames o fugas de materiales peligrosos y que son consecuencia de las actividades operativas globales de su traslado en el territorio nacional a través de infraestructura de transporte terrestre.

Durante la operación de las diferentes obras de infraestructura de transporte siempre existen riesgos potenciales durante la Carga, Descarga y Recorrido; ya que en cualquier acción se pueden producir accidentes. En las costas, los buques también pueden ocasionar derrames accidentales. Los derrames y fugas de materiales peligrosos dan lugar a impactos ambientales que representan una gran pérdida de recursos naturales, tiempo y dinero.

Algunas sustancias peligrosas como los hidrocarburos presentan actividad carcinogénica en detrimento del hombre y los animales, de tal manera que la presencia de estas sustancias químicas en agua subterránea es un enorme peligro para el consumo humano.

En países desarrollados como el Reino Unido, Francia, Canadá, etc., cuentan con un sistema de administración de riesgos químicos que les permite dar respuesta inmediata a un accidente durante el transporte de materiales peligrosos; pues bien, este trabajo es el preámbulo para proveer de fundamentos técnicos a las Entidades como la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, PROFEPA, SEMARNAT y de Protección Civil, para tener listos sus tiempos de respuesta ante siniestros que ocurran en carreteras o calles del País.

Los principales objetivos de esta investigación son:

- Medir la permeabilidad de los suelos con líquidos considerados como peligrosos, y potencialmente presentes en la infraestructura del transporte.
- Establecer las diferencias existentes entre la permeabilidad de un suelo a diferentes líquidos.
- Diseñar y probar un equipo de laboratorio (permeámetro), que permita obtener muestras inalteradas de suelo y medir su permeabilidad en laboratorio.

De ninguna manera este trabajo pretende hacer una caracterización completa de la permeabilidad de los suelos existentes, sin embargo, se plantea la metodología para poder realizar las mediciones de permeabilidad en cualquier lugar de una manera práctica y económica.

La contaminación de suelos asociada a problemas en el transporte terrestre de materiales peligrosos en México.

1.1 Antecedentes.

El crecimiento industrial de México ha provocado el surgimiento de nuevos problemas en donde los de mayor impacto son los ambientales. La mayoría de las industrias generan contaminación en sus diferentes etapas productivas.

El ambiente se puede afectar ya sea contaminando el aire, el agua o el suelo. En el caso del transporte terrestre de materiales peligrosos la mayor afectación en un accidente se da en el suelo, por lo que este fenómeno motiva a evaluar la permeabilidad de los suelos con diferentes sustancias potencialmente presentes en la infraestructura del transporte.

En este capítulo, con el auxilio de gráficas y tablas, se muestra la situación actual del transporte terrestre de materiales peligrosos. También se describen brevemente los procesos de contaminación en suelos.

1.2 Materiales y residuos peligrosos.

De acuerdo a la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) un material o residuo peligroso por sus características representa un peligro para el ambiente, la salud o los recursos naturales.

Para calificar a un material o residuo como peligroso se debe aplicar el análisis conocido como CRETIB. El nombre de este análisis lo conforman las siglas que corresponden a cada una de las características del material como sigue: Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad y Biológico infeccioso.

Dicho análisis se debe practicar de acuerdo a la normatividad y se considerará confiable únicamente cuando se realiza en los laboratorios reconocidos por el Sistema Nacional de Laboratorios de Prueba. Cualquier material o residuo cuyo resultado sea positivo para alguna de las características citadas, se considera peligroso.

La mayor contaminación de suelos es por hidrocarburos. El Instituto Nacional de Ecología (INE), a través de la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas, se ha dado a la tarea de rescatar al suelo como recurso natural y establecer nuevos criterios basados en análisis químicos. En la actualidad lo que procede es identificar el tipo y concentración de los contaminantes, lo cual constituye el punto de partida para estudiar las alternativas que permitan su tratamiento

1.3 Situación actual del transporte de sustancias peligrosas.

Las afectaciones ambientales que se tienen como consecuencia de las fallas en los sistemas de transporte de sustancias peligrosas han despertado el interés de instituciones gubernamentales que de alguna manera tienen influencia sobre el problema.

A continuación se presenta una breve descripción de la situación actual del transporte de sustancias peligrosas con apoyo de una serie de datos proporcionados por la PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente), a través de la Subprocuraduría de Auditoría Ambiental.

La Tabla 1.1 muestra el lugar de ocurrencia de las emergencias ambientales reportadas a PROFEPA del año 1993 a 2001, en donde se observa que el 70.20% de las emergencias ambientales reportadas a PROFEPA suceden durante el transporte.

Tabla 1.1 Lugar de ocurrencia de emergencias ambientales (PROFEPA 1993-2201).

AÑO	NUMERO DE EVENTOS	LUGAR DE OCURRENCIA					
		PLANTA		TRANSPORTE		OTRO	
		No.	%	No.	%	No.	%
1993	157	38	24.2%	107	68.2%	12	7.6%
1994	416	92	22.1%	221	53.1%	103	24.8%
1995	547	110	20.1%	322	58.9%	115	21.0%
1996	587	149	25.4%	332	56.6%	106	18.1%
1997	632	145	22.9%	477	75.5%	10	1.6%
1998	538	96	17.8%	429	79.7%	18	3.3%
1999	469	64	13.6%	395	84.2%	10	2.1%
2000	470	68	14.5%	392	83.4%	10	2.1%
2001	483	116	24.0%	343	71.0%	24	5.0%
	4299	878	20.4%	3018	70.2%	408	9.5%

Este 70.20% de las emergencias ambientales se distribuye por modo de transporte de la manera que muestra la Tabla 1.2.

En la Tabla 1.2 se aprecia que el transporte por ductos representa el mayor problema de emergencias ambientales con el 59.7% y le sigue el carretero con 29.9% dando un total de accidentes por carretera de 901 a lo largo de 9 años, cuyo promedio es de 100 accidentes por año.

Tabla 1.2 Distribución de emergencias por modo de transporte (PROFEPA 1993-2001).

AÑO	MEDIO DE TRANSPORTE UTILIZADO										
	TOTAL	FFCC		CARRETERO		MARITIMO		DUCTO		OTRO	
		No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%
1993	107	3	2.8%	27	25.2%	5	4.7%	69	64.5%	3	2.8%
1994	221	15	6.8%	65	29.4%	2	0.9%	139	62.9%	-	-
1995	322	13	4.0%	90	28.0%	7	2.2%	212	65.8%	-	-
1996	332	13	3.9%	96	28.9%	9	2.7%	214	64.5%	-	-
1997	477	8	1.7%	132	27.7%	58	12.2%	279	58.5%	-	-
1998	429	12	2.8%	133	31.0%	55	12.8%	228	53.1%	-	-
1999	395	14	3.5%	107	27.1%	43	10.9%	231	58.5%	-	-
2000	392	5	1.3%	118	30.1%	33	8.4%	236	60.2%	-	-
2001	343	9	2.6%	133	38.8%	6	1.7%	193	56.3%	2	0.6%
Total	3018	92	3.0%	901	29.9%	218	7.2%	1801	59.7%		3.4%

En el Congreso Nacional 2002 de la ExpoAmbiental se presentó un avance de la investigación titulada "IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS EN TRAMOS CARRETEROS POR TRANSPORTE DE MATERIALES PELIGROSOS" realizada en la Universidad Nacional Autónoma de México a través del Posgrado en Ingeniería Ambiental, por Fernández M. R. de L. y Soler A. F. I., 2001.

En la investigación mencionada se desarrolla la metodología de identificación de riesgos a la salud de la población, al ambiente y a la estructura de la carretera en un tramo específico, ocasionado por un accidente durante el transporte de materiales y residuos peligrosos.

El proyecto también analiza las bases de datos existentes relacionados con los accidentes presentados durante el transporte de estos materiales en carreteras federales. El resultado esperado del análisis es obtener el tramo de la red carretera federal que presente mayor incidencia de accidentes, en los cuales se vean involucrados el transporte de materiales y residuos peligrosos.

Posteriormente realiza una simulación de los accidentes que se han presentado en el tramo seleccionado, estima el área de afectación por cada incidente y obtiene como producto del análisis, el riesgo existente en dicho tramo.

En la Tabla 1.3 se observan los estados de la república que presentan mayor incidencia de accidentes durante el transporte terrestre de materiales peligrosos de 1999-2001.

Tabla 1.3 Estados con mayor incidencia de emergencias ambientales (PROFEPA 1999-2201).

ESTADO	NÚMERO	ESTADO	NÚMERO
Hidalgo	29	Veracruz	12
San Luis Potosí	25	Tamaulipas	11
México	24	Nuevo León	11
Oaxaca	15	Sonora	11
Guanajuato	13	ZMCM	10
Michoacán	12	Jalisco	9
Puebla	12	Querétaro	8
Tlaxcala	12	Morelos	7

ZMCM Zona Metropolitana de la Ciudad de México

Los estados con mayores problemas son: Hidalgo, San Luis Potosí y México, donde las principales sustancias involucradas son: gasolina, amoníaco, combustóleo, diesel, turbosina, ácidos sulfúrico, clorhídrico, nítrico, fosfórico, acético, hidróxido de sodio e hipoclorito de sodio; estas sustancias están involucradas en el 80% de los eventos ocurridos durante el periodo 1999-2001.

Las principales causas de accidentes se muestran en la gráfica de la figura 1.1, donde se observa que la falla humana es la responsable en la mayoría de los casos.

Los datos mostrados dan una idea general de la situación del problema del transporte terrestre de materiales peligrosos, cabe destacar que los accidentes ocurridos en nuestras carreteras no son nada despreciables, ya que provocan además de pérdidas humanas instantáneas, afectaciones ambientales de graves consecuencias.

ACCIDENTES DURANTE EL TRANSPORTE TERRESTRE DE MATERIALES PELIGROSOS
CAUSAS PRINCIPALES %

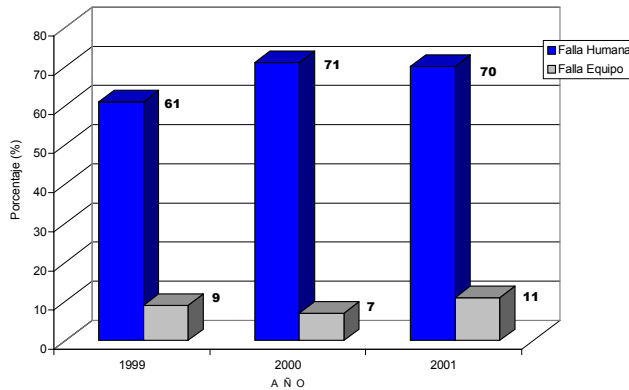


Figura 1.1 Causas principales de accidentes (PROFEPA 1999-2001).

1.4 Contaminación de suelos.

La principal afectación ambiental de los accidentes carreteros de sustancias peligrosas es directamente sobre el suelo, ya que en la mayoría de los casos los derrames son de tales proporciones que alcanzan al suelo aledaño a la carretera.

La contaminación del suelo no sólo se presenta durante el transporte de las sustancias, sino también en los accidentes durante la carga y descarga de los materiales, es evidente que la mayor afectación por las cantidades que se manejan es durante el traslado.

En la figura 1.2. se presenta una cuantificación de las afectaciones ambientales producidas por dichos eventos.

EMERGENCIAS AMBIENTALES DURANTE EL TRANSPORTE TERRESTRE
DE MATERIALES PELIGROSOS
PORCENTAJE DE CASOS CON AFECTACIONES AMBIENTALES

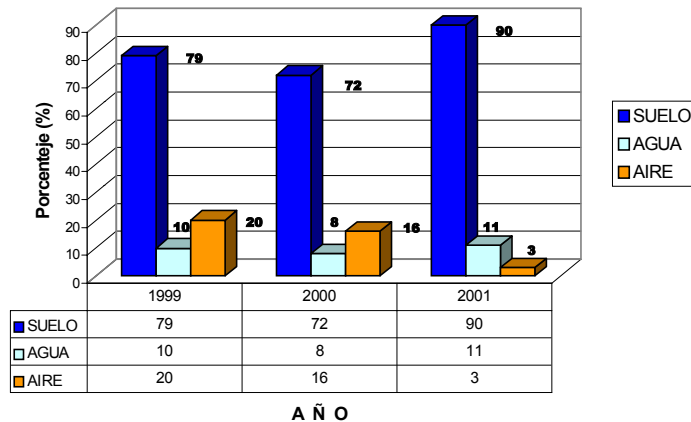


Figura 1.2 Porcentaje de casos con afectaciones ambientales (PROFEPA 1999-2001).

De acuerdo a las estadísticas mostradas en la Figura 1.2 resulta evidente que la contaminación de suelos es la mayor afectación ambiental que se tiene durante una emergencia ambiental

1.4.1 Causas de contaminación.

Las causas de contaminación de suelos se pueden dividir en dos grupos, los derrames y las fugas de contaminates. La Figura 1.3 muestra la distribución por tipo de eventos reportados.

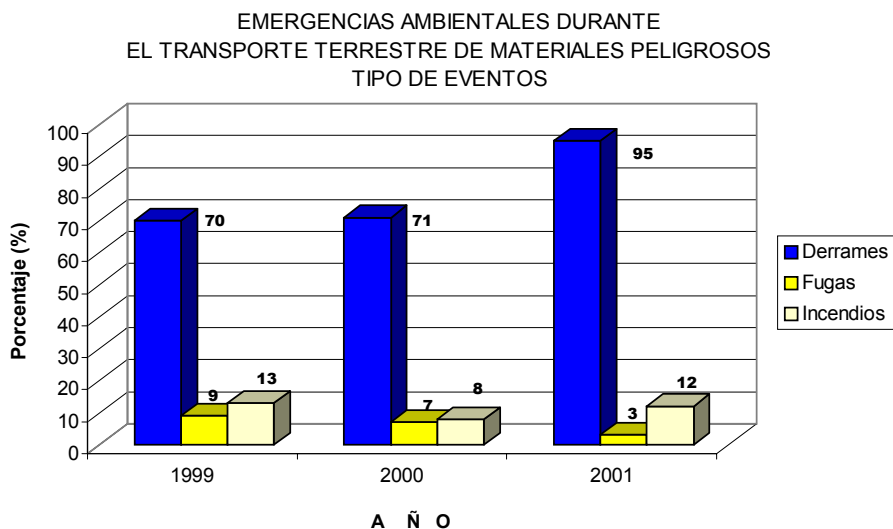


Figura 1.3 Tipo de eventos ocurridos en emergencias ambientales (PROFEPA 1999-2201).

De acuerdo a los datos anteriores se deduce que el principal problema, desde el punto de vista de contaminación, son los derrames en el caso de los materiales trasladados por carretera, que en los últimos 3 años han ocupado el primer lugar; para el caso de las emergencias ambientales suscitadas en la red de ductos, se consideran como fugas.

1.4.2 Derrames.

Las fuentes potenciales de derrames que contaminan el suelo son los accidentes que ocurren cuando estas sustancias son transportadas a sus centros de consumo, ya que por las carreteras y las vías férreas, se mueven gran parte de productos peligrosos.

De acuerdo a datos de la SCT se encuentran circulando en la red carrera nacional alrededor de veinte mil vehículos que transportan sustancias peligrosas. Esto se

traduce en una desafortunada frecuencia de ocurrencia de accidentes que provocan derrames y contaminan el suelo.

Las causas atribuibles de un accidente giran en torno a los siguientes aspectos:

- El camino.
- El conductor.
- El vehículo.
- Los factores climáticos.

Estos elementos como parte de un sistema trabajan en conjunto, el conductor y el vehículo son las variables mas impredecibles en su comportamiento, el camino puede presentar problemas de diseño geométrico y estado de la superficie de rodamiento, lo que puede producir accidentes. Los factores climáticos tienen influencia principalmente en la visibilidad del conductor en caso de lluvia o niebla y en el contacto neumático-pavimento en caso de pavimento mojado. Un accidente carretero de magnitud considerable está asociado con un derrame, debido a la ruptura del tanque de gasolina o diesel del vehículo.

Una fuente importante de contaminación del suelo cercano a las carreteras son los accidentes que sufren los vehículos del tipo T3-S2, T3-S2-R4 y C3, que son los que transportan derivados del petróleo y líquidos industriales de aplicación especial; estos vehículos, por sus dimensiones, geometría y centro de gravedad, son inestables cuando circulan a velocidades altas y tienden a volcarse derramando el líquido, algunas veces sobre la superficie de rodamiento y en caminos de sección transversal en balcón o terraplén, el vehículo sale del camino, y el derrame se produce directamente sobre el suelo.

