

**CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EXPANSIVO  
DE SUELOS ARCILLOSOS EN CABO ROJO**

Por:

Yaurel Guadalupe Torres

Tesis sometida en cumplimiento parcial  
de los requisitos para el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

en

Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO  
RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ  
DICIEMBRE 2008

Aprobado por:

\_\_\_\_\_  
Miguel A. Pando López, Ph.D.  
Presidente, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Miguel A. Muñoz Muñoz, Ph.D.  
Miembro, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Ricardo Ramos Cabeza, Ph.D.  
Miembro, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Julia O'Hallorans, Ph.D.  
Representante de Escuela Graduada

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Ismael Pagán Trinidad, M.S.C.E.  
Director del Departamento de  
Ingeniería Civil y Agrimensura

\_\_\_\_\_  
Fecha

## Abstract

This MS thesis involves characterizing and evaluating the expansion potential of several clayey soils from the area of Boquerón, Cabo Rojo, Puerto Rico. The samples were collected from two test pits excavated as part of this project and were also obtained from a geotechnical consultant that had performed a study in the vicinity of the test pit locations. The experimental program involved in-situ field tests and laboratory tests. The laboratory program involved geotechnical classification of the soils, gradation, Atterberg limits, mineralogy characterization, and tests for assessing swell potential of clayey soils. The mineralogy characterization involved determination of specific surface area, cation exchange capacity, infrared spectroscopy, differential thermal analysis, X-Ray diffraction, and X-Ray fluorescence. Results from these tests revealed significant presence of montmorillonite. The mineralogy combined with test results of swell pressure and free swell revealed that some of the soils tested from Cabo Rojo can experience a free swell greater than 40% and swell pressures greater than 35,000 psf. The results of this investigation confirmed presence of expansive soils in this area of the Cabo Rojo region of Puerto Rico.

## Resumen

Esta tesis de Maestría en Ciencias envuelve la caracterización y evaluación del potencial expansivo de varios suelos arcillosos del área de Boquerón, Cabo Rojo, Puerto Rico. Las muestras fueron obtenidas de dos trincheras realizadas como parte de este proyecto además de muestras obtenidas por parte de un consultor geotécnico que había realizado un estudio en la vecindad de la localización de las trincheras. El programa experimental envolvió pruebas in-situ y de laboratorio. Las pruebas de laboratorio incluyeron pruebas geotécnicas de clasificación, gradación, límites de Atterberg, caracterización mineralógica y pruebas para la verificación del potencial de entumecimiento de los suelos arcillosos. La caracterización mineralógica envolvió la determinación de área superficial de las arcillas, capacidad de intercambio catiónico, espectroscopia de infrarrojo, análisis por diferencia termal, difracción de rayos X y fluorescencia de rayos X. Los resultados de estas pruebas reflejaron la presencia del mineral montmorilonita. La mineralogía combinada con los resultados de presión de entumecimiento y entumecimiento libre revelaron que algunos suelos de Cabo Rojo pueden experimentar un entumecimiento libre mayor de 40% y presiones de entumecimiento mayores de 35,000 libras/pies<sup>2</sup>. Los resultados de esta investigación comprueban la existencia de suelos expansivos en esta área de la región de Cabo Rojo, Puerto Rico.

# Agradecimientos

---

Quiero agradecer primero que todo a mi familia y a Dios por siempre formar parte de mi crecimiento, formación y mis logros; por darme el aliento para seguir adelante y por haberme permitido estar donde estoy.

Agradezco a mi comité de tesis por darme la oportunidad de realizar esta investigación, en especial al Dr. Miguel Muñoz Muñoz por aceptar formar parte de mi comité sin haberme conocido.

También extendiendo mi agradecimiento a todos amigos y compañeros del grupo de geotecnia del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Edgardo Ruiz Mateo, Eimar Sandoval, Arleen Reyes, Omar Esquilín Mangual, Omar Flores, César Ramírez Fulcar, Manuel Ochoa y sobre todo a nuestro amigo, compañero y técnico de laboratorio, el señor Jaime Ramírez quien siempre dijo presente.

No pueden faltar mis más expresivas gracias a los compañeros del laboratorio de Agronomía y Suelos, en especial a Emmanuel Feliciano y Katherine Quiñones quienes dejaban sus tareas a un lado para poder ayudarme con las mías. Agradezco también al Director de la Estación Experimental Agrícola Tropical del Departamento de Agricultura Federal el Dr. Ricardo Goenaga y al químico Ulises Chardón quienes me extendieron la mano muy cordialmente. Esta tesis se pudo completar también gracias a la colaboración de los técnicos de laboratorio de los distintos departamentos del Recinto Universitario de Mayagüez, José Almodóvar del Departamento de Biología, Miguel Santiago del Departamento de Geología y

Boris Rentería del Departamento de Ciencias de Ingeniería y Materiales. Agradezco también al laboratorio *Evans Analytical Group* en Texas quienes colaboraron con parte de esta tesis.

Agradezco en especial al Dr. Pedro Jiménez quien hizo posible que esta investigación pudiese comenzar. También le doy las gracias enérgicamente al ingeniero Francisco “Pancho” Rodríguez Dosal de TAMRIO quien facilitó parte de su equipo y personal para la recopilación de muestra y poder enriquecer esta investigación. Mi agradecimiento también al Dr. Juan B. Bernal Vera por sus consejos y su apoyo durante este proceso. Al Dr. Miguel Pando López por haberme aceptado como estudiante de investigación y por haberme guiado a través de esta jornada hasta completarla.

Por último quiero agradecer a quien me ha dado todo el apoyo posible y quien siempre ha estado conmigo en mis altas y bajas durante gran parte de este proceso. Gracias por ser mi fortaleza en mis momentos de debilidad, mi cordura en mis momentos de locura y mi locura en mis momentos lucidez absurda. Gracias por la difícil tarea de soportarme; mi amiga, compañera y novia Alesandra Cristina Morales Vélez. Tienes mi mundo en tus manos.

# Tabla de Contenido

---

Agradecimientos.....	i
Tabla de Contenido.....	iii
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tablas.....	x
Abreviaciones.....	xii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Organización de la tesis.....	2
Capítulo 2. Revisión de Literatura.....	4
2.1. Introducción.....	4
2.2. Definición del potencial expansivo o de entumecimiento.....	4
2.3. ¿Qué son suelos expansivos?.....	5
2.4. Minerales de arcilla.....	8
2.4.1. <i>Caolinitas</i> .....	8
2.4.2. <i>Micas</i> .....	9
2.4.3. <i>Vermiculitas</i> .....	9
2.4.4. <i>Esmectitas</i> .....	9
2.5. Factores relacionados al cambio volumétrico del suelo.....	10
2.5.1. <i>Tamaño de partícula</i> .....	11
2.5.2. <i>Área superficial</i> .....	11
2.5.3. <i>Carga estructural y carga dependiente del pH</i> .....	11
2.5.4. <i>Capacidad de intercambio catiónico</i> .....	13
2.5.5. <i>Plasticidad</i> .....	13
2.6. Suelos expansivos en el mundo.....	15

2.7. Caracterización mineralógica de suelos expansivos .....	18
2.8. Medición de potencial expansivo o de entumecimiento .....	19
2.8.1. Índice de plasticidad (PI).....	20
2.8.2. Actividad del suelo.....	21
2.8.3. Índices de entumecimiento libre .....	22
2.8.4. Coeficiente de extensión lineal (COLE) .....	24
2.8.5. Potencial de entumecimiento unidimensional .....	25
2.8.6. Potencial de cambio volumétrico (PVC) .....	26
2.8.7. Índice de expansión (EI).....	28
2.9. Estudios previos en Puerto Rico.....	28
2.10. Resumen.....	30
<b>Capítulo 3. Plan Experimental (Metodología) .....</b>	<b>33</b>
3.1. Introducción.....	33
3.2. Procedimiento general .....	33
3.3. Estudio de campo y muestreo .....	34
3.4. Pruebas de laboratorios .....	35
3.4.1. Caracterización del suelo .....	35
3.4.2. Propiedades de compactación .....	36
3.4.3. Caracterización mineralógica del suelo.....	37
3.4.4. Medición de potencial expansivo.....	40
<b>Capítulo 4. Área de Estudio.....</b>	<b>42</b>
4.1. Introducción.....	42
4.2. Descripción general del área de estudio.....	42
4.2.1. Geología general .....	44
4.2.2. Información de suelos superficiales del área de estudio.....	49
4.3. Área de proyecto y muestreo .....	50
4.4. Pruebas de campo.....	53
4.5. Caracterización del suelo .....	55

4.5.1. Descripción visual .....	56
4.5.2. Contenido de humedad natural.....	59
4.5.3. Límites de Atterberg.....	59
<b>Capítulo 5. Resultados y Análisis .....</b>	<b>64</b>
5.1. Introducción.....	64
5.2. Clasificación de muestras estudiadas .....	64
5.2.1. Resumen de las muestras .....	64
5.2.2. Granulometría.....	66
5.2.3. Límites de Atterberg.....	67
5.2.4. Resumen de clasificación.....	69
5.3. Compactación .....	70
5.4. Propiedades mineralógicas del suelo .....	72
5.4.1. Resultados de pH .....	73
5.4.2. Resultados de área superficial.....	73
5.4.3. Resultados de capacidad de intercambio catiónico.....	76
5.4.4. Resultados de difracción de rayos X.....	80
5.4.5. Resultados de fluorescencia de rayos X.....	90
5.4.6. Resultados del análisis por diferencia termal (DTA).....	91
5.4.7. Resultados de espectroscopia de infrarrojo .....	94
5.4.8. Microscopia electrónica de rastreo.....	98
5.4.9. Resumen de resultados del análisis mineralógico.....	103
5.5. Medición de potencial expansivo .....	107
5.5.1. Índice de entumecimiento libre y MFSI.....	108
5.5.2. Potencial de entumecimiento .....	112
5.5.3. Potencial de cambio volumétrico.....	127
5.5.4. Coeficiente de extensión lineal (COLE) .....	129
5.5.5. Resumen de mediciones del potencial expansivo.....	132
5.6. Tendencias y relaciones entre los resultados .....	134
<b>Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>146</b>

6.1. Resumen.....	146
6.2. Conclusiones .....	148
6.3. Recomendaciones para trabajos futuros .....	150
Referencias .....	152
Apéndices .....	158

# Lista de Figuras

---

Figura 2.1. Estructura de tetraedro y octaedro. ....	6
Figura 2.2. Esquemáticos mostrando grupos de minerales 1:1, 2:1 y 2:2. ....	7
Figura 2.3. Distribución de iones según la doble capa difusa. ....	12
Figura 2.4. Carta de plasticidad para clasificar suelos finos según los límites de Atterberg. ....	14
Figura 2.5. Mapa de suelos expansivos en EE.UU. ....	17
Figura 2.6. Gráfica para estimar el potencial de entumecimiento basado en la actividad del suelo. ...	22
Figura 2.7. Índice de entumecimiento vs índice de plasticidad. ....	26
Figura 2.8. Índice de entumecimiento vs PVC. ....	27
Figura 2.9. Distribución de suelos expansivos en Puerto Rico según encuesta de Ochoa y Pando (2005). ....	29
Figura 2.10. Discrepancia sobre el problema de suelos expansivos según encuesta de Ochoa y Pando (2005). ....	30
Figura 3.1. Equipo de compactación Proctor. ....	36
Figura 3.2. Equipo de compactación Harvard Miniatura. ....	37
Figura 4.1. Mapa general de Puerto Rico mostrando área de Cabo Rojo. ....	43
Figura 4.2. Localización del área de estudio. ....	43
Figura 4.3. Mapa geológico. ....	46
Figura 4.4. Mapa geológico, cuadrángulo de Puerto Real, Cabo Rojo. ....	47
Figura 4.5. Mapa área del Valle de Lajas. ....	49
Figura 4.6. Área de la exploración geotécnica por trinchera. ....	51
Figura 4.7. Vegetación de la zona. ....	52
Figura 4.8. Trinchera No.1 del 6 de septiembre de 2007. ....	52
Figura 4.9. Trinchera No. 2 del 20 de septiembre de 2007. ....	53
Figura 4.10. Resultados pruebas de campo. ....	54
Figura 4.11. Fotos de los suelos de tubos Shelby del estudio privado. ....	57
Figura 4.12. Fotos de los suelos de la trinchera de exploración de Cabo Rojo. ....	58
Figura 4.13. Resumen de valores de los límite de Atterberg del estudio en Cabo Rojo. ....	60
Figura 4.14. Valores de límites de Atterberg y carta de plasticidad del estudio en Cabo Rojo. ....	61
Figura 4.15. Humedad natural, límites plástico y líquido. Muestras de estudio privado y trinchera. ...	62
Figura 4.16. Registro de la trinchera No.2. ....	63

