



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Determinación experimental de las
propiedades térmicas del suelo del
ex Lago de Texcoco**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Civil

P R E S E N T A

Diana Margarita Portillo Arreguín

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Norma Patricia López Acosta



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mi mamá, quien le debo todo lo que soy
A Diego, el mejor regalo que la vida me ha dado
A mi abuela, por su enorme corazón
A Roberto, por ser mi papá

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por la beca otorgada durante la realización de esta tesis, y por el apoyo para la utilización de sus Laboratorios de Mecánica de Suelos y de Vías Terrestres para la ejecución de las principales pruebas de esta investigación.

A la Dra. Norma Patricia López Acosta por darme la oportunidad de estar en el Instituto de Ingeniería y por la confianza que tuvo en mí para la realización de este proyecto.

Al Instituto de Geología de la UNAM, particularmente a sus Laboratorios de *Difracción de Rayos X* y de *Física de Suelos*, por la realización de algunos ensayos especiales en muestras de suelos arcillosos del ex Lago de Texcoco.

A la empresa de ingeniería PILOTEC, y en particular al M. en I. Walter I. Paniagua Zavala por su valioso apoyo para la medición *in-situ* de propiedades térmicas en perforaciones profundas en el subsuelo de Santa Fe, Ciudad de México.

Al M. en I. David F. Barba Galdámez por su apoyo, entusiasmo e infinita paciencia brindados durante el desarrollo de este proyecto.

A los sinodales M. en I. Agustín Deméneghi Colina, M. en I. Nikte N. Ocampo Guerrero y M. en I. Rodrigo T. Sepúlveda Hirose por el tiempo invertido en la revisión de este trabajo.

A los compañeros y amigos que conocí en el Instituto de Ingeniería y la Facultad de Ingeniería, y a todas las personas de las que recibí ayuda de manera desinteresada.

ÍNDICE

ÍNDICE	i
RESUMEN.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
NOTACIÓN.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	3
1.1. Transferencia de calor	3
1.1.1. Conducción.....	3
1.1.2. Convección.....	3
1.1.3. Radiación	3
1.2. Propiedades térmicas del suelo	4
1.2.1. Conductividad térmica	4
1.2.2. Difusividad térmica	4
1.2.3. Capacidad calorífica	4
1.3. Conducción de calor en suelos	5
1.3.1. Ecuación de Fourier.....	5
1.3.2. Analogía de la conducción de calor con el flujo de agua en suelos.....	6
1.3.3. Conducción de calor en estado transitorio	7
1.3.4. Aplicaciones	8
1.4. Factores influyentes en las propiedades térmicas del suelo.....	11
1.4.1. Contenido de agua	11
1.4.2. Estructura	11
1.4.3. Composición.....	12
1.5. Métodos de obtención de las propiedades térmicas del suelo	13
1.5.1. Métodos en condiciones establecidas.....	13
1.5.2. Métodos en condiciones transitorias	16
1.6. Modelos predictivos	19
1.6.1. Límites de Weiner (1912).....	19
1.6.2. Modelo de Johansen (1975)	20
1.6.3. Modelo de Maxwell (1873).....	20

1.6.4.	Modelo de Tarnawski <i>et al.</i> (2000).....	20
1.6.5.	Modelo de De Vries (1963).....	23
2.	ZONA DE ESTUDIO.....	25
2.1.	Localización.....	25
2.2.	Geología.....	25
2.3.	Hidrología.....	26
2.3.1.	Calidad del agua.....	27
2.4.	Estratigrafía.....	27
3.	DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DEL SUELO DEL EX LAGO DE TEXCOCO.....	29
3.1.	Consideraciones generales.....	29
3.2.	Teoría del método de la aguja.....	29
3.3.	Localización y características de las muestras analizadas.....	30
3.4.	Determinación de las propiedades índice.....	31
3.5.	Mineralogía.....	33
3.6.	Contenido de materia orgánica.....	34
3.6.1.	Método de ignición.....	34
3.6.2.	Método de Walkley y Black.....	35
3.7.	Determinación experimental de propiedades térmicas del suelo del sitio.....	36
3.7.1.	Descripción del equipo <i>KD2 Pro</i>	36
3.7.2.	Calibración del equipo.....	37
3.7.3.	Desarrollo de la prueba.....	38
3.7.4.	Métodos de interpretación.....	41
4.	RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.....	49
4.1.	Propiedades índice del suelo.....	49
4.2.	Mineralogía.....	51
4.3.	Materia orgánica.....	52
4.4.	Propiedades térmicas.....	54
4.5.	Relación entre las propiedades índice y térmicas.....	56
4.6.	Comparación de sensores de aguja simple y doble.....	57
4.7.	Análisis de los modelos predictivos aplicados.....	58
4.8.	Comparación de métodos de interpretación.....	59
4.8.1.	Análisis Simplificado.....	59
4.8.2.	Método de Bristow <i>et al.</i> (1994).....	59
5.	CONCLUSIONES.....	61

REFERENCIAS	63
ANEXOS.....	69
A. Descripción de las muestras ensayadas	69
B. Difractogramas obtenidos mediante el método de DRX para análisis mineralógico de las muestras.....	73
C. Determinación experimental <i>in-situ</i> de propiedades térmicas en el suelo de Santa Fe	79

RESUMEN

Las propiedades térmicas del suelo son fundamentales en el diseño de proyectos de ingeniería que consideran la transferencia de calor, tales como las estructuras termoactivas, el aislamiento de sistemas de cableado subterráneos, el almacenamiento de desechos sólidos y radioactivos, y el congelamiento artificial de suelo como sistema temporal de estabilidad. A pesar de que obtener la conductividad térmica es algo complejo, en la actualidad existen diferentes métodos, tanto en laboratorio como en campo o *in-situ*, para su determinación. Estas pruebas no se efectúan regularmente en México, por lo que existe una falta de información general de las propiedades térmicas de los suelos locales.

En el presente trabajo se determinaron experimentalmente las propiedades térmicas del suelo del ex Lago de Texcoco por medio del método transitorio de la aguja en 40 muestras inalteradas, con ayuda del equipo *KD2 Pro*. A partir de estos ensayos se caracterizó el comportamiento térmico de las formaciones arcillosas del sitio. Los resultados de las pruebas demuestran que estos suelos tienen baja conductividad térmica.

Con base en los datos experimentales se obtuvo la relación entre las propiedades térmicas y las propiedades índice, así mismo, se determinó la influencia de estas propiedades en el comportamiento térmico del suelo. De lo anterior, se estableció que las muestras con mayor densidad y baja relación de vacíos presentaron alta conductividad térmica. Además, se hizo una comparación entre la conductividad térmica obtenida con el sensor de aguja simple y el sensor de aguja doble. Se demostró que, para suelos arcillosos saturados, la aguja doble tiene tendencias a la subestimación. En adición, los datos obtenidos a partir de la caracterización de las muestras fueron ajustados a algunos modelos predictivos para la determinación de la conductividad térmica. Aquéllos que mostraron un mejor ajuste para el suelo analizado fueron los modelos de Johansen (1975) y de De Vries (1963). Por último, se hizo una comparación entre el método de interpretación que utiliza el equipo *KD2 Pro* para la aguja simple y el Análisis Simplificado propuesto por la ASTM D5334-14 (2014). Para la aguja doble, se comparó el método de Levenberg-Marquardt que utiliza el equipo *KD2 Pro* con el Método de Bristow *et al.* (1994). Ambos métodos de interpretación mostraron resultados consistentes.

ABSTRACT

Thermal properties of soils are of great importance in the design of engineering projects that consider heat transfer, such as thermo-active ground structures, isolation of underground cable systems, solid and radioactive waste storage, and artificial ground freezing for temporary stability systems. Although it is complex to determine thermal conductivity, nowadays it is possible through several laboratory and field or *in-situ* methods. These tests are not regularly carried out in Mexico, therefore, there is a general lack of information of thermal properties of local soils.

In the present work, the thermal properties of the soil of the former Texcoco Lake were determined experimentally by performing the transient method of thermal needle probe test in 40 undisturbed soil samples. With this, thermal behavior of the clay formations of the site is characterized. The results show that these soils have a low thermal conductivity.

From the experimental data, the relation between the thermal and index properties was obtained. Likewise, the influence of these properties on the thermal behavior of the soil was determined. From the foregoing, it is established that samples with high density and a low void ratio presented high thermal conductivity. In addition, a comparison of the thermal conductivity obtained with the single needle and the dual-needle sensors was made. It was shown that, for saturated clay soils, the dual needle probe underestimates the thermal conductivity. Further, the data obtained from the characterization of the samples are adjusted to several predictive models for the determination of thermal conductivity. Those that showed a better fit for the analyzed soil were Johansen (1975) and De Vries (1963) models. Finally, a comparison was made between the interpretation method used by *KD2 Pro* equipment for the single needle sensor and the simplified analysis proposed by ASTM D5334-14 (2014). For the dual-needle sensor, a comparison was held between the *KD2 Pro* equipment method, using Levenberg-Marquardt algorithm, and Bristow *et al.* (1994). Both interpretation methods showed consistent results.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Conducción en las distintas fases de un suelo (Alrtimi <i>et al.</i> , 2016).	3
Figura 1.2. Flujo de calor a través de una sección de suelo (Farouki, 1981).	5
Figura 1.3. Ley de Darcy (Mitchell y Soga, 2005).	6
Figura 1.4. Ley de Fourier (Mitchell y Soga, 2005).	6
Figura 1.5. Conservación de la energía.	7
Figura 1.6. Comportamiento de las estructuras termoactivas en verano e invierno (adaptado de Abuel-Naga <i>et al.</i> , 2015).	9
Figura 1.7. Sistema de cableado subterráneo (Odisha Sun Times, 2016).	9
Figura 1.8. Almacenamiento de desechos radioactivos (Northern Hoot, 2015).	10
Figura 1.9. Congelamiento del suelo como técnica de soporte temporal (Ground Freezing, 2010).	10
Figura 1.10. Transferencia de calor a través de una isla (Philip y De Vries, 1957).	11
Figura 1.11. Diagrama del equipo del método de la placa caliente con guarda (Stepanic <i>et al.</i> , 2018).	14
Figura 1.12. Diagrama de la celda térmica (Clarke <i>et al.</i> , 2008).	15
Figura 1.13. Diagrama de TRT (Banks, 2012).	16
Figura 1.14. Diagrama de la aguja simple (ASTM D5334-14, 2014).	17
Figura 1.15. Diagrama de prueba de la aguja simple.	17
Figura 1.16. Diagrama de la aguja doble (ASTM D5334-14, 2014).	18
Figura 1.17. Diagrama de prueba de la aguja doble.	18
Figura 1.18. Diagrama de sensor de TPS (British Standards Institution, 2012).	18
Figura 1.19. Modelos de flujo de calor: a) en serie, b) en paralelo.	19
Figura 1.20. Representación del modelo de Maxwell: dispersión de partículas esféricas dentro de una matriz (adaptado de Pietrak y Wiśniewski, 2015).	20
Figura 1.21. Partícula cúbica de suelo seco o saturado (Tarnawski <i>et al.</i> , 2000).	21
Figura 1.22. Partícula cúbica de suelo no saturado con bajo contenido de agua (Tarnawski <i>et al.</i> , 2000).	21
Figura 1.23. Partícula cúbica de suelo no saturado con alto contenido de agua (Tarnawski <i>et al.</i> , 2000): a) Las dimensiones de los puentes de agua son menores a la partícula sólida. b) Las dimensiones de los puentes de agua son mayores a la partícula sólida.	22
Figura 1.24. Variación de modelos predictivos de conductividad térmica con respecto a la porosidad del material.	24
Figura 2.1. Localización del Lago de Texcoco dentro de la Cuenca del Valle de México (adaptado de Ramos-Leal <i>et al.</i> , 2010).	25
Figura 2.2. Esquema hidráulico del Lago de Texcoco (CONAGUA, 2014).	27
Figura 3.1. Localización de sondeos utilizados para determinación de propiedades térmicas.	30
Figura 3.2. Perfil N-S de muestras seleccionadas para la determinación de propiedades térmicas del suelo del ex Lago de Texcoco.	31
Figura 3.3. Determinación de la densidad de sólidos.	32
Figura 3.4. Labrado de pastilla para determinación de relaciones gravimétricas y volumétricas.	32
Figura 3.5. Determinación de: a) Límite líquido usando la copa de Casagrande. b) Límite plástico.	32

Figura 3.6. Esquema de preparación de muestras para la identificación de minerales arcillosos por DRX (adaptado de Justo y Morillo, 1999).	34
Figura 3.7: Prueba de contenido de materia orgánica: a) Preparación de la muestra. b) Muestras calcinadas.	35
Figura 3.8. Obtención del contenido de materia orgánica mediante el método de Walkley y Black.	35
Figura 3.9. Equipo <i>KD2 Pro</i> .	36
Figura 3.10. Sensor de aguja simple TR-1.	37
Figura 3.11. Sensor de aguja doble SH-1.	37
Figura 3.12. a) Calibración de la aguja simple con silicón epóxico. b) Calibración de la aguja doble con bloque de Delrin.	38
Figura 3.13. Preparación de la muestra: a) Tubo de pared delgada, b) Corte, c) Extracción por medio de un gato hidráulico, d) Muestra inalterada.	39
Figura 3.14. Prueba de la aguja.	39
Figura 3.15. Forma típica de la gráfica temperatura contra tiempo de la prueba de aguja simple.	40
Figura 3.16. Etapas de una prueba típica de conductividad térmica durante la fase de calentamiento (ASTM D5334-14, 2014).	40
Figura 3.17. Forma típica de la gráfica de cambio de temperatura contra tiempo de la prueba de aguja doble.	41
Figura 3.18. Obtención de las pendientes: a) S_h para la fase de calentamiento. b) S_c para la fase de recuperación.	44
Figura 3.19. Gráfica típica de una prueba de propiedades térmicas empleando el sensor de aguja doble.	45
Figura 4.1. Perfil de propiedades índice del suelo del ex Lago de Texcoco.	50
Figura 4.2. Histogramas y curvas de distribución normal de propiedades índice del suelo del ex Lago de Texcoco.	51
Figura 4.3. Perfil de contenido de materia orgánica del suelo del ex Lago de Texcoco.	53
Figura 4.4. Histograma y curva de distribución normal del contenido de materia orgánica del suelo del ex Lago de Texcoco.	54
Figura 4.5. Perfil de propiedades térmicas del suelo del ex Lago de Texcoco en función de la profundidad.	55
Figura 4.6. Histograma y curva de distribución normal de las propiedades térmicas del suelo del ex Lago de Texcoco.	56
Figura 4.7. Relación entre la conductividad térmica y las propiedades índice del suelo.	56
Figura 4.8. Comparación de sensores para la determinación de conductividad térmica.	58
Figura 4.9. Comparación entre la conductividad térmica obtenida experimentalmente y los modelos predictivos utilizados.	58
Figura 4.10. Comparación de las conductividades térmicas obtenidas experimentalmente y con el método de Análisis Simplificado de la ASTM D5334-14 (2014).	59
Figura 4.11. Comparación de las propiedades térmicas obtenidas experimentalmente con la aguja doble y con el método <i>Single point</i> : a) Conductividad térmica. b) Capacidad calorífica volumétrica. c) Difusividad térmica.	60
Figura Anexo B.1. Difractograma correspondiente a la muestra SM-37 M17 obtenido del análisis de roca total.	73

Figura Anexo B.2. Difractograma correspondiente a la muestra SM-14bis M4 obtenido del análisis de roca total.	73
Figura Anexo B.3. Difractograma correspondiente a la muestra TBH-356 M2bis obtenido del análisis de roca total.	74
Figura Anexo B.4. Difractograma correspondiente a la muestra TBH-417 M7 obtenido del análisis de roca total.	74
Figura Anexo B.5. Difractograma correspondiente a la muestra SM-47 M4 obtenido del análisis de roca total.	75
Figura Anexo B.6. Difractograma correspondiente a la muestra SM-37 M17 obtenido del análisis de la fracción de arcilla.	75
Figura Anexo B.7. Difractograma correspondiente a la muestra SM-14bis M4 obtenido del análisis de la fracción de arcilla.	76
Figura Anexo B.8. Difractograma correspondiente a la muestra TBH-356 M2bis obtenido del análisis de la fracción de arcilla.	76
Figura Anexo B.9. Difractograma correspondiente a la muestra TBH-417 M7 obtenido del análisis de la fracción de arcilla.	77
Figura Anexo B.10. Difractograma correspondiente a la muestra SM-47 M4 obtenido del análisis de la fracción de arcilla.	77
Figura Anexo C.1. Determinación experimental <i>in-situ</i> de propiedades térmicas en el suelo de Santa Fe: a) Excavación. b) Medidas de seguridad. c) Medición con el equipo de la aguja térmica.	79
Figura Anexo C.2. Perfil de las propiedades térmicas del suelo de Santa Fe.	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Propiedades térmicas de algunos tipos de suelos y rocas (adaptado de Rawlings y Sykulski, 1999).....	5
Tabla 1.2. Conductividad térmica de algunos minerales (adaptado de Abuel-Naga <i>et al.</i> , 2015; Horai, 1971; Kodešová, 2013; Zafor <i>et al.</i> , 2015).	12
Tabla 1.3. Resumen de modelos predictivos para suelos saturados.	24
Tabla 2.1. Características mineralógicas reportadas de la fracción arcillosa de la Cuenca de México (adaptado de Carreón-Freyre <i>et al.</i> , 2006).....	26
Tabla 2.2: Análisis químicos de las aguas extraídas del Lago de Texcoco (Hiriart y Marsal, 1969).	27
Tabla 2.3. Valores medios de propiedades índice en el suelo del ex Lago de Texcoco. ..	28
Tabla 3.1. Coordenadas de los sondeos utilizados para la determinación de las propiedades térmicas del suelo del ex Lago de Texcoco.....	31
Tabla 3.2. Descripción de muestras utilizadas para el estudio mineralógico.	33
Tabla 4.1. Estadística descriptiva de las propiedades índice del suelo del ex Lago de Texcoco.	49
Tabla 4.2. Resultados del análisis mineralógico del suelo del ex Lago de Texcoco.	52
Tabla 4.3. Contenidos de materia orgánica del suelo del ex Lago de Texcoco.	53
Tabla 4.4. Comparación de contenidos de materia orgánica obtenidos mediante distintos métodos.....	54
Tabla 4.5. Estadística descriptiva de las propiedades térmicas del suelo del ex Lago de Texcoco.	55
Tabla Anexo A.1. Propiedades índice y relaciones gravimétricas y volumétricas de las muestras ensayadas.....	69
Tabla Anexo A.2. Propiedades térmicas medidas y obtenidas de las muestras ensayadas.	71
Tabla Anexo C.1. Estadística descriptiva de las propiedades térmicas del suelo de Santa Fe.	80

NOTACIÓN

$\nabla^2 T$	Vector gradiente de temperatura
A	Área de una sección transversal
b_0	Tasa de variación constante de temperatura ambiente para el método de ajuste del equipo <i>KD2 Pro</i>
$b_{1,2}$	Constantes de ajuste del método de ajuste del equipo <i>KD2 Pro</i>
BCG	Bomba de calor geotérmico
B_m	Volumen de sulfato ferroso para valorar la muestra
B_r	Volumen de sulfato ferroso usado para valorar el blanco de reactivos
C	Factor de calibración
c_{ce}	Capacidad calorífica específica
c_{cv}	Capacidad calorífica volumétrica
CV	Coeficiente de variación
D	Difusividad térmica
DRX	Difracción de Rayos X
dv	Volumen diferencial
e	Relación de vacíos
Ei	Función integral exponencial
F	Factor de orientación de poros y partículas sólidas de De Vries
g	Factor de forma (De Vries)
G_s	Densidad de sólidos
i_h	Gradiente hidráulico
IP	Índice plástico
i_t	Gradiente térmico
J_i	Cantidad de flujo
k	Conductividad hidráulica
L_i	Coeficiente de conductividad
m	Media
m_2	Tasa de variación constante de temperatura ambiente
m_3	Pendiente de incremento de temperatura con respecto al logaritmo de temperatura
MAE	Error medio absoluto
mcf	Factor de corrección de humedad
ME	Error medio
MO	Contenido de materia orgánica
$MTPS$	Transitorio de fuente plana modificado
n	Porosidad
N	Número de datos
N_1	Normalidad del sulfato ferroso
p	Peso de la muestra seca
Q	Tasa de transferencia de calor por unidad de longitud
q	Suministro de calor

\dot{q}	Transferencia de calor por unidad de tiempo
q_h	Flujo hidráulico
q_t	Flujo térmico
q_x	Calor suministrado en dirección del eje x
q_y	Calor suministrado en dirección del eje y
q_z	Calor suministrado en dirección del eje z
r	Distancia radial desde la fuente de calor
$RMSE$	Raíz del error cuadrático medio
s	Desviación estándar
S	Pendiente
S_c	Pendiente en la fase de recuperación
S_h	Pendiente en la fase de calentamiento
S_r	Grado de saturación
$SUCS$	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
T	Temperatura
t	Tiempo
T_0	Temperatura inicial
t_h	Tiempo en el que se deja de suministrar calor
t_m	Tiempo en el que ocurre el máximo cambio de temperatura
TPS	Transitorio de fuente plana
V_s	Volumen de sólidos
V_w	Volumen de agua
w	Contenido de agua
X	Longitud
x	Fracción de volumen
X_i	Fuerza motriz
β	Factor de corrección para suelos secos de Tarnawski <i>et al.</i>
γ	Constante de Euler
γ_f	Condición del modelo de Tarnawski <i>et al.</i>
δ	Factor del modelo de Tarnawski <i>et al.</i>
ΔH	Cambio de carga hidráulica
ΔT	Cambio de temperatura
ΔT_m	Máximo cambio de temperatura
θ_w	Contenido volumétrico de agua
λ	Conductividad térmica
λ_e	Conductividad térmica experimental
λ_m	Conductividad térmica modelada
λ_t	Conductividad térmica teórica
ρ	Densidad

Subíndices

a	Aire
w	Agua
s	Partículas sólidas

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las propiedades térmicas del suelo es fundamental en el diseño y análisis de proyectos de ingeniería en los que se induce un flujo de calor a través de él. Al ser un sistema heterogéneo y polifásico, la transferencia de calor en los suelos implica múltiples procesos, entre los que destacan los mecanismos de conducción, convección y radiación. La importancia de cada uno de éstos depende directamente de las fracciones de sólidos, agua y aire que existan en el suelo, así como del tamaño de las partículas sólidas (Alrtimi *et al.*, 2016). En suelos saturados, el mecanismo de transferencia dominante es la conducción.

De acuerdo con Rees *et al.* (2000), en la mayoría de los casos prácticos, la capacidad calorífica específica puede estimarse con suficiente aproximación a partir de métodos empíricos que consideran las fracciones volumétricas de los diferentes componentes del suelo. En cambio, la determinación de la conductividad térmica representa mayor dificultad. Esta propiedad es función de varios parámetros como la densidad, la mineralogía, la temperatura, el contenido de agua y la estructura del suelo (IEEE Power and Energy Society, 2017). La medición de la conductividad térmica en suelos y rocas puede efectuarse con pruebas de laboratorio o *in-situ*.

Las pruebas para determinación de propiedades térmicas no se efectúan regularmente en México, por lo que existe una falta de información general de los parámetros de los suelos locales. El objetivo general de esta tesis es llevar a cabo una determinación experimental de las propiedades térmicas de los suelos arcillosos del ex Lago de Texcoco mediante el método transitorio de la aguja.

Los objetivos específicos de esta tesis abarcan, en primer lugar, implementar el método de la aguja para obtener los parámetros térmicos del suelo del ex Lago de Texcoco y así, realizar la caracterización térmica de la Formación Arcillosa Superior (FAS) del sitio. En segundo lugar, establecer la relación entre las propiedades índice y térmicas del suelo analizado. En tercer lugar, comparar las mediciones de la conductividad térmica efectuadas con los sensores de aguja simple y aguja doble. Posteriormente, aplicar varios modelos existentes para predecir la conductividad térmica del suelo, así como realizar el ajuste de los datos a una curva de distribución normal. Por último, interpretar los resultados de la prueba de la aguja con varios métodos y comparar el ajuste con el método que utiliza el equipo.

La caracterización térmica de la FAS consiste en llevar a cabo la prueba del método de la aguja en 32 muestras arcillosas de suelo con los sensores de aguja doble y de aguja simple. Posteriormente, se repite el procedimiento para 8 muestras de un perfil que abarca la FAS y parte de la FAI. Cada muestra es caracterizada mediante la obtención de sus propiedades índice y la determinación del contenido de materia orgánica. Por último, se realiza el análisis mineralógico únicamente de cinco muestras representativas del subsuelo del sitio.

La presente tesis se estructura en cinco capítulos. En el primer capítulo se abordan los fundamentos teóricos de las propiedades térmicas. Al respecto, se describen los mecanismos de transferencia de calor en suelos, haciendo énfasis en la conducción, las principales propiedades térmicas y los factores influyentes del suelo en el comportamiento térmico. En seguida, se discuten las aplicaciones de las propiedades térmicas en la ingeniería. Posteriormente, se exponen algunos métodos experimentales de obtención de

los parámetros térmicos y sus ventajas y desventajas. Finalmente, se describen distintos modelos predictivos de obtención de las principales propiedades térmicas.

En el segundo capítulo se presenta una revisión bibliográfica sobre el suelo del ex Lago de Texcoco. Se describe la localización, geología, hidrología y estratigrafía de la zona. Asimismo, se presentan valores de propiedades índice y de composición del suelo que han sido reportados por varios autores.

En el tercer capítulo se describe el procedimiento implementado para la determinación de las propiedades térmicas del suelo. Con ello, se describen las muestras analizadas y su localización dentro del sitio. En seguida, se mencionan las pruebas efectuadas para caracterización del material; determinación de propiedades índice, límites líquidos y plásticos, el análisis mineralógico y el contenido de materia orgánica. Posteriormente, se aborda el procedimiento de laboratorio para la obtención de las propiedades térmicas del suelo por medio del método de la aguja (simple y doble), incluyendo la descripción del equipo utilizado y la calibración del mismo. Finalmente se explican los métodos de interpretación de datos utilizados en esta investigación para la obtención de las propiedades térmicas.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados de las pruebas experimentales y la interpretación de ellos. Se inicia mostrando los valores obtenidos de las propiedades índice, la mineralogía y el contenido de materia orgánica a través de estadística descriptiva. Los resultados se comparan con aquéllos reportados por otros autores. Posteriormente, se presentan los parámetros térmicos del suelo determinados en laboratorio. En seguida, se lleva a cabo un análisis de los mismos con relación a la profundidad del terreno y a las propiedades índice de cada muestra. Se muestran los histogramas de las propiedades índice y térmicas, así como el ajuste de los datos a distribuciones normales. Después, se hace una comparación de los valores de conductividad térmica obtenidos con los sensores de aguja simple y doble. A continuación, se analiza el comportamiento de los modelos predictivos, descritos en el capítulo uno, para el caso del suelo del ex Lago de Texcoco. Finalmente, se comparan los métodos de interpretación de datos descritos en el capítulo tres.

En el último capítulo se presentan las conclusiones generales de la tesis.

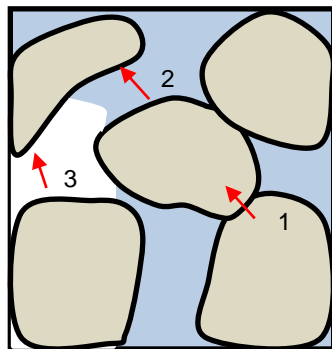
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. Transferencia de calor

La transferencia de calor es el proceso mediante el cual existe un intercambio de energía entre distintos cuerpos, o entre distintas zonas de un mismo cuerpo que presentan un gradiente de temperatura. El flujo va de donde la temperatura es más alta a donde es más baja. La transferencia de calor involucra múltiples procesos, entre los que destacan conducción, convección y radiación. Debido a la naturaleza heterogénea y polifásica de los suelos, la importancia de cada mecanismo depende directamente de las fracciones de sólidos, agua o aire que existen en él, así como del tamaño de sus partículas (Alrtimi *et al.*, 2016).

1.1.1. Conducción

La conducción de calor se presenta en todos los elementos que constituyen un suelo; en partículas sólidas, en el agua en sus distintos estados y en el aire. La transferencia de calor ocurre mediante el contacto directo entre los elementos, sin intercambio de materia. El calor fluye desde el elemento con mayor temperatura al elemento con menor temperatura (Farouki, 1981). En suelos saturados, la conducción es el mecanismo dominante de transferencia de calor.



1. Conducción entre partículas sólidas
2. Conducción por líquido
3. Conducción por aire

Figura 1.1. Conducción en las distintas fases de un suelo (Alrtimi *et al.*, 2016).

1.1.2. Convección

La convección es un mecanismo de transferencia de calor fundamental en fluidos, por lo que sólo reviste importancia en suelos altamente permeables con presencia de velocidades de flujo de agua mayores o iguales a $1 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$ (Loveridge, 2012). Ocurre cuando el movimiento del agua es causado por un gradiente de temperatura, originando diferencias en la densidad. El fluido transporta el calor creando un patrón de flujo, que también facilita la transferencia por conducción (Farouki, 1981).

1.1.3. Radiación

La radiación que influencia al suelo proviene de dos fuentes, tanto del interior de la Tierra como del Sol. Es emitida por toda aquella materia que no tiene una temperatura de cero absoluto y no requiere un medio, por lo que puede transportarse a través del vacío (Farouki,

1981). En suelos, la radiación suele despreciarse, ya que representa menos del 1% del calor total transferido (Jumikis, 1977).

1.2. Propiedades térmicas del suelo

1.2.1. Conductividad térmica

Se define como la cantidad de calor que pasa por una sección transversal en determinado tiempo, bajo un gradiente de temperatura aplicado en la dirección del flujo de calor; lo anterior implica una condición de estabilidad en la que la temperatura en cierto punto no varía a lo largo del tiempo (Farouki, 1981). Los valores de conductividad térmica para suelos dependen en gran magnitud de su composición y del contenido de agua, y pueden ser muy variables incluso entre muestras del mismo material. En el SI, las unidades de la conductividad térmica son *Watt sobre metro por Kelvin* ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$), aunque también es posible utilizar grados Celsius sin ningún factor de conversión, debido a que ambas unidades tienen la misma escala.

$$\frac{W}{m \cdot K} = \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$$

Asimismo, la resistividad térmica se define como el recíproco de la conductividad térmica (λ^{-1}) y está directamente asociada con la estructura del suelo y su contenido de agua.

1.2.2. Difusividad térmica

La difusividad térmica es el índice de facilidad con la que un material acepta un cambio de temperatura, expresado en SI como $m^2\ s^{-1}$ o $mm^2\ s^{-1}$. Valores altos de difusividad térmica implican una gran capacidad para altos y rápidos cambios en la temperatura.