La tabla 1.4 muestra la clasificación de acuerdo al tipo de carga y número de vehículos que tienen permiso para circular por las carreteras de México.

Tabla 1.4 Clasificación de acuerdo al tipo de carga que se transporta (SCT 2000).

Clase de Servicio	No. de Unidades
CARGA GENERAL	332,618
CARGA ESPECIALIZADA	42,715
Materiales peligrosos	19,935
Automóviles sin rodar	1,875
Petróleo y derivados	14,924
FONDOS Y VALORES	1,622
Grúas para arrastre	1,827
Grúas , arrastre y salvamento	2,240
Vehículos voluminosos	292
TOTAL	375,333

Puede observarse que un 89% de las unidades que constituyen el autotransporte federal se destinan al flujo de carga en general, es decir frutas, legumbres, etc, y un 11% corresponde a carga especializada donde un 2% se refiere a vehículos que transportan valores y carga con exceso de dimensiones entre otros; un 9% lo constituyen los vehículos que transportan sustancias agresivas y que representan mayor riesgo, además de exigir un especial cuidado que el restante 91% del total de la carga que se transporta en el país

1.4.3 Fugas.

La contaminación de suelos por fugas tiene su principal ocurrencia en el transporte de hidrocarburos a través de la red de ductos con la que cuenta actualmente PEMEX, otra fuente de importancia que ha causado muchos problemas es el flujo de gasolina hacia el suelo aledaño de los tanques de almacenamiento en gasolineras. Cabe mencionar el accidente ocurrido en la ciudad de Guadalajara el 22 de abril de 1992, este accidente se debió a la presencia y explosión de gasolina en la red de alcantarillado, y cobró alrededor de 213 defunciones y 1,470 lesionados, además de cuantiosos daños materiales.

La principal causa de contaminación de suelos en el país son las fugas por la gran cantidad de tomas clandestinas en la red de ductos de PEMEX. La longitud de la red de ductos es de alrededor de 54 mil kilómetros por donde transporta petróleo crudo, gas natural, gas amargo, gas dulce, gasolinas, diesel y otros productos refinados.

Cuenta, además, con 2 mil kilómetros localizados en zonas submarinas. Cerca de la mitad de los ductos tienen más de 30 años de operación, y a pesar del constante mantenimiento ocurren problemas de fugas provocadas por la corrosión y fallas del material. Por tal motivo, el Instituto Mexicano del Petróleo y PEMEX crearon un programa de investigación y desarrollo tecnológico para generar el conocimiento que contribuya a incrementar la integridad de los ductos existentes desarrollando nuevas tecnologías para su inspección. Como estadística, se perfora una toma clandestina cada tres días, aunque la empresa acepta que puede haber más que no han localizado porque la vigilancia que tienen para la red es mínima.

Se ha identificado otra fuente de contaminación del suelo por fugas de líquidos contaminantes producto de la operación del transporte y es en los paraderos masivos de vehículos de carga, ya que existen zonas principalmente de restaurantes y talleres donde el suelo no tiene ningún recubrimiento (asfalto o concreto), y el mal estado de los empaques produce un goteo de sustancias (principalmente aceites y combustibles) que de manera individual no son significativas para la cantidad transportada, sin embargo, si se suman estos pequeños derrames por el número de vehículos que usan el paradero, se obtienen cantidades de importancia que viajan al suelo y producen contaminación.

Estado del arte del flujo de agua en suelos.

2.1 Generalidades acerca del flujo de agua en suelos.

Al tratar con el tema de permeabilidad de los suelos, es necesario mantener en mente los conceptos más importantes referentes al estado energético del agua del suelo. Existen varios fenómenos que tienen relación directa con la permeabilidad de los suelos; ya que la permeabilidad es un valor altamente sensible que depende de la naturaleza del suelo, de sus características mecánicas y de las fuerzas de superficie cuando el tamaño de partícula principal es el correspondiente a finos.

2.2 Fenómeno capilar en suelos.

El fenómeno capilar en suelos es la respuesta a las fuerzas de cohesión y adhesión que se generan en los líquidos en la interfase con un cuerpo sólido. En esta sección se presentan los mecanismos asociados al fenómeno capilar en suelos.

2.2.1 Cohesión y adhesión.

Las fuerzas básicas responsables de la retención y movimiento del agua en el suelo, se definen como cohesión y adhesión. La fuerza de cohesión es la atracción entre moléculas de agua, mientras que la adhesión es la atracción de las moléculas de agua con superficies sólidas. La fuerza de adhesión hace que algunas moléculas de agua estén rígidamente unidas a las partículas de suelo y se llama agua adsorbida; en cambio las moléculas unidas por fuerzas de cohesión sobre superficies de los granos de suelo pueden ser fácilmente removidas. Las fuerzas de cohesión y adhesión juntas regulan el movimiento del agua. En suelos arcillosos la adhesión y la cohesión ejercen influencia sobre sus propiedades de plasticidad.

2.2.2 La tensión superficial.

Las fuerzas de atracción y de repulsión intermolecular afectan las propiedades de la materia tales como: el punto de ebullición, de fusión, el calor de vaporización y la tensión superficial.

Dentro de un líquido, alrededor de una molécula, actúan atracciones simétricas; pero en la superficie, una molécula se encuentra sólo parcialmente rodeada por moléculas y en consecuencia es atraída hacia adentro del líquido por las moléculas que la rodean. Esta fuerza de atracción tiende a arrastrar a las moléculas de la superficie hacia el interior del líquido (tensión superficial), y al hacerlo el líquido se comporta como si estuviera rodeado por una membrana invisible.

La tensión superficial es responsable de la resistencia que un líquido presenta a la penetración de su superficie, de la tendencia a la forma esférica de las gotas de un líquido, del ascenso de los líquidos en los tubos capilares y de la flotación de objetos u organismos en la superficie de los líquidos.

Termodinámicamente la tensión superficial es un fenómeno de superficie y es la tendencia de un líquido a disminuir su superficie hasta que su energía de superficie potencial es mínima, condición necesaria para que el equilibrio sea estable. Como la esfera presenta un área mínima para un volumen dado, entonces por la acción de la tensión superficial, la tendencia de una porción de un líquido lleva a formar una esfera o a que se produzca una superficie curva o menisco cuando está en contacto un líquido con un recipiente.

A la fuerza que actúa por centímetro de longitud de una película que se extiende se le llama tensión superficial del líquido, la cual actúa como una fuerza que se opone al aumento de área del líquido. La tensión superficial es numéricamente igual a la proporción de aumento de la energía superficial con el área y se mide en dinas/cm. La energía superficial por centímetro cuadrado se representa con la letra griega gamma (γ).

La tensión superficial depende de la naturaleza del líquido, del medio que le rodea y de la temperatura. En general, la tensión superficial disminuye con la temperatura, ya que las fuerzas de cohesión disminuyen al aumentar la agitación térmica. Las moléculas del medio exterior ejercen acciones atractivas sobre las moléculas situadas en la superficie del líquido, contrarrestando las acciones de las moléculas del fluido. En la Tabla 2.1 se muestra el valor de la tensión superficial de algunos líquidos.

Tabla 2.1 Valores de la tensión superficial de varios líquidos (Koshkin, Shirkévich).

Líquido	Tensión Superficial dinas/cm	Líquido	Tensión Superficial dinas/cm
Agua	72.75	Éter Etílico	17.01
Acetona	23.7	n – Hexano	18.43
Acetato de Etílico	23.9	Glicerina	59.4
Aceite de Oliva	33.06	Tolueno	28.5
Alcohol Etílico	22.75	Tetracloruro de Carbono	26.95
Benceno	28.85	Petróleo	26

Los valores de la tensión superficial muestran que las moléculas superficiales tienen una energía aproximadamente 25 % mayor que las que se encuentran en el interior del fluido. Este exceso de energía no se manifiesta en sistemas ordinarios debido a que el número de moléculas en la superficie es muy pequeño en comparación con el número total del sistema. En la práctica, los efectos de superficie son significativos para partículas que tienen un diámetro menor de 10^{-4} cm.

2.2.3 Tensión capilar.

La tensión capilar es favorecida por la fuerza de atracción que ejercen las paredes de un delgado tubo del tamaño de un capilar sobre un líquido, la componente vertical de esta fuerza de adhesión que se une a la propia fuerza de cohesión del suelo provocando el vencimiento de la fuerza gravitacional. El líquido asciende a una altura donde se iguala la resultante de las fuerzas de adhesión y cohesión con la fuerza gravitacional (ver figura 2.1).

La altura de ascensión capilar es inversamente proporcional al diámetro del tubo y directamente proporcional a la tensión superficial. La altura de ascensión se puede calcular con la ecuación 2.1.

$$h = \frac{2T}{r * d * g} \quad (2.1)$$

donde:

h	Altura de ascensión capilar
T	Tensión superficial
r	Radio del tubo
d	Densidad del líquido
g	Fuerza de gravedad

Para el caso del agua esta expresión se reduce a:

$$h = \frac{0.15}{r} \quad (2.2)$$

Esta ecuación enfatiza la relación inversa entre la altura capilar y el tamaño del radio del tubo capilar, a través del cual, el agua asciende.

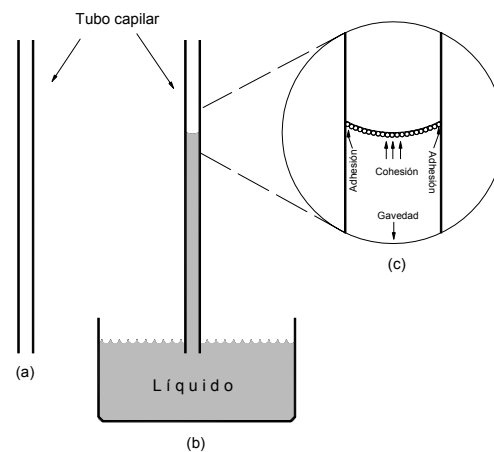


Figura 2.1 Diagramas que muestran el fenómeno de capilaridad.

(a) La situación antes de colocar el fino tubo en la superficie del agua. (b) Cuando el tubo es insertado en el líquido, el agua asciende. (c) Las fuerzas de atracción entre las moléculas de agua y las paredes del tubo (adhesión) y la mutua atracción de las moléculas de agua una a otra (cohesión). El agua asciende hasta el momento en que la fuerza de gravedad iguala a las fuerzas atractivas de cohesión y adhesión.

2.2.4 Ascensión capilar en suelos.

Las fuerzas capilares trabajan en todos los suelos humedecidos. Sin embargo, la medición del movimiento del agua por capilaridad es menor que el que se suscita en la base de contacto agua-suelo. Una razón es que los poros no son uniformes y largos como el caso de un tubo capilar. Además, algunos poros están llenos de aire, el cual puede ser atrapado, aminorando o impidiendo el movimiento de agua por capilaridad.

En suelos el movimiento del agua por capilaridad depende principalmente del tipo de suelo y el tamaño de sus vacíos; la Figura 2.2 ilustra la velocidad de flujo en tres tipos de suelo, arena, limo y arcilla.

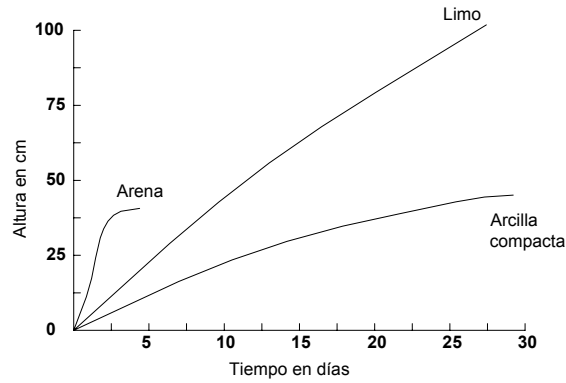


Figura 2.2 Movimiento del agua por capilaridad en tres tipos de suelo. Note la rápida respuesta de la arena pero con moderada altura. Aparentemente los poros del limo son mas favorables para el movimiento que en la arcilla compacta.

La capilaridad es tradicionalmente ilustrada como una ascensión vertical. Pero el movimiento es en cualquier dirección.

2.3 Ley de Darcy y el coeficiente de permeabilidad.

Basandose en sus trabajos sobre la mecánica de fluidos, el ingeniero francés Henry Darcy (1803-1858) descubrió que existe una relación entre la cantidad de agua que fluye a través de una superficie, el área de esta superficie y el gradiente hidráulico (ver figura 2.5).

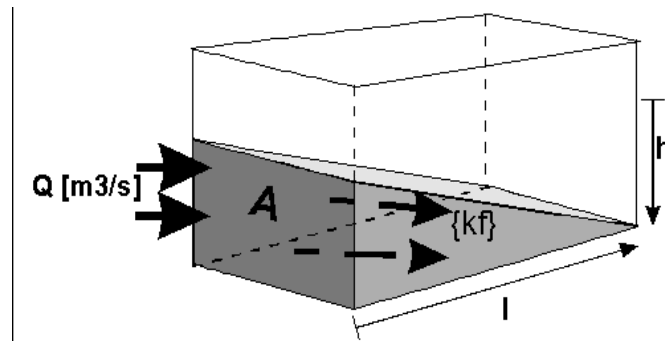


Figura 2.3 Diagrama de Darcy.

Como resumen de sus trabajos se puede expresar la "ley de Darcy" en la forma:

$$Q = \frac{dV}{dt} = k * A * i \quad (2.3)$$

con $i = \frac{h}{l}$

o también: $k = \frac{Q}{i * A}$ [m/s] (2.4)

Por definición la determinación de "k" sólo es posible para un régimen de flujo laminar pero no para un régimen de flujo turbulento.

Algunos ejemplos para los rangos del coeficiente de permeabilidad "k" (en m/s) para distintos tipos de suelo no consolidados se muestra la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Valores típicos del coeficiente de permeabilidad.

	<i>k</i>		<i>k</i>
Grava	10 ⁻¹ – 10 ⁻²	Arena limosa	10 ⁻⁵ – 10 ⁻⁷
Arena gruesa	10 ⁻³	Arcilla limosa	10 ⁻⁶ – 10 ⁻⁹
Arena mediana	10 ⁻³ – 10 ⁻⁴	Arcilla	< 10 ⁻⁹
Arena fina	10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁵		

2.4 Factores que influyen en la permeabilidad de los suelos.

La permeabilidad se ve afectada por diversos factores inherentes tanto al suelo como a características del fluido circulante. Los principales son:

- Las fuerzas de superficie.
- La porosidad.
- La tortuosidad de los vacíos del suelo.
- La relación de vacíos del suelo.
- La temperatura del fluido y suelo.
- La viscosidad del fluido en movimiento.
- La estructuración del suelo.
- La humedad del suelo.

Las fuerzas de superficie de los granos determinan principalmente la fuerza de atracción entre las moléculas del fluido y las partículas de suelo; este fenómeno determina en gran medida la velocidad de humectación de un suelo, la porosidad y la relación de vacíos, que son los principales parámetros con los que se ha relacionado el valor de la permeabilidad en las expresiones existentes para su determinación. Se piensa que la cantidad de vacíos que tenga un suelo determinara en gran parte el valor de su permeabilidad, sin embargo, la tortuosidad de los canales es un elemento importante, ya que un fluido circula con mayor rapidez por un canal uniforme que por uno que presente una alta tortuosidad, a pesar de que su tamaño o vacíos sean los mismos.

Las características del fluido también influyen sobre el valor de la permeabilidad, por ejemplo: la permeabilidad que puede tener una sosa líquida con respecto al agua destilada, dista de ser igual, en este caso la viscosidad de la sosa determina en gran medida su comportamiento en el suelo, haciendo más lenta su forma de fluir. La temperatura del fluido se relaciona directamente con su viscosidad.

La permeabilidad también puede variar por la estructuración del suelo; la estratificación ocasiona que los valores de su permeabilidad sean diferentes en cada estrato, incluso si se trata del mismo suelo con diferente grado de compactación o humedad, la permeabilidad seguramente será diferente.

2.5 Métodos de medición de la permeabilidad.

Existen varios procedimientos para la determinación de la permeabilidad de los suelos, los podemos dividir básicamente en dos grupos: los “directos”, por que se basan en pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición del coeficiente de permeabilidad, y otros “indirectos”, ya que proporcionan el valor del coeficiente de permeabilidad en forma secundaria, es decir, por medio de pruebas y técnicas diseñadas para otros fines. Los métodos son los siguientes:

a) Directos:

- Permeámetro de carga constante.
- Permeámetro de carga variable.
- Prueba directa en los suelos en el lugar.

b) Indirectos:

- Cálculo a partir de la curva granulométrica.
- Cálculo a partir de la prueba de consolidación.
- Cálculo con la prueba horizontal de capilaridad.