Figura 5.1. Curvas granulométricas de muestras estudiadas.....	67
Figura 5.2. Carta de plasticidad. ....	68
Figura 5.3. Compactación. Muestra T 2-6 ft según energía de Proctor modificado.....	71
Figura 5.4. Área superficial por el método del EGME. ....	75
Figura 5.5. Relación entre límites de Atterberg obtenidos y área superficial. ....	75
Figura 5.6. Relación entre CIC $Mg^{+2}$ y área superficial. ....	77
Figura 5.7. Composición mineralógica a base de intercambio catiónico activo vs actividad . ....	79
Figura 5.8. Cationes de intercambio activos vs actividad.....	80
Figura 5.9. Resultados de XRD cuantitativo. Muestras CM-1-05, CM-1-07, T 2-6 ft y T 6-8 ft. ....	83
Figura 5.10. Resultado de XRD – Muestra CM-1-04. ....	85
Figura 5.11. Resultado de XRD – Muestra CM-1-05. ....	86
Figura 5.12. Resultado de XRD – Muestra CM-1-07. ....	86
Figura 5.13. Resultado de XRD – Muestra CM-1-08. ....	87
Figura 5.14. Resultado de XRD – Muestra CM-1-09. ....	87
Figura 5.15. Resultado de XRD – Muestra T 2-6 ft.....	88
Figura 5.16. Resultado de XRD – Muestra T 6-8 ft.....	88
Figura 5.17. Resultados de XRD – Cualitativo. Todas la muestras.....	89
Figura 5.18. Resultados de análisis por diferencia termal de las muestras selectas. ....	93
Figura 5.19. Espectro CM-1-04. Absorbancia. ....	95
Figura 5.20. Espectro CM-1-05. Absorbancia. ....	96
Figura 5.21. Espectro CM-1-07. Absorbancia. ....	96
Figura 5.22. Espectro CM-1-08. Absorbancia. ....	97
Figura 5.23. Espectro CM-1-09. Absorbancia. ....	97
Figura 5.24. Fotos microscópicas con SEM. Resolución 500X 10kV. ....	100
Figura 5.25. Fotos microscópicas con SEM. Resolución 3,500X 10kV. ....	101
Figura 5.26. Fotos microscópicas con SEM. Resolución 7,500X 10kV. ....	102
Figura 5.27. Relación entre entumecimiento libre y MFSI. ....	110
Figura 5.28. MFSI vs límite líquido volumétrico.....	111
Figura 5.29. Resultados de la presión de entumecimiento. Métodos A & B. ....	113
Figura 5.30. Resultados de entumecimiento libre y porcentaje de levantamiento.....	114
Figura 5.31. Entumecimiento vs tiempo. ....	117

Figura 5.32. Presión de entumecimiento. Métodos A y B. Muestras CM-1-04, CM-1-05 y CM-1-07. .....	118
Figura 5.33. Presión de entumecimiento. Métodos A y B. Muestras CM-1-08, T 2-6 ft y T 6-8 ft.	119
Figura 5.34. Presión de entumecimiento. CM-1-04, Métodos A y B. ....	121
Figura 5.35. Presión de entumecimiento. CM-1-05, Método A. ....	122
Figura 5.36. Presión de entumecimiento. CM-1-07, Métodos A y B. ....	123
Figura 5.37. Presión de entumecimiento. CM-1-08, Métodos A y B. ....	124
Figura 5.38. Presión de entumecimiento. T 2-6 ft, Métodos A y B. ....	125
Figura 5.39. Presión de entumecimiento. T 6-8 ft, Métodos A y B. ....	126
Figura 5.40. Resultados potencial de cambio volumétrico. ....	128
Figura 5.41. Cambio en las muestras debido a la expansión. ....	129
Figura 5.42. Cationes de intercambio activos vs actividad. ....	130
Figura 5.43. Valor del COLE estimado en función del % de arcilla y las regiones de la Figura 5.42. .....	131
Figura 5.44. Relación entre actividad y potencial de entumecimiento usando relación de Seed et al. (1962). ....	135
Figura 5.45. Relación entre la presión de enumecimiento y el incremento en humedad medido. ....	139
Figura 5.46. Relación entre entumecimiento libre y porciento de levantamiento vs incremento en humedad medido. ....	140
Figura 5.47. Regresiones entre parámetros de presión de entumecimiento y la actividad. ....	141
Figura 5.48. Regresión entre presión de entumecimiento y la presión in-situ. ....	142
Figura 5.49. Comparaión entre la presión de entumecimiento estimada y los valores medidos. ....	144

# Lista de Tablas

---

Tabla 2.1. Potencial expansivo según Snethen (1979).....	5
Tabla 2.2. Rangos típicos de propiedades de varios minerales.....	10
Tabla 2.3. Suelos expansivos en el mundo.....	15
Tabla 2.4. Métodos típicos de caracterización mineralógica.....	18
Tabla 2.5. Correlaciones de pruebas comunes en los suelos.....	19
Tabla 2.6. Correlaciones de pruebas comunes en los suelos.....	20
Tabla 2.7. Potencial de entumecimiento basado en el índice de plasticidad según Chen (1988). ....	20
Tabla 2.8. Potencial de entumecimiento según MFSI. ....	24
Tabla 2.9. Potencial de retracción-entumecimiento basado en el COLE.....	25
Tabla 2.10. Magnitud del PVC.....	27
Tabla 2.11. Índice de expansión. ....	28
Tabla 3.1. Pruebas de caracterización del suelo.....	35
Tabla 3.2. Resumen de pruebas para la caracterización mineralógica.....	39
Tabla 3.3. Prueba de medición del potencial expansivo del suelo.....	41
Tabla 4.1. Descripción geológica.....	48
Tabla 4.2. Clasificación taxonómica de suelos en Cabo Rojo. ....	50
Tabla 4.3. Resumen pruebas de caracterización del suelo. ....	55
Tabla 5.1. Origen de las muestras estudiadas.....	65
Tabla 5.2. Resumen de muestras estudiadas y pruebas de clasificación.....	65
Tabla 5.3. Muestras escogidas para investigación.....	69
Tabla 5.4. Ensayos de propiedades mineralógicas. ....	72
Tabla 5.5. Resultados del pH.....	73
Tabla 5.6. Área superficial de las arcillas. ....	74
Tabla 5.7. Resultados de capacidad de intercambio catiónico para el suelo.....	76
Tabla 5.8. Resultados de CIC para la fracción de arcilla. ....	77
Tabla 5.9. Valores del parámetro de actividad de intercambio catiónico ....	78
Tabla 5.10. Composición de las regiones mineralógicas. Gráfica $CIA_c$ vs $A_c$ .....	79
Tabla 5.11. Resultados XRD cuantitativo. CM-1-05, CM-1-07, T 2-6 ft y T 6-8 ft.....	82
Tabla 5.12. Resultados de fluorescencia de rayos X. ....	90
Tabla 5.13. Resumen de minerales identificados con IRS.....	98

Tabla 5.14. Resumen de las propiedades mineralógicas obtenidas.....	103
Tabla 5.15. Resumen de composición mineralógica de la muestra CM-1-04. ....	104
Tabla 5.16. Resumen de composición mineralógica de la muestra CM-1-05. ....	104
Tabla 5.17. Resumen de composición mineralógica de la muestra CM-1-07. ....	105
Tabla 5.18. Resumen de composición mineralógica de la muestra CM-1-08. ....	105
Tabla 5.19. Resumen de composición mineralógica de la muestra CM-1-09. ....	106
Tabla 5.20. Resumen de composición mineralógica de la muestra T 2-6 ft.....	106
Tabla 5.21. Resumen de composición mineralógica de la muestra T 6-8 ft.....	107
Tabla 5.22. Prueba de medición del potencial expansivo del suelo.....	108
Tabla 5.23. Resultados del entumecimiento libre ( <i>Free Swell</i> ). ....	108
Tabla 5.24. Clasificación del potencial de entumecimiento según MFSI y $LL_{\text{volumen}}$ . ....	109
Tabla 5.25. Potencial de entumecimiento basado en el MFSI. ....	111
Tabla 5.26. Resumen pruebas de potencial de entumecimiento. ....	113
Tabla 5.27. Resultados de entumecimiento libre y porcentaje de levantamiento. ....	115
Tabla 5.28. Resumen cambio en razón de vanos. ....	120
Tabla 5.29. Resultados PVC. ....	127
Tabla 5.30. Resumen % de arcilla, región y COLE estimado. ....	131
Tabla 5.31. Resumen de los resultados de las pruebas. ....	133
Tabla 5.32. Resumen Potencial de entumecimiento. Figura 5.44. ....	136
Tabla 5.33. Cambio de humedades ASTM D 4546 Método A y Método B. ....	137
Tabla 5.34. Cambios en razón de vanos, humedad y saturación, Método A. ....	138
Tabla 5.35. Cambios en razón de vanos, humedades y saturación, Método B. ....	138
Tabla 5.36. Resumen de valores estimados para las ecuaciones propuestas. Método A. ....	144

# Abreviaciones

---

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	: American Standards for Testing and Materials
Å	: Angstrom, $10^{-10}$ metros
CIA <sub>c</sub>	: Actividad de Intercambio Catiónico
CIC	: Capacidad de Intercambio Catiónico
COLE	: Coeficiente de Extensión Lineal
DTA	: <i>Differential Thermal Analysis</i> o Análisis por Diferencia Termal
EGME	: Ethylene Glycol Monoethyl Ether
EI	: <i>Expansion Index</i> o Índice de Expansión
$\gamma_{\text{dry, max}}$	: Peso unitario seco máximo
IRS	: <i>Infrared Red Spectroscopy</i> o Espectroscopia de Infrarrojo
LI	: <i>Liquidity Index</i> o Índice Líquido
LL	: <i>Liquid Limit</i> o Límite Líquido
MFSI	: <i>Modified Free Swell Index</i> o Índice de Entumecimiento Libre Modificado
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration
NRCS	: National Resource Conservation Service
PDC	: <i>Penetrometer Dynamic Cone</i> o Cono Dinámico de Penetración
PI	: <i>Plasticity Index</i> o Índice de Plasticidad
PL	: <i>Plastic Limit</i> o Límite Plástico
PVC	: <i>Potential Volume Change</i> o Potencial de Cambio Volumétrico
SEM	: <i>Scan Electron Microscope</i> o Microscopio de Rastreo de Electrón
SL	: <i>Shrinkage Limit</i> o Límite de Retracción
USCS	: Unified Soil Classification System
USDA	: United States Department of Agriculture
USSCS	: United States Soil Conservation Service
$w_{\text{opt}}$	: Contenido de humedad óptimo
XRD	: <i>X-Ray Diffraction</i> o Difracción de Rayos- X

# Capítulo 1. Introducción

---

---

## 1.1. Introducción

Los suelos expansivos causan problemas en varias partes del mundo incluyendo EE.UU., Canadá, Argentina, Australia, entre otros (Chen, 1975). Por ejemplo en EE.UU., los suelos expansivos causan daños estructurales que ascienden hasta los \$9 mil millones al año según estudios realizados (Jones y Holtz, 1973, Jones y Jones, 1987). A pesar de que no son un riesgo de vida preocupante como los terremotos, huracanes o las inundaciones, sí son causantes de grandes costos económicos. Los suelos expansivos son aquellos que tienden a cambiar su volumen según el cambio que sufran en el contenido de humedad; a medida en que éste aumenta, el suelo expande, a medida en que disminuye, se contrae. Para el caso de Puerto Rico la evidencia existente referente a daños ocasionados por suelos expansivos es escasa y en muchos casos especulativa. Dentro de la comunidad geotécnica de Puerto Rico, no hay un consenso al respecto. Una encuesta realizada por Ochoa y Pando (2005) confirma esta falta de consenso. Algunas compañías de geotecnia consideran los suelos expansivos como un problema muy serio en Puerto Rico mientras otras consideran que no lo es. Las compañías que consideran el problema uno real, identificaron las regiones de Moca, San Sebastián, Cabo Rojo y Dorado como las más afectadas por este problema. Esta tesis busca proveer información confiable relacionada a este tipo de suelos para una de las regiones identificadas como potencialmente críticas. Específicamente esta tesis involucró la evaluación del potencial de expansión de muestras alteradas e inalteradas usando diversos métodos experimentales como el entumecimiento libre, el

índice de entumecimiento modificado, el potencial de cambio volumétrico y potencial de entumecimiento.