1.2.3. Capacidad calorífica

La capacidad calorífica describe la habilidad de un material para almacenar calor. Puede expresarse por unidad de masa ($J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$) como capacidad calorífica específica c_{ce} , o por unidad de volumen ($J\ m^{-3}\ ^\circ C^{-1}$) como capacidad calorífica volumétrica c_{cv} . Ambas expresiones pueden relacionarse si se conoce el valor de la densidad ρ .

$$c_{cv} = \rho c_{ce} \tag{1.1}$$

En la Tabla 1.1 se muestran valores típicos de las propiedades térmicas de algunos tipos de suelos y rocas. La relación entre la conductividad térmica λ , la difusividad térmica D y la capacidad calorífica volumétrica c_{cv} es:

$$\lambda = D c_{cv} \tag{1.2}$$

Tabla 1.1. Propiedades térmicas de algunos tipos de suelos y rocas (adaptado de Rawlings y Sykulski, 1999).

Material	Conductividad térmica λ , (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	Capacidad calorífica específica c_{ce} , (kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹)	Densidad ρ , (g cm ⁻³)	Difusividad D , (mm ² s ⁻¹)
Granito	2.1 - 4.5	0.84	2.64	0.90 - 2.08
Caliza	1.4 - 5.2	0.88	2.48	0.65 - 2.31
Arenisca	1.4 - 5.2	0.71	2.24	0.86 - 3.24
Arcilla húmeda	1.4 - 1.7	1.3 - 1.7	-	0.53 - 0.65
Arcilla saturada	1.7 - 2.4	1.7 - 1.9	1.44 - 1.92	0.65 - 0.86
Arena húmeda	-	1.3 - 1.7	-	0.43 - 0.53
Arena saturada	2.1 - 2.6	1.7 - 1.9	1.44 - 1.92	0.75 - 0.97

1.3. Conducción de calor en suelos

1.3.1. Ecuación de Fourier

La expresión fundamental para la conducción de calor en suelos homogéneos e isótropos es dada por Fourier como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1.3)$$

donde T representa la temperatura del medio (°C). Cuando el flujo de calor alcanza un estado establecido, la temperatura en cada punto del cuerpo estudiado es constante (Figura 1.2). Por lo tanto, se afirma que la temperatura es una función de la posición X , mas no del tiempo. Bajo estas condiciones:

$$\dot{q} = \frac{dq}{dt} \quad (1.4)$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_1 - T_2}{X} \quad (1.5)$$

La ecuación general toma la forma:

$$\dot{q} = \lambda A \frac{T_1 - T_2}{X} \quad (1.6)$$

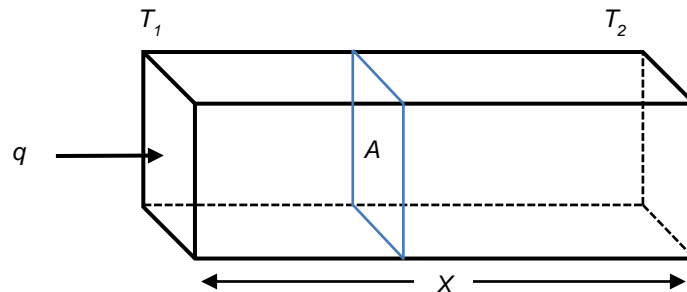


Figura 1.2. Flujo de calor a través de una sección de suelo (Farouki, 1981).

1.3.2. Analogía de la conducción de calor con el flujo de agua en suelos

Los flujos que pasan a través del suelo tienen un papel importante en los problemas geotécnicos generales. El flujo más estudiado en la ingeniería es el hidráulico, debido a la gran influencia que tiene en la filtración, la consolidación, la deformación y la estabilidad del suelo, siendo estos algunos de los principales problemas en el análisis y diseño de proyectos geotécnicos. No obstante, también existen otros tipos de flujo, como lo son químico, térmico y eléctrico (Mitchell y Soga, 2005). Todos estos flujos pueden ser modelados de una manera similar, ya que siguen un comportamiento descrito por la ecuación:

$$J_i = L_i X_i \quad (1.7)$$

donde J_i es cantidad de flujo, X_i la fuerza motriz que suele ser un gradiente y L_i el coeficiente de conductividad según sea el caso. Cuando la ecuación anterior se adecúa a un flujo específico, se escribe para un área de sección transversal A . El flujo de agua en suelos es expresado por la ley de Darcy como:

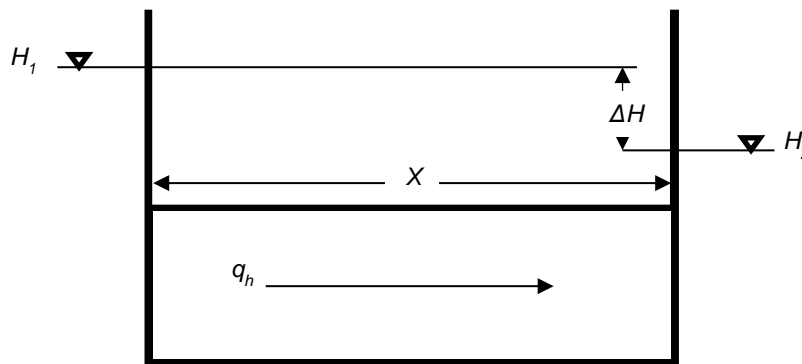


Figura 1.3. Ley de Darcy (Mitchell y Soga, 2005).

$$q_h = k \frac{\Delta H}{X} A$$

$$q_h = k i_h A \quad (1.8)$$

donde q_h es el flujo hidráulico; k es la conductividad hidráulica e i_h es el gradiente hidráulico. El flujo de calor, por otra parte, según la ley de Fourier es:

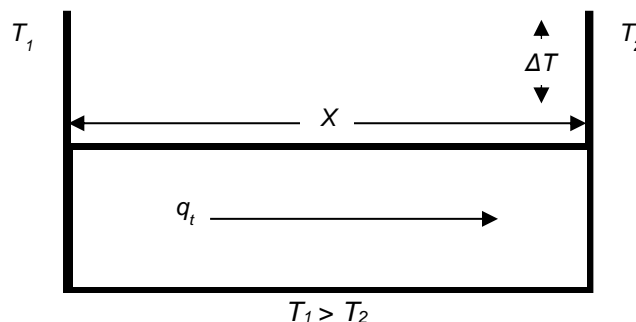


Figura 1.4. Ley de Fourier (Mitchell y Soga, 2005).

$$q_t = \lambda \frac{\Delta T}{X} A$$

$$q_t = \lambda i_t A \quad (1.9)$$

donde q_t es el flujo térmico; λ el coeficiente de conductividad térmica e i_t , el gradiente térmico.

Mientras haya una relación lineal entre el valor del flujo y un gradiente, serán matemáticamente similares y la Ec. (1.7) podrá utilizarse para cualquier tipo de flujo con sus respectivas condiciones de frontera tomadas en cuenta (Mitchell y Soga, 2005). La analogía representa una herramienta útil, pues es posible utilizar soluciones obtenidas en problemas de flujo de agua para el estudio de la transferencia de calor (Barba-Galdámez y López-Acosta, 2017).

1.3.3. Conducción de calor en estado transitorio

La ecuación de Fourier es aplicable a un volumen diferencial en el interior de un estrato de suelo. Se asume que se trata de un material uniforme, homogéneo e isótropo, así como, el flujo de calor es uniformemente distribuido por toda la sección transversal. La deducción se basa en la ecuación de la conservación de la energía (Jumikis, 1977).

$$\text{Energía que entra} - \text{Energía que sale} = \text{Energía almacenada} \quad (1.10)$$

donde la energía que entra se expresa como q en todas las caras positivas del elemento diferencial y, la que sale, es igual a la energía que entra más un diferencial de q que varía a lo largo de la dirección que sigue (Figura 1.5).

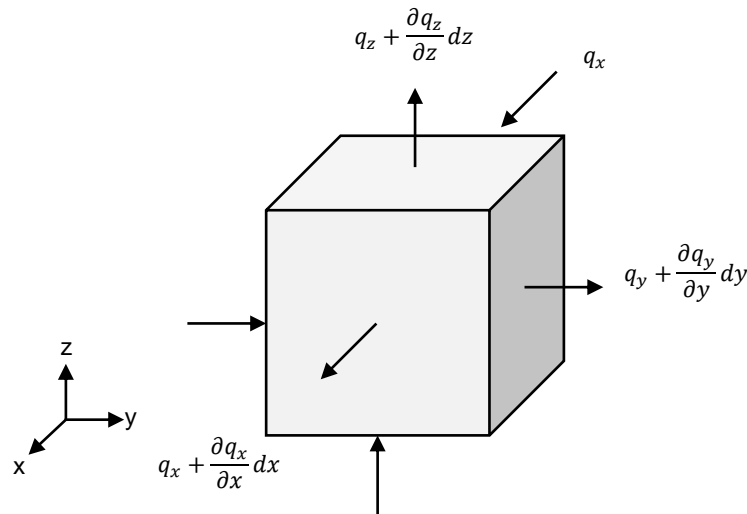


Figura 1.5. Conservación de la energía.

Si la temperatura varía ∂T con respecto al tiempo, el elemento recibe un incremento de calor dq :

$$dq = c_{cv} \frac{\partial T}{\partial t} dv \quad (1.11)$$

donde dv representa el volumen del cubo diferencial (m^3). La ecuación de la conservación de la energía queda expresada como:

$$q_x + q_y + q_z - \left[\left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) + \left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) + \left(q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) \right] = c_{cv} \frac{\partial T}{\partial t} dv \quad (1.12)$$

De acuerdo con la ley de Fourier, la cantidad de calor que fluye es:

$$dq = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} (dA) \quad (1.13)$$

El signo negativo indica que la temperatura disminuye mientras la distancia entre los puntos de interés aumenta. Se expresa como una derivada parcial debido a que se trata de un estado transitorio en el que la temperatura T no varía únicamente con la posición x , pero también con el tiempo t . Los tres flujos de calor en direcciones de los ejes x , y , z pasando a través de las áreas $dy \cdot dz$, $dx \cdot dz$ y $dx \cdot dy$ respectivamente son:

$$\begin{aligned} q_x &= -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} dy \cdot dz \\ q_y &= -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} dx \cdot dz \\ q_z &= -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} dx \cdot dy \end{aligned} \quad (1.14)$$

Sustituyendo las Ecs. (1.2) y (1.14), la expresión de transferencia de energía queda expresada como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \nabla^2 T \quad (1.15)$$

1.3.4. Aplicaciones

Estructuras termoactivas

Las estructuras termoactivas son una tecnología moderna para el aprovechamiento de la energía geotérmica. Se trata de una técnica en la que a elementos como túneles, losas, pilas o muros diafragma se les instala un sistema de acondicionamiento alimentado por la energía geotérmica del suelo en contacto con las mismas (Laloui y Di Donna, 2011). La iniciativa pretende satisfacer la demanda de energía favoreciendo al ambiente, pues además de utilizar energía renovable, las cimentaciones y otros elementos ya son necesarios por razones estructurales y no se necesita instalar elementos adicionales, lo que contribuye a la sustentabilidad del proyecto. El sistema funciona por medio de una Bomba de Calor Geotérmica (BCG), que es una máquina térmica que utiliza el gradiente de temperatura existente entre el suelo y el medio ambiente. En los meses más fríos, la BCG extrae el calor del suelo para calentar la edificación, mientras que, en los meses cálidos, el calor se inyecta al suelo para permitir que la estructura se enfríe (Figura 1.6).

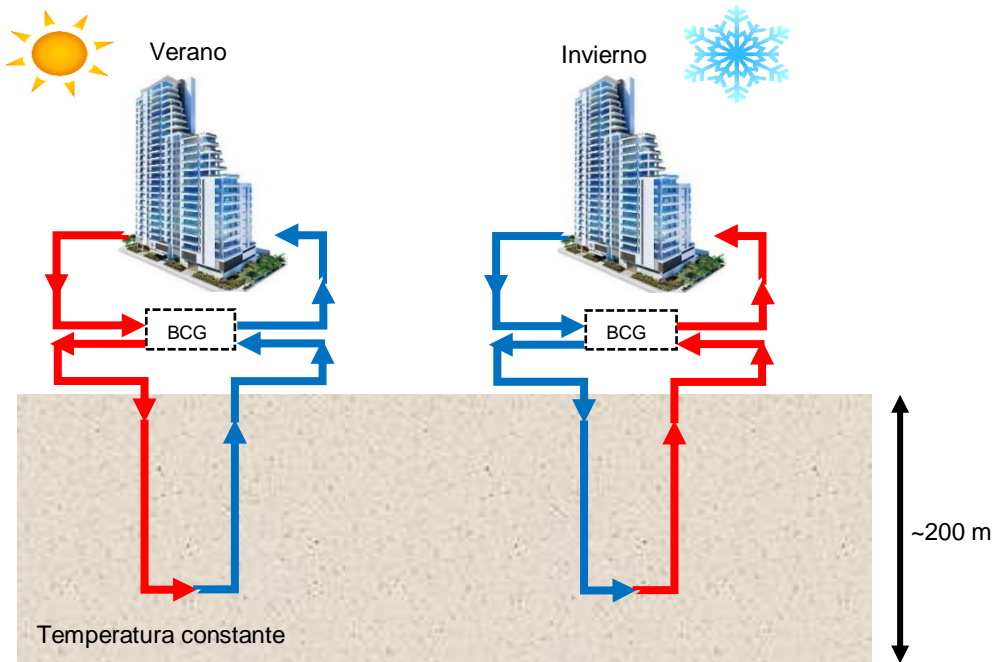


Figura 1.6. Comportamiento de las estructuras termoactivas en verano e invierno (adaptado de Abuel-Naga *et al.*, 2015).

Las estructuras termoactivas son elementos estructurales complejos debido a que para su análisis es necesario profundizar en el estudio de su comportamiento termo-mecánico. Lo anterior, involucra aspectos como la carga y los esfuerzos térmicos en el elemento estructural, la interacción suelo-estructura y las propiedades térmicas del suelo (Barba-Galdámez, 2018). La analogía de los flujos de calor y de agua proporcionan metodologías útiles para el estudio del flujo de calor-deformación de las estructuras termoactivas (Barba-Galdámez y López-Acosta, 2017).

Aislamiento de sistemas de cableado subterráneos

El funcionamiento de los sistemas de cableado subterráneos (Figura 1.7) debe diseñarse de tal forma que la temperatura del núcleo del cable no exceda la temperatura óptima de operación (Rerak y Ocloñ, 2017). El conocimiento del comportamiento térmico del suelo debe considerarse en el diseño de las redes, con el fin de evitar la fusión del aislante de los cables y el mal funcionamiento del sistema. Los sistemas subterráneos requieren de un medio que favorezca la disipación del calor, pudiendo ser el suelo de origen del sitio o materiales de relleno.



Figura 1.7. Sistema de cableado subterráneo (Odisha Sun Times, 2016).

Almacenamiento de desechos

Los rellenos sanitarios son uno de los métodos más utilizados para la disposición de residuos. A pesar de que no es la mejor solución, en los últimos años se ha desarrollado tecnología para producir energía a partir de los gases provenientes de los vertederos. Los rellenos sanitarios representan una fuente de energía térmica proveniente de procesos físicos, químicos y microbiológicos (Faitli *et al.*, 2015). La caracterización de propiedades térmicas es fundamental para el correcto diseño de los rellenos, ya que son parámetros necesarios para estimar el potencial de extracción de calor y para la planificación del control de procesos de descomposición.

De igual manera, las propiedades térmicas del suelo son necesarias para el diseño del almacenamiento de desechos radioactivos (Figura 1.8). El calor que éstos generan es una de las restricciones que existen en las normas y códigos para la disposición de residuos. Con los parámetros térmicos del suelo y el conocimiento sobre el tipo de desechos, es posible modelar las cargas térmicas para diseñar un correcto almacenamiento (Roglans-Ribas y Spinrad, 1989).



Figura 1.8. Almacenamiento de desechos radioactivos (Northern Hoot, 2015).

Sistemas de soporte artificial

Algunos proyectos de ingeniería necesitan de estabilidad adicional durante la etapa de construcción, antes de colocar las estructuras permanentes (Figura 1.9). En numerosas ocasiones, ha resultado conveniente congelar el suelo para obtener un soporte artificial durante un periodo corto (Farouki, 1981). El conocimiento de las propiedades térmicas del suelo es necesario para el diseño del sistema de soporte temporal.



Figura 1.9. Congelamiento del suelo como técnica de soporte temporal (Ground Freezing, 2010).

1.4. Factores influyentes en las propiedades térmicas del suelo

1.4.1. Contenido de agua

La influencia del contenido de agua sobre la conductividad térmica de un suelo puede describirse con la teoría de las islas de líquidos de Philip y De Vries (1957). En suelos no saturados, el agua se encuentra en *islas* separadas y aisladas entre ellas, ya sea dentro de poros o formando meniscos alrededor de las partículas sólidas. Lo anterior forma puentes entre ellas y, por lo tanto, facilita la transferencia de calor por conducción (Figura 1.10). Si se presenta un aumento de temperatura que favorezca a la evaporación del agua, se provoca migración de la misma y reducciones en los puentes de conexión entre partículas. Por consecuencia, hay un decremento en la conducción térmica (Sakaguchi *et al.*, 2007).

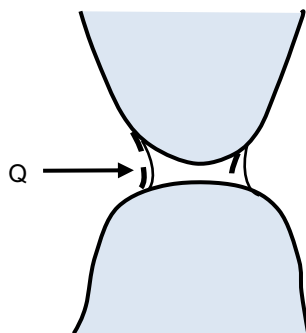


Figura 1.10. Transferencia de calor a través de una isla (Philip y De Vries, 1957).

Es importante resaltar que, en el caso de suelos no saturados, la presencia de agua favorece a la conductividad térmica debido a que existen más conexiones entre partículas sólidas, sin embargo, en suelos saturados no ocurre lo mismo; ya que mayores contenidos de agua incrementan la porosidad, lo que se asocia a bajas conductividades térmicas.

Existe, por otro lado, una relación entre la conductividad térmica y la humedad retenida del agua en las partículas sólidas. Por encima de los 0°C, el agua en el suelo puede clasificarse como humedad retenida y humedad libre. Haciendo uso de presión hidrostática o drenes, el estado de la humedad libre puede alterarse, más no el de la humedad retenida (Nakshabandi y Kohnke, 1965). Ésta se encuentra sujeta a fuerzas de atracción resultantes de su interacción con la superficie de las partículas de suelo sólidas, pudiendo ser de naturaleza intermolecular, eléctrica, magnética y gravitacional (Farouki, 1981).

Entre suelos diferentes, la conductividad térmica varía considerablemente incluso si tienen el mismo contenido de agua, sin embargo, si se tienen contenidos de humedad retenida iguales, la conductividad térmica presenta valores similares (Nakshabandi y Kohnke, 1965).

1.4.2. Estructura

El suelo posee una determinada distribución de partículas de distintos tamaños y formas, lo que determina su densidad y porosidad. Estas propiedades afectan directamente la conductividad térmica, debido a que implica cierto arreglo entre las partículas sólidas que favorece o perjudica el contacto entre ellas (Farouki, 1981). Mientras más puntos de contacto haya entre las partículas del suelo habrá una mejor transferencia de energía y la conductividad térmica será mayor.

Cuando la densidad de un suelo es alta, significa que hay bastante contacto entre partículas y poco espacio entre ellas, por lo tanto, se presenta una conductividad térmica alta. De igual forma, ésta decrece cuando se presenta una baja densidad y una alta relación de vacíos (Nakshabandi y Kohnke, 1965). A pesar de que la estructura del suelo y el contacto entre partículas son factores influyentes en las propiedades térmicas del mismo, su efecto no es tan considerable como lo es la presencia de agua.

1.4.3. Composición

La parte inorgánica del suelo está compuesta por diversos minerales, los cuales poseen propiedades distintas (Tabla 1.2) que varían según la temperatura y la dirección del flujo de calor (Farouki, 1981). El mineral con la conductividad térmica más alta es el cuarzo, por lo que su cuantificación es fundamental en la evaluación de las propiedades térmicas del suelo. Bristow (2002) menciona que, en promedio, la mezcla de minerales arcillosos presenta una conductividad térmica de $2.9 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

La concentración de sales tiene un efecto considerable en las propiedades térmicas del suelo, principalmente en las arcillas. La interacción de iones con las partículas sólidas influye directamente la floculación, provocando que la estructura del suelo sea desordenada y como consecuencia, que el suelo presente una baja conductividad térmica (Farouki, 1981). El contenido de materia orgánica, por su parte, tiene interacción directa con las partículas sólidas del suelo, por lo que su presencia altera el estado de las propiedades térmicas (Farouki, 1981). La conductividad térmica media de la materia orgánica es $0.25 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (Bristow, 2002).

Tabla 1.2. Conductividad térmica de algunos minerales (adaptado de Abuel-Naga *et al.*, 2015; Horai, 1971; Kodešová, 2013; Zafor *et al.*, 2015).

Mineral	Conductividad térmica, λ ($\text{W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Actinolita	2.1
Agua	0.6
Aire	0.03
Albita	2.3
Anhidrita	6.4
Calcita	3.4
Caolinita	2.8
Clorita	5.1
Cuarzo	7.8
Dolomita	5.1
Esmectita	1.8
Halita	6.5
Hexahidrita	0.7
Ilita	1.8
Materia orgánica	0.25
Mica	2.3
Ortoclasa	2.3
Siderita	3.0

1.5. Métodos de obtención de las propiedades térmicas del suelo

La determinación de las propiedades térmicas del suelo puede realizarse con pruebas de laboratorio o ensayos *in-situ*. Las pruebas de laboratorio permiten obtener valores puntuales de las propiedades térmicas del material. Entre las principales ventajas se encuentran: bajos costos, rapidez y la posibilidad de controlar las condiciones de frontera del suelo. No obstante, requieren de la extracción, transporte y manejo adecuado de muestras inalteradas (Barry-Macaulay *et al.*, 2013). Asimismo, la escala representa una desventaja, ya que con pequeños volúmenes de suelo no es posible reproducir condiciones de campo como la presencia de agua subterránea y heterogeneidad espacial (Vieira *et al.*, 2017). En un estudio realizado por King *et al.* (2012) se determinó que es necesario realizar al menos 15 mediciones de laboratorio de muestras separadas para considerar representativo el valor de las propiedades térmicas del sitio. Estas discrepancias son similares a las observadas en la determinación de la permeabilidad, en donde los efectos de escala pueden producir diferencias de hasta 4 órdenes de magnitud (López-Acosta *et al.*, 2019).

Por otra parte, los ensayos *in-situ* permiten obtener valores promedios de la conductividad térmica en las condiciones reales de campo. Su principal desventaja son los altos costos de realización y los largos periodos de ejecución (Akrouch *et al.*, 2016). En general, se ha observado que los valores de conductividad térmica obtenidos en laboratorio suelen ser menores que aquellos obtenidos *in-situ* (Low *et al.*, 2015). Esto se puede deber al efecto del agua subterránea, sin embargo, también es posible que ocurra debido a la falta de control de pérdidas de calor del equipo. Tanto en laboratorio como *in-situ* es recomendable llevar a cabo las pruebas con suficiente precaución para minimizar los errores y obtener resultados de calidad (Loveridge *et al.*, 2017). Ambos tipos de pruebas pueden clasificarse dos tipos de condiciones: establecidas y transitorias (López-Acosta *et al.*, 2017).

1.5.1. Métodos en condiciones establecidas

En estado establecido, el suelo permanece a una temperatura constante mientras se somete a un gradiente térmico y el flujo de calor a través de él se estabiliza (Abuel-Naga *et al.*, 2009). Este tipo de métodos permiten una aplicación directa de la ley de Fourier (Vieira *et al.*, 2017).

Método de la placa caliente con guarda

Se trata de un método de laboratorio cuyo objetivo es generar un flujo establecido y homogéneo de calor que pase a través del material analizado. Lo que provoca una diferencia de temperaturas medible entre las superficies de la muestra. Conociendo el valor del flujo de calor (calculable a partir del consumo eléctrico del calentador) y del gradiente de temperatura, es posible obtener la conductividad térmica del material.

El equipo (Figura 1.11) consiste en un calentador central principal o *placa caliente* que se encuentra en medio de dos muestras idénticas y un par de placas metálicas simétricas. Cada muestra tiene una superficie en contacto con el calentador y otra con la placa. La placa caliente, a su vez, está rodeada por una guarda, cuyo objetivo es proveer un flujo de calor auxiliar para asegurar un flujo unidimensional sobre las superficies de ambas muestras (Stepanic *et al.*, 2018). Al encender el equipo, el calor comienza a fluir del calentador a las placas, a través de las muestras. Durante la prueba es necesario

monitorear las temperaturas del calentador, las placas y las muestras, y se considera finalizada cuando la temperatura de los tres es constante (Farouki, 1981).

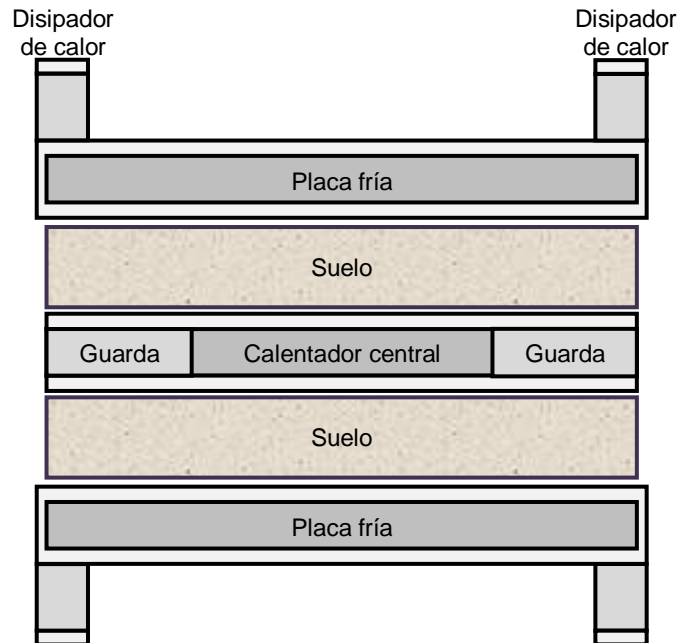


Figura 1.11. Diagrama del equipo del método de la placa caliente con guarda (Stepanic *et al.*, 2018).

El método presenta ciertas desventajas durante su desarrollo. En primer lugar, la dificultad de preparación de las muestras; es necesario que ambas sean completamente idénticas para garantizar que la energía fluye de igual forma en ellas. En segundo lugar, se trata de una prueba que puede tomar varios días, puesto que es necesario que se alcance el estado establecido. En tercer lugar, la humedad de las muestras puede verse fuertemente afectada durante la prueba (Farouki, 1981).

Celda térmica

La celda térmica es una prueba de laboratorio que funciona de manera similar a la placa caliente con guarda; consiste en mantener las bases de una muestra cilíndrica a distintas temperaturas, permitiendo que un flujo de calor pase a través de ella (Farouki, 1981).

El equipo consiste en una celda de aislamiento que contiene dos calentadores en forma de placas (Figura 1.12). Se labra una muestra cilíndrica de material inalterado y se coloca entre ellas, asegurando el contacto de las mismas con ambas bases de la muestra (Clarke *et al.*, 2008). La celda de aislamiento permite mantener una temperatura constante en el ambiente mientras se realiza la prueba, con el fin de evitar pérdidas o ganancias de calor externo. Asimismo, las placas sellan la muestra para evitar alteraciones en el contenido natural de agua. Durante la prueba, el calor fluye de la placa inferior a la superior. Se monitorean las temperaturas de ambas placas, la temperatura del aire por encima de la placa superior y el consumo de energía eléctrica del equipo para poder determinar la conductividad térmica de la muestra (Clarke *et al.*, 2008). De igual forma, es posible colocar sensores a lo largo de la muestra para determinar la temperatura de manera puntual (Farouki, 1981).

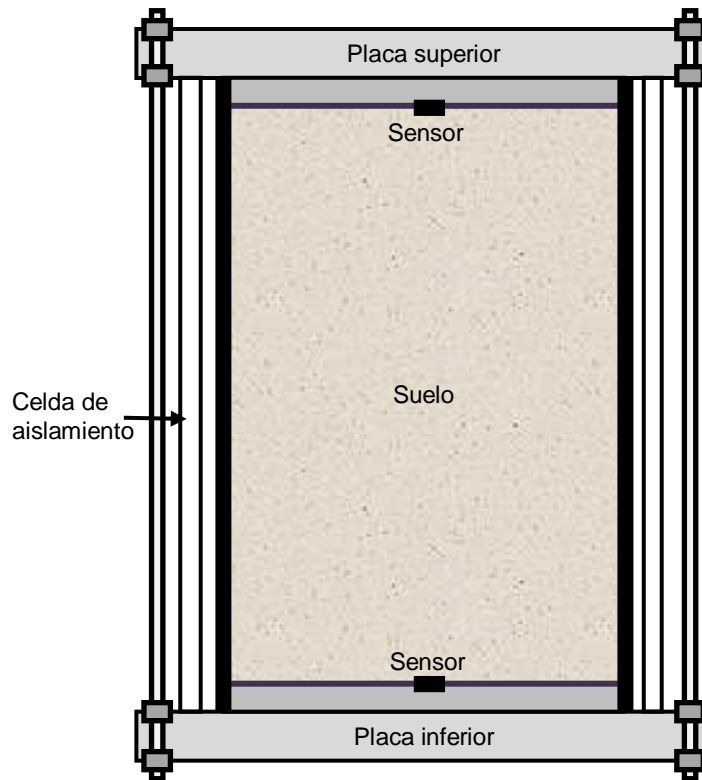


Figura 1.12. Diagrama de la celda térmica (Clarke *et al.*, 2008).

Ensayo de respuesta térmica (TRT)

El ensayo de respuesta térmica o TRT (*Thermal Response Test*) es un método empleado para la determinación de las propiedades térmicas del suelo para el diseño de sistemas intercambiadores de calor, por ejemplo, las pilas de energía.

Consiste en instalar una tubería cerrada en forma de U dentro de una excavación. A través de la misma, se hace circular un fluido que transporta una cantidad de calor constante (Banks, 2012). Durante la prueba, se monitorean las temperaturas de entrada y salida de la excavación, la potencia suministrada y la duración del ensayo (Figura 1.13). La principal ventaja de este método es que no requiere la ejecución de un gran número de pruebas, sin embargo, se trata de una prueba muy costosa y de varios días de duración.