El uso del permeámetro de carga constante ofrece el método más simple para determinar el coeficiente de permeabilidad de un suelo y se recomienda ser utilizado en suelos poco permeables; pueden ser usado por ejemplo: en limos o arenas medianamente cementadas.

El permeámetro de carga variable puede ser usado para determinar el coeficiente de permeabilidad en suelos finos y gruesos, el principio básico es el mismo en ambos métodos, solo con la diferencia de la aplicación de las formulas para obtener los resultados, ya que en el permeámetro de carga variable se utiliza un volumen determinado de líquido, haciendo intervenir la diferencia de alturas del tubo alimentador.

Las pruebas directas en campo consisten básicamente en la berrenación de pozos sobre el terreno que se desea conocer su permeabilidad; este tipo de pruebas son muy usadas en la hidráulica de captaciones, proporcionando un valor de la permeabilidad media del estrato en estudio. Los métodos existentes para este tipo de pruebas fundamentan su teoría en la observación de los abatimientos del líquido en el pozo en un tiempo determinado, el abatimiento puede ser por bombeo en estratos abajo del nivel freático o por infiltración del líquido en suelos no saturados.

La Tabla 2.3 muestra las normas ASTM para pruebas de permeabilidad en campo y en laboratorio.

Tabla 2.3 Métodos estandarizados por ASTM para pruebas de permeabilidad en suelos.

Clave	Libro	Nombre de la prueba
D4511	04.08	Conductividad hidráulica de turbas saturadas mediante la prueba de carga constante.
D3385	04.08	Tasa de infiltración de suelos (en campo) utilizando la prueba del infiltrómetro de doble anillo.
D2434	04.08	Permeabilidad de suelos granulares mediante la prueba de carga constante.
D5126	04.09	Comparación de métodos de campo para determinar la conductividad hidráulica en la zona vadosa.
D5084	04.09	Conductividad hidráulica de materiales porosos saturados utilizando la prueba del permeámetro de pared flexible

La permeabilidad obedece a la variación de diversos factores, que no solo dependen de la estructura del suelo; en la práctica se ha tratado de establecer una correlación entre la granulometría de un material y ésta, siendo muy limitadas las relaciones.

Diversos autores como Hazen, Slichter y Terzagui, han propuesto fórmulas que relacionan la permeabilidad con la estructura del suelo.

La ecuación de Hazen, por ejemplo: utiliza el D_{10} como el diámetro que relaciona el tamaño de las partículas con la permeabilidad. Esta relación supone que la distribución de tamaños es suficientemente extensa para evitar que las partículas más pequeñas sean arrastradas por la fuerza de filtración del líquido, es decir el suelo debe poseer “estabilidad hidrodinámica”. Los suelos gruesos uniformes que contienen finos no suelen presentar tal estabilidad.

Hazen experimentó con arenas uniformes con diámetro efectivo comprendido entre 0.1 y 3 mm. Slichter tomó en cuenta, además del D_{10} , la temperatura del agua y un coeficiente “ C ” que depende de la porosidad “ n ” del suelo para calcular el coeficiente de permeabilidad “ k ”. Terzaghi, para suelos arenosos, propuso hacer intervenir la porosidad del medio granular “ n ”, pero además hace intervenir la forma de los granos en las arenas y la presencia de limos.

La expresión propuesta por Koseny – Carman tiene relevancia porque además de hacer intervenir la relación de vacíos del suelo y el diámetro representativo de sus partículas, toma en cuenta el peso volumétrico del fluido y su viscosidad

2.5.1 Método del Cuerpo de Ingenieros US Army.

Este método propone un método experimental para conocer el valor de la permeabilidad media “ k_m ” del suelo. El método consiste en medir el tiempo de abatimiento de un determinado tirante de agua, sobre un pozo previamente excavado de dimensiones conocidas.

En la figura 2.4 se observa el diagrama del pozo excavado. La ecuación 2.5 se aplica cuando los diámetros del pozo no son uniformes y la ecuación 2.6 es para el caso de tener un diámetro uniforme.

Se aplican las siguientes ecuaciones para el calcular la permeabilidad media “ k_m ” del suelo.

$$k_m = \frac{\pi \cdot d^2}{11 \cdot D \cdot (t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2} \quad (2.5)$$

$$k_m = \frac{\pi \cdot D}{11 \cdot (t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2} \quad \text{para } d = D \quad (2.6)$$

donde:

k_m	Coeficiente de Permeabilidad medio	[cm/s]
D	Diámetro de la muestra en la cámara inferior	[cm]
d	Diámetro del tubo superior	[cm]
H_1	Carga piezométrica $t = t_1$	[cm]
H_2	Carga piezométrica $t = t_2$	[cm]
t	Tiempo	[s]

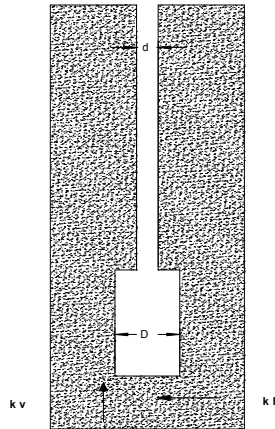


Figura 2.4 Pozo excavado para medir la permeabilidad " k_m " del suelo por el método del Cuerpo de Ingenieros US Army.

2.6 Estado energético del agua en el suelo.

En un material poroso, como es el suelo, obran diversas fuerzas. El campo gravitatorio de la Tierra atrae verticalmente el agua contenida en el suelo. Campos de fuerza producidos por la atracción de superficies de sólidos tiran del agua en diferentes direcciones.

El peso del agua, y a veces el peso adicional de las partículas no constreñidas en la matriz del suelo, actúan sobre el agua en virtud de la atracción de la gravedad.

Los iones disueltos en el agua tienen fuerza atractiva para el disolvente y resisten las fuerzas que tienden a separarlos del agua.

En el estudio de estos fenómenos tiene a la vez importancia los conceptos de energía cinética (que posee todo cuerpo en movimiento, $\frac{1}{2} * m * v^2$) y energía potencial (es la contenida en un cuerpo en virtud de su posición con un campo de fuerza).

2.6.1 Succión.

El agua en el suelo está sujeta a un número de campos de fuerza. Estos campos resultan de la atracción que ejerce la matriz sólida sobre el agua, así como la presencia de sales y la acción externa de presión de gas y de gravedad.

Se consideran varios potenciales o combinaciones de potencial según el fenómeno que se estudie. Teóricamente a cada fuerza que obra sobre el agua le corresponde un potencial. Pero en la práctica, por razón de comodidad, algunos de los potenciales se combinan en un solo potencial. El potencial total del agua en el suelo puede expresarse como la suma de la contribución separada de varios factores que son:

$$\psi_T = \psi_M + \psi_g + \psi_p + \psi_\pi + \psi_\Omega \quad (2.7)$$

donde:

$\psi_M, \psi_g, \psi_p, \psi_\pi$ y ψ_Ω son, respectivamente, los potenciales de la matriz de suelo, de gravedad, de presión, osmótico y de sobrecarga

La forma en que actúan los diferentes potenciales no es la misma y sus gradientes separados no siempre son igualmente efectivos en la generación de flujo (por ejemplo). La ventaja principal del concepto de potencial total es que presenta una medida unificada por la cual es posible evaluar el estado del agua en cualquier momento y lugar dentro del suelo.

El estado energético del agua del suelo es de fundamental importancia en los procesos de transporte, recarga, flujo y propiedades mecánicas de los suelos. El flujo de agua en el suelo es un caso especial de un problema mayor de movimientos de líquidos en medios porosos.

2.6.1.1 Succión osmótica ψ_π .

La presencia de sales en el agua del suelo afecta sus propiedades termodinámicas y disminuye su energía potencial. En particular las sales bajan la presión de vapor del agua del suelo. El efecto osmótico es importante en el proceso que involucra la difusión de vapor.

El potencial osmótico resulta de la hidratación de iones en la solución de suelo. Estas fuerzas de atracción orientan el agua en torno a los iones, y el potencial osmótico es el trabajo requerido para separar el agua de estos iones.

El ejemplo más conocido de la presencia de fuerzas osmóticas es el ascenso del agua en una rama de un tubo en U, que contiene una solución separada del agua

pura contenida en la otra rama por una membrana semipermeable situada en un arco de tubo en U. La membrana tiene orificios bastante grandes para dejar pasar las moléculas de agua, pero demasiado pequeños para que pasen los iones de la sustancia disuelta.

En virtud de la atracción por los iones, el agua pura pasa a través de la membrana y entra en la solución hasta que la presión hidrostática, por diferencia de altura entre las dos ramas, contrarresta el efecto de aquella atracción. Esta diferencia de presión es la “presión osmótica”, que se observa en la figura 2.5.

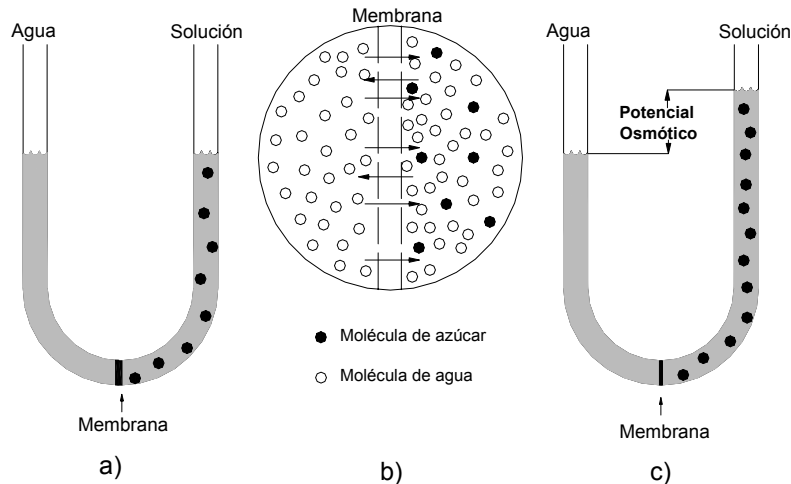


Figura 2.5 Procesos de ósmosis y presión osmótica.

(a) El tubo contiene agua en el extremo izquierdo y en el derecho agua con azúcar, estos líquidos están separados por una membrana permeable al agua pero no a las moléculas de azúcar. (b) A lo largo de la membrana las moléculas de agua tienen movimiento libre de un lado a otro del tubo, y las moléculas de azúcar no pueden penetrar en la membrana. Ya que el efecto del azúcar disminuye la energía libre del agua en el lado de la solución, mas agua pasa de izquierda a derecha que de derecha izquierda. (c) Equilibrio de las fuerzas de osmosis genera la diferencia de niveles entre los dos extremos del tubo, este es el potencial osmótico. (Nyle C. Brandy 1990)

Las sustancias presentes en el suelo, en su mayoría no son volátiles a temperaturas ordinarias y quedan como residuo al evaporarse el agua. Para eliminar el agua de una solución que contiene solutos es preciso suministrar mayor cantidad de energía que para eliminar el agua pura.

La interfase agua solución obra como una membrana en una solución y la presión de vapor en el aire circundante es reducida proporcionalmente, a semejanza de la diferencia de presión creada a través de una membrana de solución.

Por consiguiente, existen fuerzas osmóticas siempre que un líquido y una fase aérea interactúan, aun en ausencia de la membrana.

Las partículas de arcilla suspendidas en una solución causan el mismo fenómeno en virtud de la atracción que la arcilla ejerce sobre el agua. Podría discutirse si el fenómeno es un efecto osmótico por comportarse la partícula como un ión o si es un efecto matricial porque obedece a las fuerzas superficiales de una partícula sólida.

El flujo neto de agua en respuesta a una diferencia de potencial matricial de un punto a otro puede tener una dirección contraria al flujo de agua producido por un gradiente de potencial osmótico.

2.6.1.2 Succión mátrica ψ_M .

La succión mátrica esta asociada con la atracción de agua por superficies sólidas y con la atracción mutua de las moléculas de agua, comprende las fuerzas no equilibradas que ocurren en la interfase aire-agua que dan origen a la tensión superficial.

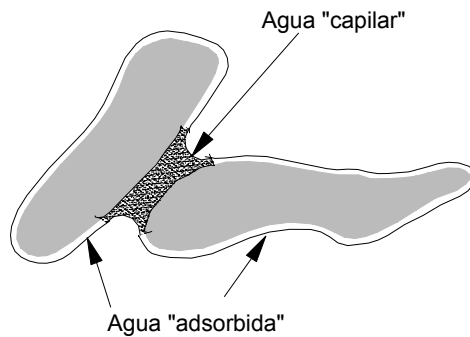


Figura 2.6 Agua en un suelo parcialmente saturado, sujeta a la capilaridad y a la adsorción, que en combinación producen la succión mátrica.

2.6.1.3 Potencial gravitacional ψ_g .

El potencial gravitacional del agua del suelo en cualquier punto se determina por la elevación del punto en estudio respecto a un nivel de referencia arbitrario. Por conveniencia es costumbre colocar el nivel de referencia dentro del suelo o bajo el perfil del suelo considerado, de modo que el potencial gravitacional sea siempre positivo o cero.

A la altura Z arriba de la referencia, la energía potencial gravitacional E_g de una masa M de agua, ocupando un volumen V , es:

$$E_g = MgZ = \rho_w VgZ \quad (2.8)$$

donde:

- ρ_w Densidad del agua.
- g Aceleración de la gravedad.

Así, el potencial gravitacional, en términos de energía potencial por unidad de masa es:

$$\psi_g = gZ \quad (2.9)$$

y en términos de energía potencial por unidad de volumen:

$$\psi_g = \rho_w gZ \quad (2.10)$$

El potencial gravitacional es independiente de las condiciones químicas y de presión de agua en el suelo, pues depende únicamente de la elevación relativa.

2.6.1.4 Potencial de presión ψ_p .

Este potencial que se debe al peso del agua en el punto considerado o a presión de gas distinta de la que existe en la posición de referencia, se denomina "potencial de presión". Si el punto está por debajo del agua freática, el potencial es igual y de signo opuesto de gravedad que se mide desde la superficie libre del agua; se llama también "potencial de sumergencia" y podría denominarse "potencial piezométrico", que corresponde a la "altura piezométrica".

Los potenciales de presión debido a un gas, se miden con un manómetro ordinario, mientras que los potenciales de presión por presión de un fluido pueden medirse con un manómetro o con piezómetro. El nivel del agua en el tubo, medido desde el punto de referencia apropiado, es la lectura piezométrica, que puede convertirse en unidades de potencial.

Desarrollo experimental.

3.1 Introducción.

La medición de la permeabilidad se realizó, tanto en campo como en laboratorio, empleando muestras inalteradas de suelo.

Para las pruebas de laboratorio se diseñó y construyó un permeámetro que permite extraer muestras inalteradas de suelo, los líquidos considerados son los involucrados en los derrames sobre las carreteras y el derecho de vía, pero además también en su transporte por ductos; tienen características y propiedades diferentes que hacen variar la permeabilidad del suelo.

Los suelos estudiados corresponden a las unidades geológicas del Valle de Querétaro y zonas aledañas al Instituto Mexicano del Transporte.

3.2 Características de los materiales geológicos en estudio.

El Valle de Querétaro tiene un origen tectónico y las principales estructuras geológicas corresponden a mesetas, domos de lava y volcanes.

Los eventos principales ocurrieron durante el Terciario, según lo evidencian los materiales predominantes en la zona.

Posiblemente durante el Mioceno aparecieron las rocas que conforman la morfología de la Sierra de Santa Rosa Jáuregui, el Zamorano, Cerro de Monte Negro, Pie de Gallo y el Cerro del Cimatarío, así como los promontorios de escasa elevación.

Durante el Pleistoceno se manifestó una actividad volcánica no explosiva, en que el material deyectado fue principalmente del tipo máfico, cuyos derrames intermitentes fluyeron a través de fisuras de la corteza terrestre.

3.2.1 Descripción geológica y ubicación de los suelos estudiados.

En las zonas de estudio se encuentran tobas arcillosas, arenosas, vítreas, de caída libre correspondientes a las Unidades Geológicas Mompaní y Cuesta China, así como a suelos del tipo lacustre. En la figura 3.1 se muestra la ubicación de los sitios mencionados.



Figura 3.1 Mapa de localización de los suelos estudiados.

3.2.1.1 Banco de materiales Cuesta China (Tstcch).

La geología del lugar corresponde a tobas de caída libre pseudoestratificada con intercalaciones de arena pómez, cenizas, limos. Ocasionalmente se encuentran horizontes mezclados con vidrio volcánico.