## **1.2. Objetivos**

El objetivo principal de esta investigación, es evaluar el potencial expansivo de un suelo arcilloso del oeste de Puerto Rico. Se propone evaluar el potencial expansivo mediante distintas pruebas de laboratorio. Un objetivo secundario es comparar las distintas pruebas y definir las ventajas y desventajas de cada una. También se propone identificar las propiedades mineralógicas de las arcillas seleccionadas para este estudio y relacionarlas con su potencial expansivo.

## **1.3. Organización de la tesis**

Esta tesis se compone de seis Capítulos y tres Apéndices. Adicional del Capítulo de introducción, tenemos el Capítulo 2 que presenta la revisión de literatura llevada a cabo para este trabajo enfocado en los siguientes temas: definiciones y conceptos básicos, pruebas y técnicas para evaluar potencial expansivo de arcillas y estudios existentes parecidos al propuesto realizados en otras regiones del mundo. El tercer capítulo describe la metodología experimental utilizada para la caracterización y evaluación en esta investigación y explica brevemente cada uno de los métodos. El cuarto capítulo presenta una descripción general de la geología de Puerto Rico, específicamente enfocada a la región cercana al área de estudio. Este capítulo a su vez presenta una descripción detallada del lugar donde se llevó a cabo el muestreo para las distintas pruebas realizadas. Las pruebas realizadas fueron agrupadas en tres grupos principales; caracterización del suelo, propiedades mineralógicas del suelo y la evaluación del potencial expansivo. El quinto capítulo presenta los resultados y el análisis de cada una de las pruebas mencionadas en el capítulo precedente. Por último, el sexto capítulo es un resumen de la tesis

---

con recomendaciones a seguir para la identificación de este tipo de suelo y las pruebas a realizarse para la evaluación de su potencial expansivo.

## **Capítulo 2. Revisión de Literatura**

---

---

### **2.1. Introducción**

Este capítulo tiene como propósito principal proveer información relacionada con el potencial expansivo o cambio volumétrico de los suelos principalmente arcillosos. Se empieza con una definición de qué es un suelo expansivo y qué es su potencial de expansión. También provee una breve descripción de los suelos expansivos desde un enfoque mineralógico. Se presenta un resumen de los minerales más comunes que componen la estructura de suelos arcillosos y se relacionan éstos con algunas de las propiedades químicas y físicas que son consideradas como las más responsables del alto potencial de expansión de estos tipos de suelos. Este capítulo además resume de forma tabulada algunas de las experiencias que han recogido otras investigaciones en distintas partes del mundo con respecto a este problema de carácter global que son los suelos expansivos. El capítulo presenta un resumen de los métodos más utilizados por investigadores del tema para describir y evaluar las propiedades de suelos expansivos y su potencial expansivo. Finalmente este capítulo presenta un resumen de la poca investigación que se ha encontrado relacionada a evaluación de propiedades ingenieriles de suelos expansivos en Puerto Rico.

### **2.2. Definición del potencial expansivo o de entumecimiento**

Suelos expansivos se refiere a suelos que tienen una gran capacidad para aumentar su volumen. La literatura especializada a veces también usa el término potencial de entumecimiento como equivalente al término más explícito: potencial expansivo. El potencial

expansivo de un suelo puede definirse de muchas maneras. También cabe aclarar que uno se puede referir al potencial expansivo de suelos inalterados (es decir con una estructura que refleja la condición de campo o in-situ) o a muestras de suelo compactadas que reflejan un estado alterado con respecto a su estructura in-situ. Para muestras inalteradas, Snethen (1979) define el potencial expansivo o de entumecimiento como el porcentaje que cambia el volumen de una muestra restringida lateralmente al pasar de un estado inicial definido por su humedad y densidad natural a un estado de saturación. Esta medición se hace sometiendo a la muestra a una presión vertical igual a la que la muestra tiene in-situ. Basado en la definición, Snethen (1979) clasificó el potencial de expansión de los suelos en tres rangos que se resumen en la Tabla 2.1. Snethen reconoce que esta clasificación es baja en comparación con otras publicaciones.

Tabla 2.1. Potencial expansivo según Snethen (1979).

<i>Potencial Expansivo</i>	<i>Cambio Volumétrico Unidimensional<sup>1</sup></i>
Bajo	< 0.5%
Intermedio o Moderado	0.5 – 1.5%
Alto	> 1.5%

Más adelante en este capítulo se presentan otros criterios de clasificación del potencial expansivo de suelos.

### 2.3. ¿Qué son suelos expansivos?

En ingeniería civil, se considera un suelo expansivo como aquel que muestra una tendencia marcada a sufrir grandes cambios de volumen cuando cambia su contenido de humedad<sup>1</sup>. Por lo general todos los suelos de textura fina cambian algo de volumen al cambiar su contenido de humedad, pero en suelos expansivos se observa esto en forma más marcada. En suelos no plásticos o de poca plasticidad como un limo arenoso, esta tendencia a cambio de

<sup>1</sup> El contenido de humedad en ingeniería civil se define en términos gravimétricos como la relación de peso entre la fase de agua y de suelo seco expresada en porciento.

volumen es muy pequeña. El comportamiento volumétrico de suelos finos (limos y arcillas) sujeto a cambios de humedad es que su volumen aumenta o disminuye según su contenido de humedad suba o baje. Por tanto, de la misma manera que un suelo puede expandirse al aumentar su contenido de humedad, también puede contraerse al secarse.

La literatura especializada indica que los suelos expansivos suelen ser suelos arcillosos de alta plasticidad y ocasionalmente también limos de alta plasticidad. El tamaño de partícula de las arcillas es igual o menor que dos micrones ( $2\mu\text{m}$ ) según el *United State Department of Agriculture (USDA)*.

La cantidad de cambio volumétrico que manifiesta un suelo fino está relacionada directamente a su mineralogía y por tanto es necesario explicar brevemente la mineralogía de las arcillas para entender mejor el comportamiento de un suelo expansivo. El potencial expansivo de un mineral se debe a ciertas características físicas y químicas que son propias de cada mineral. La mayoría de los minerales de arcilla poseen una estructura cristalina formada por láminas a base de tetraedros de silicio y octaedros de aluminio. La Figura 2.1 muestra estas estructuras.

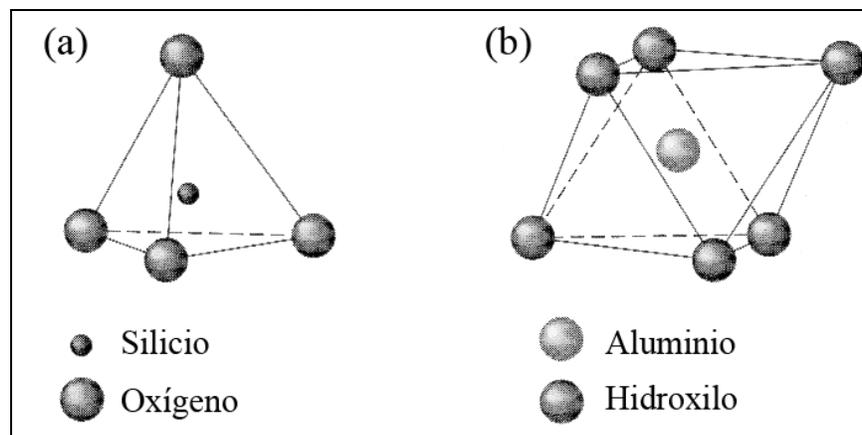


Figura 2.1. Estructura de tetraedro y octaedro. Adaptado de Das, 2002.

En la Figura 2.1a, se muestra el tetraedro de silicio que consiste en un poliedro en forma piramidal de cuatro caras triangulares que en su centro tiene un átomo de silicio y que en cada uno de sus cuatro vértices posee un átomo de oxígeno. En cambio, el octaedro (Figura 2.1b) es

un poliedro de ocho caras triangulares que en su centro tiene un átomo de aluminio y en cada uno de sus seis vértices posee un átomo de oxígeno o hidroxilos.

La mayoría de los minerales de arcilla con láminas tetraedrales y octaedrales, se dividen en grupos de minerales 1:1, 2:1 y 2:1:1 o 2:2, según la configuración de sus láminas. Los minerales 1:1, son aquellos que poseen en su estructura básica una lámina tetraedral por cada lámina octaedral de ahí la denominación 1:1. Esta configuración se muestra en la Figura 2.2a. Los minerales 2:1 tienen en su estructura básica dos láminas tetraedrales unidas por una lámina octaedral (Figura 2.2b). Cada capa estructural de los minerales 2:1 están separadas entre sí por moléculas de agua o por cationes intercambiables como potasio, magnesio, calcio, sodio, entre otros. Los minerales 2:1:1 o 2:2, tienen una estructura básica similar a los minerales 2:1, con la excepción de que cada capa estructural está separada por una lámina octaedral, como se muestra en la Figura 2.2c (Das, 2002; Mitchell y Soga, 2005).

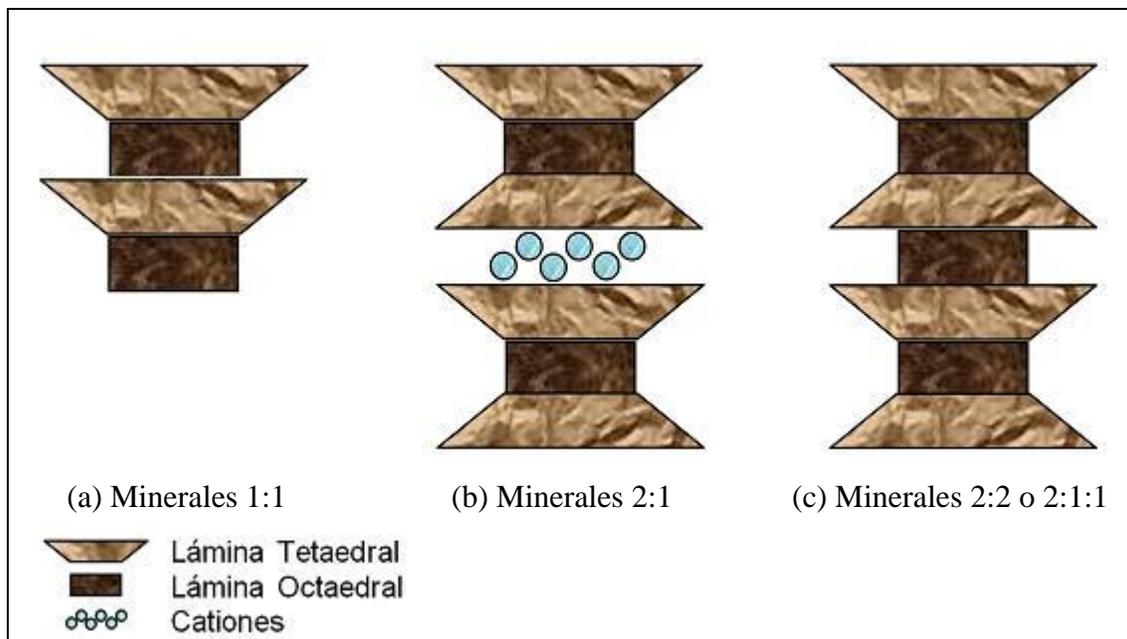


Figura 2.2. Esquemáticos mostrando grupos de minerales 1:1, 2:1 y 2:2.

Más adelante se describe en mayor detalle el potencial expansivo de distintos minerales con distintas estructuras o configuraciones. Sin embargo, los minerales 1:1 por lo general son

---

minerales con poca o ninguna capacidad de expansión. El mineral más común en este grupo son las caolinitas. Por otro lado, los minerales 2:1 suelen presentar apreciable capacidad de expansión (Schulze, 2002). Cuando comparamos los minerales del grupo 2:1 en relación a las propiedades de cambio volumétrico, se pueden dividir en tres grupos principales: las micas, las vermiculitas y las esmectitas.