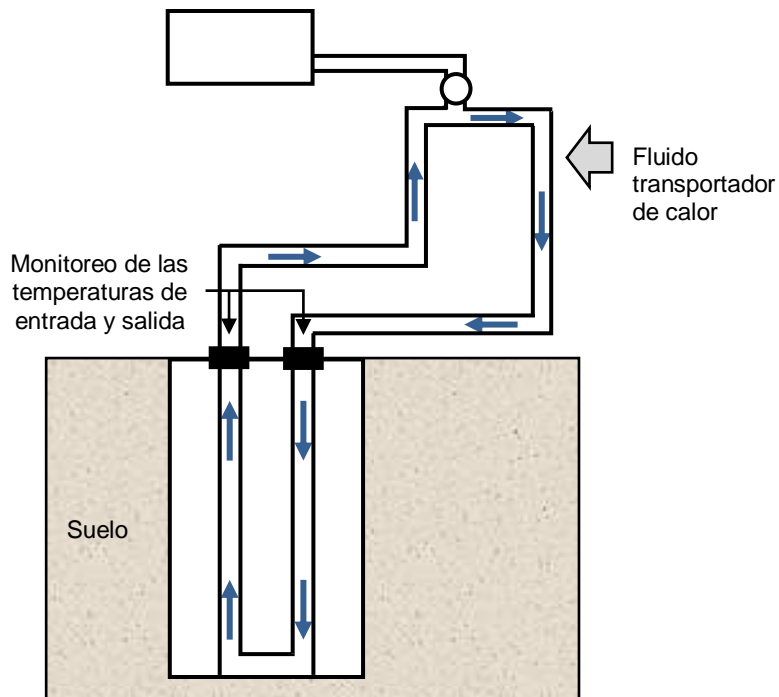


Figura 1.13. Diagrama de TRT (Banks, 2012).

1.5.2. Métodos en condiciones transitorias

En estado transitorio, se mide la disipación del calor a lo largo del tiempo. En general, estas pruebas tienen una menor duración, puesto que las mediciones se llevan a cabo durante los incrementos de temperatura (Vieira *et al.*, 2017), y son más sencillas de llevar a cabo que aquellas hechas bajo condiciones establecidas. Sin embargo, son más susceptibles a ser afectadas por el contacto entre los sensores y la muestra y la migración de la humedad.

Método de la aguja

El método de la aguja se basa en la teoría de conducción de calor ocasionado por una fuente de energía lineal e infinita. Se asume un medio homogéneo, isótropo y semi-infinito que mantiene una temperatura constante en sus fronteras (ASTM D5334-14, 2014).

El equipo consiste en una unidad de medición, un elemento calentador en forma de aguja de dimensiones conocidas y un sensor medidor de temperatura (Figura 1.14). El sensor se instala dentro de la muestra de suelo, se aplica una corriente eléctrica que induce un flujo de calor constante, produciendo variaciones de temperatura en el medio. Dichos cambios se registran a lo largo del tiempo, así como la cantidad de calor suministrada, con lo cual es posible determinar la conductividad térmica de la muestra. Entre las ventajas que el método presenta está la facilidad del desarrollo de la prueba, el bajo costo que representa y la versatilidad del equipo, puesto que puede ser utilizado en laboratorio y en campo.

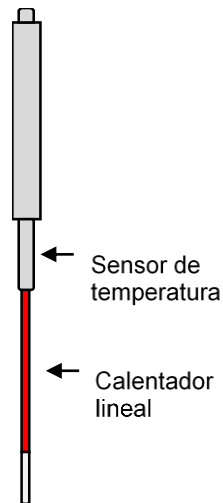


Figura 1.14. Diagrama de la aguja simple (ASTM D5334-14, 2014).

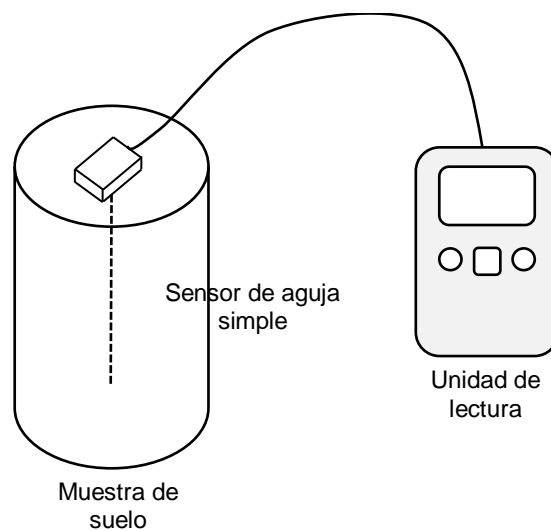


Figura 1.15. Diagrama de prueba de la aguja simple

Una variación del método de la aguja simple es la aguja doble (Figura 1.16). El equipo difiere ya que se tienen un par de agujas paralelas con una separación de 6 mm entre ellas, una de ellas genera el flujo de calor, mientras que la otra lo mide a cierta distancia. La ventaja de la aguja doble es que otorga la posibilidad de obtener la capacidad calorífica volumétrica y la difusividad térmica, además de la conductividad térmica. Sin embargo, cambios en la separación de ambas agujas pueden afectar el cálculo de las propiedades térmicas (Vieira *et al.*, 2017).

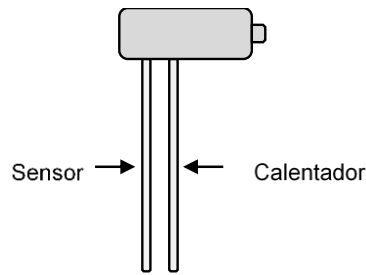


Figura 1.16. Diagrama de la aguja doble (ASTM D5334-14, 2014).

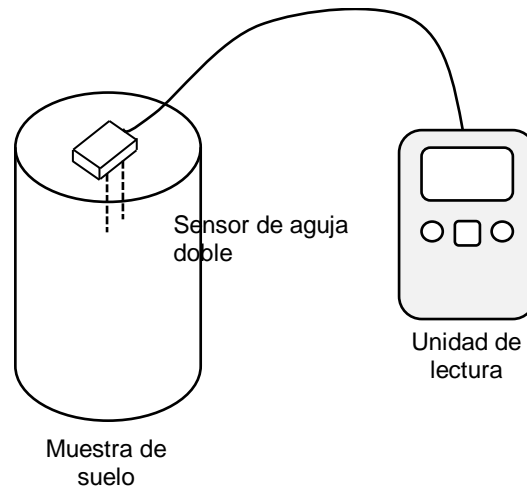


Figura 1.17. Diagrama de prueba de la aguja doble.

Método de fuente plana transitoria (TPS)

El método de fuente plana transitoria o TPS por sus siglas en inglés (*Transient Plane Source*) consiste en un sensor plano de níquel cubierto con un aislante (Figura 1.18). Se coloca entre dos muestras idénticas y se aplica una corriente para generar calor. El sensor registra las variaciones de temperatura a lo largo del tiempo. Con los datos obtenidos es posible calcular la conductividad térmica, difusividad térmica y capacidad calorífica volumétrica de la muestra de suelo.

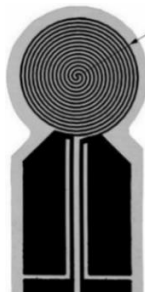


Figura 1.18. Diagrama de sensor de TPS (British Standards Institution, 2012).

Existe una modificación al método conocida como MTPS (*Modified Transient Plane Source*), en la que el sensor se encuentra protegido por un anillo. Funciona de manera

similar al TPS; la muestra de suelo se coloca sobre el sensor y se genera un flujo de calor lineal.

1.6. Modelos predictivos

Varios modelos, teóricos han sido desarrollados con el fin de predecir las propiedades térmicas del suelo, con base en algunas de sus propiedades. Algunos de los modelos más conocidos se describen a continuación.

1.6.1. Límites de Weiner (1912)

Se trata de un modelo desarrollado por Wiener (1912) que indica que la conductividad térmica de un material polifásico tiene límites superior e inferior. Los resultados de todos los modelos predictivos se ubican entre estas fronteras. Al asumir que el calor fluye perpendicularmente a los fluidos y las partículas sólidas del suelo (Figura 1.19a), la ecuación para calcular la conductividad térmica en serie es:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{x_w}{\lambda_w} + \frac{x_a}{\lambda_a} + \frac{x_s}{\lambda_s} \quad (1.16)$$

donde $\lambda_{w,a,s}$ es la conductividad térmica del agua, aire y partículas sólidas respectivamente, y $x_{w,a,s}$ representa las fracciones de volumen de agua, aire y suelo según corresponde. El modelo de flujo de calor en serie representa el límite inferior de la conductividad térmica. Cuando el calor fluye paralelamente a las fases (Figura 1.19b), la expresión es:

$$\lambda = x_w \lambda_w + x_a \lambda_a + x_s \lambda_s \quad (1.17)$$

siendo éste el límite superior de la conductividad térmica.

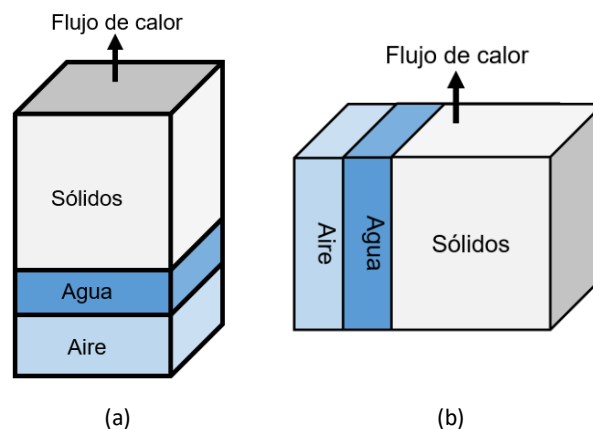


Figura 1.19. Modelos de flujo de calor: a) en serie, b) en paralelo.

1.6.2. Modelo de Johansen (1975)

Con el fin de obtener un valor intermedio entre los límites del modelo en serie y en paralelo, Johansen (1975) propuso emplear una media geométrica para suelos saturados.

$$\lambda = \lambda_s^{(1-n)} \lambda_w^n \quad (1.18)$$

siendo n la porosidad del material.

1.6.3. Modelo de Maxwell (1873)

El modelo de Maxwell (1873) determina la conductividad efectiva en medios heterogéneos para electricidad y magnetismo, sin embargo, la expresión es aplicable a transferencia de calor. Se considera una dispersión de partículas esféricas dentro de una matriz (Figura 1.20), donde la interacción térmica entre ambos elementos se desprecia (Pietrak y Wiśniewski, 2015). En este caso, se asume que las partículas son el agua y, la matriz es el conjunto de partículas sólidas que conforman el suelo. La expresión es:

$$\frac{\lambda}{\lambda_s} = 1 + \frac{3n(\lambda_w - \lambda_s)}{\lambda_w + 2\lambda_s - n(\lambda_w - \lambda_s)} \quad (1.19)$$

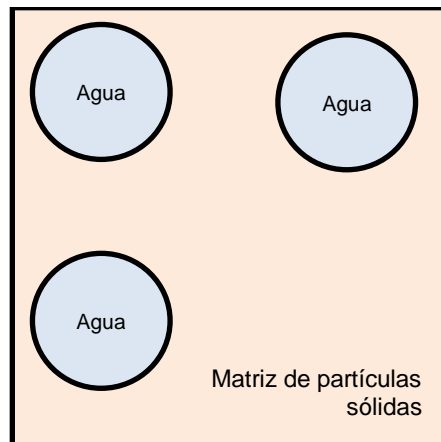


Figura 1.20. Representación del modelo de Maxwell: dispersión de partículas esféricas dentro de una matriz (adaptado de Pietrak y Wiśniewski, 2015).

1.6.4. Modelo de Tarnawski *et al.* (2000)

El modelo de Tarnawski *et al.* (2000) asume una partícula cúbica rodeada por aire (en el caso de suelos secos), por agua (en suelos saturados), o por una combinación de ambas (en suelos no saturados). La determinación de la conductividad térmica para el caso de suelos secos y saturados se realiza de manera directa, ya que sólo es necesario considerar un medio continuo (Figura 1.21).

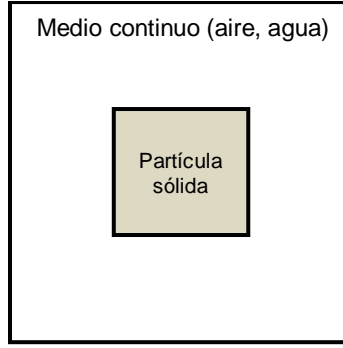


Figura 1.21. Partícula cúbica de suelo seco o saturado (Tarnawski *et al.*, 2000).

Para suelos secos:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\beta - 1}{\lambda_a \beta} + \frac{\beta}{\lambda_s + \lambda_a [\beta^2 - 1]} \quad (1.20)$$

donde β se calcula como:

$$\beta = \sqrt[3]{\frac{1}{1-n}} \quad (1.21)$$

Para suelos saturados:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\beta - 1}{\lambda_w \beta} + \frac{\beta}{\lambda_s + \lambda_w [\beta^2 - 1]} \quad (1.22)$$

En el caso de suelos no saturados, el modelo toma en cuenta dos tipos de contenido volumétrico de agua θ_w . Para $\theta_w \leq 0.083n$, se asume que el contenido de agua presente es bajo y cubre la superficie de cada partícula de manera uniforme (Figura 1.22).

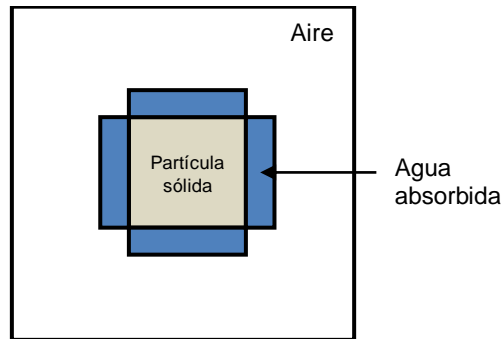


Figura 1.22. Partícula cúbica de suelo no saturado con bajo contenido de agua (Tarnawski *et al.*, 2000).

La expresión para calcular la resistividad térmica es:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\beta - 1 - \frac{\delta}{3}}{\beta \lambda_a} + \frac{\beta \delta}{3[\lambda_a(\beta^2 - 1) + \lambda_w]} + \frac{\beta}{\lambda_s + \frac{2}{3}\delta \lambda_w + \lambda_a(\beta^2 - 1 - \frac{2}{3}\delta)} \quad (1.23)$$

$$\delta = \frac{\theta_w}{1-n} \quad (1.24)$$

Para $\theta_w > 0.083n$, existen dos casos; el primero indica que el agua está distribuida simétricamente en las partículas sólidas formando puentes que conectan a las mismas. En este caso, las dimensiones de los puentes de agua son menores que las de las partículas sólidas (Figura 1.23a). La condición se cumple cuando $\gamma_f < 1$. En el segundo caso, se asume que las dimensiones de los puentes de agua son mayores a las de las partículas sólidas (Figura 1.23b) y se cumple la condición $\gamma_f > 1$.

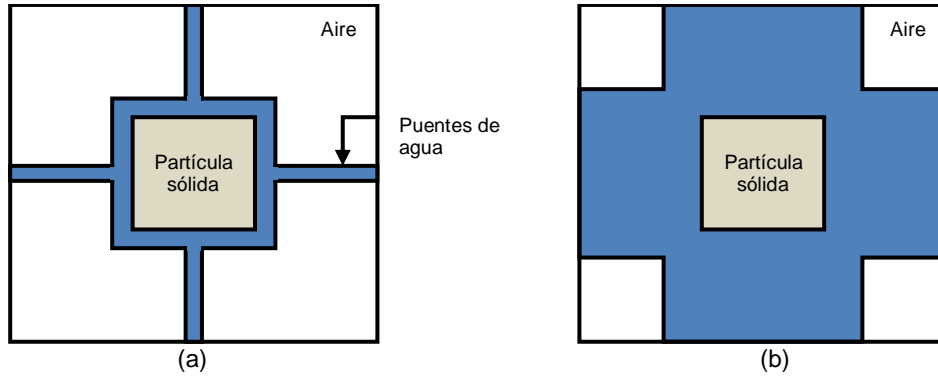


Figura 1.23. Partícula cúbica de suelo no saturado con alto contenido de agua (Tarnawski *et al.*, 2000): a) Las dimensiones de los puentes de agua son menores a la partícula sólida. b) Las dimensiones de los puentes de agua son mayores a la partícula sólida.

$$\gamma_f = \sqrt{\frac{V_{wf}/V_s}{3|\beta - \alpha|}} \quad (1.25)$$

siendo que:

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{V_w}{V_s} - \frac{V_{wf}}{V_s}} + 1 \quad (1.26)$$

$$\frac{V_w}{V_s} - \frac{\theta_w}{1-n}, \frac{V_{wf}}{V_s} = \frac{V_{wf}}{V_v} (\beta^3 - 1) = [0.183 + 0.198(0.4764 - n)](\beta^3 - 1) \quad (1.27)$$

Para $\gamma_f < 1$:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\beta^2 - \beta\alpha}{\lambda_a(\beta^2 - \gamma_f^2) + \lambda_w\gamma_f^2} + \frac{\beta\alpha - \beta}{\lambda_a(\beta^2 - \alpha^2) + \lambda_w\alpha^2} + \frac{\beta - \beta\gamma_f}{\lambda_a(\beta^2 - \alpha^2) + \lambda_w(\alpha^2 - 1) + \lambda_s} + \frac{\beta\gamma_f}{\lambda_s + \lambda_w(\alpha^2 - 1 + 2\beta\gamma_f - 2\alpha\gamma_f) + \lambda_a(\beta^2 - \alpha^2 - 2\beta\gamma_f + 2\alpha\gamma_f)} \quad (1.28)$$

Para $\gamma_f > 1$:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\lambda} = & \frac{\beta^2 - \beta\alpha}{\lambda_a(\beta^2 - \gamma_f^2) + \lambda_w\gamma_f^2} + \frac{\beta\alpha - \beta\gamma_f}{\lambda_a(\beta^2 - \alpha^2) + \lambda_w\alpha^2} \\ & + \frac{\beta\gamma_f - \beta}{\lambda_a(\beta^2 - \alpha^2 - 2\beta\gamma_f + 2\alpha\gamma_f) + \lambda_w(\alpha^2 + 2\beta\gamma_f - 2\alpha\gamma_f)} \\ & + \frac{\beta}{\lambda_s + \lambda_w(\alpha^2 - 1 + 2\beta\gamma_f - 2\alpha\gamma_f) + \lambda_a(\beta^2 - \alpha^2 - 2\beta\gamma_f + 2\alpha\gamma_f)} \end{aligned} \quad (1.29)$$

1.6.5. Modelo de De Vries (1963)

El modelo de De Vries (1963) se basa en la ecuación de Maxwell (1873) para la conductividad eléctrica. Usualmente el modelo tiene un buen ajuste para suelos con altos grados de saturación (Alrtimi *et al.*, 2016). El modelo propone calcular un promedio ponderado de la conductividad térmica de cada elemento del suelo. Asimismo, en la ecuación se asume que no existe contacto entre las partículas del suelo y que éstas son elipsoidales (Alrtimi *et al.*, 2016). La conductividad térmica se expresa como:

$$\lambda = \frac{\lambda_w x_w + F_a \lambda_a x_a + F_s \lambda_s x_s}{x_w + F_a x_a + F_s x_s} \quad (1.30)$$

donde F_s y F_a son factores dependientes de la orientación de poros y partículas sólidas:

$$F_s = \frac{1}{3} \left[\frac{2}{1 + 0.125(\lambda_s/\lambda_w - 1)} + \frac{1}{1 + 0.75(\lambda_s/\lambda_w - 1)} \right] \quad (1.31)$$

$$F_a = \frac{1}{3} \left[\frac{2}{1 + g_a(\lambda_s/\lambda_w - 1)} + \frac{1}{1 + g_c(\lambda_s/\lambda_w - 1)} \right] \quad (1.32)$$

donde g_a y g_c son factores de forma obtenidos como:

$$g_a = 0.013 + 0.944x_w \quad \text{Para } x_w < 0.09 \quad (1.33)$$

$$g_a = 0.333 - \frac{x_a}{n} (0.333 - 0.035) \quad \text{Para } 0.09 < x_w < n \quad (1.34)$$

$$g_c = 1 - 2g_a \quad (1.35)$$

Para el cálculo de λ_s es posible utilizar valores promedio de la literatura y realizar una ponderación, sin embargo, es recomendable llevar a cabo el análisis de la composición mineralógica particular de las muestras (Côté y Konrad, 2005).

De Vries asume que la conductividad térmica del aire es función de la fracción de agua presente en el suelo, por lo que:

$$\lambda_a = 0.0615 + 1.9x_w \quad (1.36)$$

Por otra parte, Bristow (2002) propone un par de ecuaciones para determinar la conductividad térmica del aire y del agua en función de la temperatura:

$$\lambda_a = 0.0237 + 0.000064T \quad (1.37)$$

$$\lambda_w = 0.552 + 2.34 \times 10^{-3}T - 1.1 \times 10^{-5}T^2 \quad (1.38)$$

En la Figura 1.24 se muestra el comportamiento de los modelos anteriores y su variación con respecto a la porosidad del material. Si se supone un suelo compuesto de materiales arcillosos cuya conductividad térmica de sólidos es $2.9 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ y haciendo uso de las Ecs. (1.37) y (1.38) para el cálculo de las conductividades térmicas del aire y el agua respectivamente con $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$:

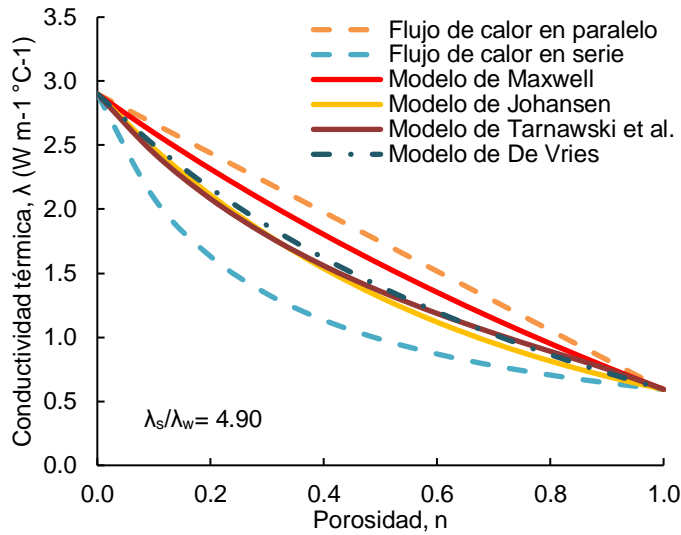


Figura 1.24. Variación de modelos predictivos de conductividad térmica con respecto a la porosidad del material.

En la Tabla 1.3 se resumen los modelos discutidos para el caso de suelos saturados.

Tabla 1.3. Resumen de modelos predictivos para suelos saturados.	
Modelo	Ecuación
Flujo de calor en serie	$\frac{1}{\lambda} = \frac{x_w}{\lambda_w} + \frac{x_a}{\lambda_a} + \frac{x_s}{\lambda_s}$
Flujo de calor en paralelo	$\lambda = x_w \lambda_w + x_a \lambda_a + x_s \lambda_s$
Modelo de Johansen	$\lambda = \lambda_s^{(1-n)} \lambda_w^n$
Modelo de Maxwell	$\frac{\lambda}{\lambda_s} = 1 + \frac{3n(\lambda_w - \lambda_s)}{\lambda_w + 2\lambda_s - n(\lambda_w - \lambda_s)}$
Modelo de Tarnawski <i>et al.</i>	$\frac{1}{\lambda} = \frac{\beta - 1}{\lambda_w \beta} + \frac{\beta}{\lambda_s + \lambda_w[\beta^2 - 1]}$
Modelo de De Vries	$\lambda = \frac{\lambda_w x_w + F_a \lambda_a x_a + F_s \lambda_s x_s}{x_w + F_a x_a + F_s x_s}$

2. ZONA DE ESTUDIO

2.1. Localización

El ex Lago de Texcoco se localiza al noreste de la Cuenca del Valle de México y pertenece a la parte más baja de ella, teniendo una altitud promedio de 2,226 msnm. Al norte limita con El Caracol; al sur con la Autopista Peñón Texcoco y el Lago Nabor Carrillo; al poniente con el Circuito Exterior Mexiquense y al oriente con los denominados *ríos del Oriente*.

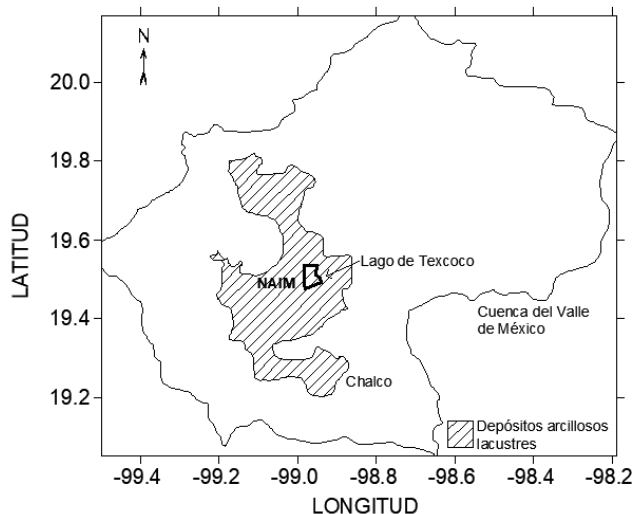


Figura 2.1. Localización del Lago de Texcoco dentro de la Cuenca del Valle de México (adaptado de Ramos-Leal *et al.*, 2010).

2.2. Geología

Tras la actividad volcánica que la cuenca presentó durante los periodos terciario y cuaternario, se formaron el Cerro Gordo, Chimalhuacán y Chiconautla, lo que convirtió al sur de la cuenca en el único desagüe. Posteriormente, durante el Cuaternario superior, al formarse la sierra de Chichinautzin entre las sierras Nevada y Las Cruces, la cuenca fue transformada en una unidad hidrográfica cerrada. Este acontecimiento permitió la formación de seis lagos principales: Zumpango, Xaltocan, Texcoco, México, Xochimilco y Chalco (Díaz-Rodríguez *et al.*, 1998).

La geología de la zona consta de estratos de arcilla lacustre de menos de un millón de años con un espesor promedio de 60 m (Marsal y Graue, 1969). Debajo de ellos, se encuentran sedimentos clásticos y aluviales originarios de la actividad volcánica del periodo Cuaternario (Díaz-Rodríguez *et al.*, 1998). Al fondo, existen rocas del Crétacico superior cubiertas por material volcánico y derrames de lava, provenientes de las sierras circundantes (Hiriart y Marsal, 1969).

De acuerdo con Mesri (1975), los sedimentos lacustres tienen una granulometría de 5 a 10% de arenas, 55 a 65% de limos y 20 a 30% de arcillas. Asimismo, tienen un contenido de 3 a 21% de carbonatos y 5 a 10% de materia orgánica. Por lo tanto, el suelo corresponde a arcillas limosas o limos arcillosos (Díaz-Rodríguez y Santamarina, 2001). Se trata de un

suelo altamente orgánico que presenta altas relaciones de vacíos (6 a 11), contenidos de agua mayores a 400% y porosidades entre 0.8 y 0.9 (Marsal y Mazari, 1959).

La composición mineralógica de las arcillas consiste en una mezcla heterogénea de materiales con comportamiento mecánico complejo (Carreón-Freyre *et al.*, 2006). En la Tabla 2.1 se muestran los resultados de estudios que varios autores han reportado.

Tabla 2.1. Características mineralógicas reportadas de la fracción arcillosa de la Cuenca de México (adaptado de Carreón-Freyre *et al.*, 2006)

Autor	Composición mineralógica de la fracción arcillosa (%)
Zeevaert, 1953	Montmorilonita (20%), cenizas y diatomeas (65%), feldespatos, cuarzo y ferromagnesianos (15%).
Marsal y Mazari, 1959	Montmorilonita (13%), ilita (54%), caolinita (4%), dickita (2%), halloysita (1%), nontronita (3%), fósiles (3%), materia orgánica (1-7%) y otros (20%).
Mesri <i>et al.</i> , 1975	Esmectita (10%) y sílice volcánico (90%).
Warren y Rudolph, 1997	Sílice, montmorilonita, halloysita, caolinita e ilita.
Díaz-Rodríguez <i>et al.</i> , 1998	La fracción arcillosa se compone de montmorilonita, ilita y cristobalita, y varía de 20 a 55% de la muestra total. El contenido de materia orgánica varía de 1.1 a 9.9% siendo mayor a los 11 m de profundidad y a más de 30 m es despreciable. De 34.6 a 35.8 m se encontró un contenido de 4.7% de MO, producto de algunas raíces existentes.

2.3. Hidrología

El ex Lago de Texcoco abarca dos zonas hidrológicas pertenecientes a la Cuenca del Valle de México, Teotihuacán y Texcoco. Funciona como vaso regulador para nueve ríos provenientes del oriente (Murillo y García, 1978): San Juan Teotihuacán, Papalotla, Xalapango, Coxacoalco, Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica y Coatepec; y los ríos de aguas negras Los Remedios, La Compañía y Churubusco. Existen nueve cuerpos de agua artificiales cuya función es el control de avenidas: Lago Nabor Carrillo, Lago Regulación Horaria, Lago Churubusco, Lago Texcoco Norte, Laguna Xalapango, Lago Recreativo, Lagunas Facultativas, Laguna Casa Colorada y el Caracol Sosa Texcoco (Figura 2.2).



Figura 2.2. Esquema hidráulico del Lago de Texcoco (CONAGUA, 2014).

2.3.1. Calidad del agua

El lago de Texcoco no tiene flujo natural hacia afuera, por lo que el agua presente en él es salina, resultado de evaporación y concentración de las sales (Rudolph, *et al.*, 1989), principalmente carbonatos, bicarbonatos y cloruros de sodio. En la Tabla 2.2 se muestran las concentraciones de iones en función de la profundidad del agua, siendo que, las concentraciones mayores se localizan en las formaciones arcillosas.

Tabla 2.2: Análisis químicos de las aguas extraídas del Lago de Texcoco (Hiriart y Marsal, 1969).

Profundidad (m)	Concentración de sal (ppm ¹)
6-60	53,500
90-150	40,000
200-300	2,000 a 3,700
200-2,000	1,700 a 2,800

Un estudio reciente de la calidad del agua en la zona mostró altos valores de sólidos disueltos totales, mucho mayores que los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 (2001) para agua potable. Las concentraciones encontradas fueron las siguientes (PIMOSA, 2017): (a) sólidos disueltos totales, 87,093 mg L⁻¹; (b) Nitratos, 46.223 mg L⁻¹; (e) Nitrógeno amoniacal, 62.357 mg L⁻¹; (f) Sulfatos (SO₄), 1,434.22 mg L⁻¹; (g) Hierro, 1.024 mg L⁻¹ y; (h) Sodio, 43,892.25 mg L⁻¹ (el límite permisible para agua potable es 200 mg L⁻¹).