Los pseudoestratos varían de sólo unos cuantos centímetros hasta un metro de espesor (ver figura 3.2).

Estos materiales geológicos fueron depositados durante el Terciario Superior, y dado que su exposición aparece en la Cuesta China sobre la autopista México-Querétaro, reciben el mismo nombre y se representa por Tstcch.



Figura 3.2 Unidad Cuesta China, al fondo se observa la Autopista México – Querétaro.

3.2.1.2 Toba Mompaní (Titm).

A esta unidad corresponden los siguientes lugares: Colonia Álamos, Sanfandila, El Nuevo Aeropuerto y Arboledas.

Con el nombre de Mompaní, se identifica a un paquete de tobas lítico-arcillosas de tono gris y claro que afloran en las proximidades de la ranchería Mompaní, de donde toma su nombre. Las conforman dos miembros: uno lítico y otro arcilloso. El miembro lítico se localiza en la base del paquete y lo conforma pedrería de basalto y pómez principalmente; presenta ligera piroconsolidación. Su espesor en la zona del trabajo se midió de 7 metros en promedio.

El miembro areno-arcilloso es de color crema, sin piroconsolidación, lo cual permite su fácil erosión. Su espesor es de 40 metros en promedio. La distribución de ambos miembros es irregular, en ocasiones sólo aflora el miembro areno-arcilloso. Las tobas Mompaní están cubiertas en forma discordante por las Andesitas basálticas Menchaca (Tmbm). La extensión de estas tobas es de carácter regional, debido a las características físicas y de la posición estratigráfica se correlacionan con la Toba Joya de Cortés que aflora al norte de Salamanca, Gto. (ver la figura 3.3).



Figura 3.3 Unidad Mompaní, terrenos del Aeropuerto Intercontinental de Querétaro.

3.2.1.3 Los Olivos, suelo del tipo lacustre (Qla).

En esta Unidad Geológica se enmarcan los suelos residuales, arcillas, gravas y boleas producto de la erosión y alteración de las rocas que conforman las montañas de la periferia del valle. Los depósitos de aluvión alcanzan espesores hasta de 100 metros en el centro del valle.



Figura 3.4 Suelo lacustre, Los Olivos, ciudad de Querétaro.

3.2.2 Propiedades índice de los suelos estudiados.

Con la finalidad de identificar y caracterizar los materiales estudiados se determinaron sus propiedades índice, como son: Límites de Atterberg, contenido de Humedad y Granulometría.

Estos datos son necesarios para realizar la clasificación SUCS de los sitios estudiados. La tabla 3.1 muestra las propiedades índices de los diferentes suelos y en la figura 3.5 se ubican en la carta de plasticidad.

Tabla 3.1 Propiedades índice de los suelos en estudio.

SITIO	LL	LP	IP	Ss	CLASIFICACION SUCS
ALAMOS	36.2	26.9	9.3	2.03	ML
ARBOLEDAS	16.9	NP	NP	2.02	ML
CUESTA CHINA	38.9	25.7	13.2	1.92	ML
AEROPUERTO	50.3	34.3	16.0	2.60	MH
OLIVOS	63.6	32.6	31.0	2.54	MH
SAN FANDILA	40.0	33.0	7.0	2.55	ML

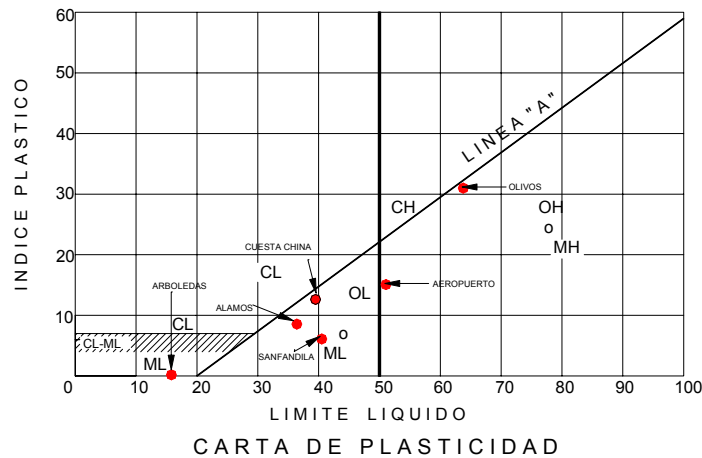


Figura 3.5 Ubicación de los suelos estudiados en la carta de plasticidad.

3.3 Características y usos de los líquidos utilizados.

Los líquidos usados en este trabajo de tesis se encuentran involucrados en los accidentes que suceden durante el transporte terrestre de materiales peligrosos entre ellos se encuentra: agua destilada, agua potable, sosa líquida, diesel, acetona, ácido acético y ácido sulfúrico.

Se consideró el uso del agua con el fin de comparar los diferentes valores de la permeabilidad (ver figura 3.6).



Figura 3.6 Líquidos usados en pruebas de campo.

3.4 Medición de parámetros de conductividad hidráulica “*in situ*”.

Esta sección presenta la metodología empleada para medir la permeabilidad del los suelos en campo a diferentes sustancias, se describe el método de prueba y su forma de interpretación.

3.4.1 Objetivo de la prueba “*in situ*”.

La metodología que se propone para medir la permeabilidad en pruebas de campo tiene los siguientes objetivos:

- Medir la permeabilidad del suelo en su estado natural.
- Reproducir las condiciones en las que sucede un derrame o una fuga sobre el suelo.
- Ser controlable durante su ejecución y de fácil interpretación.
- Requerir el mínimo de herramientas e instrumentos especiales.
- Ser de bajo riesgo y costo.
- Permitir con facilidad su repetibilidad para obtener valores representativos de la zona en estudio.

3.4.2 Aspectos generales y procedimiento de la prueba de permeabilidad “*in situ*”.

Este procedimiento cubre la determinación de la permeabilidad de un suelo en campo; se realiza en campo midiendo el abatimiento de un tirante hidráulico sobre un sondeo realizado directamente en el terreno de prueba.

Con los registros de los abatimientos y los tiempos correspondientes a cada nivel de líquido, se proponen dos maneras de obtener la permeabilidad media del suelo (k_m), la primera con la interpretación de la gráfica de abatimientos y la segunda con la aplicación de la ecuación experimental del Cuerpo de Ingenieros de U.S. Army, mostrada en la sección 2.5.1 del capítulo 2 de esta publicación.

3.4.2.1 Equipo necesario.

El equipo necesario para llevar a cabo la prueba es el siguiente: pico, pala, barreta, escoba, brocha, cucharón, reglas metálicas (2 por sondeo), reglas de precisión, termómetro, flexómetro, libreta de registro, bolsas de plástico, etiquetas para identificación, máscara contra gases tóxicos, guantes para ácidos, bata de laboratorio y los fluidos para las pruebas de permeabilidad.

3.4.2.2 Preparación del sitio.

Se nivela y limpia la zona a estudiar, retirando basura y la capa vegetal que se encuentren sobre el estrato de prueba (ver figuras 3.7 y 3.8).



Figura 3.7 Retiro del material suelto del sitio de prueba.



Figura 3.8 Nivelación y limpieza del sitio de prueba.

3.4.2.3 Procedimiento de prueba.

- 1) Se realiza un sondeo cúbico o circular sobre el estrato limpio y nivelado, de 12 cm de profundidad por 12 cm. de diámetro (ver figuras 3.8 y 3.9).

Nota: se deberá recuperar todo el material producto del sondeo; es necesario conocer su peso, humedad natural y pruebas índice, por tal razón la muestra se debe trasladar protegida hasta el laboratorio.



Figura 3.9 Excavación y recuperación del material del sondeo.



Figura 3.10 Sondeo excavado.

- 2) Se corta una bolsa plástica en su extremo inferior y se dobla, posteriormente el extremo doblado se coloca al interior del sondeo, con el fin de proteger las paredes y fondo del sondeo. Esto evita que el líquido entre en contacto con el suelo antes de hacer las mediciones del abatimiento (ver figura 3.11).
- 3) Se vierte el líquido dentro de la bolsa plástica llenando totalmente el sondeo (ver figura 3.11).
- 4) Se extrae con cuidado la bolsa, permitiendo que el líquido quede expuesto directamente a las paredes y fondo del sondeo de forma repentina.



Figura 3.11 Vertido del líquido en la bolsa de plástico.

- 5)** Se activa el cronómetro y se coloca una regla metálica que sirve de referencia de las lecturas de abatimiento del líquido sobre el sondeo (ver figura 3.12).
- 6)** Se toman las lecturas de los abatimientos a diferentes tiempos, hasta el primer minuto, posteriormente se tomarán a cada minuto o dependiendo de la evolución del abatimiento, hay líquidos que no se infiltran rápidamente, lo que permite tomar lecturas en intervalos de tiempo mayores, en cambio, hay líquidos como la gasolina en que la prueba dura de 15 a 30 minutos, lo que hace indispensable registrar las variaciones en intervalos menores.



Figura 3.12 Medición del abatimiento en el nivel inicial del líquido.

3.4.2.4 Formato de la prueba “*in situ*”.

La información recabada durante la prueba se puede registrar en el formato que muestra la figura 3.13, donde se incluyen los datos generales del sitio en estudio, las dimensiones del sondeo, las lecturas realizadas del abatimiento del líquido y la gráfica de campo.

Carretera _____
 Tramo _____
 Fecha _____
 Distancia al eje del camino _____
 Líquido _____
 Operador _____
 Clave del sondeo _____

PRUEBA DE PERMEABILIDAD DE CONTAMINANTES EN CAMPO

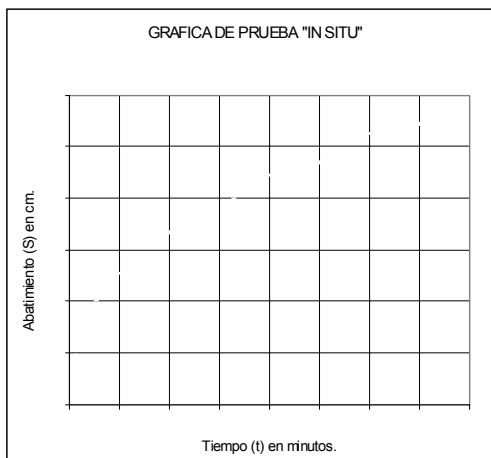
FORMA DE CAMPO

DATOS DEL SONDEO

DIMENSIONES

Diámetros	Profundidad
D1	P1
D2	P2
D3	P3

Volumen del sondeo =



LECTURAS

Tiempo (t) en min.	Abatimiento (s) en cm.

Temperatura del líquido = T = _____ °C

Observaciones:

Figura 3.13 Formato de datos de campo.

3.4.3 Interpretación de la prueba “in situ”.

Se sabe que la velocidad es una relación lineal, para el caso del flujo, entre la distancia recorrida por el fluido y el tiempo empleado. De la curva se obtienen varios segmentos, los que representan las velocidades de humedecimiento, saturación y transporte; el último de ellos corresponde al valor de la permeabilidad media “ k_m ” del suelo.

Otra manera de calcularla es utilizando la fórmula del cuerpo de ingenieros mostrada en la sección 2.5.1.

Con la finalidad de mostrar claramente el procedimiento a seguir en ambos métodos, se muestra el ejemplo numérico de la interpretación de la prueba 300402P4GA, que corresponde a la infiltración de diesel sobre un limo de baja plasticidad (ML). La nomenclatura de la prueba significa que se realizó el 30 de abril de 2002 (300402), que es el pozo 4 (P4) y que el líquido es gasolina (GA).

3.4.3.1 Modelo teórico propuesto para la determinación de “ k_m ” por la gráfica de abatimientos.

Después de realizar el análisis de la información obtenida en campo, se observó un comportamiento característico en todas las pruebas realizadas, en la figura 3.14 se presenta la gráfica patrón que resulta de representar en el eje “y” el valor de cada abatimiento (S) y en el eje “x” el tiempo correspondiente (t). La función que obedece a este comportamiento es de la forma:

$$S_c = \rho * t^\omega$$

Los coeficientes que definen el modelo teórico propuesto son ρ y ω , los cuales determinan el comportamiento del líquido sobre el suelo. Estos coeficientes tomaron rangos muy variables en todas las pruebas, y su valor se atribuye principalmente a las características del suelo y del líquido involucrado. La variación de los coeficientes ρ y ω para los suelos estudiados es:

ρ	ω
5.248 a 0.189	0.883 a 0.196

En la tabla 3.2 se observa el rango de variación obtenido por tipo de líquido

Tabla 3.2 Variación de los coeficientes ρ y ω por tipo de líquido.

Líquido	ρ	ρ	ω	ω
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Agua Destilada	4.452	0.806	0.574	0.419
Agua Potable	5.019	0.635	0.644	0.402
Sosa Líquida	3.540	0.189	0.660	0.211
Diesel	3.537	1.152	0.498	0.397
Ácido Sulfúrico	4.237	0.738	0.523	0.376
Ácido Acético	5.248	1.436	0.637	0.196
Gasolina	4.214	1.132	0.883	0.389
Acetona	2.618	1.085	0.706	0.394

El modelo teórico propuesto (ver figura 3.14) presenta 3 zonas diferenciadas:

Etapa de Humedecimiento: corresponde a la etapa en la que el suelo absorbe a gran velocidad el líquido, las partículas de suelo son humedecidas a gran velocidad.

Etapa de saturación: el suelo satura sus vacíos con el líquido y se encuentra listo para iniciar el flujo establecido.

Etapa de Transporte: el fluido viaja libremente hasta donde está el frente húmedo, el promedio de las velocidades obtenidas en esta etapa, es el valor de la permeabilidad media " k_m " del suelo buscada.

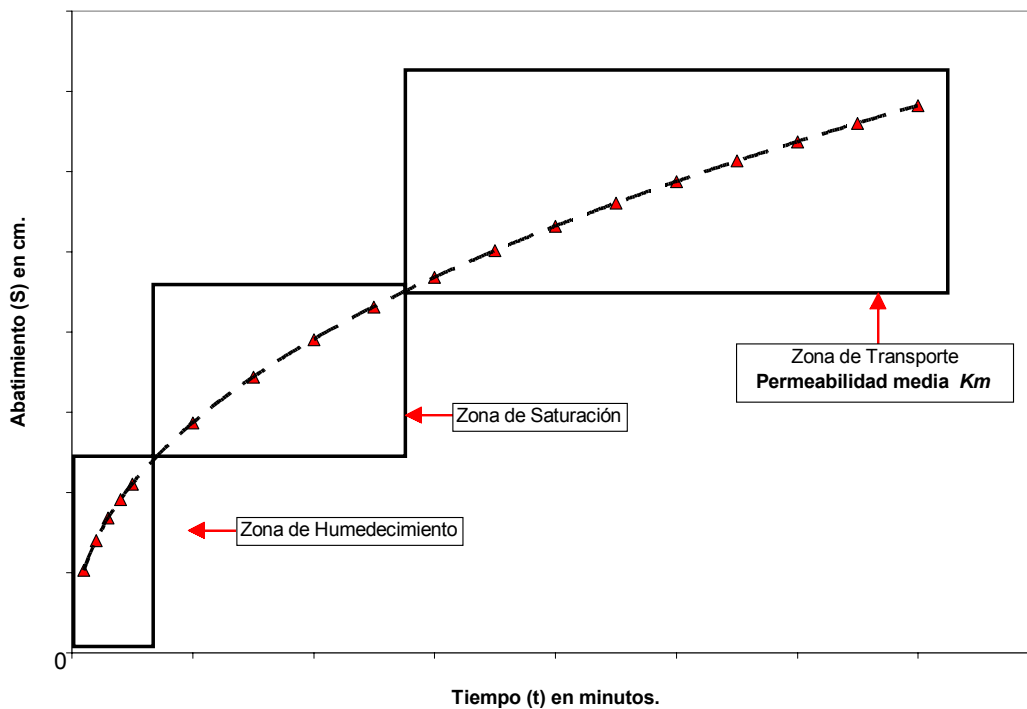


Figura 3.14 Modelo de comportamiento teórico de los abatimientos en el sondeo de prueba.

Los pasos se van repitiendo hasta que toda la masa del suelo involucrada se ha humedecido, saturado o bien el fluido ha cesado de viajar.

Una vez obtenidos el registro del abatimiento con los tiempos correspondientes se requiere calcular el valor de los coeficientes ρ y ω de la manera siguiente:

1. Se calcula el logaritmo de tiempo (t) y el abatimiento (S) (ver tabla 3.3).
2. Se completa la tabla calculando los valores de X , Y y X^2 .

Tabla 3.3 Registro de campo y cálculos previos para el ajuste de datos.