## **2.4. Minerales de arcilla**

Esta sección describe brevemente los grupos comunes de los minerales de arcilla. Las propiedades aquí descritas y los factores relacionados al cambio volumétrico se definen con mayor detalle en la próxima sección.

### *2.4.1. Caolinitas*

Las caolinitas son el grupo más común de los minerales 1:1. Murray y Keller (1993) mencionan que éstas se forman por meteorización residual, alteración hidrotermal o como mineral sedimentario. A pesar de que se puede encontrar en suelos con fracciones de partículas gruesas como las arenas, predominan en la región de partículas de arcillas gruesas. Tienen un área superficial total bien baja en comparación con otros minerales de arcilla por su tamaño de partícula y porque el área superficial total se debe a su superficie externa únicamente. La carga estructural de las caolinitas es la más baja de los minerales de arcilla comunes y es generada mayormente por la carga dependiente del pH. Su capacidad de intercambio catiónico está limitada por su carga estructural y tiene poca o ninguna sustitución isomórfica. Las capas 1:1 están fuertemente atadas por puentes de hidrógenos que impiden la separación entre ellas evitando que sean minerales expansivos.

### *2.4.2. Micas*

Las micas pertenecen al grupo de los minerales 2:1. La mica, a pesar de que puede manifestar un comportamiento expansivo, no se considera como tal porque es muy poco. Este grupo se compone de micas primarias y secundarias. Las micas primarias como la muscovita y la biotita pueden meteorizarse por procesos mecánicos, químicos o biológicos para formar otros minerales tales como la illita, vermiculita, esmectita o la caolinita. Las micas secundarias pertenecen a la fracción de arcilla. El grupo más común en este rango es la illita. Su carga estructural es baja y la capacidad de intercambio catiónico también. El espacio que hay entre las capas de este mineral está ocupado por iones de potasio que no son intercambiables. Estos iones retienen con gran fuerza las capas evitando la expansión entre ellas.

### *2.4.3. Vermiculitas*

Las vermiculitas pertenecen a los minerales 2:1 y tienen una estructura similar al grupo de las micas. Al igual que la illita, poseen átomos de potasio entre las capas. Las vermiculitas se forman en tamaños macroscópicos y en tamaños arcillosos. Éstas poseen un área superficial muy alta pero menor que la de las esmectitas. Su carga estructural es generada tanto por sustitución isomórfica como por la carga dependiente del pH. Esto hace que tenga una carga muy alta permitiendo una capacidad de intercambio catiónico mucho mayor que los otros grupos de minerales. También se conoce que las vermiculitas tienen cierto grado de expansión por la absorción de moléculas de agua entre sus capas. Las vermiculitas se pueden encontrar en climas templados o subtropicales con mayor frecuencia que en climas polares o tropicales.

### *2.4.4. Esmectitas*

Las esmectitas son el grupo de minerales que manifiestan el mayor potencial expansivo y son las responsables de ocasionar la mayor parte de los daños estructurales en edificios y

---

carreteras. Estos minerales pertenecen al grupo 2:1. De los minerales de arcilla más comunes entre las esmectitas están la montmorilonita y la bentonita. La bentonita es conocida por su uso comercial en diferentes aspectos de la ingeniería. El tamaño de partículas se encuentra en la región más pequeña de las arcillas. Además, casi el 80% del área superficial total es generada por su superficie interna. Esto implica que el grupo de las esmectitas tiene un área superficial muy alta. La carga estructural es baja en comparación con las micas, pero lo suficiente como para permitir la capacidad de intercambio catiónico. El enlace entre las capas 2:1 es tan débil que las moléculas de agua pueden acomodarse fácilmente entre ellas, generando una separación muy amplia entre las capas. Esto permite que el mineral se expanda libremente. La Tabla 2.2 presenta algunas de las características de los minerales de arcilla más comunes.

**Tabla 2.2. Rangos típicos de propiedades de varios minerales.**

<i>Propiedad Física/Química</i>	<i>Grupo</i>			
	<i>Caolinitas</i>	<i>Micas</i>	<i>Vermiculitas</i>	<i>Esmectitas<sup>1</sup></i>
Estructura	1:1	2:1	2:1	2:1
Área Superficial – m <sup>2</sup> /g	10 – 20	150	300 – 500	600 – 800
Carga Estructural mol/fórmula unitaria	0.25	0.6 – 0.8	0.6 – 1.5	0.25 – 0.6
CIC – cmol/kg	1 – 15	15 – 40	130 – 210	80 – 150
Potencial Expansivo <sup>2</sup>	Poco <sup>3</sup>	Moderado	Alto	Muy Alto

*Nota:* (1) En esta familia se encuentra la montmorilonita y la bentonita.

(2) Potencial Expansivo evaluado cualitativamente.

(3) Por lo general poco, excepto las haloisitas que pertenecen a este grupo.

## 2.5. Factores relacionados al cambio volumétrico del suelo

Propiedades importantes de los minerales de arcillas que influyen grandemente en el comportamiento expansivo del suelo son el tamaño de partícula, el área superficial de partícula, la carga estructural, la capacidad de intercambio catiónico y la plasticidad. A continuación se presenta una descripción de cada uno de estos factores.

### *2.5.1. Tamaño de partícula*

Los minerales de arcilla tienen tamaños de partículas de dos micrones o menores, por lo tanto, cuando se hace referencia a los espacios que hay entre las capas de los minerales, se expresa en unidades de Ángstroms (Å) o  $10^{-10}$ m. Cuando la partícula de suelo está en este rango tan pequeño, las fuerzas eléctricas dominan las fuerzas de masa y por tanto son más relevantes. El tamaño de una partícula está directamente relacionado a su área superficial y es inversamente proporcional a ésta.

### *2.5.2. Área superficial*

El área superficial de una partícula de suelo se define como la parte que queda expuesta para interactuar con otras partículas como las moléculas de agua y cationes. Se puede visualizar como si fuese equivalente a la “piel” de la partícula. El área superficial se expresa en área normalizada con respecto a la masa de la partícula y comúnmente se expresa en  $m^2/g$ . En partículas de suelo grandes como las arenas, el área superficial se refiere al área externa de la partícula. Sin embargo para las arcillas, la estructura es compleja y existe una superficie externa y una interna que se suele reportar como área superficial total. Por lo general, a mayor área superficial, mayor será el potencial expansivo de una arcilla. Esta tendencia se debe a que a mayor superficie expuesta, las moléculas de agua tienen mayor superficie donde adherirse causando así una mayor separación entre las capas, que se traduce en una mayor expansión volumétrica.

### *2.5.3. Carga estructural y carga dependiente del pH*

La carga estructural de un mineral arcilloso se refiere a la carga negativa total que posee un mineral (Schulze, 2002). Esta carga negativa, ocurre durante la formación del mineral y se genera por sustitución isomórfica o por carga dependiente del pH. La sustitución isomórfica se

---

define como el reemplazo parcial del catión que está dentro del tetraedro de silicio, del octaedro de aluminio, o ambos. Esta sustitución ocurre durante la formación del mineral. El factor principal que influye en esta sustitución de un catión por otro, es el tamaño relativo entre el sustituto y el sustituido. La carga dependiente del pH es la carga generada por la protonación<sup>2</sup> o deprotonación<sup>3</sup> de los grupos funcionales en la superficie del mineral. Un pH alto promueve la disociación de los grupos funcionales y aumenta la carga neta negativa expandiendo la doble capa difusa mientras que un pH bajo hace lo contrario (Lambe, 1,958).

La doble capa difusa es una nube de cationes y aniones que se agrupan alrededor de la superficie de las partículas (Mitchell y Soga, 2005). Dado que la superficie de las arcillas posee, generalmente, una carga neta negativa, la mayor concentración de cationes ocurre cerca de ésta, mientras que la concentración de aniones es menor (Figura 2.3). A medida que aumenta la distancia de la superficie de la partícula, se reducen la cantidad de cationes y aumenta la cantidad de aniones.

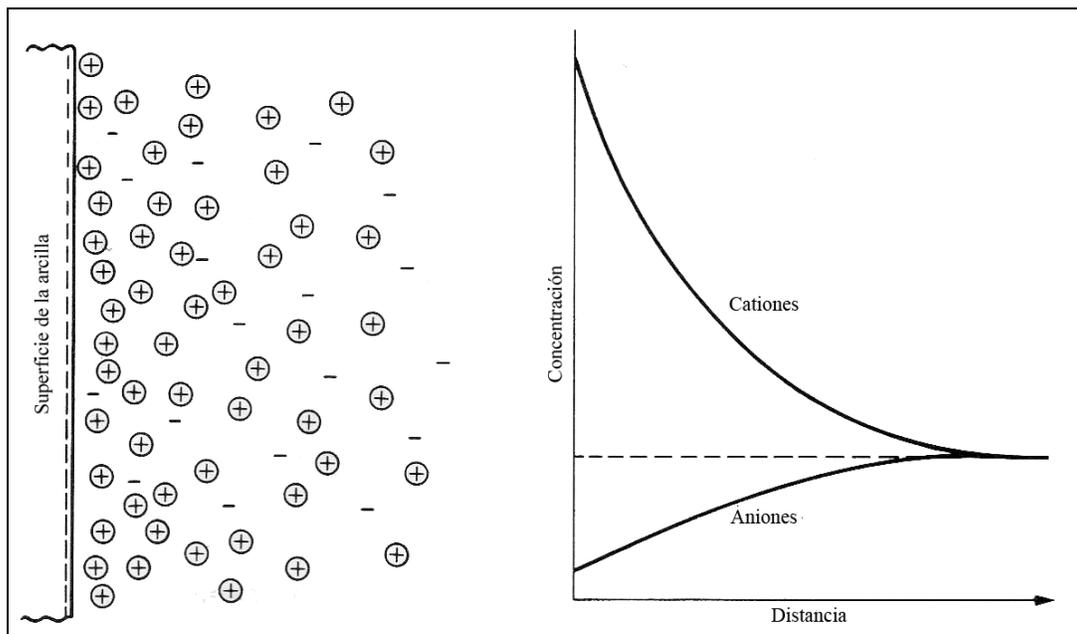


Figura 2.3. Distribución de iones según la doble capa difusa. Adaptado de Mitchell y Soga, 2005.

<sup>2</sup> Protonación es la adición de un protón ( $H^+$ ) a un átomo, molécula o ion.

<sup>3</sup> Deprotonación es la remoción de un protón de una molécula.

---

De igual manera ocurre con el potencial eléctrico, mientras más distante de la superficie de la partícula, menor será el potencial. Esto se debe a la variación de concentración iónica que hay en la doble capa y se conoce como repulsión osmótica según lo define Snethen (1977). Lambe (1958) indica que cualquier cambio en el sistema de suelo-agua que expanda la doble capa difusa tiende a debilitar la resistencia del suelo porque la interferencia entre dos capas difusas de coloides adyacentes aumenta la repulsión entre éstos.

En resumen, la carga estructural es la carga disponible durante la formación del mineral responsable de que ocurran los intercambios de cationes. La misma está sujeta a la sustitución isomórfica o a la carga dependiente del pH. No existe una relación directa entre la carga estructural y el potencial expansivo de un mineral. Sin embargo, su existencia es necesaria para que ocurran cambios volumétricos en los minerales arcillosos.

#### *2.5.4. Capacidad de intercambio catiónico*

Otro factor que influye en el potencial a cambios volumétricos es la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Ésta se define como la capacidad que tiene un mineral para intercambiar a un catión por otro y se expresa en unidades de  $\text{cmol}_c/\text{kg}$ . La CIC es generada por sustitución isomórfica y la carga dependiente del pH y está limitada por la carga estructural del mineral. Aunque no existe una relación directamente proporcional entre la CIC y el potencial expansivo, es necesario que el mineral tenga la capacidad de intercambiar cationes para que pueda manifestar expansión.

#### *2.5.5. Plasticidad*

La plasticidad de un suelo es un estado de consistencia en donde el suelo es maleable y se puede trabajar como plasticina. El suelo adquiere esta consistencia cuando alcanza un contenido de humedad que puede variar según el tipo de suelo. Mientras más amplio sea el rango de

humedad en que el suelo se comporta de forma plástica, mayor será el potencial expansivo. En la ingeniería civil, se utilizan los límites de Atterberg para determinar esta característica. Los límites de Atterberg distinguen los estados líquido y plástico del suelo a base del contenido de humedad. Los mismos se definen como límite líquido y límite plástico. La diferencia aritmética entre estos dos contenidos de humedad se conoce como índice de plasticidad. Esta es una característica distintiva que poseen los suelos finos (limo y arcilla), a diferencia de los suelos gruesos (arena y grava). La plasticidad en estos suelos se debe a la capacidad que tienen las partículas finas para mantenerse unidas entre sí utilizando el agua como puente de enlace. La Figura 2.4 muestra la gráfica que se utiliza para clasificar el suelo como limo (M) o arcilla (C) de alta (H) o baja (L) plasticidad a base de los límites de Atterberg.