A pesar que la relación de vacíos y el grado de saturación de los suelos no están afectados por las sales disueltas, existe una correlación entre la densidad de sólidos del suelo y la concentración de carbonatos del agua presente (Hiriart y Marsal, 1969).

2.4. Estratigrafía

De acuerdo con Marsal y Graue (1969), la estratigrafía del lago es la siguiente:

¹ Partes por millón

- a) *Costra superficial (CS)*. Se trata de un estrato constituido por arcillas consolidadas por secado, arenas limosas y limos arcillosos. En promedio, la costra superficial tiene un espesor de 1.5 m, profundidad a la que se encuentra el nivel de aguas freáticas (variable en época de lluvias y de sequía). El material se encuentra surcado por grietas infiltradas con suelos erosionados.
- b) *Formación arcillosa superior (FAS)*. Se encuentra formada por arcillas altamente plásticas de origen volcánico-lacustre, intercalada por algunos estratos arenosos y de vidrio volcánico (Murillo y García, 1978). Tiene un espesor variable de 18 a 40 m. Las propiedades índice de la FAS varían considerablemente según los cambios de elevación, por ejemplo, el contenido natural de agua va de 100 a 600%. Esto se explica por la composición química del agua al momento de la sedimentación de ceniza volcánica.
- c) *Capa dura (CD)*. Se integra por material limo-arenoso ligeramente cementado intercalado por arcillas. Tiene un espesor de 2 a 3 m.
- d) *Formación arcillosa inferior (FAI)*. Está compuesta por arcillas plásticas con contenidos de agua menores que los de la FAS. Tiene un espesor aproximado de 15 m.
- e) *Depósitos profundos (DP)*. Están constituidos por limos compactos y arcillas, intercaladas entre capas de arenas finas cementadas.
- f) *Formación arcillosa profunda (FAP)*. Entre 47 y 52 m de profundidad, se identifica la presencia de arcillas.
- g) *Depósitos profundos inferiores (DPI)*. Este estrato permanece como la profundidad máxima explorada, se compone de suelos arenosos y limosos compactos y parcialmente cementados.

En la Tabla 2.3 se muestran los valores medios de las propiedades índice del terreno por estrato. Alanís (2003) realizó la caracterización del ex Lago de Texcoco en sitios en los que existe una alta concentración de sal, es por ello que presenta valores mayores que Murillo y García (1978), quienes obtuvieron propiedades índice en zonas de baja salinidad.

Tabla 2.3. Valores medios de propiedades índice en el suelo del ex Lago de Texcoco.

Estrato	(Alanís, 2003) ²				(Murillo y García, 1978)			
	w (%)	IP (%)	G _s (g cm ⁻³)	e	w (%)	IP (%)	G _s (g cm ⁻³)	e
FS	89	54	2.80	3.3	61	55	2.50	1.7
FAS	201	183	2.67	7.1	303	230	2.46	7.3
CD	55	26	-	-	59	34	2.53	1.2
FAI	100	-	4.42	4.4	255	176	2.45	5.9
DP	39	24	-	-	49	47	2.42	1.5
FAP	143	-	3.83	3.8	147	114	2.27	3.5
DPI	30	-	-	-	37	23	-	-

Nota: w= contenido natural de agua (%), IP= índice plástico (%), G_s= densidad de sólidos y e= relación de vacíos.

De acuerdo con Ridlo *et al.* (2012), la mineralogía influencia directamente al índice plástico del suelo. La presencia de esmectita y ferrihidrita se asocia con límites líquidos altos, mientras que las muestras que tienen límites líquidos bajos suelen contener ilita y caolinita. La presencia de ilita se asocia con materiales marrón y rojizos (Bain, 1971) Asimismo, la presencia de materia orgánica incrementa el valor de los límites líquidos, mas no tan significativamente como lo hace la esmectita.

² Valores promedio

3. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DEL SUELO DEL EX LAGO DE TEXCOCO

3.1. Consideraciones generales

En este capítulo se describen las pruebas experimentales para determinar las propiedades térmicas del suelo del ex Lago de Texcoco, ejecutadas en el Laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. En los últimos años, el área de estudio ha sido objeto de varias investigaciones debido a la construcción del proyecto del Nuevo Aeropuerto Internacional de México (NAIM). La estimación de las propiedades térmicas fue posible gracias a las exploraciones geotécnicas realizadas en la zona de estudio, en las que se extrajeron, a distintas profundidades, muestras inalteradas con tubos *Shelby* o de pared delgada de 60 cm de largo y 4" de diámetro.

El protocolo de la prueba consistió en extraer 40 muestras inalteradas de los tubos *Shelby*, realizar la prueba de conductividad térmica empleando los sensores de aguja simple y de aguja doble, labrar una pastilla de volumen conocido con el fin de determinar las relaciones gravimétricas y volumétricas del material y finalmente, determinar la densidad de sólidos y el índice plástico de cada muestra. En adición, 37 muestras fueron sometidas a una prueba de contenido de materia orgánica en las instalaciones del Laboratorio de Vías Terrestres del Instituto de Ingeniería de la UNAM, mediante el método de ignición estandarizado por la ASTM D2974-14 (2014). Como comprobación, se determinó el contenido de materia orgánica en seis muestras mediante el método de Walkley y Black, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000, en el Laboratorio de Física de Suelos del Instituto de Geología de la UNAM. De igual forma, se realizó el análisis mineralógico de cinco muestras representativas del suelo en estudio en el Laboratorio de Difracción de Rayos X del Instituto de Geología de la UNAM.

3.2. Teoría del método de la aguja

El método de la aguja se basa en la teoría de conducción de calor ocasionado por una fuente de energía lineal e infinita. Se asume un medio homogéneo, isótropo y semi-infinito que mantiene una temperatura constante en sus fronteras (ASTM D5334-14, 2014). Si una tasa de transferencia de calor por unidad de longitud constante Q ($W m^{-1}$) se aplica durante un periodo t , el incremento de temperatura ΔT a una distancia radial r desde la fuente es:

$$\Delta T = -\frac{Q}{4\pi\lambda} Ei\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right) \quad (3.1)$$

donde Ei es una función integral exponencial, definida por Abramowitz y Stegun (1972) como:

$$-Ei(-x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (3.2)$$

Para mediciones efectuadas en la fase de recuperación (una de las fases de la prueba de la aguja), el incremento de temperatura es:

$$\Delta T = \frac{Q}{4\pi\lambda} \left[-Ei \left(-\frac{r^2}{4Dt} \right) + Ei \left(-\frac{r^2}{4D(t - t_h)} \right) \right] \quad (3.3)$$

siendo t_h el tiempo en el que se deja de suministrar calor al medio. Las ecuaciones de incremento de temperatura no pueden resolverse directamente para λ y D , por lo que es posible hacer un ajuste mediante diversos métodos para su determinación.

3.3. Localización y características de las muestras analizadas

Se hizo la determinación de las propiedades térmicas del suelo del ex Lago de Texcoco con el método de la aguja en 32 muestras arcillosas de suelo, con profundidades de 1 a 22 m, localizadas en la FAS. Adicionalmente, se realizó el mismo procedimiento con 8 muestras para un perfil continuo de 2 a 32 m de profundidad (sondeo SM-14bis). La prueba se llevó a cabo en muestras inalteradas de suelo saturado. En las Figuras 3.1 y 3.2, así como en la Tabla 3.1 se presenta la ubicación de los sondeos que fueron analizados.

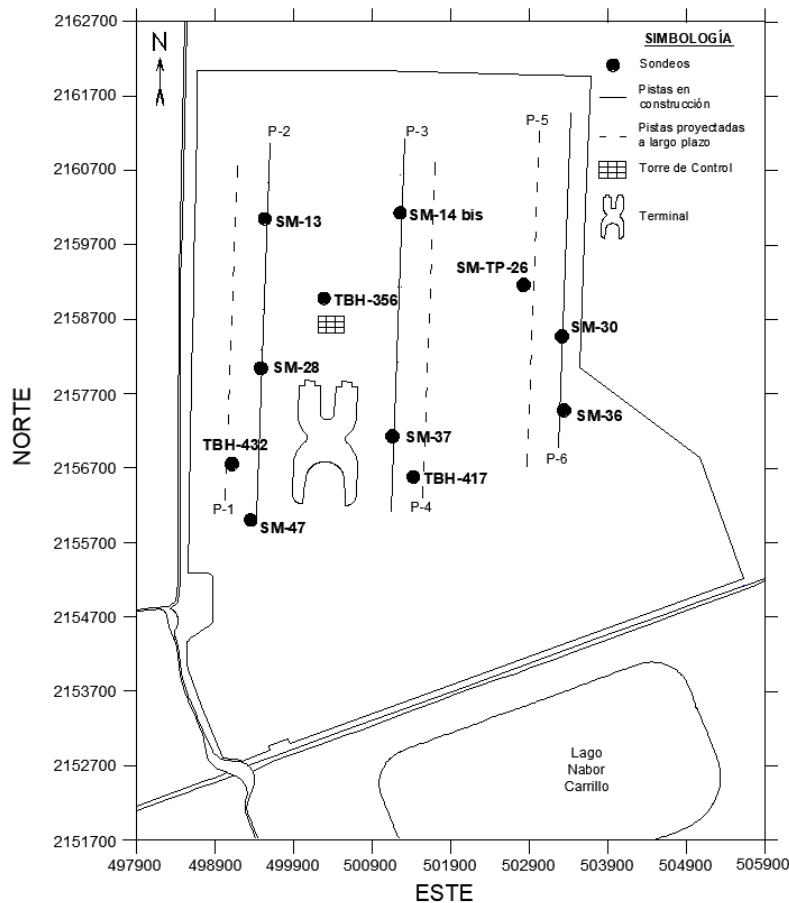


Figura 3.1. Localización de sondeos utilizados para determinación de propiedades térmicas.

Tabla 3.1. Coordenadas de los sondeos utilizados para la determinación de las propiedades térmicas del suelo del ex Lago de Texcoco.

Ubicación	Sondeo	Coordenadas UTM	
		X	Y
Pista 1	TBH-432	499112	2156756
Pista 2	SM-13	499537	2160051
Pista 2	SM-28	499480	2158043
Pista 2	SM-47	499353	2156001
Torre de Control	TBH-356	500287	2158982
Pista 3	SM-14bis	501255	2160130
Pista 3	SM-37	501158	2157126
Pista 4	TBH-417	501424	2156581
Pista 5	SM-TP-26	502826	2159160
Pista 6	SM-30	503318	2158472
Pista 6	SM-36	503342	2157475

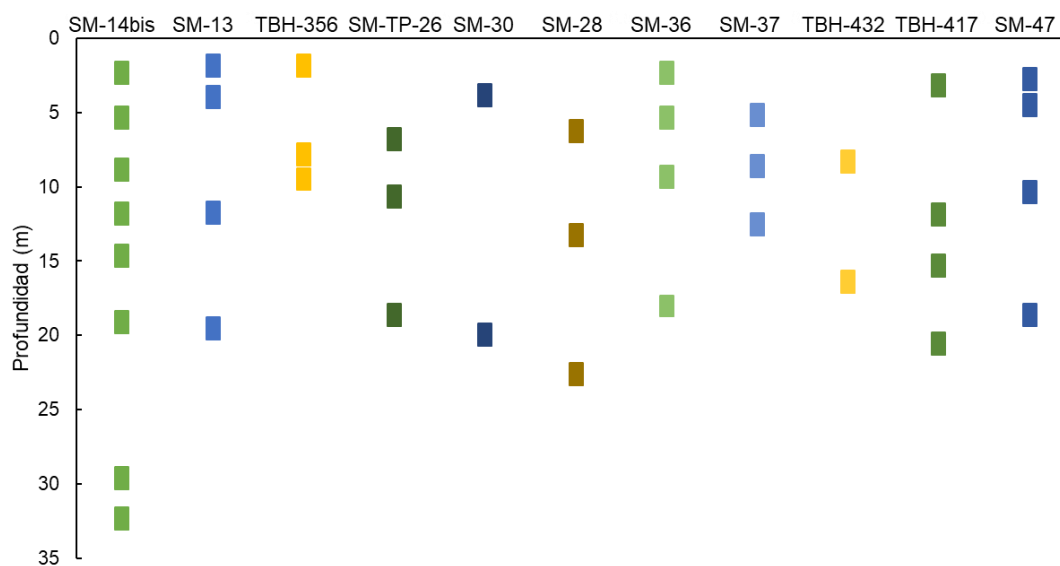


Figura 3.2. Perfil N-S de muestras seleccionadas para la determinación de propiedades térmicas del suelo del ex Lago de Texcoco.

3.4. Determinación de las propiedades índice

Se determinó la densidad de sólidos (Figura 3.3) y el contenido natural de agua de cada muestra. Se hizo el labrado de una pastilla con un anillo de 90.62 cm^3 (Figura 3.4), con el fin de obtener los volúmenes de las fases de la muestra y así poder calcular la densidad, porosidad, relación de vacíos, grado de saturación y contenido volumétrico de agua. Adicionalmente, se determinaron los límites líquido y plástico de las muestras con la finalidad de conocer la consistencia del material y clasificarlo de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (Figura 3.5).



Figura 3.3. Determinación de la densidad de sólidos.



Figura 3.4. Labrado de pastilla para determinación de relaciones gravimétricas y volumétricas.

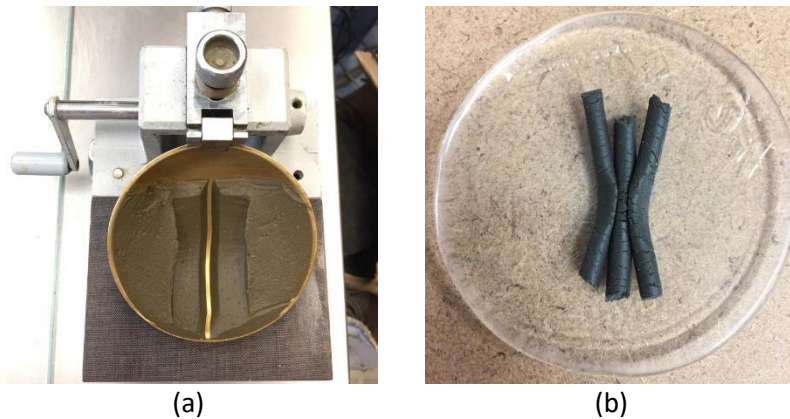


Figura 3.5. Determinación de: a) Límite líquido usando la copa de Casagrande. b) Límite plástico.

El contenido de agua y los límites líquido y plástico calculados representan valores aparentes, ya que no se calcula la corrección por contenido de sales. La misma situación ocurre con la densidad de sólidos, pues la concentración salina tiende a elevarla. La determinación de las propiedades índice es fundamental para el estudio de las propiedades térmicas del suelo, ya que se ha demostrado que tienen una influencia directa sobre estas propiedades. De igual manera, son necesarias para el uso de modelos predictivos empíricos y teóricos de conductividad térmica.

3.5. Mineralogía

El estudio mineralógico se llevó a cabo mediante la técnica de Difracción de Rayos X (DRX) en cinco muestras representativas del sitio (Tabla 3.2). Las muestras fueron elegidas debido a que exhibían las características visuales más comunes o típicas entre las utilizadas para esta investigación.

Tabla 3.2. Descripción de muestras utilizadas para el estudio mineralógico.

Sondeo	Muestra	Profundidad		Descripción del material
SM-37	17	8.30	- 8.90	Color marrón
SM-14bis	4	11.50	- 12.10	Color verde
TBH-356	2bis	7.50	- 8.10	Color gris. Material pegajoso. Seca rápido.
TBH-417	7	2.85	- 3.45	Color negro. Seca rápido.
SM-47	4	2.40	- 3.00	Color rojo. Presencia de arena.

El método proporciona información acerca de las estructuras cristalinas que la materia contiene. Al existir una interacción entre los cristales y los rayos X, ocurre una difracción producto de un arreglo de átomos. Se libera energía con una longitud de onda, la cual es única para cada elemento, lo que permite identificar la composición del material (Harris y White, 2008).

Se realizaron dos tipos de análisis: (a) roca total y (b) fracción de arcilla. El primero se llevó a cabo en partículas menores a 75 μm , mientras que el segundo fue hecho en material menor a 2 μm . La separación por tamaños de partícula es indispensable, ya que los minerales arcillosos, al ser menores en tamaño que otros componentes, pueden generar un efecto de desproporcionalidad en el análisis (Harris y White, 2008).

El análisis de roca total consistió en someter las muestras a rayos X para analizar la reflexión de los mismos. El suelo fue homogeneizado y tamizado a un tamaño menor a 75 μm para después ser montado en el difractómetro.

Fueron sometidas a la prueba de fracción arcilla la materia menor a 2 μm (Figura 3.6). La preparación de la mezcla incluyó tratamientos para eliminar cementantes y materiales amorfos, tales como carbonatos, óxidos de hierro, óxidos de manganeso, sílice, alúmina y materia orgánica. Lo anterior, es fundamental debido a que estos componentes afectan las líneas de difracción de los materiales.

Cada muestra fue disgregada y dispersada en agua destilada durante 24 horas. En seguida, la fracción fina se decantó y se centrifugó a 6000 rpm, dejando únicamente el material del tamaño deseado. Posteriormente, se prepararon tres agregados orientados que fueron secados a temperatura ambiente durante 24 horas. El primer agregado orientado de la muestra se analizó sin tratamiento. El segundo fue tratado con etilenglicol a 70 °C durante 24 horas y posteriormente analizado. El tercer agregado fue sometido a 550 °C.

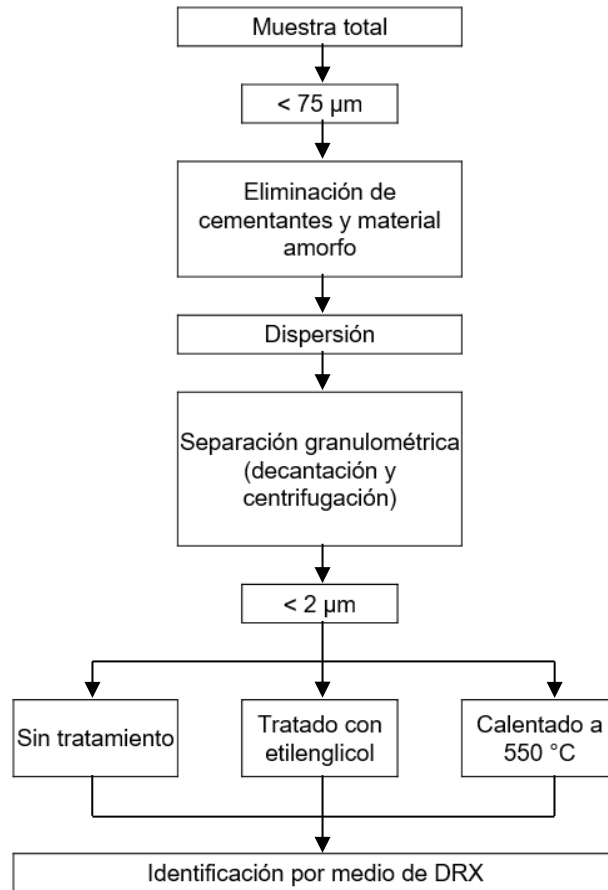


Figura 3.6. Esquema de preparación de muestras para la identificación de minerales arcillosos por DRX (adaptado de Justo y Morillo, 1999).

3.6. Contenido de materia orgánica

3.6.1. Método de ignición

El método de ensayo para determinar contenido de materia orgánica está estandarizado por la norma ASTM D2974-14 (2014). Se colocan al menos 50 g de la muestra previamente remoldeada en una cápsula de porcelana resistente a altas temperaturas (Figura 3.7a), se registra el peso y se seca al horno a 110 ± 5 °C durante al menos 16 horas. Se registra el peso seco. Posteriormente, se coloca en el horno a 400 °C, temperatura a la cual la materia orgánica se incinera (Figura 3.7b). La prueba finaliza cuando la masa de la muestra es constante tras una hora de haber estado en el horno. La materia restante es la ceniza, cuyo contenido se calcula como:

$$\text{Contenido de ceniza (\%)} = \frac{\text{Masa de la ceniza}}{\text{Masa de la muestra seca}} \times 100 \quad (3.4)$$

El contenido de materia orgánica *MO* se determina restando el porcentaje de contenido de cenizas de 100.

$$MO (\%) = 100 - \text{contenido de ceniza (\%)} \quad (3.5)$$

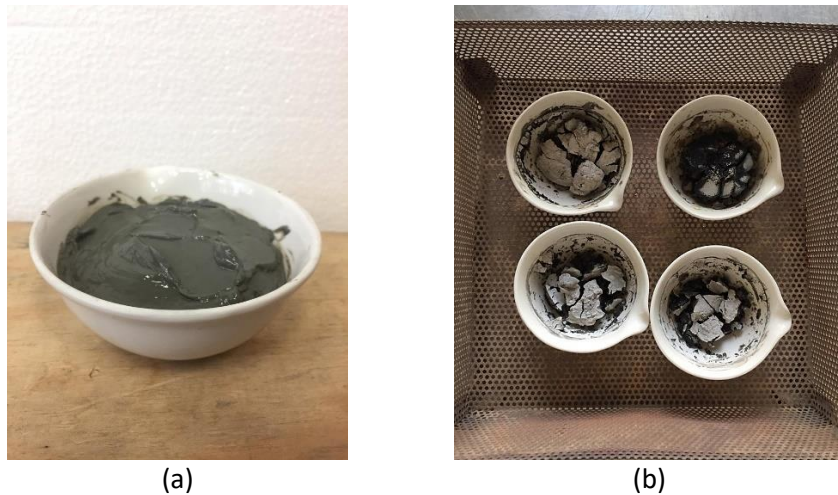


Figura 3.7: Prueba de contenido de materia orgánica: a) Preparación de la muestra. b) Muestras calcinadas.

3.6.2. Método de Walkley y Black

Se realizaron pruebas de contenido de materia orgánica con algunas modificaciones al procedimiento descrito por la NOM-021-RECNAT-2000. Este método se basa en la oxidación del carbono orgánico de suelo por medio de ácido crómico y aplicando calor espontáneo. Las pruebas fueron efectuadas en el laboratorio de Física de Suelos del Instituto de Geología de la UNAM.

La preparación de las muestras consiste en eliminar los carbonatos de las muestras con ácido clorhídrico al 10%. En forma alterna, las muestras se secan al aire, se muelen y tamizan (malla 80, de 180 μm) hasta la completa recuperación de la muestra, cuyo peso seco debe ser al menos 0.5 g. Posteriormente, el material se coloca en un matraz Erlenmeyer y se agrega ácido crómico. En seguida, se añade ácido sulfúrico para generar calor de reacción. Debido a que la presencia de cloruros en el suelo salino produce datos erróneos en la reacción, fue necesario agregar sulfato de plata a la mezcla para evitar resultados inexactos. La mezcla se deja reposar durante 30 minutos para posteriormente agregar agua destilada y ácido fosfórico. A continuación, se adiciona indicador de difenilamina y se hace la titulación con sulfato ferroso hasta que se obtiene un color verde claro (Figura 3.8).

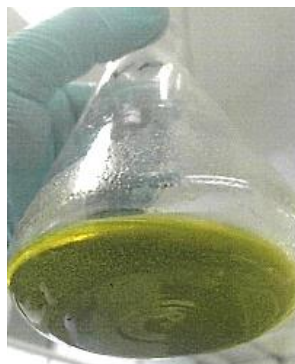


Figura 3.8. Obtención del contenido de materia orgánica mediante el método de Walkley y Black.

El contenido de carbono orgánico se obtiene como:

$$C_{orgánico} (\%) = \left(\frac{B_r - B_m}{p} \right) (N_1) (0.39) mcf \quad (3.6)$$

donde B_r es el volumen de sulfato ferroso utilizado para valorar el blanco de reactivos, B_m es el volumen de sulfato ferroso empleado para valorar la muestra, N_1 es la normalidad del sulfato ferroso, p es el peso de la muestra seca utilizada y mcf es un factor de corrección por humedad.

Para la determinación del contenido de materia orgánica, el contenido de carbono orgánico debe de multiplicarse por el factor de Van Bemmelen igual a 1.724 (Burt, 2004). El factor asume que la materia orgánica contiene 58% de carbono orgánico (1/0.58). Para suelos mexicanos, SEMARNAT (2000) recomienda utilizar el factor 1.298 (1/0.77).

$$MO (\%) = C_{orgánico} \times 1.298 \quad (3.7)$$

3.7. Determinación experimental de propiedades térmicas del suelo del sitio

3.7.1. Descripción del equipo *KD2 Pro*



Figura 3.9. Equipo *KD2 Pro*.

La aguja utilizada corresponde al modelo *KD2 Pro* fabricado por Decagon Devices, Inc (Figura 3.9). El sensor de aguja simple TR-1 (Figura 3.10) tiene 2.4 mm de diámetro, 10 cm de largo y mide conductividades térmicas en un rango de 0.1 a 4.0 W m⁻¹ °C⁻¹. El periodo de la prueba para este sensor es de 5 minutos. El sensor de la aguja doble SH-1 (Figura 3.11) posee dos agujas de 3 cm de largo, 1.24 mm de diámetro y están separadas 6 mm entre sí. La aguja doble permite medir conductividades térmicas en un rango de 0.02 a 2.0 W m⁻¹, °C⁻¹ difusividad térmica de 0.1 a 1 mm² s⁻¹ y capacidad calorífica volumétrica de 0.5 a 4 MJ m⁻³ °C⁻¹. La duración de la prueba para el sensor de aguja doble es de 2 minutos.

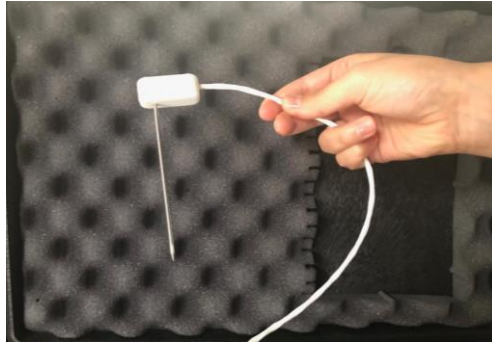


Figura 3.10. Sensor de aguja simple TR-1.



Figura 3.11. Sensor de aguja doble SH-1.

El equipo está configurado para tomar 60 lecturas, independientemente de la duración de la prueba para cada sensor. Asimismo, incluye el programa *KD2 Pro Utility* que permite descargar el registro de las mediciones de temperatura efectuadas para llevar a cabo el análisis de la prueba.

3.7.2. Calibración del equipo

La hipótesis del método indica que la aguja es un medio lineal e infinito, sin embargo, en la realidad ésta tiene un diámetro específico. Lo anterior, ocasiona una desviación entre los valores medidos experimentalmente y los calculados. Para corregir dichas diferencias se efectúa una calibración comparando la conductividad térmica de un material estándar con propiedades conocidas λ_t con la medición efectuada por el equipo λ_e . El factor de calibración C se calcula como (ASTM D5334-14, 2014):

$$C = \frac{\lambda_t}{\lambda_e} \quad (3.8)$$

El equipo incluye un material estándar para la calibración de cada sensor. Para la aguja simple, se trata de un bloque de silicón epóxico con una conductividad térmica de $0.99 \text{ W m}^{-1}\text{C}^{-1}$ (Figura 3.12a). El material estándar para la aguja doble es un bloque de Delrin (Figura 3.12b) con una conductividad térmica. De acuerdo con la norma ASTM D5334-14 (2014), la lectura debe tener una diferencia máxima admisible de 10% del valor teórico. El factor de calibración obtenido para el equipo en laboratorio es 1.03, teniendo una diferencia entre el valor medido y el teórico de 2.93%.



Figura 3.12. a) Calibración de la aguja simple con silicón epóxico. b) Calibración de la aguja doble con bloque de Delrin.

Además de los materiales estándar incluidos, la calibración puede efectuarse con glicerina anhidra al 99%, que tiene una conductividad térmica conocida de $0.286 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$. También es posible usar una mezcla de agua (destilada o de la llave) estabilizada con 5 g L^{-1} de agar, siendo que existen valores publicados de la conductividad térmica del agua en función de la temperatura (Portillo-Arreguín *et al.*, 2018).

3.7.3. Desarrollo de la prueba

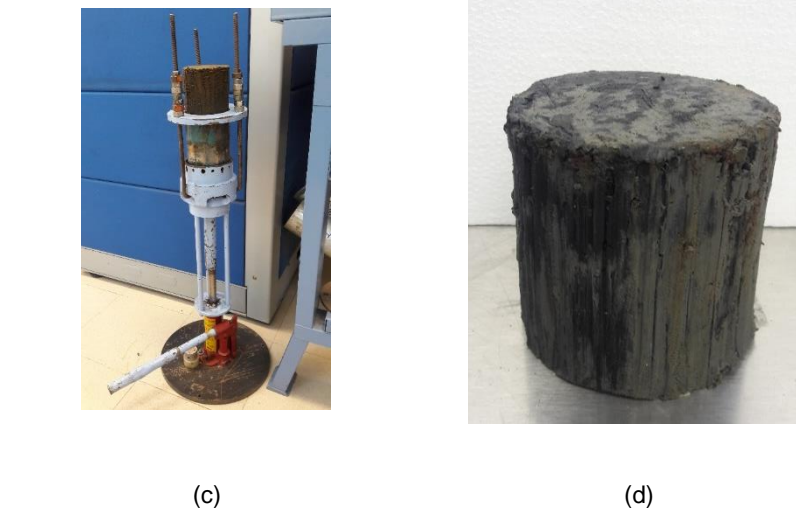
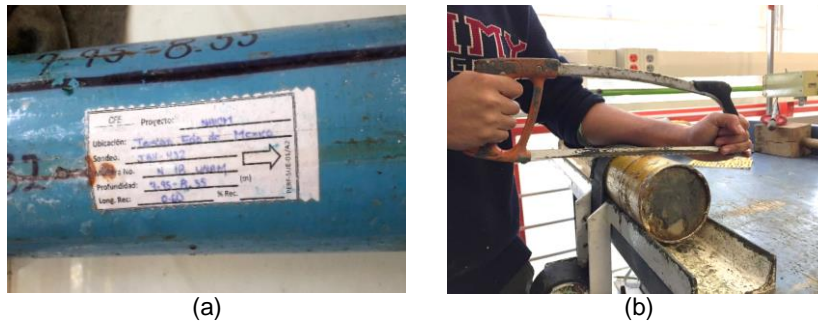


Figura 3.13. Preparación de la muestra: a) Tubo de pared delgada, b) Corte, c) Extracción por medio de un gato hidráulico, d) Muestra inalterada.

De acuerdo con la norma ASTM D5334-14 (2014) para que la prueba sea considerada representativa debe llevarse a cabo en muestras de un diámetro mínimo de 50 mm con una altura de 100 ± 30 mm. La preparación de la muestra consistió en cortar una sección de 200 mm de tubo *Shelby*, para posteriormente extraer el suelo inalterado.