Tiempo	Abatimiento	X	Y	$X * Y$	X^2
t	S	$\log t$	$\log S$		
0.17	2.00	-0.778	0.301	-0.2342	0.6055
0.50	3.00	-0.301	0.477	-0.1436	0.0906
1.00	4.00	0.000	0.602	0.0000	0.0000
1.25	4.90	0.097	0.690	0.0669	0.0094
2.00	5.40	0.301	0.732	0.2205	0.0906
2.50	6.00	0.398	0.778	0.3097	0.1584
3.50	7.00	0.544	0.845	0.4598	0.2960
4.15	8.90	0.618	0.949	0.5868	0.3820
6.00	9.50	0.778	0.978	0.7608	0.6055
9.00	11.50	0.954	1.061	1.0122	0.9106
11.00	12.50	1.041	1.097	1.1423	1.0845
12.50	12.60	1.097	1.100	1.2070	1.2032
Suma (Σ)		4.750	9.611	5.388	5.436

3. Se determinan los siguientes valores:

$$\begin{aligned} \Sigma X_i &= 4.7500 \\ \Sigma Y_i &= 9.6110 \\ \Sigma X_i Y_i &= 5.3880 \\ \Sigma X_i^2 &= 5.4360 \\ (\Sigma X_i)^2 &= 22.5579 \\ N \text{ (número de datos)} &= 12 \end{aligned}$$

4. Se realiza una regresión lineal de los datos contenidos en las columnas X y Y . Dado que la función potencial $S_c = \rho t^\omega$ se puede transformar en $\log S_c = \omega \log t + \log \rho$, usando las nuevas variables $X = \log t$ y $Y = \log S_c$, se obtiene que la relación lineal es: $Y = \omega X + b$
Donde $b = \log \rho$.

5. Se aplican las fórmulas de la regresión lineal para calcular el valor de los coeficientes ω y b .

$$\omega = \frac{N(\Sigma XY) - (\Sigma X)(\Sigma Y)}{N(\Sigma X^2) - (\Sigma X)^2} = \frac{12(5.388) - (4.75)(9.611)}{12(5.436) - (4.75)^2} = 0.4454$$

$$b = \frac{\Sigma Y - \omega \Sigma X}{N} = \frac{9.611 - 0.4454(4.75)}{12} = 0.6243$$

Recordando que $b = \log \rho$, se obtiene el inverso logaritmo de 0.6243, resultando el valor del coeficiente ρ igual a 4.21.

6. Se plantea la ecuación potencial con sus respectivos coeficientes, quedando de la forma siguiente:

$$S_c = 4.21 t^{0.4454}$$

7. Se ajustan los abatimientos medidos a la función potencial obtenida; esto se realiza evaluando la ecuación potencial en los tiempos correspondientes a cada medición. En la tabla 3.4 se observan los datos ajustados y calibrados.

Tabla 3.4 Evaluación de la ecuación potencial y cálculo de velocidad de abatimiento.

Tiempo	Abatimiento	Velocidad	Velocidad
t	$S_c = 4.21 t^{0.4454}$		S_c / t
min	cm	cm/min	cm/s
0.17	1.90	11.372	0.1895
0.50	3.09	6.183	0.1031
1.00	4.21	4.210	0.0702
1.25	4.65	3.720	0.0620
2.00	5.73	2.866	0.0478
2.50	6.33	2.533	0.0422
3.50	7.36	2.102	0.0350
4.15	7.94	1.912	0.0319
6.00	9.35	1.559	0.0260
9.00	11.20	1.245	0.0207
11.00	12.25	1.114	0.0186
12.50	12.97	1.037	0.0173

8. Se construye una gráfica que muestra los datos de campo y la línea del modelo teórico propuesto. (ver figura 3.14 y 3.15)

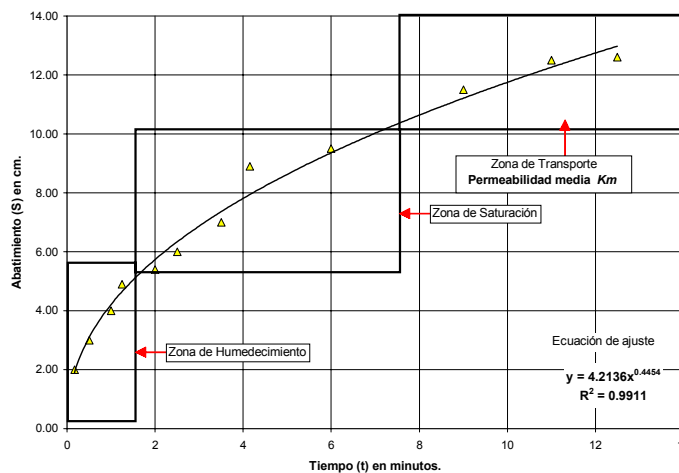


Figura 3.15 Interpretación de la grafica de abatimientos “in situ”.

9. Con la finalidad de distinguir claramente las diferentes zonas del modelo teórico se construye la gráfica siguiente que muestra la variación de la velocidad de abatimiento a lo largo del tiempo de prueba.

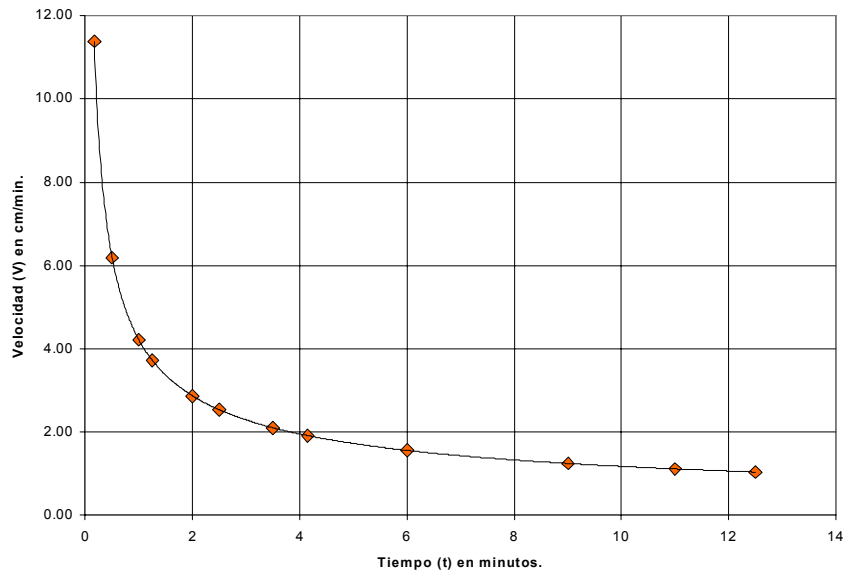


Figura 3.16 Variación de la velocidad de abatimiento.

10. Se calculan las velocidades promedio correspondientes a las zonas de humedecimiento, saturación y transporte, según muestra la tabla siguiente:

Tabla 3.5 Cálculo de las velocidades promedio de Humedecimiento, Saturación y Transporte.

Tiempo	Velocidad	Velocidad Promedio
min	cm/s	cm/min
0.16	0.190	Humedecimiento
<u>0.50</u>	<u>0.103</u>	$V_h = \mathbf{0.1398}$
0.50	0.103	
1.00	0.070	Saturación
1.25	0.062	$V_s = \mathbf{0.0519}$
2.00	0.048	
2.50	0.042	
3.50	0.035	
<u>4.15</u>	<u>0.032</u>	
4.15	0.032	Transporte
6.00	0.026	$V_t = \mathbf{0.02231}$
9.00	0.021	
11.00	0.019	
12.50	0.017	

Por lo tanto la permeabilidad media " k_m " es igual a 2.22×10^{-1} cm/s, que corresponde al promedio de la última zona de la gráfica de velocidades, este valor se adopta porque en este instante el cambio en la pendiente de la gráfica de abatimientos supone un flujo ya establecido.

3.4.3.2 Determinación de k_m por el método del Cuerpo de Ingenieros de US Army.

Se puede emplear la fórmula experimental obtenida por el Cuerpo de Ingenieros, U.S. Army, (Boletín No. 36. Waterways Experiment Station Vicksburg, Mississippi April 1951) .

Los datos de la prueba son:

H_1	=	12.60 cm	(abatimiento total)
D	=	10.13 cm	(diámetro del sondeo)
t_1	=	10.00 s	(tiempo de la 2ª. lectura de el abatimiento de el líquido en el sondeo)

El valor de la permeabilidad media " k_m ", se obtiene aplicado la ecuación que se muestra en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Cálculo de la permeabilidad con la fórmula del Cuerpo de Ingenieros US Army.

t_2	H_2	$k_m = \frac{\pi \cdot D}{11 \cdot (t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2}$
s	cm	cm/s
30	9.6	0.039318
60	8.6	0.022089
75	7.7	0.021909
120	7.2	0.014711
150	6.6	0.013356
210	5.6	0.011725
249	3.7	0.014826
360	3.1	0.011586
540	1.1	0.013304

La permeabilidad promedio aplicando este método es de 1.67×10^{-1} cm/seg.

3.5 Medición de parámetros de conductividad en laboratorio.

Pensando en las condiciones en que se encuentra el suelo en campo y la estructura de lo que debe ser un permeámetro, se diseñó uno para sacar muestras inalteradas, posteriormente se le hicieron modificaciones para añadir cera (Valadéz, 2002) e impedir que los fluidos corrieran a través de la pared y la muestra, principalmente cuando éstos son arenosos o limosos.

3.5.1 Diseño del permeámetro.

Los equipos existentes en el mercado son de características especiales para cierto tipo de suelos, son costosos y son para emplear únicamente agua como fluido; mientras que el diseñado en la Coordinación permite extraer muestras inalteradas del suelo, es resistente a los fluidos corrosivos y es muy manejable.

El diseño final del permeámetro consiste en un tubo de lucita que alberga la muestra inalterada y la carga del fluido, un casco de acero inoxidable que sirve de base al tubo de lucita y es el mecanismo extractor de la muestra inalterada (ver figura 3.17), también alberga una malla del No. 100 para la retención del suelo (ver figura 3.18).



Figura 3.17 Permeámetro de carga variable. Se muestra en piezas y armado.



Figura 3.18 Casco de acero inoxidable y malla No. 100.

El casco metálico (figura 3.19) se empotra a una base metálica que da soporte a todo el sistema en el banco de trabajo y permite colocar en su parte inferior el recipiente receptor del líquido que atraviesa la muestra.



Figura 3.19 Detalle del filo del casco de acero inoxidable, auxiliar en la extracción de la muestra.

El sellado entre las paredes del tubo y la muestra se hace con un equipo complementario consistente en un tubo de cobre de $\frac{1}{4}$ de pulgada de diámetro que desemboca en una base metálica cónica; este mecanismo permite repartir uniformemente la parafina con la que es sellada la muestra y también permite verter gradualmente el líquido a utilizar (Valadéz, 2002).

Se realizó el plano en tres dimensiones, con el objeto de visualizar todos los ángulos del equipo y poder realizar los ajustes necesarios al diseño.

Con el dibujo el fabricante pudo darse una idea clara del equipo y evitar errores de interpretación.

3.5.2 Muestreo inalterado para el cálculo de permeabilidad en laboratorio..

Para la obtención de la permeabilidad en laboratorio se extrajeron muestras inalteradas de suelo utilizando pico, pala, barreta, flexómetro, libreta de registro, bolsas plásticas, identificadores de muestras, escoba, brocha, cucharón, cuchillos, espátulas y permeámetro.

3.5.2.1 Preparación del sitio.

Para extraer la muestra inalterada es necesario nivelar y limpiar la zona a estudiar, retirando basura y la capa vegetal que se encuentren sobre el estrato de prueba. (ver figuras 3.20 y 3.21).



Figura 3.20 Identificación del estrato de prueba en zona del Aeropuerto.



Figura 3.21 Preparación del sitio para extracción de la muestra inalterada.

3.5.2.2 Extracción de la muestra inalterada.

Una vez que se preparó el sitio, se delimita un área de 25 x 25 cm sobre el suelo donde se labrará la muestra formando un montículo de suelo inalterado que facilite el hincado de la base metálica del permeámetro como se aprecia en la figura 3.22.



Figura 3.22 Labrado del cono para colocar el extractor.

Ya preparado el terreno se coloca la base metálica sobre el montículo y se inicia el hincado (ver figura 3.23), cuando el suelo ha penetrado 5 cm en la base metálica se enrosca el tubo de lucita al casco metálico y se continua el hincando del equipo aprovechando el filo de la base metálica. La extracción de la muestra se hace con el auxilio de un cuchillo, labrando aproximadamente la forma del equipo, hasta lograr que el suelo alcance una altura de 10 a 15 cm dentro del tubo de lucita (ver figura 3.24).



Figura 3.23 Colocación del equipo extractor sobre el suelo.

Cuando la muestra está lista, se etiqueta y se protege con una bolsa plástica perfectamente cerrada en sus extremos y se traslada al laboratorio donde se ensaya.



Figura 3.24 Se muestra la colocación del extractor y el suelo inalterado dentro del equipo.

3.5.2.3 Precauciones.

Es necesario que el trabajo de labrado se ejecute con cuidado y sin generar esfuerzos tangenciales al suelo, ya que esto produce que la muestra se fracture y se pierda su acomodo natural.

El traslado de la muestra debe de ser siempre en la posición de extracción, es decir vertical, ya que cualquier movimiento brusco podría ocasionar su desintegración principalmente en suelos con bajo contenido de humedad y no plásticos.

3.5.3 Prueba de permeabilidad en laboratorio.

La prueba consiste en medir la cantidad de líquido que atraviesa la muestra de suelo en un tiempo determinado, En la figura 3.25 aparece el diagrama del dispositivo utilizado.

Al ejecutar la prueba se llena de líquido el tubo vertical de lucita observándose su descenso a medida que el fluido atraviesa la muestra.

Con referencia a la figura 3.25 se tiene que: “ a ” Área del tubo vertical, “ A ” Área de la muestra, “ L ” Longitud de la muestra, “ h_1 ” Carga hidráulica al principio de la prueba, “ h_2 ” Carga hidráulica al final de la prueba, “ t ” Tiempo requerido para que la carga hidráulica pase de h_1 a h_2 .

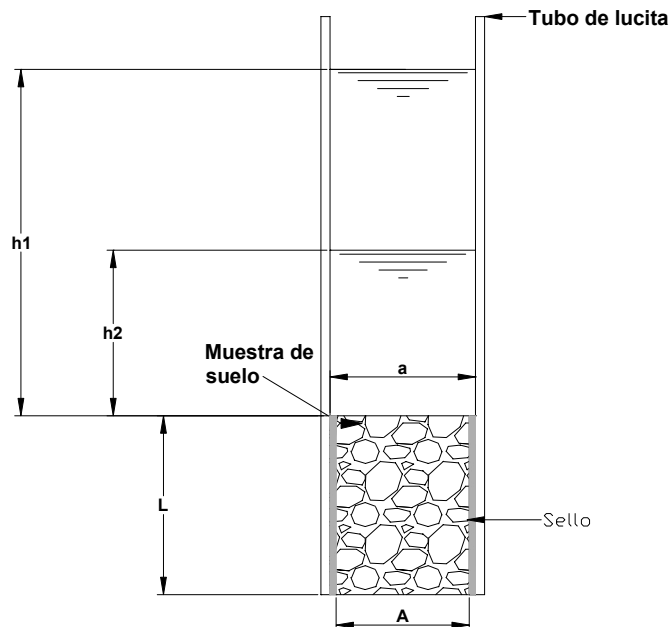


Figura 3.25 Colocación de la muestra y líquido en el permeámetro.

Considerando un tiempo dt , la cantidad de líquido (cm^3) que atraviesa la muestra será, según la ley de Darcy :

$$dV = kAidt = kA \frac{h}{L} dt$$

Al mismo tiempo, en el tubo vertical el agua habrá tenido un descenso dh y el volumen de líquido que atravesó la muestra en el tiempo dt podrá expresarse como:

$$dV = -adh$$

las dos expresiones anteriores pueden igualarse, pues ambas se refieren a lo mismo :

$$kA \frac{h}{L} dt = -adh \therefore a \int_{h_2}^{h_1} \frac{dh}{h} = \frac{kA}{L} \int dt$$

por lo tanto:

$$k = \frac{La}{At} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (3.4)$$

Con esta expresión se calcula el coeficiente de permeabilidad.