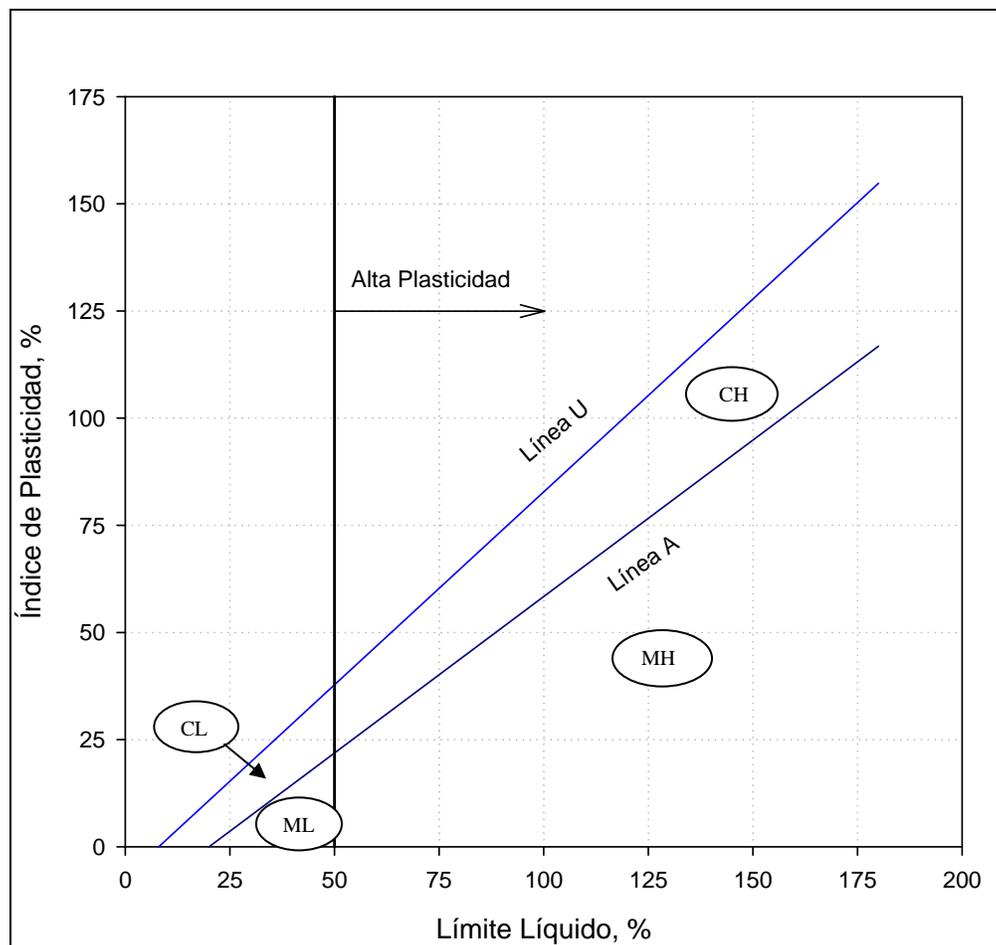


Figura 2.4. Carta de plasticidad para clasificar suelos finos según los límites de Atterberg.

## 2.6. Suelos expansivos en el mundo

A modo de información general, se presenta aquí un breve resumen sobre suelos expansivos que se han reportado en distintos lugares del mundo. La Tabla 2.3 presenta un resumen de algunas regiones en el mundo donde se han reportado problemas de suelos expansivos. En el caso de Estados Unidos se reportan varios lugares con problemas de suelos expansivos además de un mapa que muestra las áreas propensas a tener este tipo de situación.

**Tabla 2.3. Suelos expansivos en el mundo.**

<i>País</i>	<i>Descripción</i>	<i>Referencia</i>
Arabia Saudita	Algunos daños causados por suelos expansivos en el este de Arabia Saudita son grietas en verjas de mampostería, vigas de piso y hormigón armado. También causan levantamientos en losas y en pavimentos y aceras. Se utilizaron análisis de diferencia termal y rayos x para esta investigación.	Azam (2003)
Argentina	Suelos con montmorilonita. Desarrollan grandes presiones de hinchamiento en presencia de cationes de Na, K y Mg. Cambios climáticos entre seco y húmedo causan ciclos de encogimiento e hinchamiento que causan movimientos diferenciales y daños a estructuras.	Vallejos (2001)
Australia	Los cambios en volumen de los suelos expansivos causan daño a estructuras livianas. En las zonas urbanas donde hay vegetación y poco drenaje se presentan problemas de agrietamientos en techos, paredes entre otros.	Li y Cameron (2002)
Brasil	Un talud de 26 metros de altura falló al norte de la ciudad de São Paulo. Este talud tenía sedimentos cuaternarios y terciarios. Cuando se expone a la superficie la capa terciaria, la arcilla se expande y se debilita. En el suelo se encontró concentraciones altas de esmectitas.	Ortigao, et al. (1997)
Canadá	Los suelos expansivos en Canadá causan grandes costos económicos anualmente. Entre las estructuras afectadas están los edificios, carreteras, aeropuertos, aceras y estacionamientos, utilidades y servicios soterrados.	Hamilton (1977)
China	Debido a los ciclos de humedad y sequía en los suelos expansivos, se forman grietas y fisuras en la superficie de los taludes lo que acelera la falla del talud. Las pérdidas anuales debido a los suelos expansivos alcanzan los ¥100 millones (10 millones de dólares) en China.	Wu, y Huang (2006)
Etiopía	Los daños y limitaciones causados por estos suelos se reflejan mayormente en los aspectos ingenieriles y de agricultura. Cerca del 10% de los suelos en Etiopía están cubiertos por vertisoles los cuales tienen cantidades significativas de esmectitas. Causan grietas y deformaciones en carreteras, pavimentos y fallas en estructuras de drenajes.	Yitagesu (2006)
India	Los suelos expansivos afectan, ente otras cosas, la capacidad de carga, ocasionan grietas y rompimiento de pavimentos. Las estructuras livianas son las más afectadas. Se encontró que la presión de entumecimiento decrece con el uso de arenas de dunas y yeso.	Ameta, et al. (2008)

Tabla 2.3. Suelos expansivos en el mundo (continuación).

<i>País</i>	<i>Descripción</i>	<i>Referencia</i>
Irán	Suelos arcillosos y no arcillosos en la región costera del Golfo Pérsico sufren cambios volumétricos significativos. Entre los minerales no-arcillosos está el yeso el cual puede experimentar incrementos de volumen hasta un 60% y decrementos en un 40%. Esta región es caliente y árida, y experimenta fluctuaciones climáticas bien drásticas.	Azam, et al. (2003)
Italia	El diseño de túneles en suelos saturados que se expanden es difícil. La dificultad está en la caracterización y pruebas de las rocas y suelos que se expanden. También se hace difícil determinar la respuesta del suelo y la roca y las cargas que resisten cuando se hace la excavación del túnel.	Barla, Ferrero y Barla (2003)
Jordania	La falta de rigidez estructural e insuficiente presión por carga muerta de los sistemas de fundación usados en el área de la ciudad de Irbid donde hay incidencia de suelos con ciclos de retracción y entumecimiento comúnmente causa daños severos en las estructuras. En Jordania solo hay dos temporadas climatológicas, invierno (lluvia) y verano (cálido y seco). Esto abona al ciclo de retracción y entumecimiento.	Nusier y Alawneh (2002)
Polonia	Se tomaron muestras en algunas regiones de la provincia de Mazowsze, para realizar diferentes pruebas. Algunas de estas pruebas fueron DTA, CIC, Área Superficial, Límites de Atterberg, ASTM 4546, Free Swell. Algunas de las muestras resultaron tener un potencial expansivo muy alto.	Pająk-Komorowska (2003)
Turquía	Los suelos expansivos se encuentran al centro, sur y oeste de la ciudad de Ankara, capital de Turquía. Se entiende que los daños causados por cambios volumétricos diferenciales son causados por los suelos expansivos. Utilizaron muestras inalteradas y remoldeadas de Ankara. Desarrollaron ciertas correlaciones empíricas para estimar parámetros de expansión.	Ulusay y Erguler (2003)
Estados Unidos (general)	Los EE.UU. tienen presencia de suelos montmoriloníticos en diferentes regiones como la parte norte central del país, California, Texas, Colorado, Idaho, entre otros. Se realizaron diferentes pruebas de caracterización y cuantificación de potencial expansivo de los suelos en 11 estados. Algunas de estas pruebas incluyen, tamaño de partícula, límites de Atterberg, compactación, CIC, XRD, SEM, pruebas de entumecimiento, entre otras.	Snethen (1977)
EE.UU. (California)	Presencia de suelos “adobe” los cuales son altamente expansivos. Una de las causas principales de que ocasionen anualmente miles de millones de dólares en daños estructurales, es el mal diseño. California está en una zona moderadamente afectada.	Dept. of Building and Safety (1991) JCP Geologists (2001)
EE.UU. (Colorado)	La extensión de 300 km del “Front Range Corridor” es una de las regiones más afectadas por suelos expansivos en los EE.UU. La presencia de esmectita en estos suelos es la mayor causa del hinchamiento. Se ha registrado hasta un 10% y más de expansión y presiones de 20000 psf.	Chabrilat, Sabine y Gotees (2004)
EE.UU. (Idaho)	Métodos utilizados para identificación y evaluación en US95 Owyhee County, XRD, SEM, DTA, CIC, Límites de Atterberg, Free Swell, Expansion Index (ASTM 4829), One-dimensional swelling (ASTM 4546 Métodos A y B).	Hardcastle (2003)
EE.UU. (Indiana)	Los suelos con concentraciones de esmectitas se encuentran al noreste y sureste del estado. Algunos de los problemas presentes se reflejan en los sistemas sépticos. La textura y estructura del suelo como también su mineralogía puede afectar el desempeño de estos sistemas.	Krenz, Lee y Owens (2006)

Para el caso específico de los Estados Unidos, la Figura 2.5 muestra la distribución general de suelos considerados con potencial de expansión. Las zonas más críticas son aquellas coloreadas en rojo, azul y anaranjado. Basados en esta figura, los Estados Unidos están cubiertos por suelos con potencial expansivo en un 33% de su territorio. Esto, sin duda alguna, es un problema muy grave que se presenta en el centro del país extendiéndose de norte a sur, así como en el sureste hasta llegar a la Florida. El área oeste de EE.UU. también se ve afectada por suelos expansivos. Según el mapa, más de 25 estados podrían enfrentar problemas severos con suelos expansivos siendo los más críticos Texas, Montana, North Dakota, South Dakota, Nebraska, Kansas, Arkansas, Luisiana y Mississippi.