El sensor de aguja simple se introdujo completamente en la muestra. Debido a que se trata de arcillas saturadas, fue posible instalar el sensor simplemente empujándolo. Para muestras más duras, es necesario taladrar un agujero antes de introducirlo y hacer uso de grasa térmica para asegurar el contacto entre el sensor y la muestra. Se debe garantizar que existe un mínimo de 1.5 cm de material paralelo al sensor en todas las direcciones (ASTM D5334-14, 2014). Para garantizar el equilibrio térmico entre el sensor, la muestra y el medio, antes de comenzar la prueba, el sensor se dejó instalado dentro de la muestra durante 15 minutos, posteriormente, se dio inicio.



Figura 3.14. Prueba de la aguja.

La prueba se compone de dos fases: calentamiento y recuperación. En la primera, se aplicó una corriente eléctrica conocida induciendo la inyección de calor a una tasa constante. Lo anterior produjo el aumento de la temperatura en el medio, que se registró a intervalos cortos de tiempo. En la segunda etapa se registró la disminución de la temperatura con respecto al tiempo. La forma típica de la gráfica temperatura contra tiempo se presenta en la Figura 3.15.

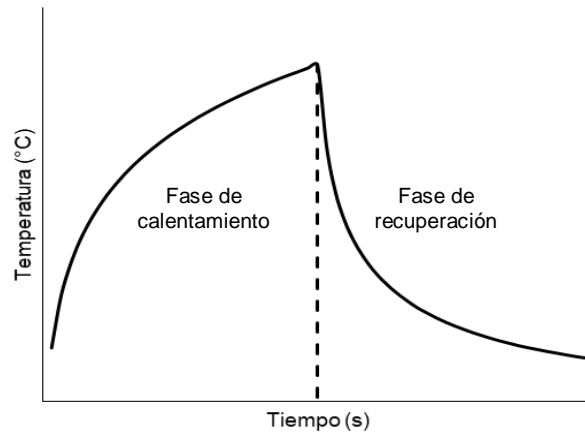


Figura 3.15. Forma típica de la gráfica temperatura contra tiempo de la prueba de aguja simple. Como se muestra en la Figura 3.16, tanto la fase de calentamiento como la de recuperación puede dividirse en tres regiones (Lockmuller *et al.*, 2003):

- A. Comprende los primeros segundos de la prueba y corresponde a la etapa en la que la respuesta del sistema está afectada por las propiedades térmicas de la aguja.
- B. Representa una etapa semi-establecida en la que la variación de temperatura es lineal con respecto al logaritmo del tiempo.
- C. Es la fase final de la prueba en la que las fronteras de la muestra están afectadas por los cambios de temperatura, dejando de cumplir una de las hipótesis del método.

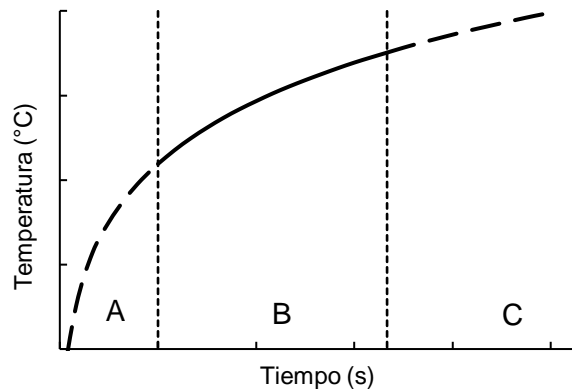


Figura 3.16. Etapas de una prueba típica de conductividad térmica durante la fase de calentamiento (ASTM D5334-14, 2014).

Al finalizar, el procedimiento se repitió con el sensor de aguja doble, cumpliendo las mismas especificaciones y poniendo especial atención a que ambas agujas permanecieran paralelas en todo momento. La gráfica de una prueba típica realizada con el sensor de aguja doble se muestra en la Figura 3.17.

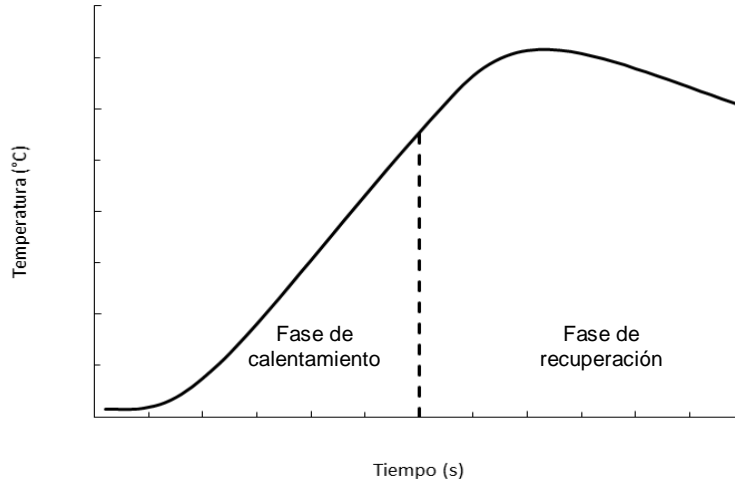


Figura 3.17. Forma típica de la gráfica de cambio de temperatura contra tiempo de la prueba de aguja doble.

Se observa que, a pesar de que la fase de calentamiento concluye, el máximo cambio de temperatura se registra después de que ésta concluye. Lo anterior se debe a que, para que la teoría de una fuente lineal de calor sea válida para la aguja doble, se debe inducir un pulso instantáneo. No obstante, en la práctica no es posible reproducir el fenómeno, por lo que se hace uso de un pulso de calor de corta duración, provocando un retraso en el tiempo en el que ocurre el máximo cambio de temperatura (Bristow *et al.*, 1994). El cambio de temperatura no se ve afectado por este retraso.

3.7.4. Métodos de interpretación

Métodos de interpretación del equipo KD2 Pro

Al emplear el método de flujo de calor transitorio y lineal para la obtención de propiedades térmicas, idealmente el sensor debería tener un largo 100 veces mayor que su diámetro para hacer válida la hipótesis de la fuente de calor unidimensional. No obstante, un sensor que cumpla dichas características no sería práctico de utilizar tanto en laboratorio como en campo. Las características del equipo generan una variación de la teoría, por lo que los datos deben de ajustarse (Decagon Devices Inc., 2014). El equipo *KD2 Pro* emplea los métodos de ajuste descritos a continuación para analizar las mediciones efectuadas.

En el caso de la aguja simple se trata de una variación del método simplificado propuesto por la ASTM D5334-14 (2014). Se aplica una cantidad de calor durante un tiempo t_h (Q). Para la fase de calentamiento de la prueba, los cambios de temperatura se registran de la siguiente manera:

$$T - T_0 = m_2 t + m_3 \ln t \quad (3.9)$$

donde T_0 es la temperatura al inicio de la medición (°C) en el tiempo $t = t_0$, m_2 es la tasa de variación constante de la temperatura ambiente o *drift* y m_3 es la pendiente de incremento de temperatura con respecto al logaritmo de temperatura. Durante la etapa de recuperación:

$$T = m_1 + m_2 t + m_3 \ln \left[\frac{t}{t - t_h} \right] \quad (3.10)$$

La conductividad térmica se calcula como:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi m_3} \quad (3.11)$$

Debido a que las ecuaciones corresponden a aproximaciones de la integral exponencial, sólo se utilizan los últimos dos tercios de los datos obtenidos durante cada fase, ya que se tiene una mejor representación de la conductividad térmica en esa porción.

Para la aguja doble, se hace un ajuste no lineal por medio del método de Levenberg-Marquardt. Los cambios de temperatura registrados por el sensor se ajustan de la manera siguiente:

$$T^* = b_0 t + b_1 Ei \left(\frac{b_2}{t} \right) \quad \text{Para } t \leq t_h \quad (3.12)$$

$$T^* = b_0 t + b_1 \left\{ Ei \left(\frac{b_2}{t} \right) - Ei \left(\frac{b_2}{t - t_h} \right) \right\} \quad \text{Para } t > t_h \quad (3.13)$$

siendo b_1 y b_2 las constantes de ajuste.

$$T^* = \frac{4\pi(T - T_0)}{Q} \quad (3.14)$$

El término b_0 en ambas ecuaciones representa una consideración a la variación constante de la temperatura ambiente (*drift*) al igual que m_2 en el caso de la aguja simple. Con las constantes de ajuste es posible calcular:

$$\lambda = \frac{1}{b_1} \quad (3.15)$$

$$D = \frac{r^2}{4b_2} \quad (3.16)$$

El método de Levenberg-Marquardt (L-M) es una herramienta para resolver modelos no lineales por medio de mínimos cuadrados. Consiste en ajustar una función parametrizada al conjunto de datos medidos. El objetivo es minimizar la suma de los cuadrados de los residuos entre los datos y la función (Draper y Smith, 1998). El método L-M calcula, a través de iteraciones, el valor mínimo para la función de la suma de cuadrados. Se trata de una combinación de los métodos del gradiente (*steepest descent*) y Gauss-Newton (Marquardt, 1963), por lo que se comporta como un modelo de gradiente cuando la solución calculada se encuentra lejos de la óptima, y como Gauss-Newton cuando la solución óptima está próxima. La ventaja del algoritmo L-M es que es un modelo estable, como el método del gradiente, y tiende a converger a la solución rápidamente, tal como Gauss-Newton. El desarrollo del algoritmo L-M queda fuera del alcance de esta investigación. Los lectores interesados, pueden consultar la publicación de Marquardt (1963) incluida en las Referencias.

Método de Análisis Simplificado

Se trata de una interpretación simple desarrollada por la ASTM D5334-14 (2014) para la determinación de propiedades térmicas empleando la aguja simple. El Análisis Simplificado de la prueba tiene el objetivo de estimar el valor de la conductividad térmica por medio de las Ecs. (3.1) y (3.3). Para valores pequeños del argumento x , la integral exponencial puede aproximarse como:

$$Ei(-x) \approx \gamma + \ln(x) \quad (3.17)$$

donde γ es la constante de Euler igual a 0.5772. Esta condición se satisface para valores pequeños de r y/o valores grandes de t . Así, la ecuación para la fase de calentamiento se reduce a:

$$\Delta T \cong \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln(t) + \frac{Q}{4\pi\lambda} \gamma \quad (3.18)$$

De manera similar, la ecuación para la fase de recuperación se expresa como:

$$\Delta T \cong \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln\left(\frac{t}{t-t_h}\right) + \frac{Q}{4\pi\lambda} \gamma \quad (3.19)$$

Ambas expresiones tienen la forma de una ecuación lineal respecto al logaritmo del tiempo, en las que la pendiente S depende únicamente de la conductividad térmica:

$$S = \frac{CQ}{4\pi\lambda} \quad (3.20)$$

donde C es el factor de calibración igual a 1.03. La pendiente puede obtenerse mediante una regresión lineal. En la fase de calentamiento (Figura 3.18a) se grafica la temperatura contra $\ln(t)$ para obtener la pendiente S_h y, en la fase de recuperación (Figura 3.18b) se grafica temperatura contra $\ln(t/(t-t_h))$ para obtener la pendiente S_c .

En ambas gráficas, deben excluirse los datos de los primeros 10 a 30 s de la prueba, ya que corresponden a la etapa en la que el sistema se ve afectado por las propiedades térmicas de la aguja (Figura 3.16). De igual manera, es necesario verificar que los puntos obtenidos en ambas gráficas sean aproximadamente equidistantes. De no ser así, algunos valores deben descartarse hasta satisfacer la condición anterior. La razón es que se trata de regresiones lineales con respecto a logaritmos, los cuales se inclinan a incrementos cortos y a resultar en valores muy cercanos. Esto afecta directamente la obtención de las pendientes, ya que la regresión tiende hacia esos valores, descartando el resto de puntos.

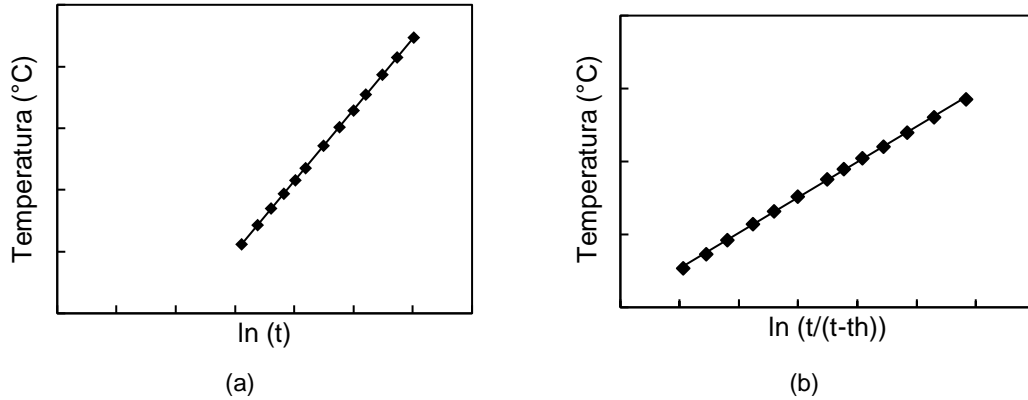


Figura 3.18. Obtención de las pendientes: a) S_h para la fase de calentamiento. b) S_c para la fase de recuperación.

Método de Bristow *et al.* (1994)

La teoría del pulso de calor de corta duración de Bristow *et al.* (1994) es un método de interpretación de datos para la obtención de propiedades térmicas mediante el sensor de aguja doble. La solución analítica para un pulso de calor de corta duración t_h proveniente de una fuente lineal e infinita se expresa como:

$$T(r, t) = \begin{cases} \frac{Q}{4\pi\lambda} E_1\left(\frac{r^2 c_{cv}}{4\lambda t}\right) & \text{Para } t \leq t_h \\ \frac{Q}{4\pi\lambda} \left[E_1\left(\frac{r^2 c_{cv}}{4\lambda t}\right) - E_1\left(\frac{r^2 c_{cv}}{4\lambda(t - t_h)}\right) \right] & \text{Para } t > t_h \end{cases} \quad (3.21)$$

donde Q es la tasa de transferencia de calor por unidad de longitud ($W m^{-1}$) y r la distancia desde la fuente de calor (m).

Esta solución describe el incremento de temperatura cuando el calentamiento inicia en $t=0$ y concluye en $t= t_h$. Considerando la Ec. (1.2), la Ec. (3.21) se expresa como:

$$T(r, t) = \begin{cases} \frac{Q}{4\pi D c_{cv}} E_1\left(\frac{r^2}{4Dt}\right) & \text{Para } t \leq t_h \\ \frac{Q}{4\pi D c_{cv}} \left[E_1\left(\frac{r^2}{4Dt}\right) - E_1\left(\frac{r^2}{4D(t - t_h)}\right) \right] & \text{Para } t > t_h \end{cases} \quad (3.22)$$

Siendo su gráfica la que se indica en la Figura 3.19.

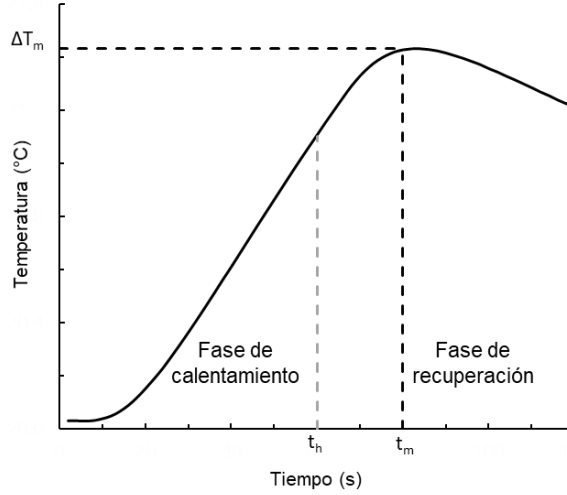


Figura 3.19. Gráfica típica de una prueba de propiedades térmicas empleando el sensor de aguja doble.

donde ΔT_m es el máximo cambio de temperatura (°C) que ocurre en el tiempo t_m . Al derivar la Ec. (3.22) e igualándola a 0 se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial t} T(r, t) = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{Q}{4\pi D c_{cv}} \left[E_1 \left(\frac{r^2}{4Dt} \right) - E_1 \left(\frac{r^2}{4D(t - t_h)} \right) \right] \right\} \quad (3.23)$$

Se sabe que (Abramowitz y Stegun, 1972):

$$E_1(x) = \int_1^{\infty} u^{-1} e^{-xu} du \quad (3.24)$$

por lo tanto,

$$\frac{\partial}{\partial t} E_1 \left(\frac{r^2}{4Dt} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \int_1^{\infty} u^{-1} e^{-\frac{r^2}{4Dt}u} du = \int_1^{\infty} u^{-1} \frac{\partial}{\partial t} e^{-\frac{r^2}{4Dt}u} du = \int_1^{\infty} \frac{r^2}{4Dt^2} e^{-\frac{r^2}{4Dt}u} du \quad (3.25)$$

La integración se lleva a cabo con un cambio de variable, en el que:

$$w = \frac{r^2}{4Dt} u \quad dw = \frac{r^2}{4Dt} du$$

si:

$$\begin{aligned} u = 1 & \quad w = \frac{r^2}{4Dt} \\ u = \infty & \quad w = \infty \end{aligned}$$

entonces:

$$\begin{aligned} \int_1^{\infty} \frac{r^2}{4Dt^2} e^{-\frac{r^2}{4Dt}u} du &= \int_{\frac{r^2}{4Dt}}^{\infty} \frac{1}{t} e^{-w} dw = \frac{1}{t} \lim_{z \rightarrow \infty} \int_{\frac{r^2}{4Dt}}^z e^{-w} dw = \frac{1}{t} \lim_{z \rightarrow \infty} [-e^{-w}]_{\frac{r^2}{4Dt}}^z \\ &= \frac{1}{t} \lim_{z \rightarrow \infty} \left[-e^{-z} + e^{-\frac{r^2}{4Dt}} \right] \\ \frac{\partial}{\partial t} E_1 \left(\frac{r^2}{4Dt} \right) &= \frac{1}{t} e^{-\frac{r^2}{4Dt}} \end{aligned} \quad (3.26)$$

De manera análoga, se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial t} E_1 \left(\frac{r^2}{4D(t-t_h)} \right) = \frac{1}{t-t_h} e^{-\frac{r^2}{4D(t-t_h)}} \quad (3.27)$$

Sustituyendo las Ecs. (3.26) y (3.27) en la Ec. (3.23):

$$\frac{\partial}{\partial t} T(r, t) = \frac{Q}{4\pi D c_{cv}} \left[\frac{1}{t} e^{-\frac{r^2}{4Dt}} - \frac{1}{t-t_h} e^{-\frac{r^2}{4D(t-t_h)}} \right] \quad (3.28)$$

Igualando a 0 y $t = t_m$:

$$\frac{1}{t_m} e^{-\frac{r^2}{4Dt_m}} = \frac{1}{t_m - t_h} e^{-\frac{r^2}{4D(t_m - t_h)}} \quad (3.29)$$

Aplicando \ln :

$$-\frac{r^2}{4Dt_m} = \ln \left[\frac{t_m}{t_m - t_h} \right] - \frac{r^2}{4(t_m - t_h)} \quad (3.30)$$

Despejando, la difusividad térmica D queda expresada como:

$$D = \frac{r^2}{4} \left\{ \frac{\frac{1}{t_m - t_h} - \frac{1}{t_m}}{\ln \left[\frac{t_m}{t_m - t_h} \right]} \right\} \quad (3.31)$$

Conociendo el valor de D , la capacidad calorífica volumétrica c_{cv} puede determinarse al ser despejada de la Ec. (3.28) y, la conductividad térmica λ , a partir de la Ecuación (1.2).

$$c_{cv} = \frac{Q}{4\pi D \Delta T_m} \left[E_i \left(-\frac{r^2}{4D(t_m - t_h)} \right) - E_i \left(-\frac{r^2}{4Dt_m} \right) \right] \quad (3.32)$$

Para su resolución es posible realizar una aproximación racional polinomial (Abramowitz y Stegun, 1972). Siendo que:

$$E_1(x) = -E_1(-x)$$

entonces:

$$c_{cv} = \frac{Q}{4\pi D \Delta T_m} \left[-E_1\left(\frac{r^2}{4D(t_m - t_h)}\right) + E_1\left(\frac{r^2}{4Dt_m}\right) \right] \quad (3.33)$$

$$E_1(x) + \ln(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + \epsilon(x) \quad \text{Para } 0 \leq x \leq 1 \quad (3.34)$$

donde el error ϵ :

$$|\epsilon(x)| = 2x10^{-7}$$

y los coeficientes:

$a_0 =$	-0.57721566	$a_3 =$	0.05519968
$a_1 =$	0.99999193	$a_4 =$	-0.000976004
$a_2 =$	-0.24991055	$a_5 =$	0.00107857

De manera similar,

$$xe^x E_1(x) = \frac{x^4 + a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4}{x^4 + b_1x^3 + b_2x^2 + b_3x + b_4} + \epsilon(x) \quad \text{Para } 1 \leq x < \infty \quad (3.35)$$

donde el error ϵ :

$$|\epsilon(x)| = 2x10^{-8}$$

y los coeficientes:

$a_1 =$	8.5733287401	$b_1 =$	9.5733223454
$a_2 =$	18.0590169730	$b_2 =$	25.6329561486
$a_3 =$	8.6347608925	$b_3 =$	21.0996530827

$$a_4 = 0.2677737343$$

$$b_4 = 3.9584969228$$

4. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

En este capítulo se exponen y discuten los resultados obtenidos a partir de las pruebas de laboratorio efectuadas. Los valores se dan a conocer por medio de tablas de estadística descriptiva. Los resultados de cada muestra pueden consultarse detalladamente en el Anexo A. Asimismo, se discute la relación entre las propiedades índice y térmicas del suelo estudiado, se comparan las mediciones efectuadas con los sensores de aguja simple y doble, se analiza el comportamiento de algunos modelos predictivos de conductividad térmica y se comparan los métodos de interpretación de datos.

Comúnmente, en el diseño de obras geotécnicas existe incertidumbre en los valores característicos de las propiedades del suelo, la cual se debe principalmente a la variabilidad natural del medio (Det Norske Veritas As, 2012). Los modelos estadísticos son una herramienta útil para el manejo de la incertidumbre, garantizando así la seguridad y rentabilidad del proyecto geotécnico (Benjamin y Cornell, 1970). En este capítulo también se presentan los histogramas de algunas propiedades del suelo analizado, así como el ajuste de los datos a distribuciones normales.

4.1. Propiedades índice del suelo

La Tabla 4.1 muestra las propiedades índice del suelo estudiado obtenidas en laboratorio. En general, los valores coinciden con lo reportado por Alanís (2003) para las zonas del ex Lago de Texcoco con alta salinidad. Las muestras analizadas exhiben densidades de sólidos más altas que las obtenidas por Alanís (2003), producto de la elevada concentración salina presente en las muestras ensayadas. Los contenidos naturales de agua varían en un rango de 80 a 371%, lo que concuerda con la descripción de Murillo y García (1978) sobre las características de la FAS. Las relaciones de vacíos y porosidades se ajustan a las reportadas por Marsal y Mazari (1959) para los suelos del Valle de México. Las relaciones de vacíos muestran una desviación estándar grande, ya que están fuertemente afectadas por la presencia de sales (Farouki, 1981). Los límites líquidos presentan valores altos, con un rango de 97 a 416%. De acuerdo con Ridlo *et al.* (2012), lo anterior se asocia al contenido de esmectita y de materia orgánica que el suelo presenta. Se observa que la desviación estándar de los índices plásticos es alta, ya que la fase sólida del suelo es considerablemente heterogénea. Las muestras se clasifican de acuerdo con el SUCS en arcillas altamente compresibles (CH) y en limos altamente compresibles (MH).

Tabla 4.1. Estadística descriptiva de las propiedades índice del suelo del ex Lago de Texcoco.

Propiedades índice	<i>N</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>CV</i>	Valor Mínimo	Valor Máximo
Densidad de sólidos, G_s (g cm^{-3})	40	2.92	0.19	6.6%	2.56	3.34
Densidad de la muestra, ρ (g cm^{-3})	40	1.25	0.08	6.5%	1.13	1.48
Contenido natural de agua, w (%)	40	218.77	77.53	35.4%	80.43	371.75
Relación de vacíos, e	40	6.83	2.25	32.9%	2.60	11.78
Porosidad, n	40	0.86	0.05	5.7%	0.72	0.92
Grado de saturación, S_r	40	0.97	0.02	1.7%	0.92	0.99
Contenido volumétrico de agua, θ_w (%)	40	83.54	5.45	6.5%	67.98	90.49
Límite líquido (%)	40	257.79	84.05	32.6%	97.05	416.68
Límite plástico (%)	40	73.23	25.93	35.4%	35.79	156.94
Índice plástico, IP (%)	40	186.46	69.47	37.3%	45.58	306.06

Nota: *N* = número de pruebas, *m* = media, *s* = desviación estándar, *CV* = coeficiente de variación.

En la Figura 4.1 se muestran los perfiles determinados de las propiedades índice. No se presentan variaciones significativas en función de la profundidad. La densidad ρ , la densidad de sólidos G_s , la porosidad n y el contenido volumétrico de agua θ_w tienen un comportamiento consistente a lo largo de todo el perfil, mientras que el contenido natural de agua w y la relación de vacíos e tienen amplias desviaciones.

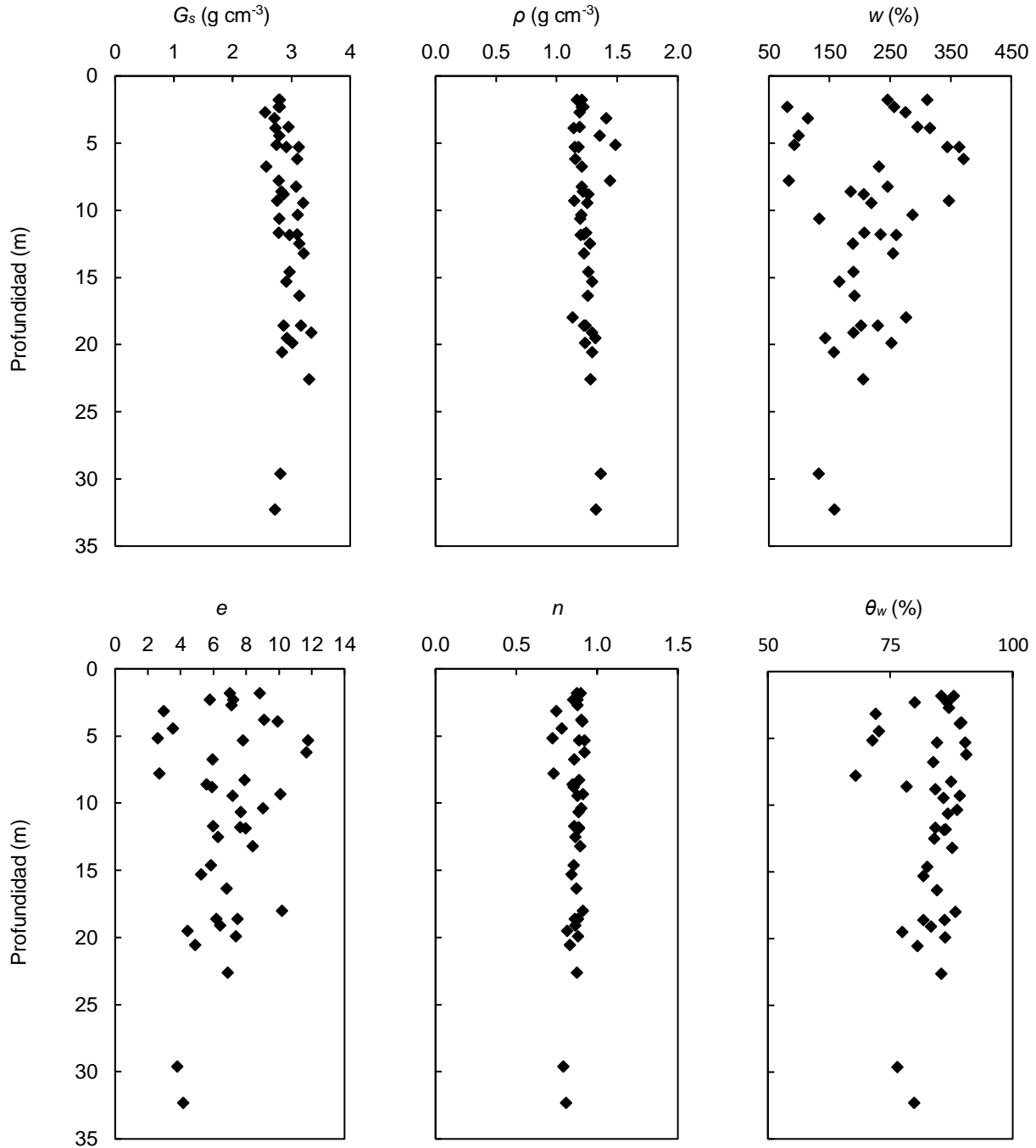


Figura 4.1. Perfil de propiedades índice del suelo del ex Lago de Texcoco.

En la Figura 4.2 se presentan los histogramas y las curvas de distribución normal de la densidad de sólidos, la densidad de las muestras, el contenido de agua y la relación de vacíos.

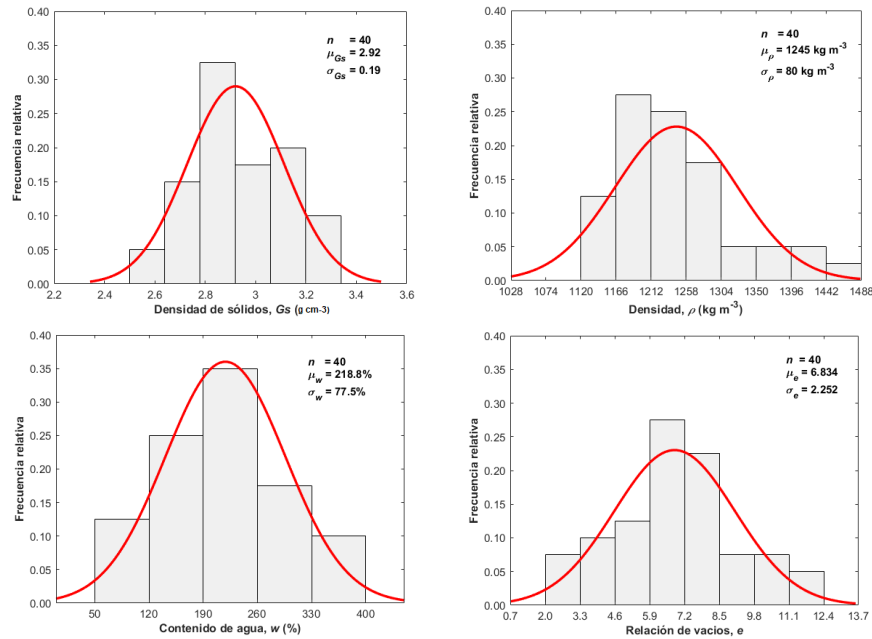


Figura 4.2. Histogramas y curvas de distribución normal de propiedades índice del suelo del ex Lago de Texcoco.