3.5.3.1 Equipo necesario para prueba de permeabilidad en laboratorio.

Para la realización de la prueba de permeabilidad en laboratorio se debe reunir el siguiente equipo: permeámetro con muestra inalterada, tela de malla N^o 100, tubo alimentador, parafina, cera, cronómetro, flexómetro, vernier, recipiente receptor de vidrio, hoja de registro de datos, cuchillos, estufa de gas, balanza, probeta graduada, líquido a utilizar.

3.5.3.2 Preparación de la muestra.

El registro ordenado de los datos que se obtienen durante la prueba, aparecen en el formato mostrado en la figura 3.26.

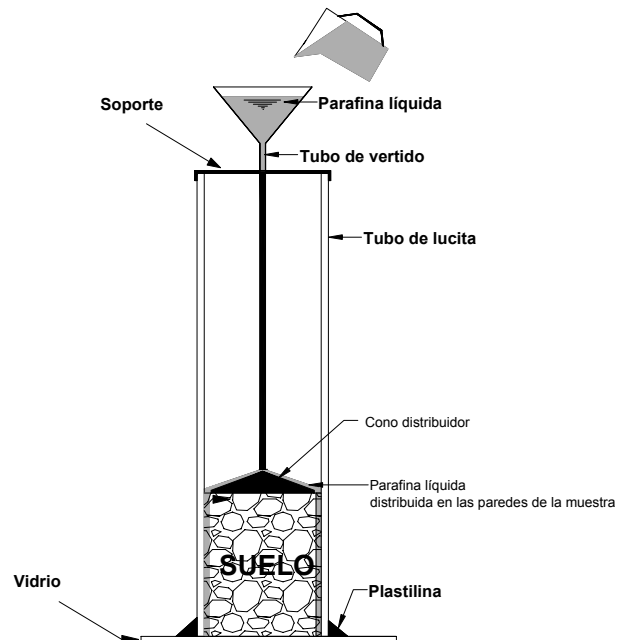


Figura 3.27 Colocación del sello de parafina sobre la muestra inalterada dentro del tubo de lucita.

Se debe colocar el tubo con la muestra sobre un cristal limpio y sellar con plastilina, la junta existente entre el tubo y el cristal. La temperatura a la que se calienta la parafina, debe ser tal, que sea la necesaria para que alcance una consistencia líquida.

Con auxilio del tubo alimentador y un embudo se debe hacer llegar la mezcla líquida sobre los extremos de la muestra inalterada hasta su nivel superior. Se dejará enfriar la mezcla hasta que alcance una consistencia dura.

Se separa el tubo de la base de cristal y se limpia la plastilina. Una vez que se tiene la muestra sellada en el tubo se procede a colocar el casco metálico con la respectiva malla y junta.

Se coloca todo el dispositivo sobre la base metálica, se limpia el tubo alimentador y se coloca dentro del tubo de lucita, descansándolo sobre la muestra de suelo, posteriormente se coloca el recipiente de vidrio que sirve de receptor del líquido que atraviesa el suelo.

Una vez realizado lo anterior, se vierte el líquido sobre el embudo del tubo alimentador hasta una altura previamente determinada, cuando el líquido alcance el nivel requerido se retira el tubo y se pone en marcha el cronómetro; tomando las lecturas de los abatimientos y el tiempo respectivo.

Cuando la mayor parte del líquido ha atravesado la muestra, finaliza el registro, se retira el casco de acero y se pesa nuevamente el dispositivo; la diferencia en peso es lo que ganó de retención de fluido el suelo. Finalmente se aplica la fórmula 3.4 para obtener el coeficiente de permeabilidad media.

Resultados experimentales.

4.1 Introducción.

La presentación de resultados se realiza en forma individual para cada suelo y al final de la sección se presenta en conjunto; también se aplica el método del Cuerpo de Ingenieros (U.S. Army) a algunos de ellos y la comparación respectiva.

4.2 Resultados de las pruebas “*in situ*”.

En cada sitio se probaron los ocho líquidos mencionados en el capítulo 2; en el nuevo Aeropuerto Intercontinental de Querétaro se utilizaron cuatro líquidos.

Cabe recordar que las pruebas “*in situ*” presentan tres velocidades diferentes, que son:

1. Velocidad de Humedecimiento (V_h).
2. Velocidad de Saturación (V_s).
3. Velocidad de Transporte (V_t).

4.2.1 Colonia Álamos.

En el sitio de la Colonia Álamos se realizaron ocho pruebas “*in situ*”; el lugar corresponde a un suelo tipo ML (limo de baja plasticidad). Las velocidades obtenidas en cada etapa de las pruebas “*in situ*” se presentan en la figura 4.1.

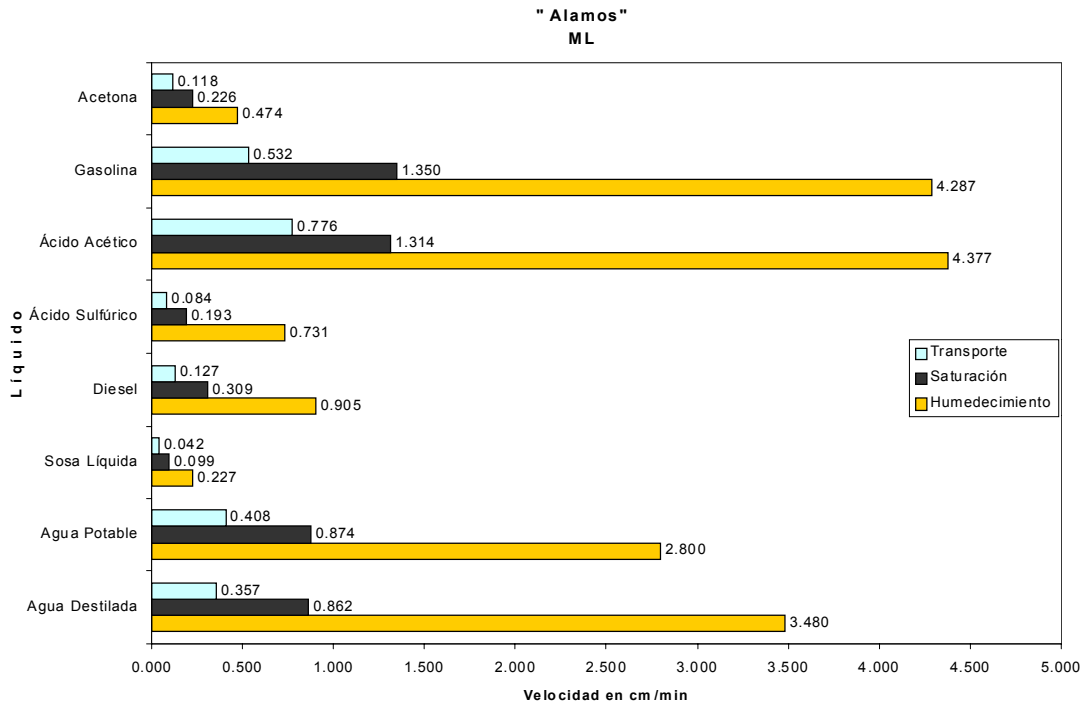


Figura 4.1 Resultados de pruebas de permeabilidad en Los Álamos.

Velocidad de Humedecimiento (V_h). Las velocidades de humedecimiento obtenidas de cada sustancia en orden descendente son: Ácido Acético $V_h = 4.377$ cm/min, Gasolina $V_h = 4.287$ cm/min; Agua Destilada $V_h = 3.48$ cm/min, Agua Potable $V_h = 2.8$ cm/min, Diesel $V_h = 0.905$ cm/min, Ácido Sulfúrico $V_h = 0.731$ cm/min, Acetona $V_h = 0.118$ cm/min y Sosa Líquida $V_h = 0.227$ cm/min.

Velocidad de Saturación (V_s). Las velocidades de saturación obtenidas de cada sustancia en orden descendente son: Gasolina $V_s = 1.35$ cm/min, Ácido Acético $V_s = 1.31$ cm/min, Agua Potable $V_s = 0.874$ cm/min, Agua Destilada $V_s = 0.862$ cm/min, Diesel $V_s = 0.309$ cm/min, Acetona $V_s = 0.226$ cm/min, Ácido Sulfúrico $V_s = 0.193$ cm/min y Sosa Líquida $V_s = 0.099$ cm/min.

Velocidad de Transporte (V_t). Las velocidades de transporte obtenidas de cada sustancia en orden descendente son: Ácido Acético $V_t = 0.776$ cm/min, Gasolina $V_t = 0.532$ cm/min, Agua Potable $V_t = 0.408$ cm/min, Agua Destilada $V_t = 0.357$ cm/min, Diesel $V_t = 0.127$ cm/min, Acetona $V_t = 0.226$ cm/min, Ácido Sulfúrico $V_t = 0.084$ cm/min y Sosa Líquida $V_t = 0.042$ cm/min.

4.2.2 Los Olivos.

Los Olivos corresponde a un suelo tipo MH (Limo de alta plasticidad), colapsable, que subyace a una capa de arcilla negra. Se realizaron ocho pruebas “*in situ*”. Las velocidades obtenidas en cada etapa de las pruebas se presentan en la figura 4.2.

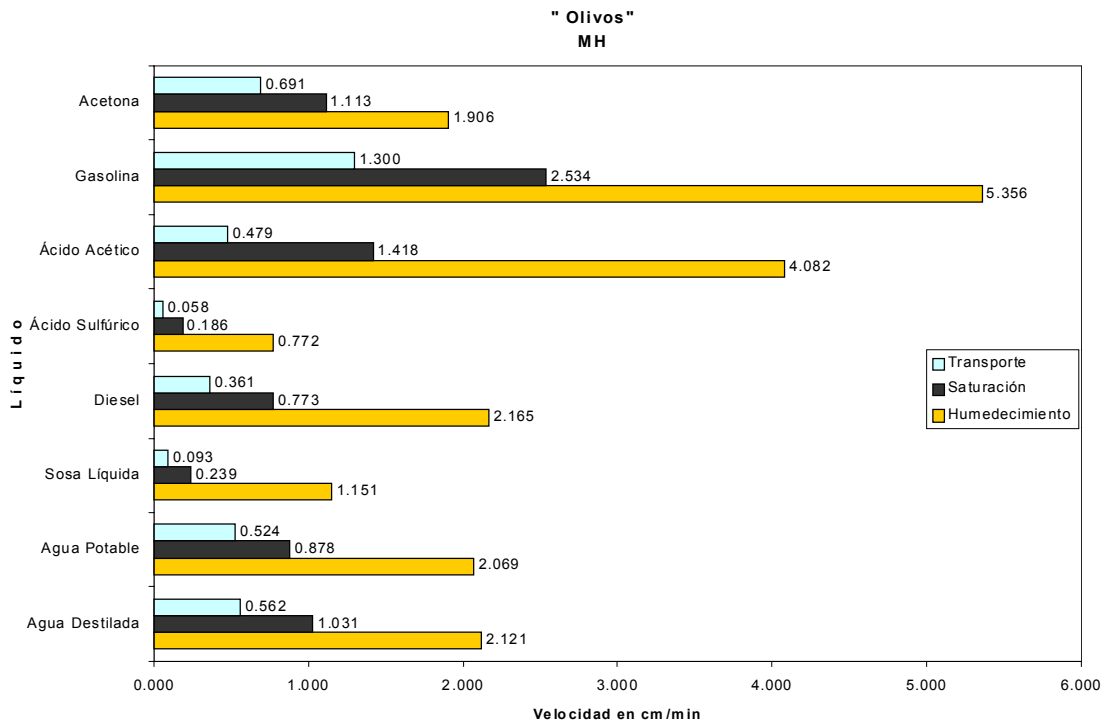


Figura 4.2 Resultados de pruebas de permeabilidad en Los Olivos.

Velocidad de Humedecimiento (V_h). Las velocidades de humedecimiento obtenidas de cada sustancia en orden descendente son: Gasolina $V_h = 5.356$ cm/min, Ácido Acético $V_h = 4.082$ cm/min, Diesel $V_h = 2.165$ cm/min, Agua Potable $V_h = 2.121$ cm/min, Agua Destilada $V_h = 2.069$ cm/min, Acetona $V_h = 1.906$ cm/min, Sosa Líquida $V_h = 1.151$ cm/min y Ácido Sulfúrico $V_h = 0.772$ cm/min.

Velocidad de Saturación (V_s). Las velocidades de saturación obtenidas de cada sustancia en orden descendente son: Gasolina $V_s = 2.534$ cm/min, Ácido Acético $V_s = 1.418$ cm/min, Acetona $V_s = 1.113$ cm/min, Agua Destilada $V_s = 1.031$ cm/min, Agua Potable $V_s = 0.878$ cm/min, Diesel $V_s = 0.773$ cm/min, Sosa Líquida $V_s = 0.239$ cm/min y Ácido Sulfúrico $V_s = 0.186$ cm/min.

Velocidad de Transporte (V_t). Las velocidades de transporte obtenidas de cada sustancia en orden descendente son: Gasolina $V_t = 1.3$ cm/min, Acetona $V_t = 0.691$ cm/min, Agua Destilada $V_t = 0.562$ cm/min, Agua Potable $V_t = 0.524$ cm/min, Ácido Acético $V_t = 0.479$ cm/min, Diesel $V_t = 0.361$ cm/min, Sosa Líquida $V_t = 0.093$ cm/min y Ácido Sulfúrico $V_t = 0.058$ cm/min.

4.2.3 Banco de material Cuesta China.

Este lugar corresponde a un suelo tipo ML (Limo de baja plasticidad) donde realizaron ocho pruebas “*in situ*”. Las velocidades obtenidas en cada etapa de las pruebas se presentan en la figura 4.3.

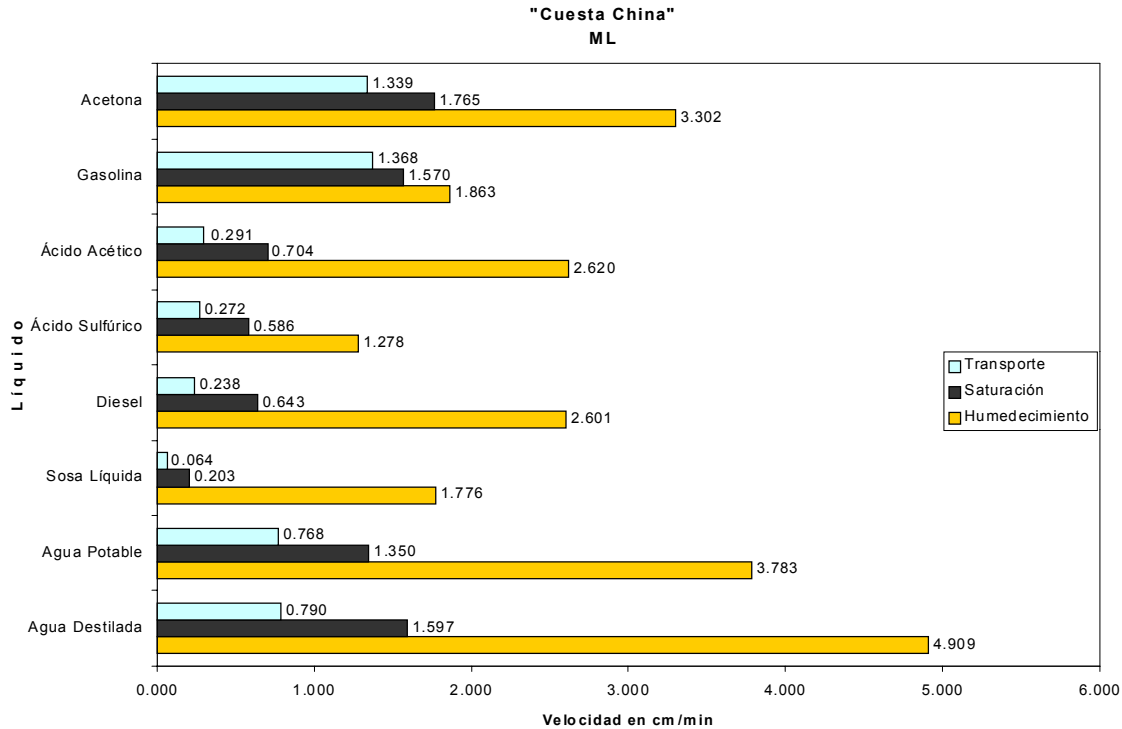


Figura 4.3 Permeabilidad en el banco de material Cuesta China.

Velocidad de Humedecimiento (V_h). Las velocidades de humedecimiento obtenidas de cada sustancia en orden descendente son: Agua Destilada $V_h = 4.909$ cm/min, Agua Potable $V_h = 3.783$ cm/min, Acetona $V_h = 3.302$ cm/min, Ácido Acético $V_h = 2.620$ cm/min, Diesel $V_h = 2.601$ cm/min, Gasolina $V_h = 1.863$ cm/min, Sosa Líquida $V_h = 1.776$ cm/min y Ácido Sulfúrico $V_h = 1.278$ cm/min.