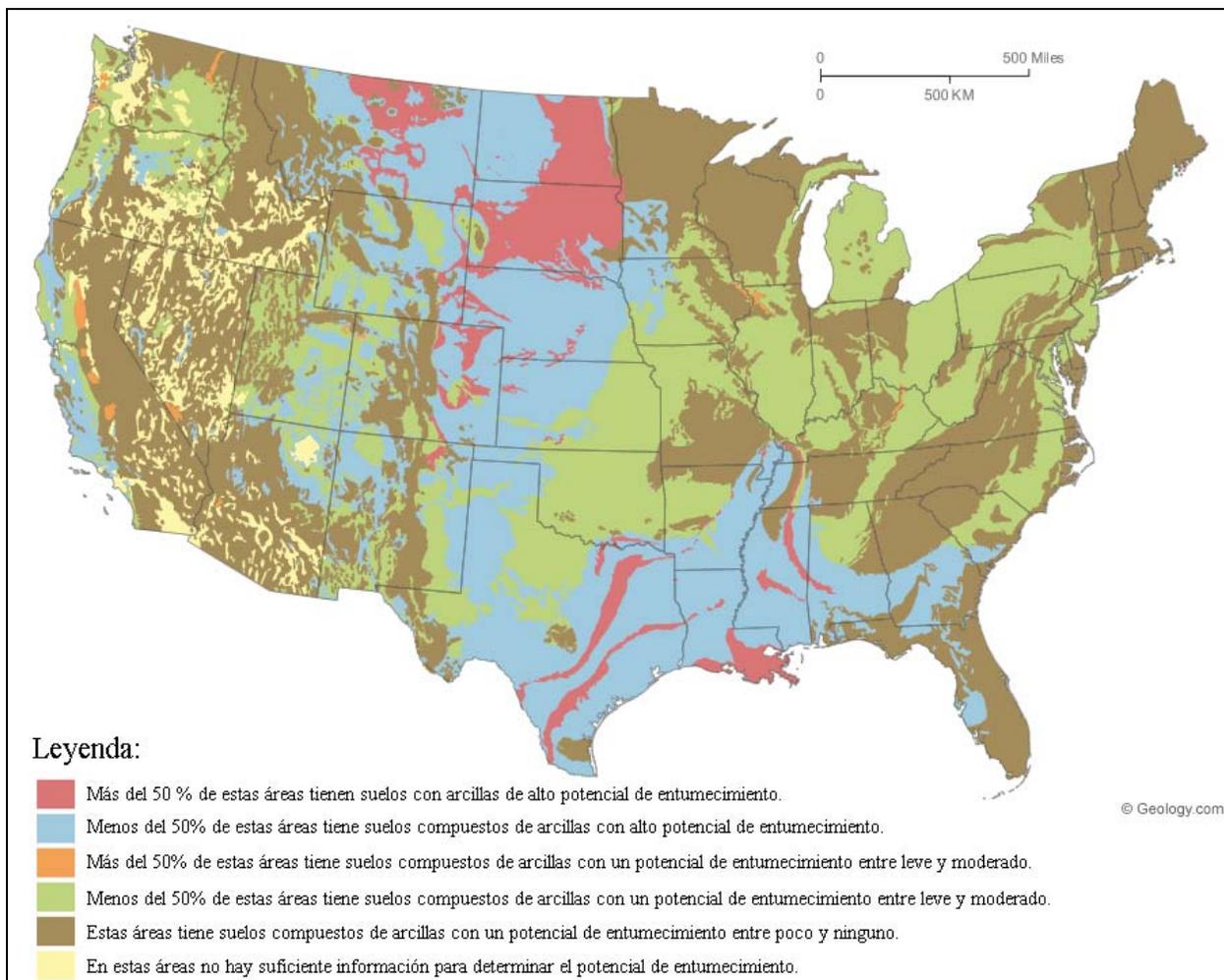


Figura 2.5. Mapa de suelos expansivos en EE.UU. Adaptado de Olive, W. et al., 1989.

## 2.7. Caracterización mineralógica de suelos expansivos

Esta revisión de literatura se concentró en recopilar información sobre las distintas técnicas y ensayos utilizados para evaluar el potencial expansivo de los suelos. El enfoque principal fue para aplicaciones de la ingeniería civil. Esta sección presenta un resumen de lo encontrado relacionado a la caracterización mineralógica. Como se vio antes, el tipo de mineral arcilloso controla grandemente las tendencias a cambios volumétricos del suelo. Una discusión más detallada sobre estos métodos se presenta en el Apéndice A. La Tabla 2.4 describe los métodos más comunes para caracterizar la mineralogía de suelos.

Tabla 2.4. Métodos típicos de caracterización mineralógica.

<i>Prueba</i>	<i>Descripción</i>
Medición del Área Superficial	Varios métodos existen para determinar el área superficial de una muestra de suelo. El Methylene Blue (MB), Ethylene Glycol Monoethyl Ether (EGME) y el gas a base de nitrógeno son algunos de los métodos existentes. El EGME permite conocer el área superficial total de la muestra, mientras que el método a base del gas de nitrógeno te permite conocer el área superficial externa.
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	La capacidad de intercambio catiónico es posible determinarla por diferentes métodos. Un método consiste en determinar la CIC total que hay en la matriz de suelo/arcilla. Otro método permite conocer la CIC a partir de cada catión principal (Na, Mg, Ca y K) de forma individual.
Difracción de Rayos X (XRD)	La difracción de rayos x se puede realizar de dos formas: cualitativa o cuantitativa. El método cualitativo es el más simple de las dos y permite conocer qué tipo de minerales cristalinos hay presentes en la muestra. El método cuantitativo es el más completo y más complejo. Este método permite conocer la cantidad de los minerales cristalinos encontrados.
Fluorescencia de Rayos X (XRF)	La fluorescencia de rayos x permite conocer la composición de elementos que forman la muestra.
Espectroscopia de Infrarrojo (IRS)	La espectroscopia de infrarrojo analiza el movimiento atómico y molecular de las muestras cuando son excitadas. Se ha podido asociar la excitación de la muestra en unos números de onda específico con la presencia de ciertos minerales.
Análisis por Diferencia Termal (DTA)	El análisis por diferencia termal permite comparar la muestra bajo estudio con una muestra estándar. En este caso se toma como estándar la bentonita y la caolinita y se comparan los picos endotérmicos y exotérmicos para ver si existe alguna similitud entre las muestras.
Microscopia Electrónica de Rastreo (SEM)	Las fotos microscópicas permiten ver la forma y tamaño de las partículas y asociarlas con algunos minerales.

## 2.8. Medición de potencial expansivo o de entumecimiento

Dado que la expansión de un suelo se debe a la absorción adicional de agua, las pruebas aquí presentadas consisten en medir diferentes propiedades a partir de añadirle agua a una muestra de suelo. Existen diferentes investigaciones que se han enfocado en correlacionar distintas pruebas que atañen el problema de suelos expansivos. Muchas de éstas se han desarrollado con el fin de otorgarle a las pruebas de índole cuantitativa, una expresión de índole cualitativa en cuanto al potencial de expansión. No todas las pruebas que aparecen en las tablas están discutidas en esta investigación.

El potencial de entumecimiento suele determinarse midiendo el hinchamiento de una muestra bajo una carga aplicada. Como se mencionó en una sección previa, el término de potencial de entumecimiento desafortunadamente es muy ambiguo ya que existen muchas definiciones distintas y una amplia variedad de pruebas con distintos métodos (Coduto, 2001). Las Tablas 2.5 y 2.6 presentan algunos de estos valores.

**Tabla 2.5. Correlaciones de pruebas comunes en los suelos.** *Adaptado de Holtz 1969 y Gibbs 1969.*

<i>Porcentaje de Coloides<sup>4</sup></i>	<i>Índice de Plasticidad</i>	<i>Límite de Retracción<sup>5</sup></i>	<i>Límite Líquido</i>	<i>Potencial de Entumecimiento</i>
< 15	< 18	< 15	< 39	Bajo
13 – 23	15 – 28	10 – 16	39 – 50	Mediano
20 – 31	25 – 41	7 – 12	50 – 63	Alto
> 28	> 35	> 11	> 63	Muy Alto

<sup>4</sup> Los coloides son partículas más pequeñas que las arcillas pero que no llegan a tamaño molecular.

<sup>5</sup> El límite de retracción es el contenido de humedad en donde la masa de suelo no sufre cambio de volumen.

**Tabla 2.6. Correlaciones de pruebas comunes en los suelos.** *Adaptado de Chen, 1988.*

<i>Datos de Campo y de Laboratorio</i>			<i>Grado de Expansión</i>			
Porcentaje pasando Tamiz No. 200	Límite Líquido	Valor N de SPT	Expansión Probable (%) <sup>a</sup>	Presión de Entumecimiento		Potencial de Entumecimiento
				k/ft <sup>2</sup>	kPa	
< 30	< 30	< 10	< 1	1	50	Bajo
30 – 60	30 – 40	10 – 20	1 – 5	3 – 5	150 – 250	Mediano
60 – 95	40 – 60	20 – 30	3 – 10	5 – 20	250 – 1,000	Alto
> 95	> 60	> 30	> 10	> 20	> 1,000	Muy Alto

<sup>a</sup>Porcentaje de cambio en volumen cuando es sometido a 1,000 lb/ft<sup>2</sup>.

### 2.8.1. Índice de plasticidad (PI)

El índice de plasticidad (PI) se definió en la sección 2.5 y se obtiene de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico según la prueba de los límites de Atterberg que se determinan según la norma ASTM D 4318 (ASTM, 2005). Por lo tanto un valor alto del índice de plasticidad implica que el suelo puede comportarse de manera plástica aun así experimentase grandes cambios en su contenido de humedad. La literatura revisada indica que a mayor plasticidad, mayor potencial de expansión suele tener el suelo. Por ejemplo, Chen (1988) relacionó el potencial de entumecimiento con el índice de plasticidad de acuerdo a los valores mostrados en la Tabla 2.7.

**Tabla 2.7. Potencial de entumecimiento basado en el índice de plasticidad según Chen (1988).**

<i>PI</i>	<i>Potencial de Entumecimiento</i>
0 – 15	Bajo
10 – 35	Mediano
20 – 55	Alto
> 35	Muy alto

---

### 2.8.2. Actividad del suelo

Seed, Woodward y Lundgren (1962) relacionaron el potencial de entumecimiento con la actividad del suelo. La actividad se define como el cociente entre el índice de plasticidad y el porcentaje de partículas de arcilla en la muestra de suelo. La relación propuesta se muestra en la Figura 2.5. Los autores utilizaron muestras alteradas reconstituidas. Sin embargo, Seed et al. (1962) entienden que se puede modificar las regresiones encontradas para aplicarlas a muestras inalteradas. Las curvas mostradas en la Figura 2.6 fueron el resultado de 23 muestras compactadas a las cuales se le midió el potencial de entumecimiento al ser inundadas cuando estaban sometidas a una presión de 1 lb/in<sup>2</sup>. Los autores recomiendan modificar la ecuación de actividad cuando se desea aplicar la gráfica a suelos naturales no compactados. La ecuación se modifica de la siguiente manera:

$$A = \frac{PI}{C - n} \quad (2.1)$$

donde; PI = índice de plasticidad

C = % arcilla ( $\leq 0.002$  mm)

n = corrección cercana a 5 para suelos naturales y a 10 para muestras perturbadas.

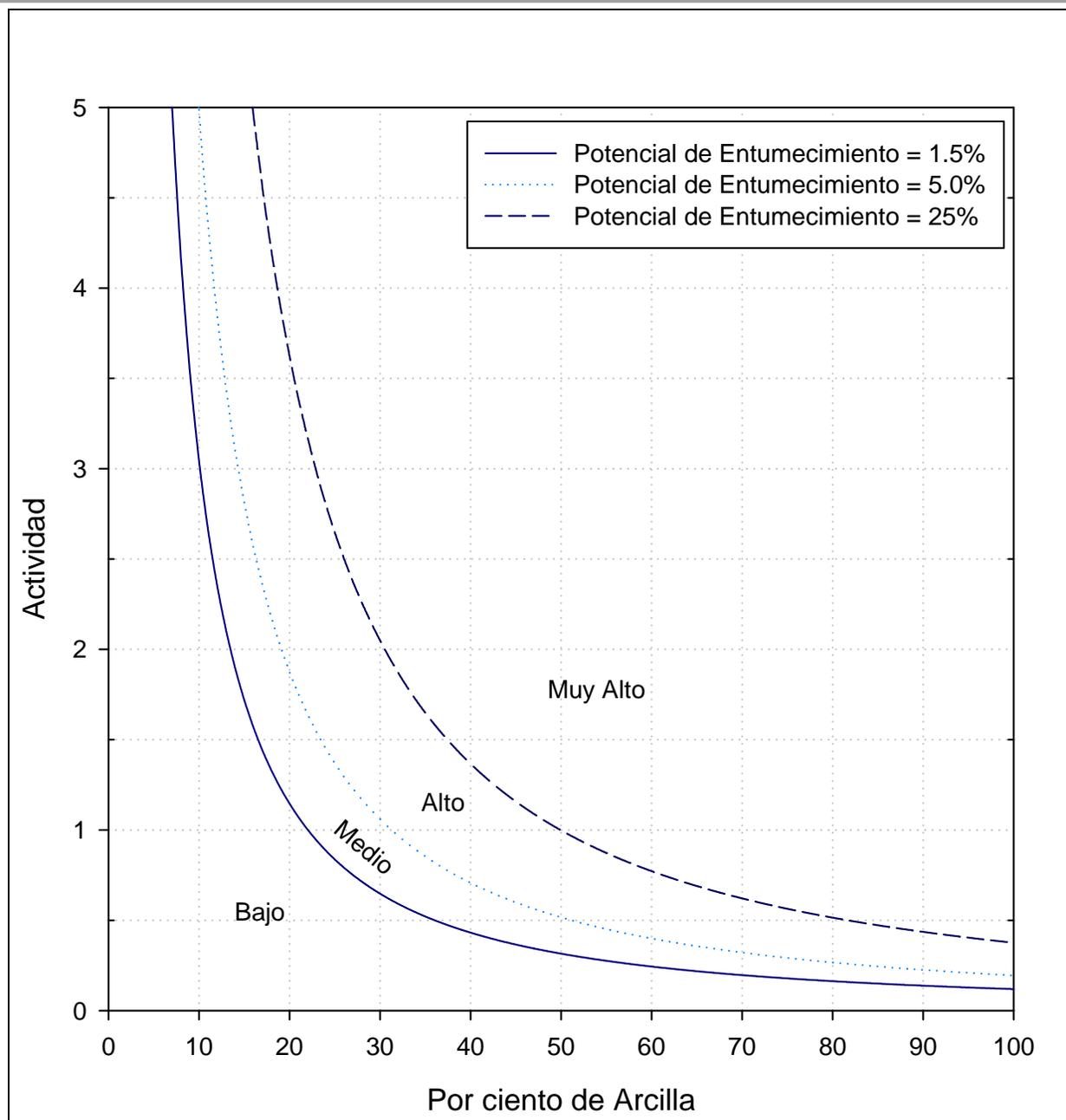


Figura 2.6. Gráfica para estimar el potencial de entumecimiento basado en la actividad del suelo.  
Adaptado de Seed et al., 1962.