4.2. Mineralogía

La Tabla 4.2 presenta los resultados del análisis mineralógico de las muestras, obtenidos a partir de pruebas de difracción de Rayos X. Éstos coinciden con lo reportado por diversos autores que han realizado caracterizaciones del suelo del Valle de México (Sección 2.2). De la Tabla 4.2 se observa que la fracción de minerales arcillosos (menor a $2\ \mu m$) de las muestras totales varían entre 10% y 15%, por lo que el suelo analizado corresponde a limos arcillosos o arcillas limosas. Los porcentajes de minerales arcillosos obtenidos son menores a los reportados por Mesri (1975), sin embargo, se encuentran dentro de los rangos presentados por Díaz-Rodríguez y Santamarina (2001) para las arcillas del centro de la Ciudad de México. Respecto al tipo de minerales arcillosos, se observa la presencia de illita, caolinita y esmectita, que coincide con lo reportado en otros estudios (Sección 2.2). Por último, el alto contenido de halita (sal de roca) se debe a la alta concentración de sal presente en el sitio. En el Anexo B se muestran los difractogramas obtenidos en el análisis mineralógico.

Tabla 4.2. Resultados del análisis mineralógico del suelo del ex Lago de Texcoco.

Sondeo	Muestra	Minerales identificados	Contenido (%)	Conductividad térmica, λ ($W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$) ³
SM-37	17	Plagioclasa intermedia: Albita	38	2.3
		Calcita	15	3.4
		Halita	18	6.5
		Anfíbol tipo actinolita	14	2.1
		Ilita	5	1.8
		Caolinita	3	2.8
		Esmectita	7	1.8
SM-14bis	4	Plagioclasa intermedia: Albita	44	2.3
		Calcita	16	3.4
		Halita	20	6.5
		Anfíbol tipo actinolita	10	2.1
		Esmectita	10	1.8
TBH-356	2bis	Plagioclasa intermedia: Albita	60	2.3
		Calcita	10	3.4
		Halita	7	6.5
		Hexahidrita	6	0.7
		Anfíbol tipo actinolita	5	2.1
		Ilita	2	1.8
		Caolinita	2	2.8
		Esmectita	8	1.8
TBH-417	7	Plagioclasa intermedia: Albita	59	2.3
		Calcita	8	3.4
		Halita	9	6.5
		Hexahidrita	4	0.7
		Anfíbol tipo actinolita	5	2.1
		Ilita	4	1.8
		Esmectita	11	1.8
SM-47	4	Plagioclasa intermedia: Albita	47	2.3
		Calcita	29	3.4
		Halita	10	6.5
		Ilita	2	1.8
		Esmectita	12	1.8

4.3. Materia orgánica

El contenido de materia orgánica *MO* de 37 muestras determinado mediante el método de ignición se presenta en la Tabla 4.3. Los resultados obtenidos coinciden con los porcentajes reportados por Marsal y Mazari (1959), Mesri (1975) y Díaz-Rodríguez *et al.* (1998) para los suelos del Valle de México. En la Figura 4.3 se muestra el perfil del contenido de materia

³ Obtenido de Abuel-Naga *et al.*, 2015; Horai, 1971; Kodešová, 2013; Zafor *et al.*, 2015.

orgánica estimado a partir de un método de ignición (norma ASTM D2974-14). En los primeros 10 metros los valores varían considerablemente, y se vuelven más consistentes a medida que la profundidad aumenta. Los resultados anteriores, se verificaron con pruebas adicionales mediante el método de Walkley y Black en seis muestras representativas del suelo en estudio.

Se encontró una relación directa entre el contenido de materia orgánica *MO* y las propiedades reconocidas a través de inspecciones visuales. Las muestras que mostraron mayor contenido de materia orgánica, en general, eran color rojo y verde, textura suave y con un olor penetrante. Por otro lado, aquellas con valores bajos de *MO* eran color gris y consistencia dura.

Tabla 4.3. Contenidos de materia orgánica del suelo del ex Lago de Texcoco.

	<i>N</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>CV</i>	Valor Mínimo	Valor Máximo
Contenido de materia orgánica <i>MO</i> (%)	37	8.55	2.87	33.5%	2.80	16.40

Nota: *N* = número de pruebas, *m* = media, *s* = desviación estándar, *CV* = coeficiente de variación.

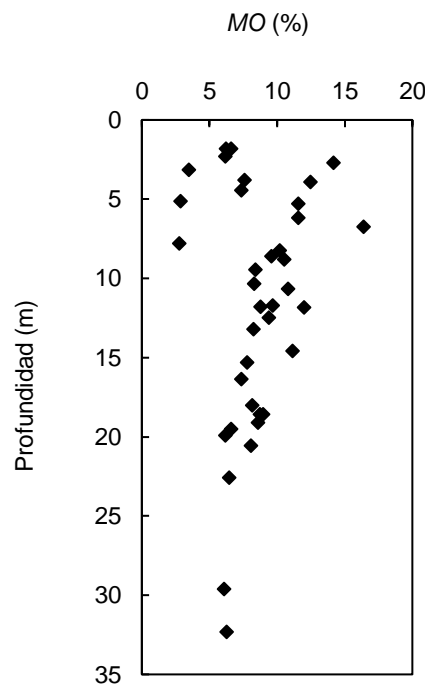


Figura 4.3. Perfil de contenido de materia orgánica del suelo del ex Lago de Texcoco.

En la Tabla 4.4 se comparan los contenidos de materia orgánica (*MO*) obtenidos en seis muestras mediante los métodos de ignición y de Walkley y Black. El método de ignición es un procedimiento sencillo y rápido de efectuar, normado por ASTM D2974-14., pero que puede presentar errores debido a los cambios de peso por la pérdida de dióxido de carbono, combustión incompleta y la pérdida de agua estructural de los minerales arcillosos (Ball, 1964). Por otra parte, el método de Walkley y Black, normado en México por la NOM-021-RECNAT-2000, permite estimar el contenido de materia orgánica del suelo mediante la determinación del contenido de carbono orgánico. En este método pueden presentarse

errores debido a que asume que el contenido de carbono orgánico es constante en el suelo (Ball, 1964) o bien, que ocurra una oxidación incompleta en el ensaye (Hoogsteen *et al.*, 2015). De acuerdo con Burt (2004), no es recomendable emplear el método de Walkley y Black cuando el suelo tiene un contenido de materia orgánica mayor que 8%. De igual manera, el método de Walkley y Black es susceptible a presentar problemas de escala, ya que la prueba se lleva a cabo en muestras de 0.5 g que pudieran no ser representativas del material del terreno, a diferencia del método de ignición que se realiza con muestras de al menos 50 g. A pesar de que el error porcentual obtenido entre ellos en las pruebas realizadas es considerable, los contenidos de *MO* determinados por medio de ambos métodos se encuentran dentro de los rangos señalados por Marsal y Mazari (1959), Mesri (1975) y Díaz-Rodríguez *et al.* (1998).

Tabla 4.4. Comparación de contenidos de materia orgánica obtenidos mediante distintos métodos

Sondeo	Muestra	MO (%)		Error (%)
		Método de ignición	Método de Walkley y Black	
SM-36	5	8.2	10.1	23.2
SM-28	9bis	6.5	5	23.1
SM-37	10	2.9	1.9	-34.5
SM-TP-26	15	16.4	16.8	2.4
TBH-432	18	10.2	7.6	-25.5
TBH-417	25	12	11.5	-4.2

En la Figura 4.4 se presenta el histograma y el ajuste a una distribución normal del contenido de materia orgánica obtenido con el método de ignición.

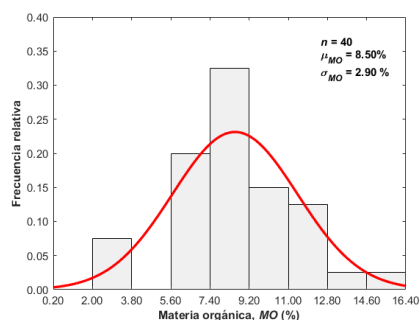


Figura 4.4. Histograma y curva de distribución normal del contenido de materia orgánica del suelo del ex Lago de Texcoco.

4.4. Propiedades térmicas

En la Tabla 4.5 se presentan las propiedades térmicas del sitio obtenidas en laboratorio. Asimismo, en la Figura 4.5 se muestran los perfiles de las propiedades térmicas. De acuerdo con las definiciones de cada propiedad y con la Ec. 1.2, teniendo una conductividad térmica constante, la difusividad térmica y la capacidad calorífica volumétrica son inversamente proporcionales. Los datos obtenidos comprueban que, a mayor profundidad, la capacidad calorífica volumétrica se reduce, mientras que la difusividad térmica presenta un incremento. La conductividad térmica no presenta variaciones significativas en función

de la profundidad. Como complemento a la caracterización térmica de los suelos de la Ciudad de México, en el Anexo C se puede consultar la medición *in-situ* que se llevó a cabo en la zona de Santa Fe.

Tabla 4.5. Estadística descriptiva de las propiedades térmicas del suelo del ex Lago de Texcoco.

Propiedades térmicas	<i>N</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	CV	Valor Mínimo	Valor Máximo
Conductividad térmica con aguja simple, λ ($W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)	40	0.726	0.041	5.6%	0.649	0.840
Conductividad térmica con aguja doble, λ ($W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)	40	0.710	0.046	6.4%	0.625	0.851
Capacidad calorífica volumétrica, c_{cv} ($MJ\ m^{-3}\ ^\circ C^{-1}$)	40	2.577	0.436	16.9%	1.496	3.351
Difusividad térmica, D ($mm^2\ s^{-1}$)	40	0.295	0.086	29.1%	0.200	0.625

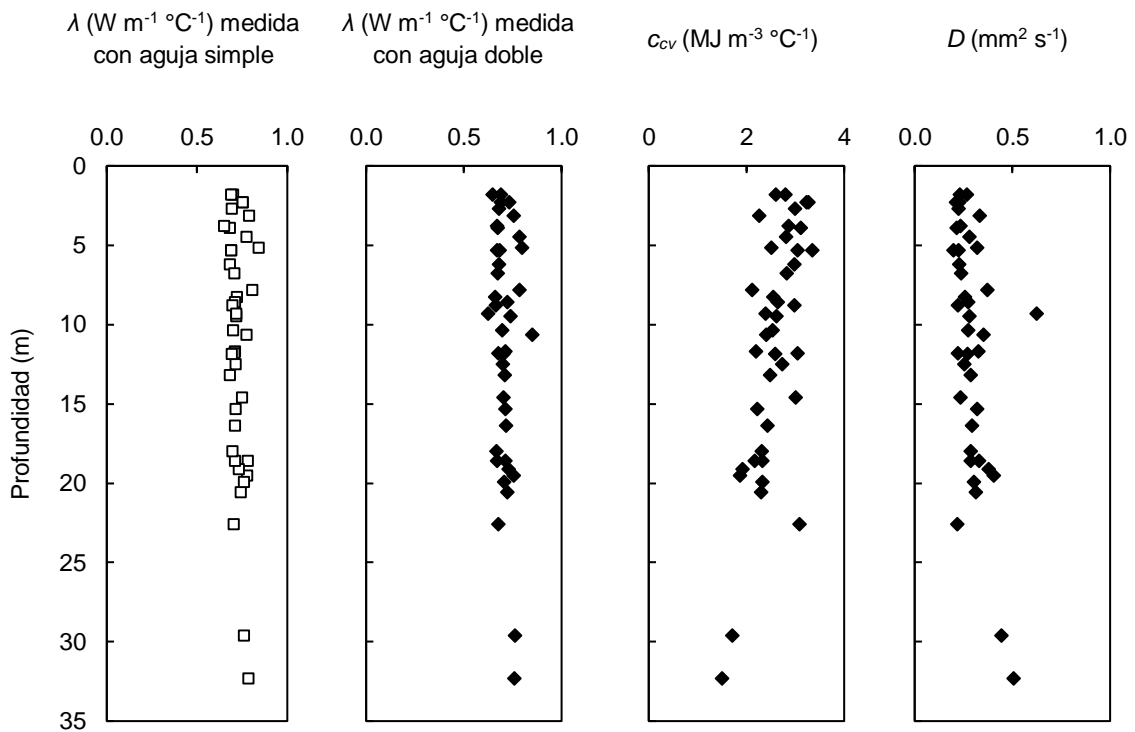


Figura 4.5. Perfil de propiedades térmicas del suelo del ex Lago de Texcoco en función de la profundidad.

En la Figura 4.6 se presentan los histogramas y los ajustes a distribuciones normales de las propiedades térmicas obtenidas.

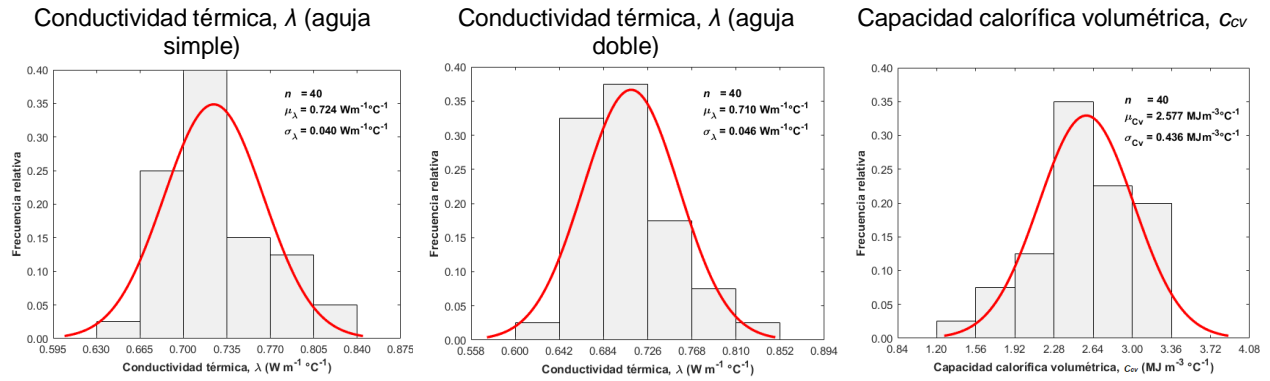
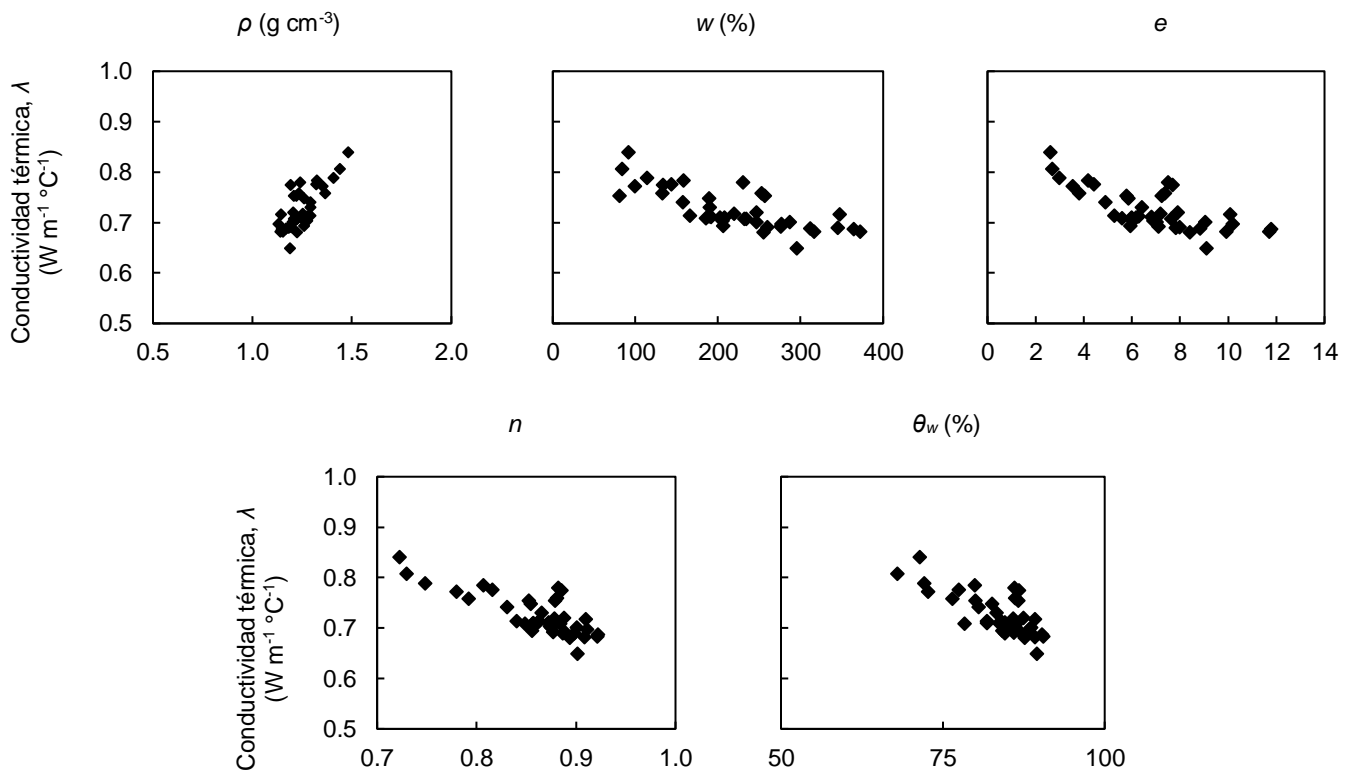


Figura 4.6. Histograma y curva de distribución normal de las propiedades térmicas del suelo del ex Lago de Texcoco.

El comportamiento de la conductividad térmica λ puede describirse a través de una curva de distribución normal. Esta propiedad no presenta una variación en órdenes de magnitud, como sucede en el caso de la conductividad hidráulica, en donde los datos se ajustan mejor a una distribución lognormal (López-Acosta *et al.*, 2018).

4.5. Relación entre las propiedades índice y térmicas



Nota: ρ = Densidad de la muestra, w = Contenido natural de agua, e = Relación de vacíos, n = Porosidad, θ_w = contenido volumétrico de agua.

Figura 4.7. Relación entre la conductividad térmica y las propiedades índice del suelo.

En la Figura 4.7 se muestra la relación entre la conductividad térmica y las propiedades índice del suelo del ex Lago de Texcoco, de acuerdo con la Sección 1.4. En primer lugar, se observa que la estructura del suelo tiene influencia directa sobre la conductividad térmica. Cuando ésta aumenta, también lo hace la densidad, mientras que la porosidad y la relación de vacíos se reducen. Al tener densidades altas, significa que la estructura se encuentra más compacta y que existen menos poros entre las partículas sólidas. De esta manera se tienen más puntos de contacto entre ellas, favoreciendo a la transferencia de calor por conducción.

En adición, se observa el comportamiento de la conductividad térmica cuando el suelo se encuentra saturado. El agua favorece la transferencia de calor por conducción al crear puentes entre las partículas sólidas, no obstante, para el caso del ex Lago de Texcoco, en donde se encontraron contenidos de agua y porosidades altas, la conductividad térmica se muestra baja. Se tienen valores cercanos a la conductividad térmica del agua, que en promedio es $0.6 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

4.6. Comparación de sensores de aguja simple y doble

En la Figura 4.8 se realiza una comparación de las mediciones efectuadas con los sensores de aguja simple y doble para la determinación de conductividad térmica. Se hizo un análisis de los errores de medición utilizando tres parámetros: error medio ME (Ec. 4.2), error medio absoluto MAE (Ec. 4.3) y la raíz del error cuadrático medio $RMSE$ (Ec. 4.4).

$$e = \lambda_m - \lambda_e \quad (4.1)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i \quad (4.2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (4.3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i)^2}{n}} \quad (4.4)$$

Cuando $ME = MAE$, significa que el modelo presenta sobrestimación de los parámetros. Por otro lado, cuando $ME = -MAE$, significa que hay una subestimación. El $RMSE$ es un parámetro que compara conjuntos (Yeh, 1987). Mientras más pequeño es, más cercanos son los datos. Se observa que el sensor de aguja doble tiene una tendencia a la subestimación, sin embargo, existe un $RMSE$ bajo, lo que indica que los resultados de ambos sensores son valores cercanos.

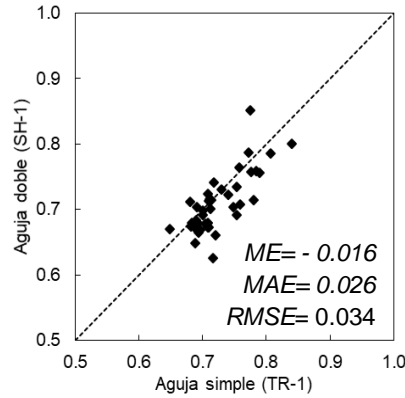


Figura 4.8. Comparación de sensores para la determinación de conductividad térmica.

4.7. Análisis de los modelos predictivos aplicados

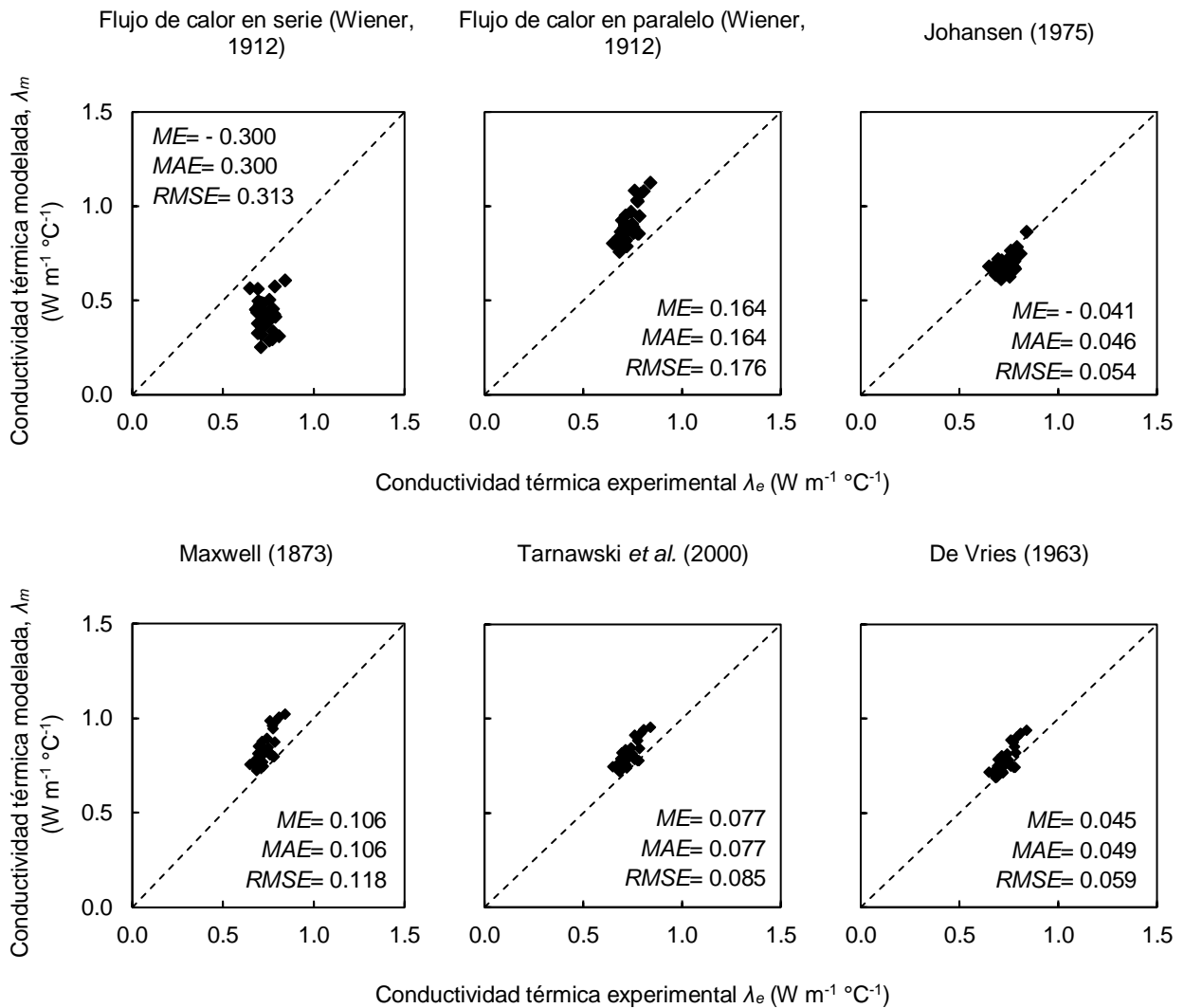


Figura 4.9. Comparación entre la conductividad térmica obtenida experimentalmente y los modelos predictivos utilizados.

Las mediciones experimentales de conductividad térmica fueron comparadas con aquellos valores estimados a partir de los modelos predictivos descritos previamente en la Sección 1.5 (Figura 4.9). Se remarca que los modelos de flujo de calor en serie y en paralelo representan los límites inferior y superior respectivamente de todos los modelos predictivos. Como consecuencia, el modelo en serie presenta subestimaciones y, el modelo en paralelo, sobrestimaciones. Ambos ajustes reflejan altas variaciones en los datos y valores de *RMSE* mayores al resto de los modelos. El modelo de Johansen (1975) tiene tendencia a la subestimación, sin embargo, permite ajustes apropiados. El modelo de Maxwell (1873) muestra sobrestimaciones y *RMSE* alto, lo que se asocia con grandes variaciones entre las conductividades térmicas experimental y modelada. Por último, los modelos de Tarnawski *et al.* (2000) y De Vries (1963) presentan sobrestimaciones de los valores. De acuerdo con Alrtimi *et al.*, (2016), el modelo de De Vries permite obtener ajustes acertados para el caso de suelos saturados.

4.8. Comparación de métodos de interpretación

4.8.1. Análisis Simplificado

En la Figura 4.10 se comparan los valores de la conductividad térmica obtenidos por medio del Análisis Simplificado de la ASTM D5334-14 (2014) contra los presentados por el equipo *KD2 Pro*. Se observa que existe una sobreestimación y un *RMSE* bajo que indica cercanía entre los conjuntos de valores comparados.

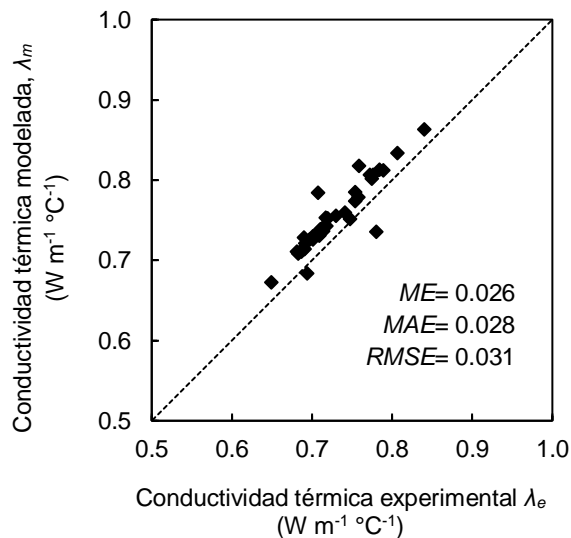


Figura 4.10. Comparación de las conductividades térmicas obtenidas experimentalmente y con el método de Análisis Simplificado de la ASTM D5334-14 (2014).

4.8.2. Método de Bristow *et al.* (1994)

Comparando los resultados obtenidos experimentalmente con el sensor de aguja doble y el método de Bristow *et al.* (1994) (Figura 4.11), se observa que la conductividad térmica presenta una buena aproximación, pues a pesar de tener una tendencia a la subestimación,

el *RMSE* es muy bajo, lo que indica que los datos experimentales y modelados son cercanos. La capacidad calorífica volumétrica tiene una sobreestimación de los datos y el *RMSE* más alto en comparación con el resto de propiedades. La difusividad térmica, por su parte, se encuentra subestimada por el método, sin embargo, se trata de una interpretación bastante acertada (Portillo-Arreguín *et al.*, 2019).

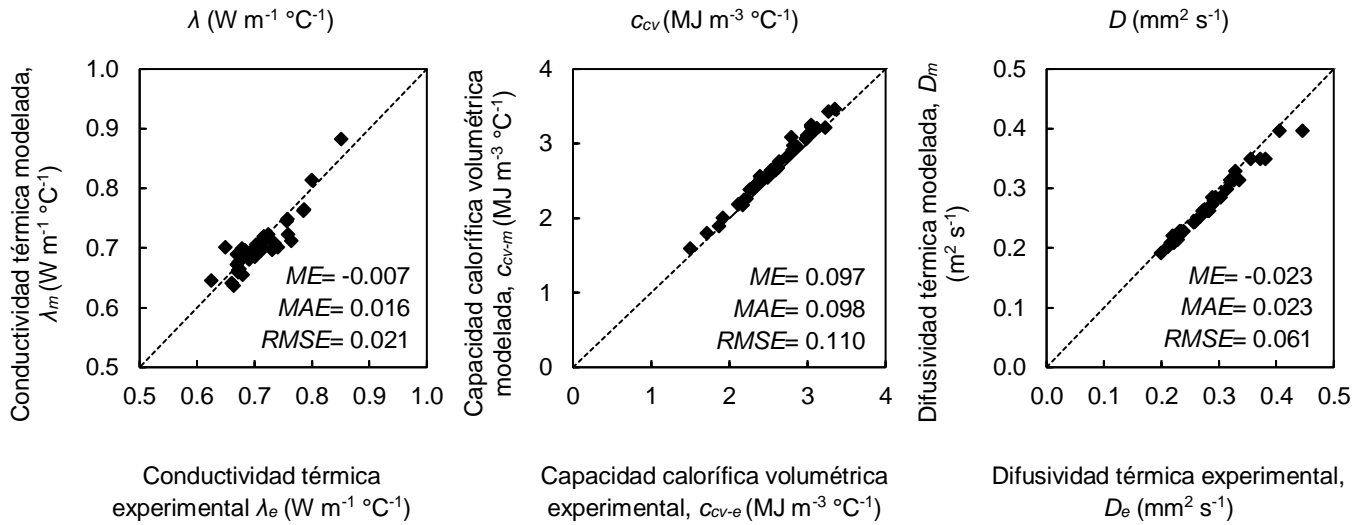


Figura 4.11. Comparación de las propiedades térmicas obtenidas experimentalmente con la aguja doble y con el método *Single point*: a) Conductividad térmica. b) Capacidad calorífica volumétrica. c) Difusividad térmica.