Velocidad de Saturación (V_s). Las velocidades de saturación obtenidas de cada sustancia en orden descendente son: Acetona $V_s = 1.765$ cm/min, Agua Destilada $V_s = 1.597$ cm/min, Gasolina $V_s = 1.570$ cm/min, Agua Potable $V_s = 1.350$ cm/min, Ácido Acético $V_s = 0.704$ cm/min, Diesel $V_s = 0.643$ cm/min, Ácido Sulfúrico $V_s = 0.586$ cm/min y Sosa Líquida $V_s = 0.203$ cm/min.

Velocidad de Transporte (V_t). Las velocidades de transporte obtenidas de cada sustancia en orden descendente son: Gasolina $V_t = 1.368$ cm/min, Acetona $V_t = 1.339$ cm/min, Agua Destilada $V_t = 0.790$ cm/min, Agua Potable $V_t = 0.768$ cm/min, Ácido Acético $V_t = 0.291$ cm/min, Ácido Sulfúrico $V_t = 0.272$ cm/min, Diesel $V_t = 0.238$ cm/min y Sosa Líquida $V_t = 0.064$ cm/min.

4.2.4 Banco de material Sanfandila.

Sanfandila corresponde a un suelo tipo ML (limo de baja plasticidad) donde se realizaron siete pruebas "in situ". Las velocidades obtenidas en cada etapa de las pruebas se presentan en la figura 4.4.

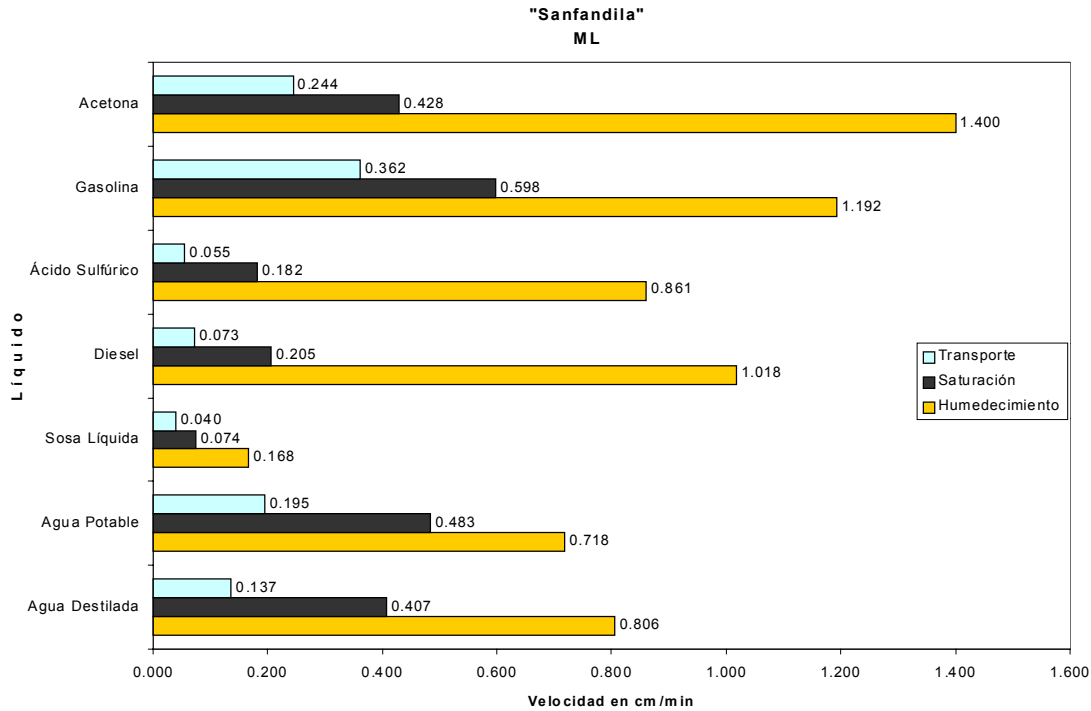


Figura 4.4 Resultados de las permeabilidades Banco Sanfandila.

Velocidad de Humedecimiento (V_h). Las velocidades de humedecimiento obtenidas de cada sustancia en orden descendente son: Acetona $V_h = 1.40$ cm/min, Gasolina $V_h = 1.192$ cm/min, Diesel $V_h = 1.018$ cm/min, Ácido Sulfúrico $V_h = 0.861$ cm/min, Agua Destilada $V_h = 0.806$ cm/min, Agua Potable $V_h = 0.718$ cm/min y Sosa Líquida $V_h = 0.168$ cm/min.

Velocidad de Saturación (V_s). Las velocidades de saturación obtenidas de cada sustancia en orden descendente son: Gasolina $V_s = 0.598$ cm/min, Agua Potable $V_s = 0.483$ cm/min, Acetona $V_s = 0.428$ cm/min, Agua Destilada $V_s = 0.407$ cm/min, Diesel $V_s = 0.205$ cm/min, Ácido Sulfúrico $V_s = 0.182$ cm/min y la Sosa Líquida $V_s = 0.074$ cm/min.

Velocidad de Transporte (V_t). Las velocidades de transporte obtenidas de cada sustancia en orden descendente son: Gasolina $V_t = 0.362$ cm/min, Acetona $V_t = 0.244$ cm/min, Agua Potable $V_t = 0.195$ cm/min, Agua Destilada $V_t = 0.137$ cm/min, Diesel $V_t = 0.073$ cm/min, Ácido Sulfúrico $V_t = 0.055$ cm/min y Sosa Líquida $V_t = 0.040$ cm/min.

4.2.5 Colonia Arboledas del Parque.

Arboledas corresponde a un suelo tipo ML (Limo de baja plasticidad) donde se realizaron ocho pruebas "in situ". Las velocidades obtenidas en cada etapa de las pruebas se presentan en la figura 4.5.

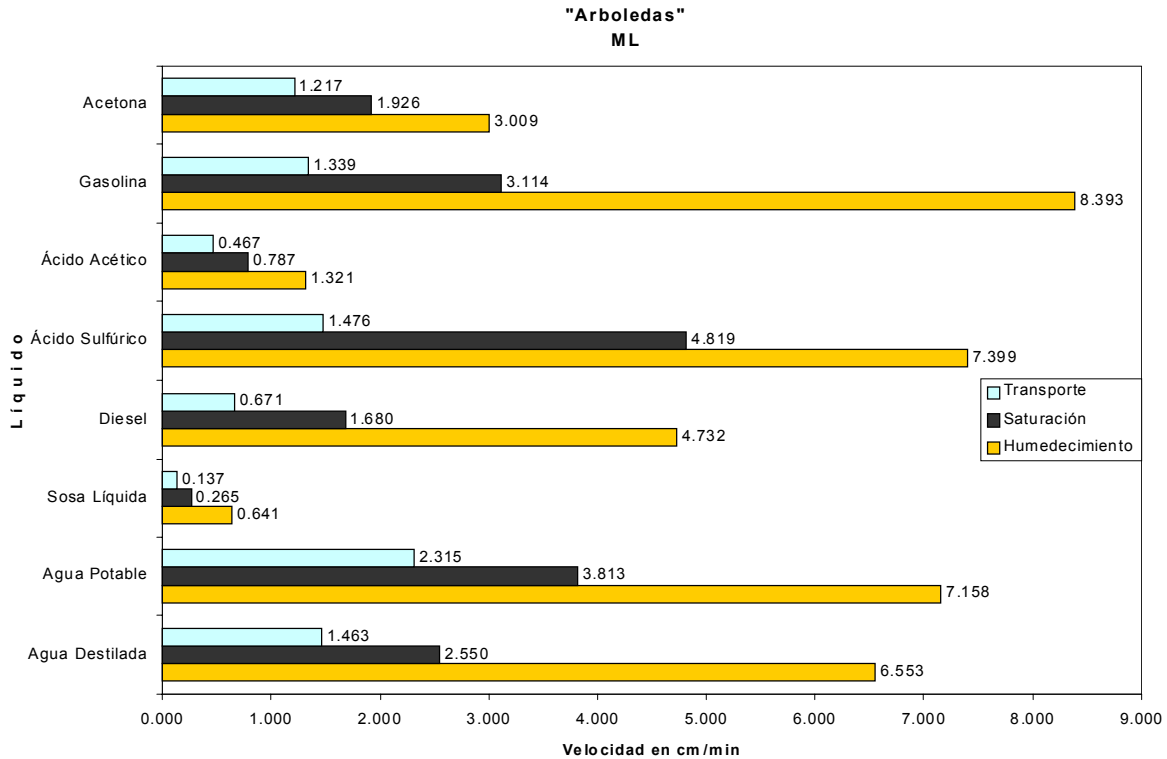


Figura 4.5 Permeabilidades en la Colonia Arboledas del Parque.

Velocidad de Humedecimiento (V_h). Las velocidades de humedecimiento obtenidas de cada sustancia en orden descendente son: Gasolina $V_h = 8.393$ cm/min, Ácido Sulfúrico $V_h = 7.399$ cm/min, Agua Potable $V_h = 7.158$ cm/min, Agua Destilada $V_h = 6.553$ cm/min, Diesel $V_h = 4.732$ cm/min, Acetona $V_h = 3.009$ cm/min, Ácido Acético $V_h = 1.321$ cm/min y Sosa Líquida $V_h = 0.641$ cm/min.

Velocidad de Saturación (V_s). Las velocidades de saturación obtenidas de cada sustancia en orden descendente son: Ácido Sulfúrico $V_s = 4.819$ cm/min, Agua Potable $V_s = 3.813$ cm/min, Gasolina $V_s = 3.114$ cm/min, Agua Destilada $V_s = 2.550$ cm/min, Acetona $V_s = 1.926$ cm/min, Diesel $V_s = 1.68$ cm/min, Ácido Acético $V_s = 0.787$ cm/min y Sosa Líquida $V_s = 0.265$ cm/min.

Velocidad de Transporte (V_t). Las velocidades de transporte obtenidas de cada sustancia en orden descendente son: Agua Potable $V_t = 2.315$ cm/min, Agua Destilada $V_t = 1.463$ cm/min, Ácido Sulfúrico $V_t = 1.463$ cm/min, Gasolina $V_t = 1.339$ cm/min, Acetona $V_t = 1.127$ cm/min, Diesel $V_t = 0.671$ cm/min, Ácido Acético $V_t = 0.467$ cm/min y Sosa Líquida $V_t = 0.137$ cm/min.

4.2.6 Aeropuerto Intercontinental de Querétaro.

La zona estudiada en el Aeropuerto corresponde a un suelo tipo MH (Limo de alta plasticidad), donde se realizaron 4 pruebas "in situ". En esta zona del Aeropuerto se manejan combustibles para las aeronaves, por tal razón fue necesario estudiar la permeabilidad del suelo bajo la acción de Gasolina, Ácido Acético, Acetona y Agua Destilada. Las velocidades obtenidas en cada etapa de las pruebas se presentan en la figura 4.2.

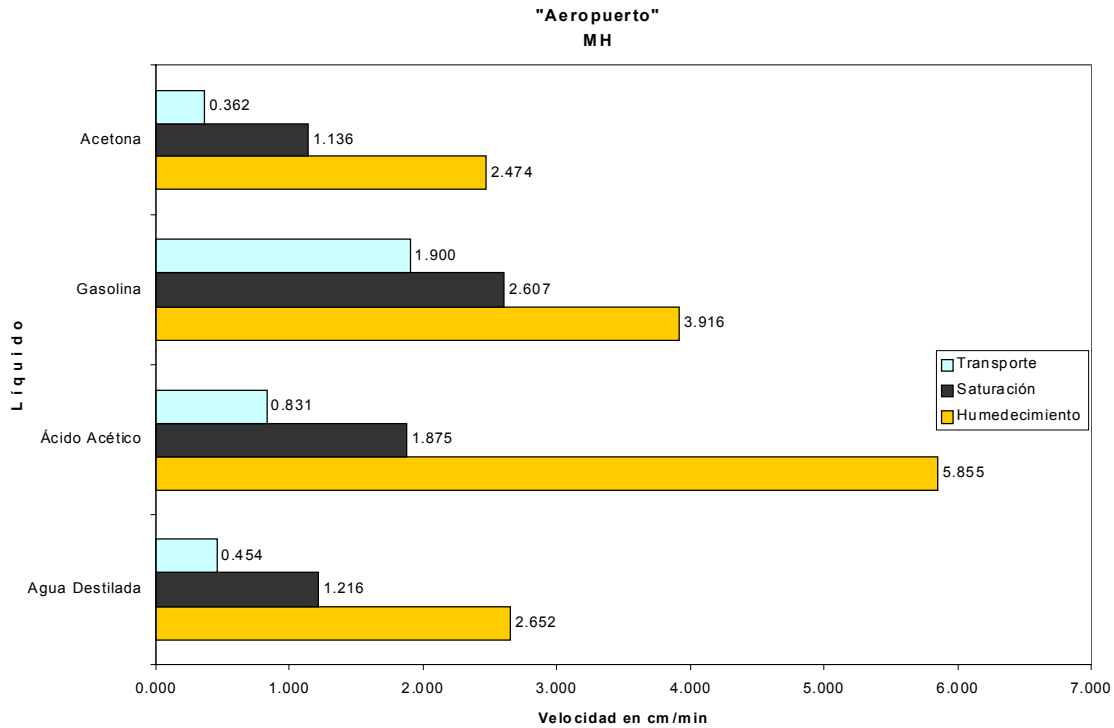


Figura 4.6 Resultados de la permeabilidad en el Aeropuerto Intercontinental de Querétaro.

Velocidad de Humedecimiento (V_h). Las velocidades de humedecimiento obtenidas de cada sustancia en orden descendente son: Ácido Acético $V_h = 5.855$ cm/min, Gasolina $V_h = 4.085$ cm/min, Agua Destilada $V_h = 2.652$ cm/min, y Acetona $V_h = 2.486$ cm/min.

Velocidad de Saturación (V_s). Las velocidades de saturación obtenidas de cada sustancia en orden descendente son: Gasolina $V_s = 2.596$ cm/min, Ácido Acético $V_s = 1.875$ cm/min, Agua Destilada $V_s = 1.216$ cm/min y Acetona $V_s = 1.134$ cm/min.

Velocidad de Transporte (V_t). Las velocidades de transporte obtenidas de cada sustancia en orden descendente son: Gasolina $V_t = 1.825$ cm/min, Ácido Acético $V_t = 0.831$ cm/min, Agua Destilada $V_t = 0.454$ cm/min y Sosa Líquida $V_t = 0.358$ cm/min.

4.2.7 Resumen general de resultados de campo.

La tabla 4.1 muestra el resumen de las velocidades obtenidas mediante el análisis de las graficas de abatimiento, se muestran las tres velocidades en unidades de cm/min.

Tabla 4.1 Velocidades de Humedecimiento (Vh), Saturación (Vs) y Transporte (Vt); en cm/min

LIQUIDO	LOS ALAMOS			LOS OLIVOS			CUESTA CHINA			SAN FANDILA			ARBOLEDAS			AEROPUERTO		
	H	S	T	H	S	T	H	S	T	H	S	T	H	S	T	H	S	T
Agua Destilada	3.480	0.862	0.357	2.121	1.031	0.562	4.909	1.597	0.790	0.806	0.407	0.137	6.553	2.550	1.463	2.652	1.216	0.454
Agua Potable	2.800	0.874	0.408	2.069	0.878	0.524	3.783	1.350	0.768	0.718	0.483	0.195	7.158	3.813	2.315			
Sosa Líquida	0.227	0.099	0.042	1.151	0.239	0.093	1.776	0.203	0.064	0.168	0.074	0.040	0.641	0.265	0.137			
Diesel	0.905	0.309	0.127	2.165	0.773	0.361	2.601	0.643	0.238	1.018	0.205	0.073	4.732	1.680	0.671			
Ácido Sulfúrico	0.731	0.193	0.084	0.772	0.186	0.058	1.278	0.586	0.272	0.861	0.182	0.055	7.399	4.819	1.476			
Ácido Acético	4.377	1.314	0.776	4.082	1.418	0.479	2.620	0.704	0.291				1.321	0.787	0.467	5.855	1.875	0.831
Gasolina	4.287	1.350	0.532	5.356	2.534	1.300	1.863	1.570	1.368	1.192	0.598	0.362	8.393	3.114	1.339	4.085	2.596	1.825
Acetona	0.474	0.226	0.118	1.906	1.113	0.691	3.302	1.765	1.339	1.400	0.428	0.244	3.009	1.926	1.217	2.486	1.134	0.358

4.2.8 Comparación de resultados.

La tabla 4.2 muestra los resultados obtenidos por el análisis de la gráfica de abatimientos de campo y los valores de la permeabilidad calculados por el método del Cuerpo de Ingenieros de US. Army, esta sección es importante por que muestra la similitud de los valores obtenidos por ambos métodos.