### 2.8.3. Índices de entumecimiento libre

El índice de entumecimiento libre, o *free swell* como se conoce comúnmente en inglés, es una prueba sencilla que ayuda a visualizar cuánto se hincha una muestra midiendo su cambio volumétrico al entrar la muestra en contacto con agua. El ensayo consiste en verter una cantidad

conocida de suelo (fracción de tamaños menores de 425  $\mu\text{m}$ ) en caída libre dentro de un tubo de ensayo calibrado lleno con 100 mL de agua y se anota la lectura inicial de volumen. Se toman lecturas de volumen periódicamente hasta que se llegue a un equilibrio volumétrico. Holtz & Gibbs (1956) definieron el índice de entumecimiento como:

$$FSI = \frac{V_f - V_i}{V_i} * 100 (\%) \quad (2.2)$$

donde; FSI = índice de entumecimiento libre

$V_i$  = volumen inicial

$V_f$  = volumen final de equilibrio

Existe un método alternativo para medir el índice de entumecimiento libre según la norma IS 2720 Parte 40 (IS, 1977). Este método alternativo también proporciona un índice de entumecimiento libre (FSI) pero se obtiene al comparar los volúmenes de equilibrio del suelo (10 gramos secados al horno) al verterse en agua destilada ( $V_a$ ) y en keroseno ( $V_k$ ). El FSI se determina de la siguiente manera:

$$FSI_{India} = \frac{V_a - V_k}{V_k} * 100 (\%) \quad (2.3)$$

donde;  $V_a$  = volumen de equilibrio medido en la probeta con agua destilada (por lo menos 24 horas)

$V_k$  = volumen de equilibrio medido en la probeta con keroseno (por lo menos 24 hora)

Otro índice de entumecimiento libre que se utiliza se conoce como índice de entumecimiento libre modificado o *Modified Free Swell Index* (MFSI propuesto por Sivapullahia, et al., 1987). Este método se describe en la norma ASTM D 5890 (ASTM, 2006) y es muy similar al de Holtz y Gibbs. Una diferencia es que se utiliza una porción del suelo secado al horno y se calcula el volumen inicial a base de la gravedad específica. El MFSI se calcula como el cambio porcentual

de volúmenes normalizado al volumen inicial. A base de este método, Sivapullahia et al. (1987) desarrollaron la Tabla 2.8 para estimar el nivel de potencial de entumecimiento.

Tabla 2.8. Potencial de entumecimiento según MFSI.

Límite Líquido, % (basado en volumen)	Índice de Entumecimiento Libre Modificado (MFSI)	Potencial de Entumecimiento
< 200	< 2.5	Despreciable
200 a 400	2.5 a 10.0	Moderado
400 a 550	10.0 a 20.0	Alto
> 550	> 20.0	Muy Alto

#### 2.8.4. Coeficiente de extensión lineal (COLE)

El coeficiente de extensión lineal consiste en determinar la deformación lineal de una muestra inalterada, sin confinar en secarse cuando está sometido a una succión de 5 lb/in<sup>2</sup> a una succión de secado al horno. El COLE es una medida de cambio en las dimensiones de la muestra de un estado húmedo a estado seco. La ecuación para determinar el COLE es la siguiente:

$$COLE = \frac{\Delta L}{\Delta L_D} = \left( \frac{\gamma_{dD}}{\gamma_{dM}} \right)^{0.33} - 1 \quad (2.4)$$

donde;  $\Delta L/\Delta L_D$  = deformación relativa a las dimensiones secas

$\gamma_{dD}$  = densidad seca de la muestra secada al horno

$\gamma_{dM}$  = densidad seca de la muestra debido a una succión de 33 kPa

Taboada (2003) clasifica el potencial de retracción-entumecimiento del suelo a base del COLE según se muestra en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Potencial de retracción-entumecimiento basado en el COLE. Adaptado de Toaboadá, 2003.

<i>Potencial de Retracción-Entumecimiento</i>	<i>Coefficiente de Extensión Lineal (COLE)</i>
Bajo	< 0.03
Moderado	0.03 – 0.06
Alto	0.06 – 0.09
Muy Alto	> 0.09

### 2.8.5. Potencial de entumecimiento unidimensional

Esta prueba se realiza en la máquina de consolidación (odómetro). La misma puede realizarse con tres métodos según la ASTM D 4546 (ASTM, 2003a). El método A consta de inundar la muestra por completo y luego tomar lectura de deformación versus tiempo hasta que haya llegado a su entumecimiento máximo (3 – 16 días). Una vez desarrollado el entumecimiento, se le aplica una carga (que aumenta gradualmente) hasta que la muestra regrese a su altura inicial. Esta prueba nos permite determinar el porcentaje de levantamiento o *percent heave*, el entumecimiento libre y la presión de entumecimiento. El método B consiste en aplicarle una presión a la muestra equivalente a la presión in-situ o la presión estimada que ejerza alguna estructura. Luego se inunda la muestra hasta el entumecimiento máximo y se sigue el procedimiento del método A. Este método permite conocer la presión de entumecimiento y el porcentaje de levantamiento. En el método C la muestra se mantiene a una altura constante por medio del ajuste de la presión vertical luego de que la muestra haya sido inundada. Una vez la muestra no presenta tendencia a entumecerse, se le aplica carga siguiendo el procedimiento de la prueba de consolidación. De este método se obtiene la presión de entumecimiento, la presión de preconsolidación y el porcentaje de levantamiento.

### 2.8.6. Potencial de cambio volumétrico (PVC)

Este método fue propuesto por Lambe (1960) para el *Federal Housing Administration*. La prueba de potencial de cambio volumétrico se realiza restringiendo la muestra compactada de suelo en una anilla similar a la de consolidación. A la muestra se le aplica una presión inicial y luego debe ser inundada con agua. Una vez se inunda, se toma lectura periódicamente de la deformación de la anilla que le está aplicando la carga inicial. La prueba determina la presión que ejerce la expansión de la muestra.

Esta prueba permite correlacionar el índice de entumecimiento con otras propiedades como el índice de plasticidad y el potencial de cambio volumétrico. El índice de entumecimiento se calcula utilizando la lectura del reloj al cabo de dos horas luego de haber inundado la muestra. En las Figuras 2.7 y 2.8 se muestran las gráficas que se utilizan para esta correlación. La Tabla 2.10 describe la magnitud de la expansión a base del PVC.

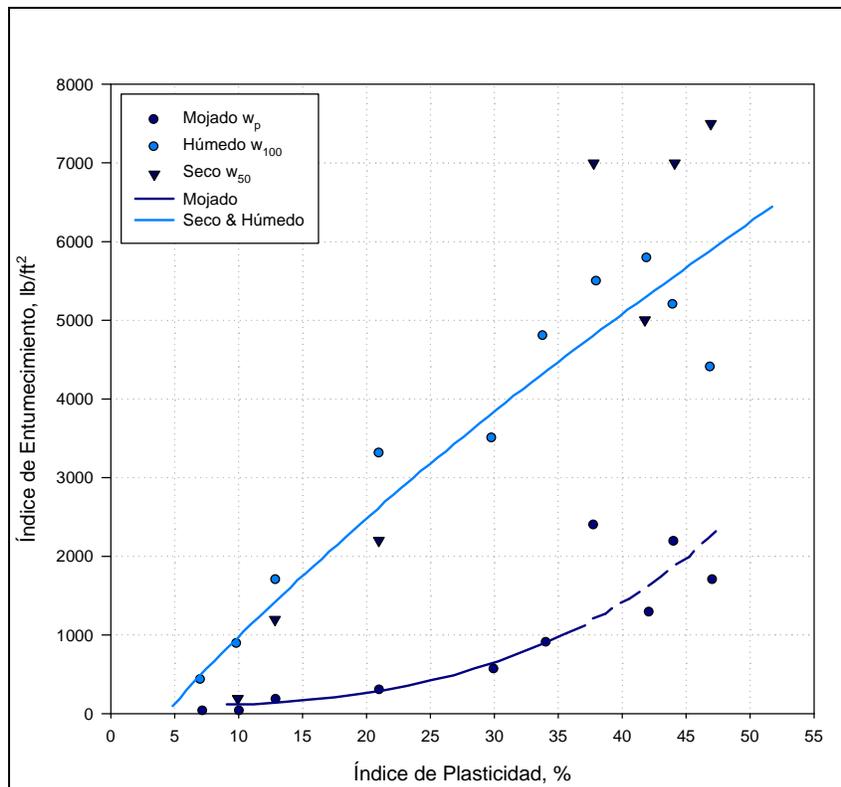


Figura 2.7. Índice de entumecimiento vs índice de plasticidad. Adaptado de Lambe, 1960.