5. CONCLUSIONES

La presente tesis se ha centrado en la determinación experimental de las propiedades térmicas de los suelos arcillosos del ex Lago de Texcoco por medio del método transitorio de la aguja. Las pruebas se llevaron a cabo en 40 muestras inalteradas provenientes de distintas profundidades (de 1 a 32 m) del sitio de estudio. Adicionalmente, se determinaron las propiedades índice y el contenido de materia orgánica de cada muestra, y se efectuó el análisis mineralógico de cinco muestras representativas.

Las propiedades térmicas se determinaron utilizando dos tipos de sensores: (a) aguja simple y (b) aguja doble. El primero permite determinar la conductividad térmica, mientras que el segundo además de medir la conductividad térmica, permite determinar la difusividad térmica y la capacidad calorífica volumétrica de las muestras. El desarrollo de la prueba de aguja simple se efectuó de acuerdo con la norma ASTM D5334-14 (2014).

En las muestras analizadas se determinó una conductividad térmica media de $0.726 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ con la aguja simple y $0.710 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ con la aguja doble. Se trata de un valor bajo si se compara con los valores típicos reportados para suelos arcillosos. La conductividad térmica decrece como consecuencia de la alta porosidad y relación de vacíos, y del contenido de materia orgánica de las muestras de suelo. La capacidad calorífica volumétrica media del sitio fue $2.577 \text{ MJ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$, mientras que la difusividad térmica resultó con un valor medio de $0.295 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$. La conductividad térmica no presentó variaciones con respecto a la profundidad del suelo. Sin embargo, se observó que a mayor profundidad la capacidad calorífica decrece y la difusividad térmica aumenta.

Las propiedades índice obtenidas experimentalmente, así como los contenidos de materia orgánica determinados mediante **dos métodos**, coincidieron con los resultados reportados por Marsal y Mazari (1959), Mesri (1975), Murillo y García (1978), Díaz-Rodríguez *et al.* (1998), Alanís (2003) y Ridlo *et al.* (2012). Asimismo, del análisis mineralógico se obtuvieron valores similares acordes con los estudios de Mesri (1975) y Díaz-Rodríguez y Santamarina (2001). Se encontró una correlación entre las propiedades índice y las propiedades térmicas obtenidas. Las propiedades que describen la estructura del suelo y el acomodo de partículas (densidad, porosidad y relación de vacíos) indicaron que las estructuras más compactas y con menos poros tienen una conductividad térmica más alta que aquéllas que presentan un número importante de vacíos entre las partículas sólidas. Es decir, al tratarse de un suelo saturado, el alto contenido de agua reduce significativamente la conductividad térmica. De los resultados obtenidos, también se determinó que es posible ajustar las siguientes propiedades a distribuciones normales: densidad de sólidos, densidad de la muestra, contenido de agua, relación de vacíos, conductividad térmica y capacidad calorífica, así como el contenido de materia orgánica de las muestras.

La conductividad térmica obtenida experimentalmente se comparó con cinco modelos predictivos propuestos por Wiener (1912) para flujos en serie y en paralelo, Johansen (1975), Maxwell (1873), Tarnawski *et al.* (2000) y De Vries (1963). Se obtuvieron tres parámetros de error para analizar el comportamiento de cada modelo: error medio, error medio absoluto y la raíz del error cuadrático medio. Los resultados indicaron que los modelos de Johansen (1975) y De Vries (1963) proporcionan los mejores ajustes para las mediciones del suelo del ex Lago de Texcoco.

La interpretación de los datos experimentales obtenidos se realizó empleando dos métodos: (a) Análisis Simplificado de acuerdo con la norma ASTM D5334-14 (2014) para las

mediciones efectuadas con la aguja simple, y (b) la teoría del pulso de calor de corta duración de Bristow *et al.* (1994) para las mediciones hechas con la aguja doble. Ambas propuestas se compararon con el método que utiliza el equipo *KD2 Pro*. De acuerdo con los resultados, el método simplificado tiende a sobreestimar ligeramente los valores de conductividad térmica, sin embargo, proporciona una aproximación adecuada para fines prácticos. Se trata de un procedimiento sencillo, pero que es sensible a errores humanos debido a que se basa en inspecciones visuales. Por otra parte, se comprobó que el método de Bristow *et al.* (1994) permite estimar de forma apropiada las tres propiedades térmicas de los suelos evaluadas en esta investigación. El método presentó un mejor ajuste para la determinación de conductividad y difusividad térmica.

La conductividad térmica de los suelos es un parámetro fundamental en diversos proyectos de ingeniería, tales como el diseño de estructuras termoactivas, el aislamiento de sistemas de transmisión subterráneos, el almacenamiento de desechos sólidos y radioactivos y los sistemas de soporte artificial. En cuanto al diseño de las estructuras termoactivas, los suelos con alta conductividad térmica muestran una mejor recuperación cerca de intercambiadores de calor, mientras que aquellos de baja conductividad tienen una mejor capacidad de almacenamiento. Los bajos valores de conductividad térmica obtenidos en esta investigación, sugieren que el diseño de estructuras termoactivas en la zona del ex Lago de Texcoco requeriría un alto número de tuberías intercambiadoras de calor. Por otra parte, para el aislamiento de sistemas de transmisión subterráneos, sería necesario diseñar un relleno con un comportamiento térmico apropiado para evitar fallas por sobrecalentamiento.

Los resultados de esta investigación son una aportación al conocimiento de las propiedades térmicas de los suelos mexicanos, que se prevé serán utilizados como base para futuras investigaciones en el área.

REFERENCIAS

- Abramowitz, M. y Stegun, I. A. (1972). *Handbook of Mathematical Functions With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. U.S. Government Printing Office.
- Abuel-Naga, H., Bergado, D. T., Bouazza, A., y Pender, M. (2009). Thermal conductivity of soft Bangkok clay from laboratory and field measurements. *Engineering Geology*, 105, 211-219.
- Abuel-Naga, H., Raouf, M. I., Raouf, A., y Nasser, A. (2015). Energy piles: current state of knowledge and design challenges. *Environmental Geotechnics*, 2(EG4), 195-210.
- Akrouch, G. A., Briaud, J. L., Sánchez, M., y Yilmaz, R. (2016). Thermal Cone Test to Determine Soil Thermal Properties. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(3), 1-12.
- Alanís, R. (2003). *Caracterización geotécnica del ex Lago de Texcoco* (Tesis de maestría). Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Alrtimi, A., Rouainia, M., y Haigh, S. (2016). Thermal conductivity of a sandy soil. *Applied Thermal Engineering*, 106, 551-560.
- ASTM International (2014a). D2974-14 Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- ASTM International (2014b). D5334-14 Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- Bain, J. A. (1971). A plasticity chart as an aid to the identification and assessment of industrial clays. *Clay Minerals*, 9(1), 1-17.
- Ball, D. F. (1964). Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soils. *Journal of Soil Science*, 15(1), 84-92.
- Banks, D. (2012). *An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling* [Segunda edición]. West Sussex. John Wiley & Sons, Ltd.
- Barba-Galdámez D. F., y López-Acosta N.P. (2017). Analogías entre flujo de agua y calor en suelos, y su importancia en las estructuras termoactivas. *Revista Ingeniería y Tecnología*, Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, BUAP. Año 13, No. 26, Abril-Septiembre 2017. ISSN 2007-1876. pp. 7-14.
- Barba-Galdámez, D. F. (2018). *Estudio del comportamiento de estructuras termoactivas con énfasis en pilas de energía* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Barry-Macaulay, D., Bouazza, A., Singh, R. M., Wang, B., y Ranjith, P. G. (2013). Thermal conductivity of soils and rocks from the Melbourne (Australia) region. *Engineering Geology*, 164, 131-138.

Barry-Macaulay, D., Bouazza, A., Wang, B., y Singh, R. M. (2015). Evaluation of soil thermal conductivity models. *Canadian Geotechnical Journal*, 52, 1892-1900.

Benjamin, J. R., y Cornell, C. A. (1970). *Probability, statistics, and decision for civil engineers*. EUA. McGraw-Hill Inc.

Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56 (2), 81-122.

Bristow K. L. (2002). Thermal conductivity. En J. H. Dane, G.C. Topp (Eds.), *Methods of Soil Analysis* (1209–1226). Madison, EUA, Soil Science Society of America, Inc.

Bristow, K., Kluitenberg, G., y Horton R. (1994). Measurement of soil thermal properties with a dual-probe heat-pulse technique. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1288-1294.

British Standards Institution (2012). BS EN ISO 22007–2:2012 Plastics – *Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity – Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method*, BSI.

Burt R. (Ed.) (2004). *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report No. 42. Versión 4.0. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture.

Carreón-Freyre, D., Hidalgo-Moreno, C. y Hernández-Marín, M. (2006). Mecanismos de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación diferencial en Chalco, Estado de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, número especial de Geología Urbana, Tomo LVIII, 2, 237-250.

Clarke B.G., Agab A., y Nicholson D. (2008). Model specification to determine thermal conductivity of soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, 161(3), 161-168.

CONAGUA (2014). Proyecto hidráulico del Lago de Texcoco. México. Gobierno de la República. SEMARNAT.

Côté J., y Konrad, J. M. (2005). A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 42, 443-458.

Das, A. (19 de diciembre de 2016). Power cables in Odisha's Cuttack to go underground. Odisha Sun Times. Recuperado de: <https://odishasuntimes.com/>

De Vries, D. A. (1963). Thermal properties of soil. *Physics of Plant Environment*. Amsterdam. W. R. van Wijk.

Decagon Devices Inc. (2014). *KD2 Pro Thermal properties analyzer: Operator's manual*. Pullman, WA. Decagon Devices Inc.

Der Norske Veritas As (2012). *Statistical representation of soil data*. Recommended practice DNP-RP-C207.

Díaz-Rodríguez, J. A., Lozano-Santa Cruz, R., Dávila-Alcocer, V. M., Vallejo, E., y Girón, P. (1998). Physical, chemical and mineralogical properties of Mexico City sediments: a geotechnical perspective. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(1987), 600-610.

Díaz-Rodríguez, J. A., y Santamarina, J. C. (2001). Mexico City soil behaviour at different strains: observations and physical interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2, 783-789.

Draper, N. R., y Smith, H. (1998). *Applied regression analysis* (Tercera edición). EUA. John Wiley & Sons, Inc.

Faitli, J., Magyar, T., Erdélyi, A., y Murányi, A. (2015). Characterization of thermal properties of municipal solid waste landfills. *Waste Management*, 36, 213-221.

Farouki, O. T. (1981). *Thermal properties of soils*. CRREL Monograph 81-1. Hanover, NH. United States Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory.

Ground Freezing (2019). Ground Freezing in Construction. Recuperado de <https://groundfreezing.com/>

Harris, W., y White, G. N. (2008). X-ray Diffraction Techniques for Soil Mineral Identification. En SSSA Book Series 5.5, *Methods of Soil Analysis. Part 5. Mineralogical Methods* (81-115). Madison, WI. Soil Science Society of America.

Hiriart, F., y Marsal, R.J. (1969). El hundimiento de la Ciudad de México. Volumen Nabor Carrillo, S.H. y C. P., Nacional Financiera, S.A.

Hoogsteen, M. J. J., Lantinga, E. A., Bakker, E. J., Groot, J. C. J., y Tittonell, P. A. (2015). Estimating soil organic carbon through loss on ignition: effects of ignition conditions and structural water loss. *European Journal of Soil Science*, 1-9.

Horai, K. (1971). Thermal conductivity of rock-forming minerals. *Journal of Geophysical Research*, 76(5), 1278-1308.

Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2017). *IEEE Guide for thermal resistivity measurements of soils and backfill materials*. NY. IEEE.

Johansen, O. (1975). *Thermal conductivity of soils* (Tesis doctoral). US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Hanover, New Hampshire.

Jumikis, A. R. (1977). *Thermal Geotechnics*. New Jersey. Rutgers University Press.

Justo, A., y Morillo, E. (1999). Técnicas de difracción de rayos X para la identificación cualitativa y cuantitativa de minerales de la arcilla. En Castellón de la Plana (Ed.). *Ciencia y tecnología de materiales*. Sevilla. 77-86.

- King, W., Banks, D., y Findlay, J. (2012). Field determination of shallow soil thermal conductivity using a short-duration needle probe test. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 45, 497-504.
- Kodešová, R., Neuberger, P., y Fér, M. (2013). Thermal properties of representative soils of the Czech Republic. *Soil and Water Research*, 8(4), 141-150.
- Laloui, L., y Di Donna, A. (2011). Understanding the behaviour of energy geo-structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil engineering*, 164 (CE4), 184-191.
- Lockmuller, N., Redgrove, J. y Kubičár, L. (2003). Measurement of thermal conductivity with the needle probe. *High Temperatures – High Pressures*, 35/36, 127-138.
- López-Acosta N. P., Barba-Galdámez D. F., Espinosa-Santiago A. L., y Choque-Mamani P. I. (2018). Data on horizontal hydraulic conductivity of fine-grained soils of the former Lake Texcoco (Mexico). *Data in Brief Journal Elsevier*, 19 (2018), pp. 1670-1682. ISSN: 2352-3409.
- López-Acosta N. P., Espinosa-Santiago A. L. & Barba-Galdámez D. F. (2019). Characterization of soil permeability in the former Lake Texcoco, Mexico. *Open Geosciences*. ISSN: 2391-5447. Vol. 11(1), pp. 113-124.
- López-Acosta, N. P., Barba, D. F., Pereira, J. M., y Paniagua, W. (2017). Pilas de energía. En W. Paniagua (Ed.). *Ingeniería de cimentaciones profundas*. México. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. 565-607.
- Loveridge, F. (2012). *The thermal performance of foundation piles used as heat exchangers in ground energy systems* (Tesis doctoral). Faculty of Engineering and the Environment. University of Southampton, UK.
- Loveridge, F., Low, J. E., y Powrie, W. (2017). Site investigation for energy geostructures. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 50, 158-168.
- Low, J. E., Loveridge, F., Powrie, W., y Nicholson, D. (2015). A comparison of laboratory and *in-situ* methods to determine soil thermal conductivity for energy foundations and other ground heat exchanger applications. *Acta Geotechnica*, 10(2), 209-218.
- Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2), 431-441.
- Marsal, R. J., y Graue, R. (1969). El subsuelo del Lago de Texcoco. Volumen Nabor Carrillo, S. H. y C. P., Nacional Financiera, S.A.
- Marsal, R. J., y Mazari, M. (1959). El subsuelo de la Ciudad de México, Volumen I. México. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Maxwell, J. C. (1873). *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Clarendon Press. Oxford.
- Mesri, G., Rokhsar, A., y Bohor, B. F. (1975). Composition and compressibility of typical sample of Mexico City clay. *Geotechnique*, 25, 527-554.

Mitchell, J. K., y Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behaviour*. New Jersey. John Wiley & Sons, Inc.

Murillo, R. y García, G. (1978). Ex Lago de Texcoco. Volumen El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del Valle de México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.

Nakshabandi, G. A., y Kohnke, H. (1965). Thermal conductivity and diffusivity of soils as related to moisture tension and other physical properties. *Agricultural Meteorology*, 2, 271-279.

Petroni, S. (27 de mayo de 2015) Northern Ontario. Coming to a town near you? Nuclear waste! Northern Hoot. Recuperado de: <https://northernhoot.com/>

Philip, J. R., y De Vries, D. A. (1957). Moisture movement in porous materials under temperature gradients. Transactions, *American Geophysical Union*, 38, 222–232.

Pietrak, K., y Wiśniewski, T. (2015). A review of models for effective thermal conductivity of composite materials. *Journal of Power Technologies*, 95(1), 14-24.

PIMOSA (2017). Estudio de calidad del agua para el tramo de prueba para estabilización de suelos con tecnología al vacío en el NAICM. Reporte técnico de Geogrupo elaborado para PIMOSA. Texcoco, Edo. Méx.

Portillo-Arreguín, D. M, López-Acosta, N. P., Barba-Galdámez, D. F., y Sánchez, M. (2018). Determinación de propiedades térmicas de los suelos a partir del método de la aguja. Memorias de la XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, SMIG (21-24 noviembre 2018), León, Guanajuato, México. pp. 53-59.

Portillo-Arreguín D.M., López-Acosta N.P., y Barba-Galdámez D.F. (En Revisión 2019). Thermal properties of Mexico Basin soils. Proceedings of the XVI Pan-American Conference for Soils Mechanics and Geotechnical Engineering. Cancún, México.

Ramos-Leal, J., Noyola-Medrano, C., Tapia-Silva, F. (2010). Aquifer vulnerability and groundwater quality in mega cities: Case of the Mexico Basin. *Environ. Earth Science*, 61, 1309-1320.

Rawlings, R. H. D., y Sykulski, J. R. (1999). Ground source heat pumps: A technology review. *CIBSE A: Building Serv. Eng. Res. Technol*, 20(3), 119-129.

Rees, S. W., Adjali, M. H., Zhou, Z., Davies, M., y Thomas, H. R. (2000). Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(3), 213-265.

Rerak, M., y Ocloń, P. (2017). The effect of soil and cable backfill thermal conductivity on the temperature distribution in underground cable system. *E3S Web of Conferences*, 13, 1-6.

Ridlo, A., Ohtsubo, M., Higashi T., Kanayama, M., y Tanaka, M. (2012). Mineralogy and chemistry of Mexico City clay and their contribution to the unusual geotechnical index properties of the clay. *Clay Science*, 16, 95-104.

- Roglans-Ribas, J., y Spinrad, B. I. (1989). A simplified thermal analysis of a nuclear waste repository. *Ann. nucl. Energy*, 16(8), 371-382.
- Rudolph, D. L., Herrera, I., y Yates, R. (1989). Groundwater flow and solute transport in the industrial well fields of the Texcoco saline aquifer system near Mexico City. *Geof, Int*, 28(2), 363-408.
- Sakaguchi, I., Momose, T., y Kasubuchi, T. (2007). Decrease in thermal conductivity with increasing temperature in nearly dry sandy soil. *European Journal of Soil Science*, 58(1), 92–97.
- Santoyo, E., Ovando, E., Mooser, F., y León, E. (2005). *Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México*. TGC. México.
- Secretaría de Salud (2001). Salud ambiental, agua para uso y consumo humano - Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. NOM-127-SSA1-1994.
- SEMARNAT (2000). Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. NOM-021-RECNAT-2000.
- Stepanic, N., Radivojević, D., y Terzić, M. (2018). An *in-situ* temperature calibration of a guarded hot plate apparatus. *Thermal Science*.
- Tarnawski, V. R., Gori, F., Wagner, B., y Buchan, G. D. (2000). Modeling approaches to predicting thermal conductivity of soils at high temperatures. *International Journal of Energy Research*, 24, 403–423.
- Vieira, A., Alberdi-Pagola, M., Christodoulides, P., Javed, S., Loveridge, F., Nguyen, F., Cecinato, F., Maranhã, J., ..., Radioti, G. (2017). Characterisation of ground thermal and thermo-mechanical behaviour for shallow geothermal energy applications. *Energies*, 10(12), 2044.
- Warren, C. J., y Rudolph, D. L. (1997). Clay minerals in basin of Mexico lacustrine sediments and their influence on ion mobility in groundwater. *Journal of Contaminant Hydrology*, 27, 177-198.
- Wiener, O. Die Theorie des Mischkörpers für das Feld des stationären Strömung, erste abhandlung die Mittelswertsätze für kraft, polarisation und energie. *Der Abhandlungen der Mathematisch-Physischen Klasse der Königl Sachsischen Gesellschaft der Wissenschaften*, 32, 509-604.
- Yeh, H. (1987). Theis' solution by nonlinear least squares and finite-difference Newton's method. *Ground Water*, 25(6), 710-715.
- Zafor, S., Dincer, I., y Gadalla, M. (2015). Evaluation of thermal properties of refrigerant clathrates with additives. En I. Dincer, C. Ozgur Colpan, O. Kizilkan, y M. Akif Ezan (Eds.). *Progress in clean energy*. Vol. 1. Analysis and Modelling. Suiza. Springer. 235-256.
- Zeevaert, L. (1953). Estratigrafía y problemas de ingeniería en los depósitos de arcilla lacustre de la Ciudad de México. Memoria del Congreso Científico Mexicano, Volumen 5, 58-70.

ANEXOS

A. Descripción de las muestras ensayadas

Tabla Anexo A.1. Propiedades índice y relaciones gravimétricas y volumétricas de las muestras ensayadas.

Sondeo	Muestra	Profundidad (m)	Propiedades índice			Relaciones gravimétricas y volumétricas						
			LL	LP	G _s (g cm ⁻³)	ρ (g cm ⁻³)	w (%)	θ _w (%)	e	n	Sr	MO (%)
TBH-432	18	7.95 - 8.55	314.2	75.1	3.08	1.20	246.4	87.4	7.90	0.89	0.98	10.2
	35	16.05 - 16.65	218.4	63.0	3.14	1.26	191.5	84.5	6.81	0.87	0.97	7.4
SM-13	4	1.50 - 2.10	225.5	55.4	2.79	1.21	246.2	85.4	7.01	0.88	0.98	6.6
	8	3.60 - 4.20	345.9	117.0	2.73	1.14	316.0	89.2	9.92	0.91	0.98	12.5
	24	11.40 - 12.00	254.3	76.1	2.79	1.24	207.5	84.2	5.98	0.86	0.98	9.7
	40	19.20 - 19.80	253.5	79.6	2.93	1.32	143.6	77.5	4.42	0.82	0.95	6.6
SM-47	4	2.40 - 3.00	285.7	57.9	2.56	1.19	275.9	87.0	7.10	0.88	0.99	14.2
	7	4.15 - 4.75	116.4	59.2	2.80	1.35	99.2	72.7	3.54	0.78	0.93	7.4
	19	10.05 - 10.65	300.8	64.5	3.11	1.20	286.9	88.6	9.04	0.90	0.98	8.3
	36	18.30 - 18.90	283.1	62.2	3.17	1.24	230.2	86.1	7.49	0.88	0.98	8.7
SM-28	3bis	5.90 - 6.50	372.4	120.8	3.10	1.15	371.8	90.5	11.69	0.92	0.98	11.6
	6bis	12.90 - 13.50	327.6	71.6	3.21	1.22	255.2	87.6	8.41	0.89	0.98	8.3
	9bis	22.30 - 22.90	272.9	81.5	3.30	1.28	205.6	85.4	6.89	0.87	0.98	6.5
TBH-356	4	1.50 - 2.10	266.1	76.0	2.81	1.17	311.4	87.9	8.83	0.90	0.98	6.2
	2bis	7.50 - 8.10	113.8	45.3	2.79	1.44	83.5	68.0	2.69	0.73	0.93	2.8
	19	9.15 - 9.75	272.5	61.4	3.20	1.25	219.1	85.9	7.18	0.88	0.98	8.4
SM-37	10	4.85 - 5.45	97.1	35.8	2.75	1.48	91.7	71.4	2.60	0.72	0.99	2.9
	17	8.30 - 8.90	191.0	46.7	2.83	1.21	185.4	78.3	5.60	0.85	0.92	9.6
	25	12.20 - 12.80	265.7	103.3	3.14	1.27	189.0	84.0	6.27	0.86	0.97	9.4
SM-14bis	1	2.00 - 2.60	271.3	39.4	2.79	1.21	256.4	86.6	7.22	0.88	0.99	6.2
	2	5.00 - 5.60	386.9	110.2	3.13	1.15	364.2	90.3	11.78	0.92	0.98	11.6
	3	8.50 - 9.10	286.3	86.5	2.87	1.26	206.4	84.2	5.93	0.86	0.98	10.6
	4	11.50 - 12.10	297.3	66.2	3.10	1.22	234.4	86.3	7.63	0.88	0.98	8.8
	5	14.30 - 14.90	201.2	91.7	2.97	1.26	189.5	82.5	5.84	0.85	0.97	11.2
	7	18.80 - 19.40	280.9	68.7	3.34	1.29	189.9	83.3	6.41	0.87	0.96	8.6
	8	29.30 - 29.90	193.1	49.3	2.81	1.36	132.4	76.5	3.81	0.79	0.97	6.1
	9	32.00 - 32.60	207.3	71.1	2.72	1.32	158.5	79.9	4.18	0.81	0.99	6.3
TBH-417	7	2.85 - 3.45	110.2	50.7	2.71	1.41	114.1	72.1	2.97	0.75	0.96	3.5
	25	11.55 - 12.15	357.8	87.1	2.97	1.20	260.1	86.0	7.98	0.89	0.97	12.0
	32	15.00 - 15.60	228.9	54.2	2.92	1.29	166.1	81.8	5.26	0.84	0.97	7.8
	43	20.25 - 20.85	185.6	50.9	2.84	1.29	157.4	80.6	4.89	0.83	0.97	8.1
SM-TP-26	15	6.45 - 7.05	282.8	112.7	2.57	1.21	232.0	83.8	5.94	0.86	0.98	16.4
	23	10.35 - 10.95	119.3	73.7	2.80	1.19	133.5	86.7	7.67	0.88	0.98	10.8
	40	18.30 - 18.90	266.1	51.0	2.87	1.22	202.6	81.8	6.17	0.86	0.95	9.0

Continuación de Tabla Anexo A.1. Propiedades índice y relaciones gravimétricas y volumétricas de las muestras ensayadas.

Sondeo	Muestra	Profundidad (m)	Propiedades índice			Relaciones gravimétricas y volumétricas						
			LL	LP	G _s (g cm ⁻³)	ρ (g cm ⁻³)	w (%)	θ _w (%)	e	n	Sr	MO (%)
SM-30	1	3.50 - 4.10	265.4	63.9	2.95	1.19	295.2	89.5	9.10	0.90	0.99	7.6
	5	19.60 - 20.20	268.9	60.8	3.02	1.23	252.6	86.2	7.37	0.88	0.98	6.2
SM-36	1	2.00 - 2.60	121.5	39.5	2.80	1.22	80.4	80.0	5.77	0.85	0.94	-
	2	5.00 - 5.60	375.5	86.3	2.92	1.18	345.0	84.6	7.82	0.89	0.95	-
	3	9.00 - 9.60	416.7	156.9	2.76	1.14	347.7	89.2	10.08	0.91	0.98	-
	5	17.75 - 18.25	412.1	106.0	2.73	1.13	276.6	88.3	10.19	0.91	0.97	8.2

Tabla Anexo A.2. Propiedades térmicas medidas y obtenidas de las muestras ensayadas.

Sondeo	Muestra	Propiedades térmicas medidas				Método de Análisis Simplificado		Single point	
		Aguja simple		Aguja doble		Aguja simple		Aguja doble	
		λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	c_{ov} (MJ m ⁻³ °C ⁻¹)	D (m ² s ⁻¹)	λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	c_{ov} (MJ m ⁻³ °C ⁻¹)	D (m ² s ⁻¹)
TBH-432	18	0.720	0.661	2.548	0.259	0.75	0.64	2.63	0.24
	35	0.711	0.716	2.433	0.294	0.74	0.72	2.52	0.29
SM-13	4	0.701	0.691	2.594	0.267	0.73	0.68	2.69	0.25
	8	0.682	0.674	3.117	0.216	0.71	0.66	3.20	0.21
	24	0.710	0.713	2.190	0.326	0.74	0.70	2.24	0.31
	40	0.776	0.758	1.867	0.406	0.81	0.75	1.89	0.40
SM-47	4	0.692	0.680	2.998	0.227	0.72	0.69	3.11	0.22
	7	0.772	0.787	2.806	0.281	0.81	0.76	2.91	0.26
	19	0.701	0.698	2.530	0.276	0.73	0.69	2.64	0.26
	36	0.780	0.714	2.173	0.329	0.74	0.71	2.17	0.33
SM-28	3bis	0.683	0.680	2.977	0.228	0.71	0.65	3.06	0.21
	6bis	0.681	0.712	2.486	0.287	0.71	0.70	2.55	0.27
	9bis	0.704	0.678	3.083	0.220	0.73	0.70	3.17	0.22
TBH-356	4	0.689	0.649	2.792	0.232	0.72	0.70	3.08	0.23
	2bis	0.807	0.785	2.111	0.372	0.83	0.76	2.19	0.35
	19	0.718	0.741	2.617	0.283	0.74	0.70	2.67	0.26
SM-37	10	0.840	0.800	2.504	0.320	0.86	0.81	2.60	0.31
	17	0.709	0.724	2.640	0.274	0.73	0.72	2.75	0.26
	25	0.713	0.701	2.736	0.256	0.74	0.69	2.82	0.24
SM-14bis	1	0.754	0.692	3.267	0.212	0.77	0.69	3.42	0.20
	2	0.687	0.672	3.351	0.200	0.71	0.66	3.46	0.19
	3	0.694	0.664	2.985	0.222	0.68	0.64	3.07	0.21
	4	0.708	0.679	3.043	0.223	0.73	0.69	3.22	0.21
	5	0.748	0.703	3.001	0.234	0.75	0.71	3.10	0.23
	7	0.730	0.731	1.920	0.381	0.76	0.70	2.00	0.35
	8	0.758	0.764	1.713	0.446	0.78	0.71	1.80	0.40
	9	0.784	0.759	1.496	0.507	0.81	0.72	1.59	0.46
TBH-417	7	0.789	0.756	2.259	0.335	0.81	0.75	2.38	0.31
	25	0.691	0.704	2.591	0.272	0.71	0.69	2.64	0.26
	32	0.714	0.714	2.220	0.322	0.74	0.71	2.26	0.31
	43	0.741	0.723	2.303	0.314	0.76	0.72	2.41	0.30
SM-TP-26	15	0.708	0.673	2.818	0.239	0.78	0.68	2.97	0.23
	23	0.775	0.851	2.397	0.355	0.80	0.88	2.53	0.35
	40	0.710	0.672	2.325	0.289	0.74	0.66	2.41	0.27

Continuación de Tabla Anexo A.2. Propiedades térmicas medidas y obtenidas de las muestras ensayadas.