Tabla 4.2 Valores de permeabilidad media k_m , calculados por el método propuesto (k_{mo}) y el del Cuerpo de Ingenieros (k_{mc})

LIQUIDO	LOS ALAMOS		LOS OLIVOS		CUESTA CHINA		SAN FANDILA		ARBOLEDAS		AEROPUERTO	
	Kmp	Kmc	Kmp	Kmc	Kmp	Kmc	Kmp	Kmc	Kmp	Kmc	Kmp	Kmc
Agua Destilada	0.387	0.357	0.204	0.562	1.233	0.790	0.217	0.137	1.398	1.463	0.651	0.454
Agua Potable	0.624	0.408	0.461	0.524	1.633	0.768	0.146	0.195	1.873	2.315		
Sosa Líquida	0.046	0.042	0.277	0.093	0.141	0.064	0.089	0.040	0.122	0.137		
Diesel	0.129	0.127	0.294	0.361	0.271	0.238	0.122	0.073	0.705	0.671		
Ácido Sulfúrico	0.125	0.084	0.104	0.058	0.313	0.272	0.147	0.055	0.811	1.476		
Ácido Acético	0.731	0.776	0.962	0.479	1.002	0.291			0.325	0.467	0.770	0.831
Gasolina	0.877	0.532	0.715	1.300	1.256	1.368	0.355	0.362	1.001	1.339	1.838	1.825
Acetona	0.172	0.118	0.670	0.691	1.002	1.339	0.256	0.244	0.703	1.217	0.496	0.358

4.3 Funcionamiento del permeámetro.

El equipo funciona muy bien para cualquier tipo de suelo, en los suelos limo-arenosos se debe de rellenar con cera el espacio entre la pared y la muestra, para evitar las fugas e interpretaciones erróneas; cuando el suelo es arcilloso, las pruebas resultan muy largas, pudiéndose perder fluido por evaporación, sobre todo cuando se trata de gasolina, diesel, ácido acético y agua.

Los valores de la permeabilidad vertical (k_v) resultaron distintos para un mismo suelo según el tipo de líquido usado.

La tabla 4.3 muestra la variación de los valores en la permeabilidad vertical " k_v " de los diferentes líquidos. Se observa que el valor más bajo fue para el Ácido Acético y el más alto fue para el Agua. La figura 4.7 muestra la comparación de los valores obtenidos.

Tabla 4.3 Resultados de la pruebas de permeabilidad en el laboratorio (Arboledas del Parque)

Líquido	k_v cm/s
AGUA	0.0003659
DIESEL	0.0001261
GASOLINA	0.0002574
ÁCIDO ACÉTICO	0.0000902

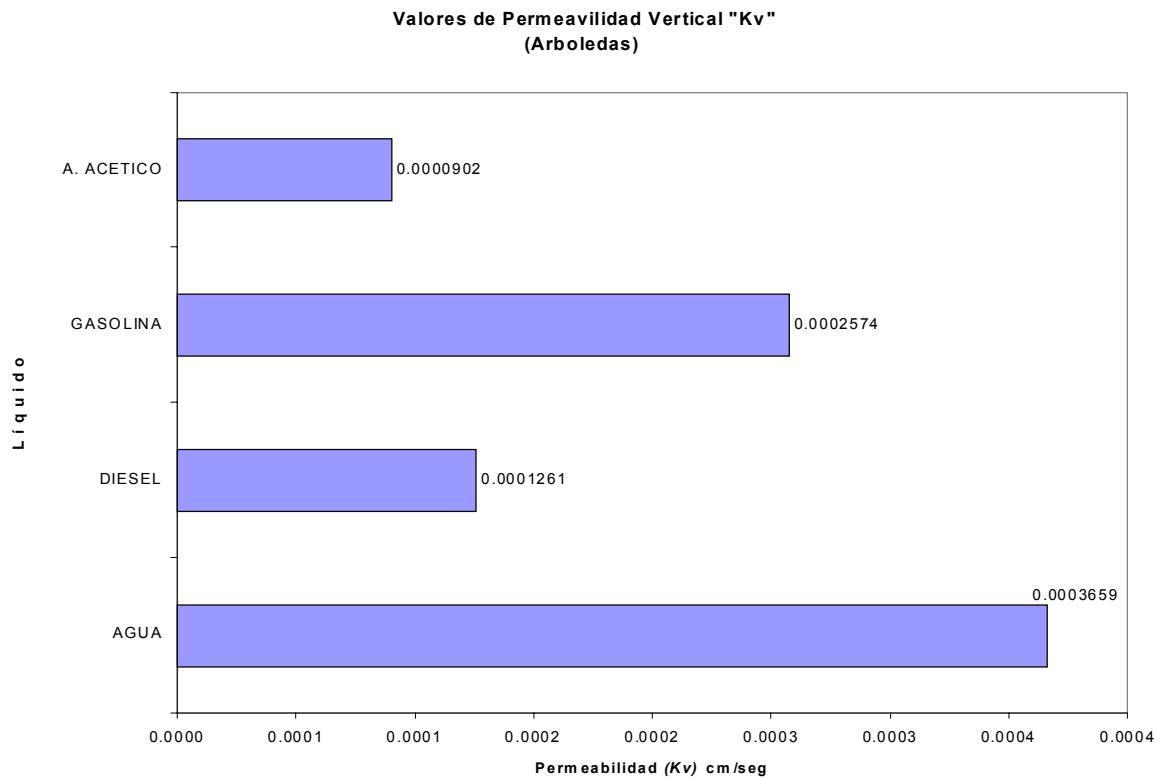


Figura 4.7 Comparación de resultados de la pruebas de permeabilidad en laboratorio (Arboledas del Parque)

La tabla 4.4 muestra la variación de los valores en la permeabilidad vertical " k_v " de los diferentes líquidos. Se observa que el valor más bajo fue para el Ácido Acético y el más alto fue para la gasolina. La figura 4.8 muestra la comparación de los valores obtenidos.

Tabla 4.4 Resultados de la pruebas de permeabilidad en el laboratorio (Cuesta China)

Líquido	k_v
	cm/s
AGUA	0.0001839
DIESEL	0.0000610
GASOLINA	0.0003151
ACIDO ACETICO	0.0000750

**Valores de Permeabilidad Vertical "Kv"
(Cuesta China)**

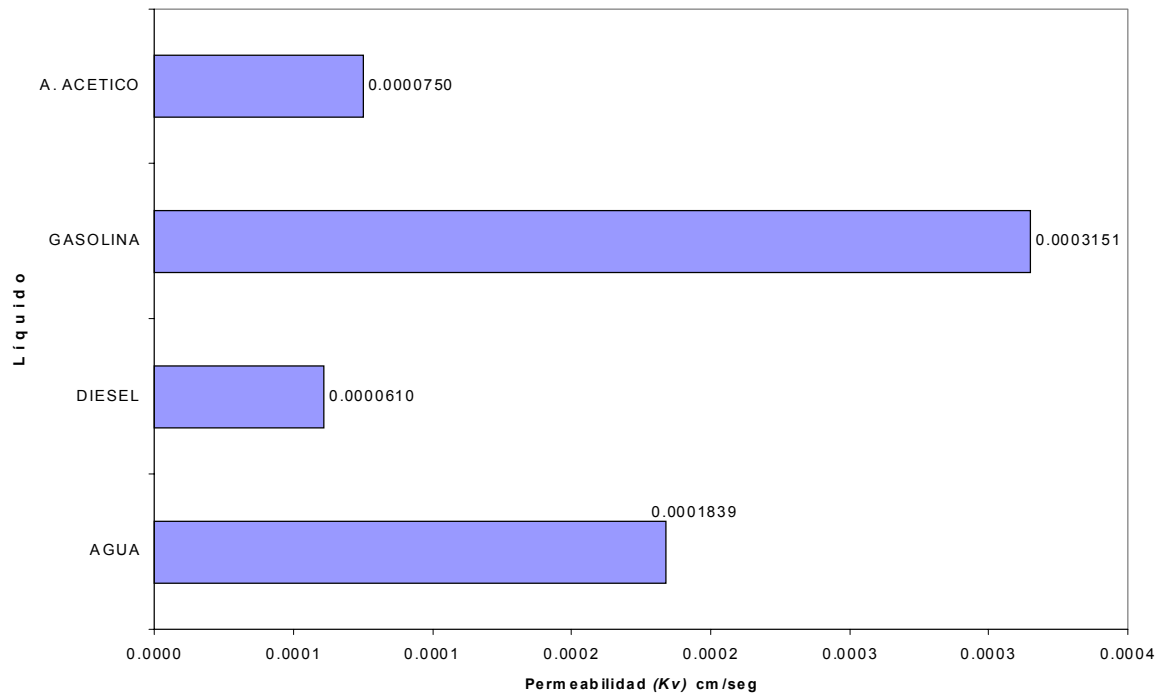


Figura 4.8 Comparación de los resultados de la pruebas de permeabilidad en laboratorio (Cuesta China)

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones.

1. Para poder conocer la permeabilidad de diversos suelos a sustancias, fueron seleccionados los suelos del Valle y Zona Metropolitana de Querétaro, que están bien conocidos en cuanto a su granulometría, propiedades índice y clasificación.
2. Caracterizar desde el punto de vista hidráulico los suelos de una región, permite estimar el tiempo de tránsito de diversas sustancias hacia el subsuelo y acuífero.
3. Las permeabilidades que los suelos ofrecen a diversas sustancias son indicativos de las dimensiones que puede alcanzar un derrame en regiones donde hay tráfico considerable de autotanques.
4. Los tiempos de tránsito deducidos de la permeabilidad marcan que tan rápido las autoridades de Protección Civil deben de atender un evento antes de que las sustancias puedan alcanzar el acuífero.
5. Los tiempos deducidos de estas pruebas también indican cuándo debe abrirse el tráfico, ya sea en terracerías o carreteras.
6. Pese a que los cuerpos de agua superficiales son los más vulnerables; de acuerdo a la permeabilidad de los suelos los acuíferos someros y profundos se vuelven susceptibles de manera directa.
7. La permeabilidad de los suelos varía de acuerdo a la naturaleza del mismo, su granulometría, ambiente de depósito, humedad volumétrica, succión, y de acuerdo al tipo de fluido.
8. La dispersión de los datos de campo en las gráficas elaboradas, se asocia al medio anisotrópico y heterogéneo; esto ayudó a establecer nuevas hipótesis de trabajo e interpretar los datos de campo levantados.

9. Mediante la interpretación de las pruebas de campo y de laboratorio se establece que independiente al tipo de fluido y de suelo, existen tres velocidades de flujo en un medio:
 - Humedecimiento.
 - Saturación.
 - Transporte.
10. El permeámetro diseñado es de bajo costo y puede ser utilizado en cualquier área para conocer las velocidades antes mencionadas.
11. La metodología propuesta para el campo es de fácil acción y reproducción, por lo que constituye otra forma económica y rápida de caracterizar desde el punto de vista hidráulico un suelo.
12. La “capilaridad” constituye otro factor para el flujo en un medio poroso, tanto vertical como horizontalmente, por lo que el permeámetro se puede modificar para realizar las pruebas horizontales de capilaridad.
13. La viscosidad y el peso específico no son las únicas características del fluido que influyen en la permeabilidad de los suelos finos, como lo indican las ecuaciones teóricas existentes, las fuerzas eléctricas que se generan en el contacto fluido-suelo forman un papel determinante en su facilidad o incapacidad de transporte en el suelo.
14. De lo observado, la gasolina presentó, en la mayoría de los casos, la velocidad de transporte mayor, y la sosa líquida la menor.

Recomendaciones.

- 1.** Para realizar la correcta caracterización de un suelo contaminado por un hidrocarburo, además de conocer sus propiedades índices se requiere hacer pruebas de permeabilidad que den luz sobre el comportamiento del contaminante en el suelo, esto será de gran ayuda para delimitar la zona afectada sobretodo a profundidades de difícil detección del contaminante.
- 2.** Es importante distinguir cuál es la utilidad que se le dará al valor de permeabilidad que se obtenga, de esto depende la elección del método adecuado para su determinación. Se recomienda utilizar el método propuesto en este trabajo de tesis para medir la permeabilidad del suelo en campo y en laboratorio se puede realizar con el permeámetro diseñado usando muestras inalteradas de suelo.
- 3.** Es necesario implementar para los Estados Unidos Mexicanos un sistema de administración de riesgos químicos basado en la velocidad de transporte o permeabilidad que permita dar respuesta inmediata a un evento y que se logre mitigar el daño ecológico.

Bibliografía

- **ALVAREZ MANILLA A. A. Y PÉREZ R. M DE LA L.**, 1995. “Caracterización Geotécnica del Valle y Zona Metropolitana de Querétaro”. Trabajo de investigación para la DEPMI de la UAQ.
- **ALVAREZ MANILLA A. A.**, 2000. “Modelo del mecanismo de agrietamiento en el valle y zona metropolitana de Querétaro”. Tesis de Maestría en Ciencias (Mecánica de Suelos) DEPMI de la Universidad Autónoma de Querétaro.
- **ALVAREZ MANILLA A. A. Y ZEPEDA GARRIDO J. A.**, 1996. “Los fenómenos de succión, difusión, dispersión y filtración a través de la prospección eléctrica”. II Congreso Internacional de Suelos No Saturados, DEPMI de la UAQ.
- AMERICAN STANDAR TESTING MATERIALS (2000). “**Annual book of ASTM Standards**”. 04.08.
- **BÁEZ ANDRADE F. J.** “Evaluación de la Pérdida de Resistencia en Concretos Asfálticos por Contacto de Sustancias Agresivas”. Tesis de Maestría, UACH. 2001.
- BAVER I. D., GARDNER W. H. y GARDNER W. R., 1972. “**Física de Suelos**”.UTEHA
- **CORPS OF ENGINEERS, U.S. ARMY.** “Waterways Experiment Station Vicksburg, Mississippi” April 1951. Boletín No. 36.
- **INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE (I.M.T.)**. “Génesis, Identificación y Uso de Suelos en México” Documento Técnico No. 19.
- **JUAREZ BADILLO, EULALIO Y RICO RODRÍGUEZ.** (1989). “Mecánica de Suelos, Tomo I” Fundamentos de la Mecánica de Suelos . Editorial Limusa, Noriega Editores. México
- **JUAREZ BADILLO, EULALIO Y RICO RODRÍGUEZ.** (1989). “Mecánica de Suelos, Tomo III” Flujo de Agua en Suelos. Editorial Limusa, Noriega Editores. México

- **LAMBE, WILLIAM J. AND WHITMAN, V. ROBERT.** (1994). “Mecánica de Suelos”. Editorial Limusa Noriega Editores.
- **NILE C. BRANDY.** (1990). “ The Nature and Properties of Soils”. MACMILLAN PUBLISHING COMPANY. Collier Macmillan Publishers. London.
- **RICO R. A. Y DEL CASTILLO, H.,** (1992), “La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres”. Vol. 1, Editorial Limusa, Noriega Editores. México.
- **SAVAL S.** “Remediación y Restauración”, en PEMEX: Ambiente y Energía. Los Retos del Futuro, coedición UNAM-Petróleos Mexicanos, México, 1995.
- **SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES,** (S.C.T.) 2000, Sistema Integral de Información de Autotransporte Federal. D.G.A.F. y Dptos. de Autotransporte Federal.
- **SOWERS GEORGE F.** (1994) “Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones”, Noriega Editores. México.

PÁGINAS WEB

- **INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO (IMP)** 2002, Dirección en Internet www.imp.gob.mx
- **PETRÓLEOS MEXICANOS (PEMEX)** 2002, Dirección en Internet www.pemex.gob.mx
- **SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES,** (S.C.T.) 2002, Dirección en Internet www.sct.gob.mx
- **SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES.** (SEMARNAT), 2002, Dirección en Internet www.semarnat.gob.mx

**CIUDAD DE MEXICO**

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730, México, D. F.
Tel. (55) 56 15 35 75
55 98 52 18
Fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

Km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro.
Tel. (442) 2 16 97 77
2 16 96 46
Fax (442) 2 16 96 71

Internet: <http://www.imt.mx>
publicaciones@imt.mx