Sondeo	Muestra	Propiedades térmicas medidas				Método de Análisis Simplificado		Single point	
		Aguja simple		Aguja doble		Aguja simple		Aguja doble	
		λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	c_{ov} (MJ m ⁻³ °C ⁻¹)	D (m ² s ⁻¹)	λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	c_{ov} (MJ m ⁻³ °C ⁻¹)	D (m ² s ⁻¹)
SM-30	1	0.649	0.670	2.864	0.234	0.67	0.67	2.95	0.23
	5	0.759	0.707	2.330	0.303	0.82	0.69	2.43	0.29
SM-36	1	0.754	0.735	3.224	0.228	0.79	0.71	3.21	0.22
	2	0.690	0.684	3.045	0.225	0.73	0.70	3.25	0.21
	3	0.717	0.625	2.390	0.625	0.75	0.65	2.56	0.25
	5	0.697	0.669	2.318	0.289	0.73	0.69	2.42	0.29

B. Difractogramas obtenidos mediante el método de DRX para análisis mineralógico de las muestras

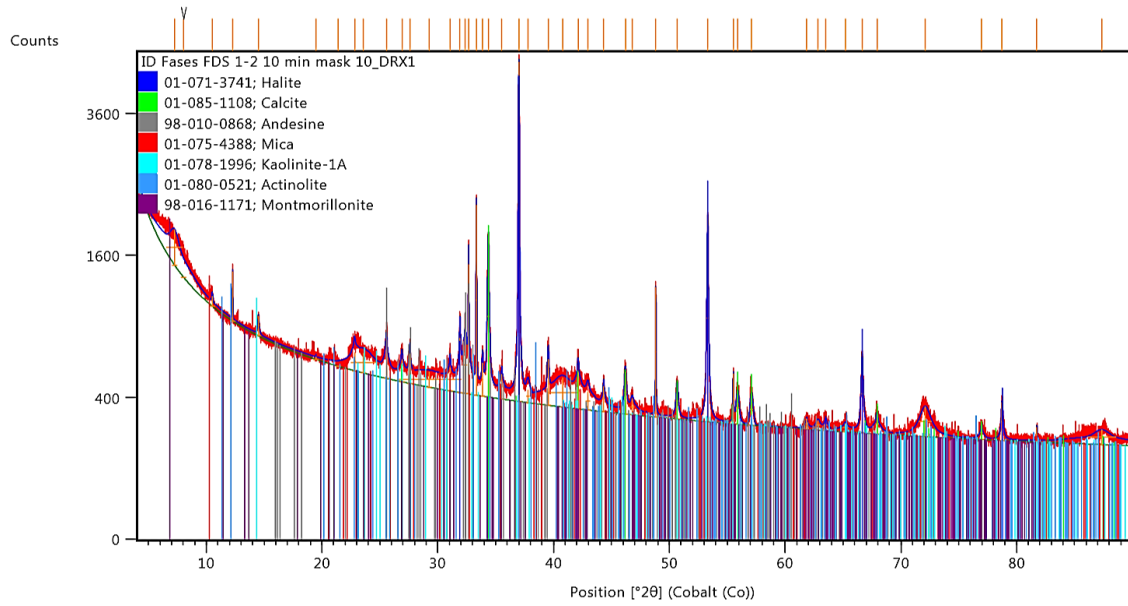


Figura Anexo B.1. Difractograma correspondiente a la muestra SM-37 M17 obtenido del análisis de roca total.

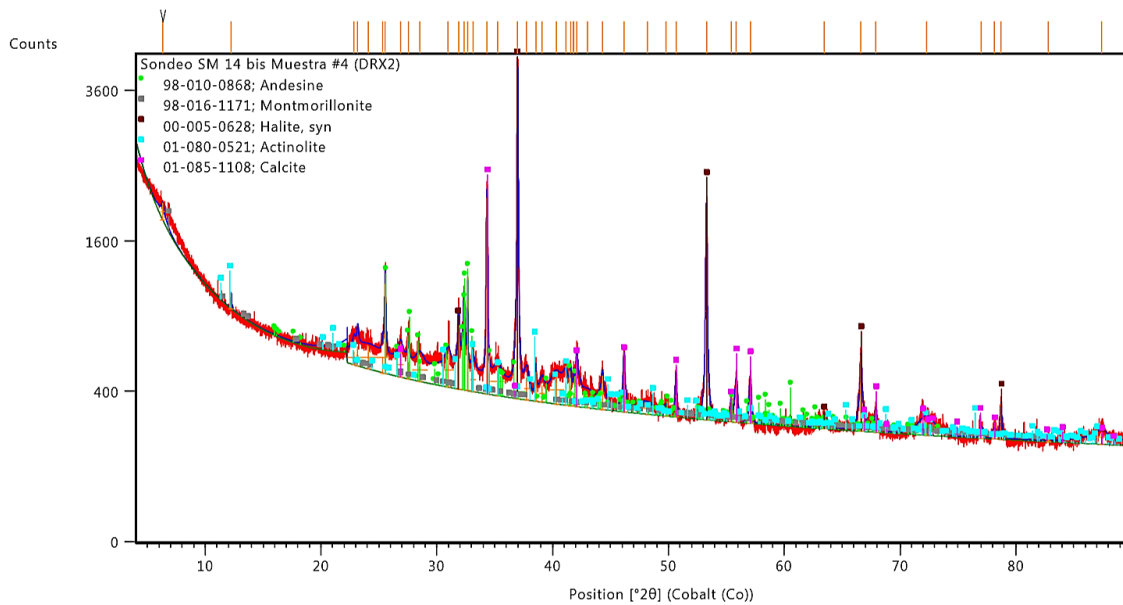


Figura Anexo B.2. Difractograma correspondiente a la muestra SM-14bis M4 obtenido del análisis de roca total.

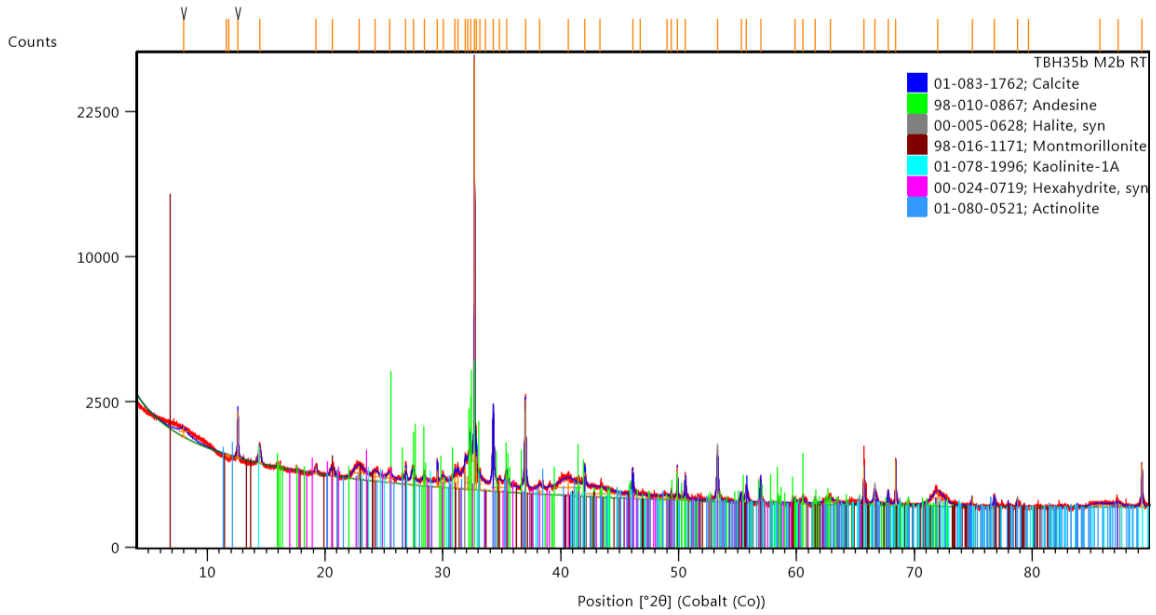


Figura Anexo B.3. Difractograma correspondiente a la muestra TBH-356 M2bis obtenido del análisis de roca total.

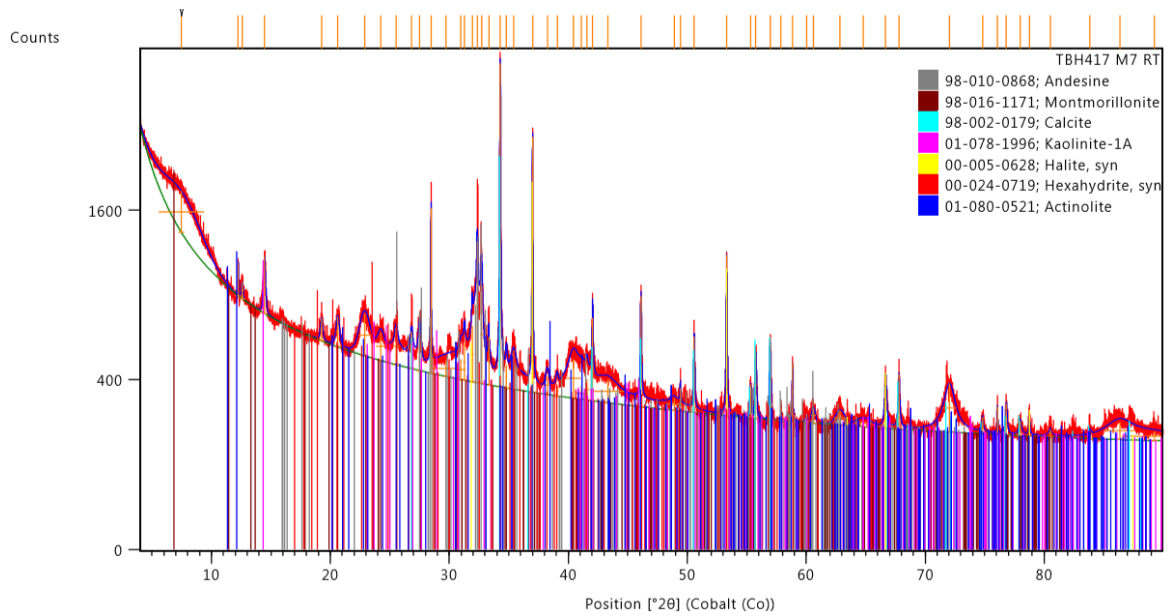


Figura Anexo B.4. Difractograma correspondiente a la muestra TBH-417 M7 obtenido del análisis de roca total

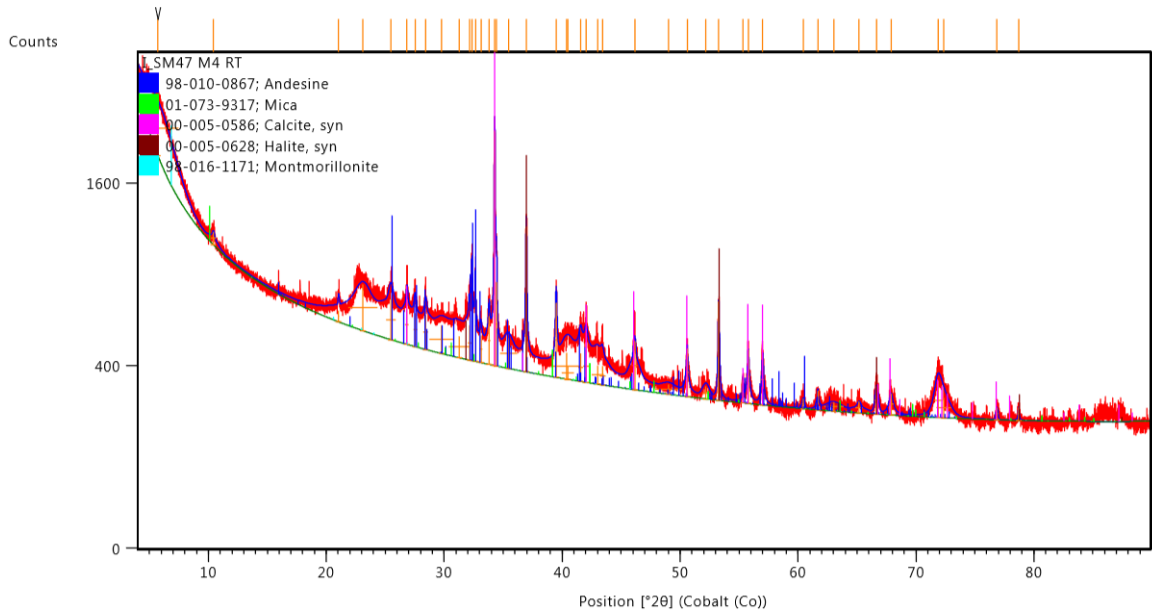


Figura Anexo B.5. Difractograma correspondiente a la muestra SM-47 M4 obtenido del análisis de roca total

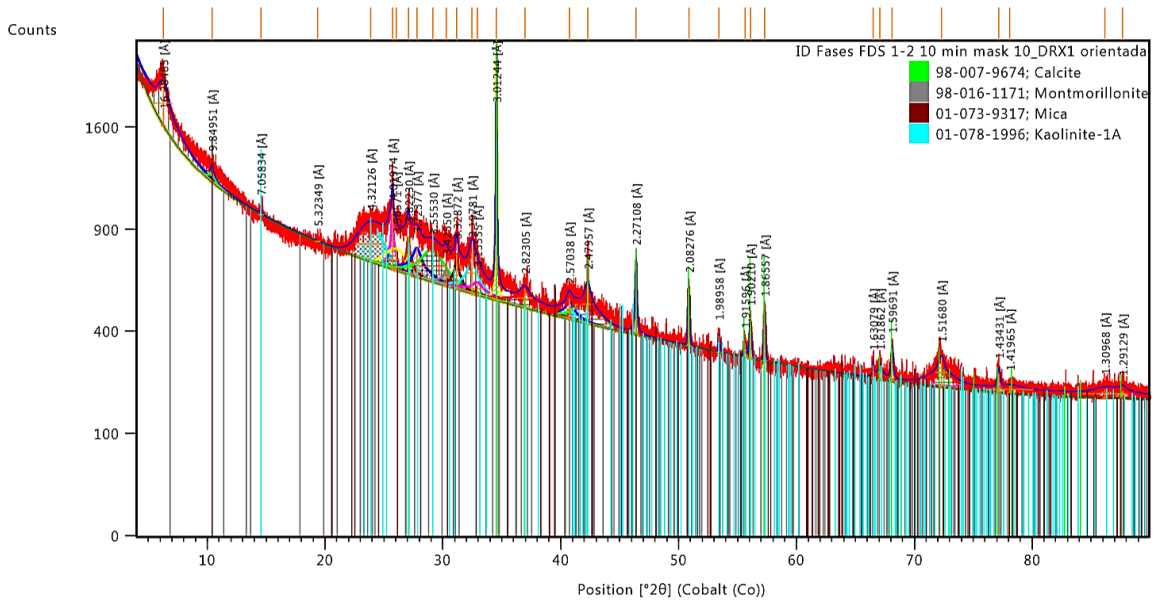


Figura Anexo B.6. Difractograma correspondiente a la muestra SM-37 M17 obtenido del análisis de la fracción de arcilla.

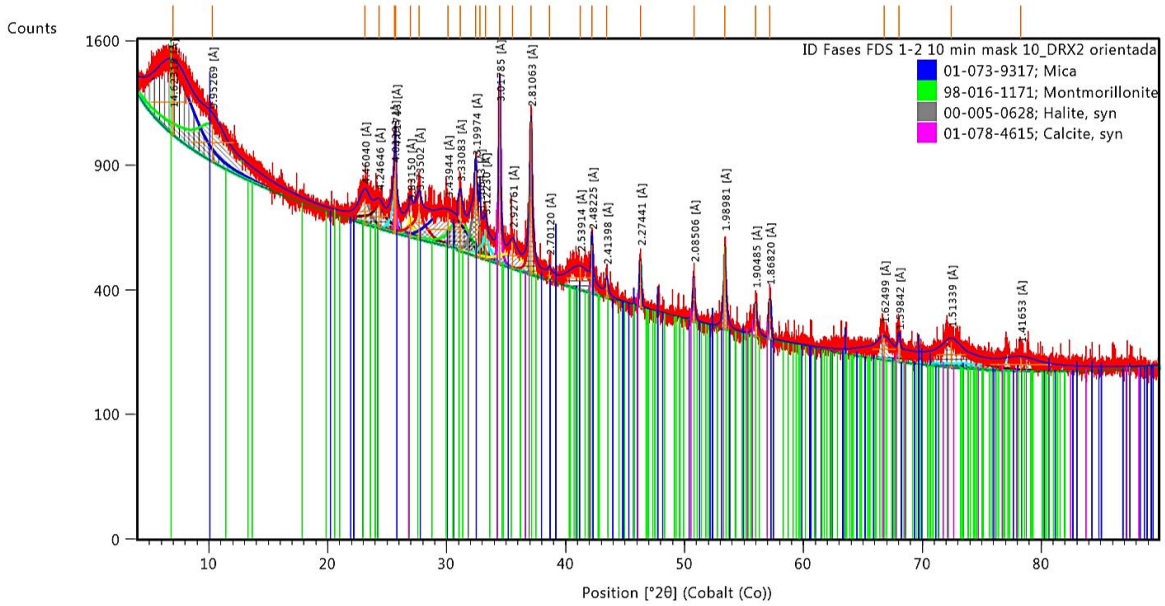


Figura Anexo B.7. Difractograma correspondiente a la muestra SM-14bis M4 obtenido del análisis de la fracción de arcilla.

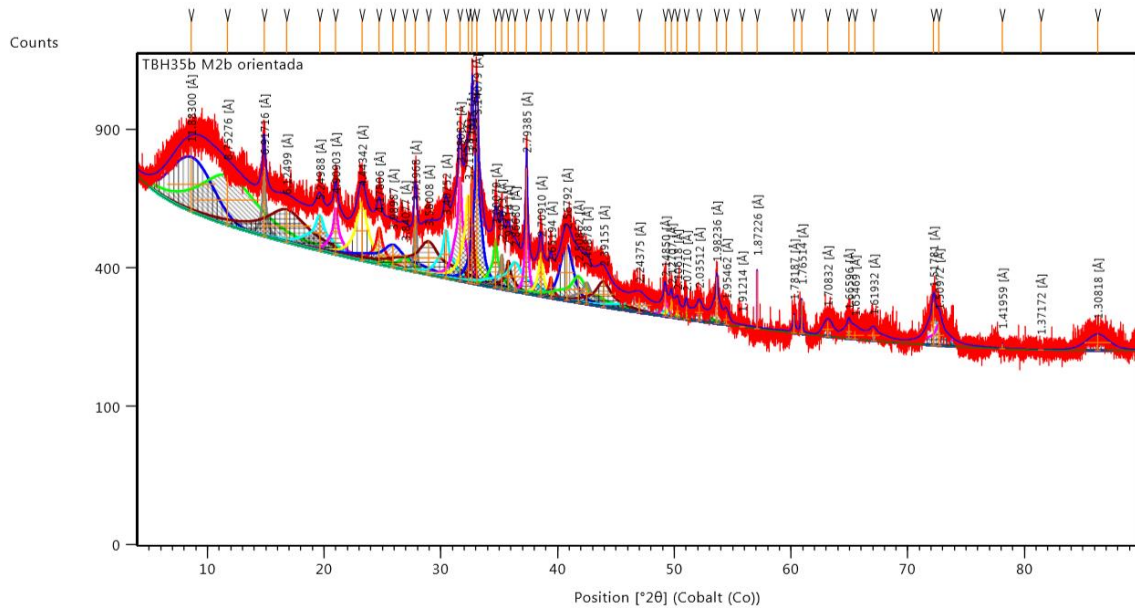


Figura Anexo B.8. Difractograma correspondiente a la muestra TBH-356 M2bis obtenido del análisis de la fracción de arcilla.

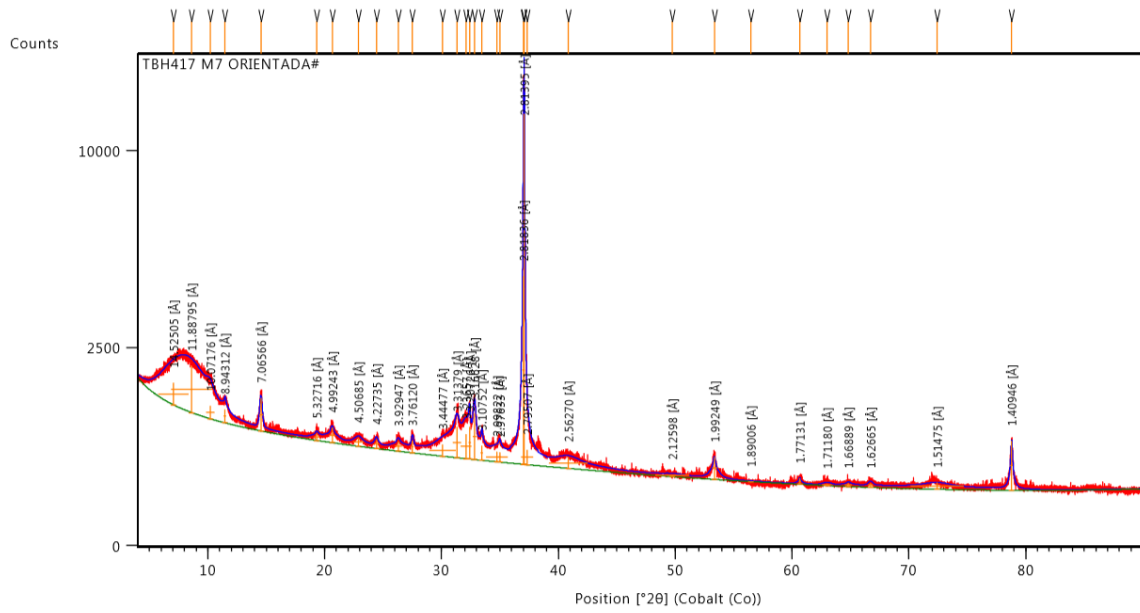


Figura Anexo B.9. Difractograma correspondiente a la muestra TBH-417 M7 obtenido del análisis de la fracción de arcilla.

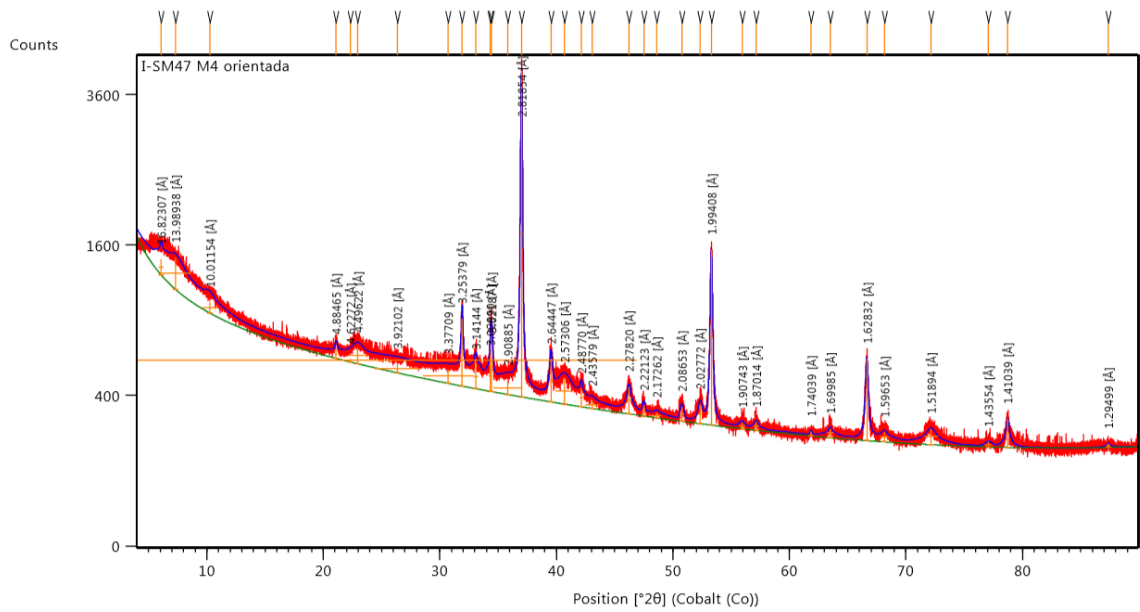


Figura Anexo B.10. Difractograma correspondiente a la muestra SM-47 M4 obtenido del análisis de la fracción de arcilla.

C. Determinación experimental *in-situ* de propiedades térmicas en el suelo de Santa Fe

Como complemento al estudio efectuado sobre las propiedades térmicas del suelo del ex Lago de Texcoco, en esta investigación se llevó a cabo la determinación *in-situ* en otro suelo de la Ciudad de México. Se midieron los parámetros térmicos del suelo en la zona de Santa Fe, al poniente de la Ciudad de México, donde actualmente se construye la Torre Bora. Se realizaron 13 pruebas en el sitio, a distintas profundidades dentro de las perforaciones para las pilas de la edificación.

El suelo de Santa Fe se compone de arenas pumíticas muy compactas que carecen de cementante (Santoyo et al., 2005). La estratigrafía de la zona se obtuvo a partir de sondeos de penetración estándar (SPT), constituida por: (a) Material de relleno (RE) que llega hasta los 7.50 m de profundidad y está compuesto por arena andesítica y pumítica, grava y boleos, producto de construcciones colindantes; (b) Arenas azules compactas (AA), se trata de un estrato de arena limosa andesítica con gravas, cuya profundidad llega hasta 21.50 m; (c) Tobas café compactas (TC), el estrato llega hasta los 27 m y se compone de arenas andesíticas, cuarzosas y pumíticas con presencia de boleos y poca arcilla; (d) Grava y arena pumítica compacta (GA), son gravas pumíticas con arena e intercalaciones de arcillas café claro cuya profundidad abarca hasta el final de las perforaciones. El nivel de aguas freáticas se encuentra por debajo del sondeo.

El protocolo de prueba consistió en descender dentro de una canastilla hasta la profundidad deseada. En seguida, en la pared de la perforación se localiza la zona en la que se puede efectuar la medición. El material debe ser característico de aquella profundidad, libre de boleos y material producto de la excavación. Ya que se trata de una zona compuesta por arenas compactas, es necesario taladrar un agujero antes de introducir los sensores de aguja. La perforación debe tener un diámetro igual al de las agujas, para asegurar el contacto entre el sensor y el suelo. Los sensores de la aguja se introducen cubiertos con grasa térmica para eliminar la resistencia al contacto con el material. Los sensores se dejan de 10 a 15 minutos dentro del suelo para garantizar el equilibrio térmico, posteriormente inicia la medición. Adicionalmente, se extrajo material de las paredes de la perforación para poderlo caracterizar en el laboratorio.



Figura Anexo C.1. Determinación experimental *in-situ* de propiedades térmicas en el suelo de Santa Fe: a) Excavación. b) Medidas de seguridad. c) Medición con el equipo de la aguja térmica.

Los resultados tanto de las propiedades térmicas obtenidas *in-situ* como del contenido natural de agua en el suelo se muestran en la Tabla C.1. Los valores son cercanos a aquellos reportados por Rawlings y Sykulski (1999) para arena húmeda (Sección 1.2). Con esta medición, además de hacer uso del equipo de la aguja térmica *in-situ*, se muestra la variedad de suelos que existen en la Ciudad de México y su distinto comportamiento térmico. En la Figura C.2 se presentan los perfiles de las propiedades térmicas del suelo de Santa Fe, así como el contenido natural de agua.

Tabla Anexo C.1. Estadística descriptiva de las propiedades térmicas del suelo de Santa Fe.

Propiedades térmicas	<i>N</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	CV	Valor Mínimo	Valor Máximo
Conductividad térmica con aguja simple, λ ($W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)	12	0.94	0.16	16.5%	0.64	1.10
Conductividad térmica con aguja doble, λ ($W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)	13	0.81	0.12	14.8%	0.61	1.10
Capacidad calorífica volumétrica, c_{cv} ($MJ\ m^{-3}\ ^\circ C^{-1}$)	13	1.91	0.48	25.0%	1.03	2.59
Difusividad térmica, D ($m^2\ s^{-1}$)	13	0.46	0.17	19.8%	0.28	0.84
Contenido natural de agua. w (%)	11	18.18	10.52	57.8%	9.20	42.30

Nota: *N* = número de pruebas, *m* = media, *s* = desviación estándar, CV = coeficiente de variación.

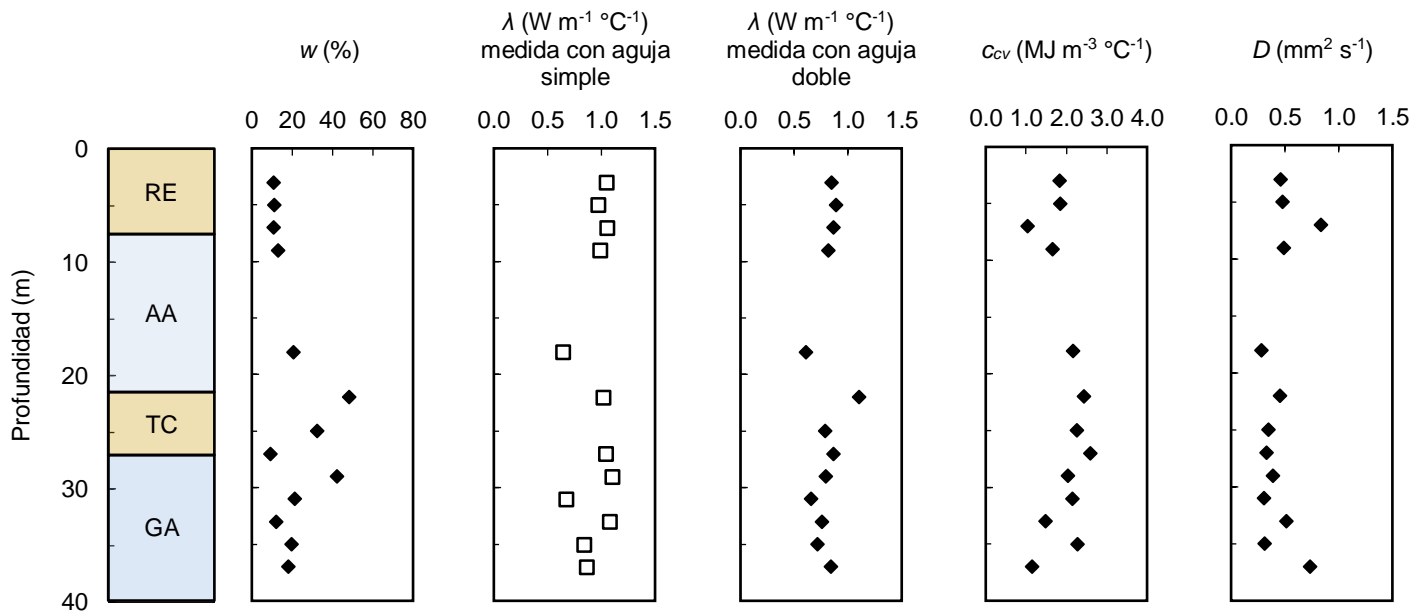


Figura Anexo C.2. Perfil de las propiedades térmicas del suelo de Santa Fe.

Es fundamental resaltar la importancia de las medidas de seguridad que se tomaron durante toda la prueba. Al descender a la perforación se contó con casco, lentes de seguridad, guantes, botas con casquillo, chaleco reflejante y arnés en todo momento. De igual forma, se previó el empleo de un tanque de oxígeno y un explosímetro, con el fin de poder detectar gases tóxicos y evitar problemas para respirar. Además del equipo para realizar la medición, se ingresó con un radio para tener comunicación con el personal que estaba monitoreando la prueba. Por último, la perforación se cubrió con una rejilla en todo momento para evitar que material o personal cayeran accidentalmente.