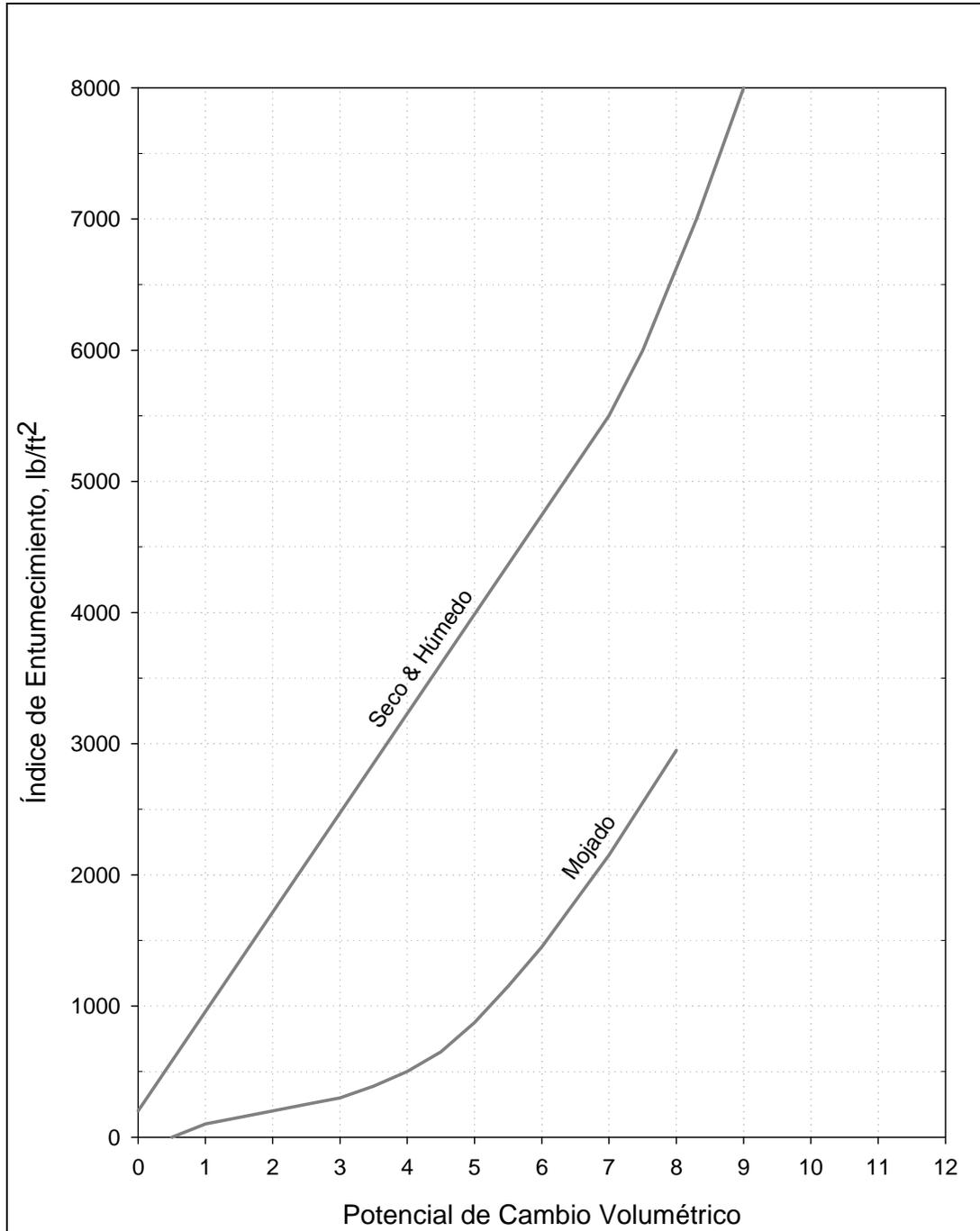


Figura 2.8. Índice de entumecimiento vs PVC. Adaptado de Lambe, 1960.

Tabla 2.10. Magnitud del PVC.

Valor de PVC	Categoría
< 2	No Crítico
2 – 4	Marginal
4 – 6	Crítico
> 6	Muy Crítico

### 2.8.7. Índice de expansión (EI)

El índice de expansión, EI, descrito en la norma ASTM D 4829 (ASTM, 2003b), consiste en medir la expansión de un suelo que está sometido a una presión constante de 6.9 kPa (1 libras/pulgadas<sup>2</sup>). El suelo debe ser compactado utilizando un contenido de humedad cerca de su valor óptimo. Este valor óptimo se determina previamente realizando una prueba de compactación. Para la prueba de EI, se inunda la muestra de suelo con agua para que comience el proceso de expansión. En esta prueba se mide la deformación vertical de la muestra. El índice de expansión se define como 1,000 veces la diferencia entre las alturas final e inicial de la muestra dividida por la altura inicial. La Tabla 2.11 define el potencial expansivo a base de este valor.

Tabla 2.11. Índice de expansión. Adaptado de la ASTM D 4829.

<i>EI</i>	<i>Potencial Expansivo</i>
0 – 20	Muy Bajo
21 – 50	Bajo
51 – 90	Mediano
91 – 130	Alto
> 131	Muy Alto

## 2.9. Estudios previos en Puerto Rico

En Puerto Rico la evidencia existente referente a daños ocasionados por suelos expansivos es escasa y en muchos casos especulativa. Una encuesta reciente realizada por Ochoa y Pando (2005) confirma esta falta de consenso. Algunas compañías y consultores del campo de geotecnia consideran la existencia de suelos expansivos como un problema real y muy serio en Puerto Rico mientras que otras compañías consideran que el problema no es grave y que muchas veces los daños estructurales pueden ser por vicios de construcción. Los encuestados que consideran el problema como uno real, identificaron las regiones de Mayagüez (municipios

al oeste de PR) y Ponce (municipios al centro-sur de PR) como las más propicias a este problema. La Figura 2.9 muestra que la concentración mayor de problemas con suelos expansivos ocurre en la región oeste de Puerto Rico, según la encuesta realizada por Ochoa y Pando (2005).

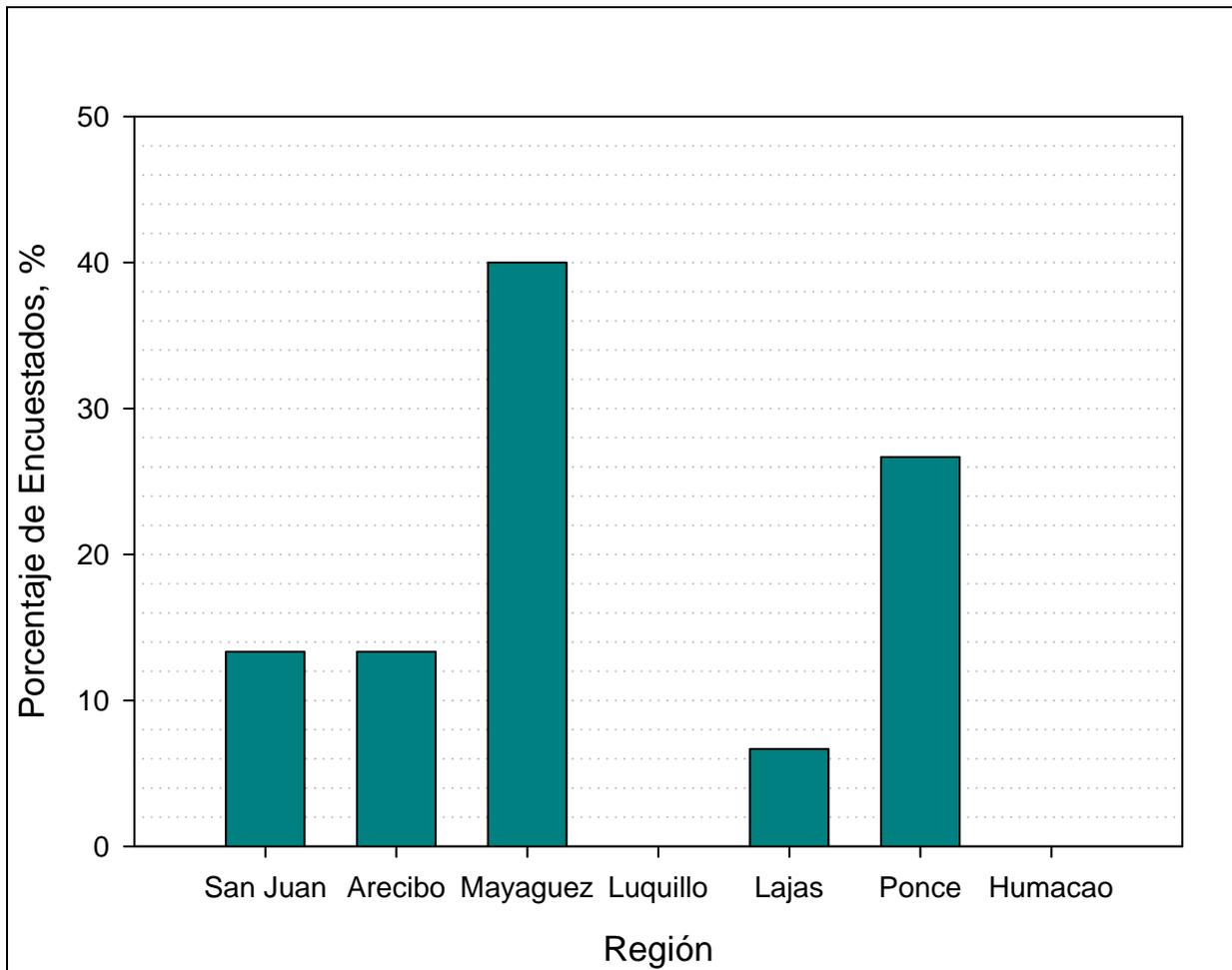


Figura 2.9. Distribución de suelos expansivos en Puerto Rico según encuesta de Ochoa y Pando (2005).

La falta de consenso que dio a relucir la encuesta, se resume en la Figura 2.10. A pesar de que más de 60% de los encuestados entienden que el problema existe, hay cerca de un 40% que no están seguros o que piensan que no existe. La Figura 2.9 también presenta la frecuencia con que los encuestados se han enfrentado a este tipo de situación. Cerca de 90% concluyó que

durante su experiencia han tenido que lidiar con este tipo de suelo en menos de 40% de los casos, donde el 50% ha sido 1 de 10.

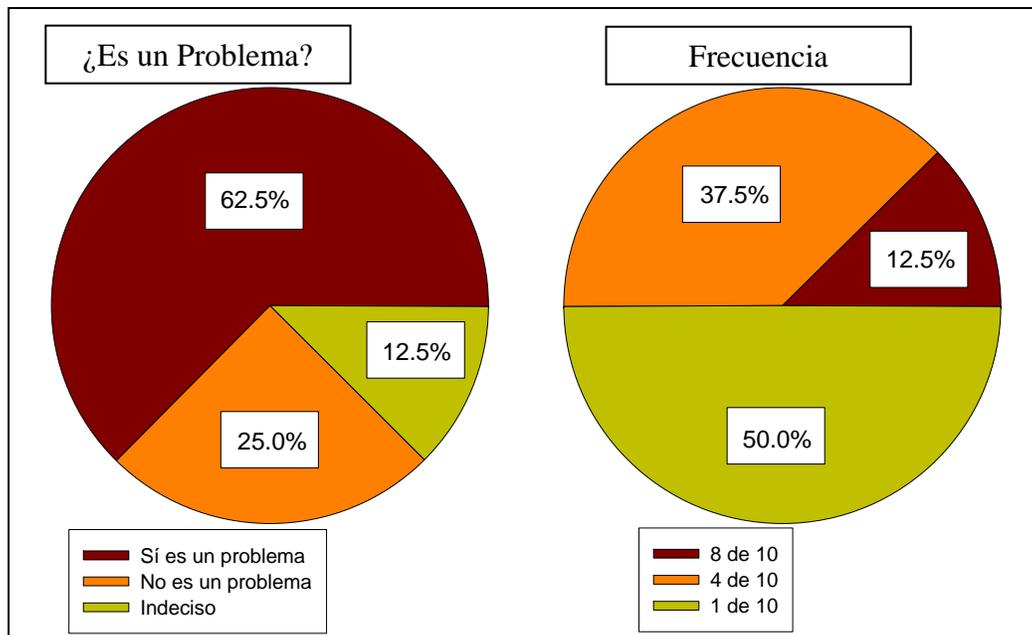


Figura 2.10. Discrepancia sobre el problema de suelos expansivos según encuesta de Ochoa y Pando (2005).

Ochoa y Pando (2005) incluyen en su reporte una lista de regiones de todo Puerto Rico donde resume los tipos de suelo y algunas características de los mismos. Estas tablas muestran propiedades como potencial de entumecimiento, límites de Atterberg, permeabilidad, mineralogía, entre otras. La información de estas tablas debe ser refinada debido a que presenta todos los suelos presentes con un potencial de entumecimientos de moderado a muy alto. Es sumamente importante definir los criterios escogidos para establecer qué es un suelo con un potencial de entumecimiento bajo, moderado, alto o muy alto. Cuando se observa el índice de plasticidad de los mismos, son muy pocos los suelos que alcanzan un valor mayor de 50%.

## 2.10. Resumen

Este capítulo describe como los suelos expansivos son principalmente suelos arcillosos y que estos tienen la capacidad de cambiar considerablemente su volumen con la pérdida o

---

ganancia de humedad. Esta cualidad intrínseca de los minerales arcillosos depende de propiedades como: el tamaño de partícula, área superficial, carga estructural, capacidad de intercambio catiónico y plasticidad. Los tres grupos más comunes de minerales son las caolinitas, las micas y las esmectitas, siendo la última la más propensa a tener un potencial de expansión significativo.

Este capítulo contiene información que sustenta que los suelos expansivos existen alrededor de todo el mundo y que han sido objeto de numerosas investigaciones. Las estructuras más impactadas por este tipo de suelo son aquellas consideradas como estructuras livianas tales como pavimentos, carreteras, sistemas de alcantarillados, etc. Para lidiar con el problema de suelos expansivos se han utilizado diferentes métodos para identificar y cuantificar el potencial de expansión de los suelos. Pruebas de caracterización incluyen determinar el área superficial, la capacidad de intercambio catiónico, difracción de rayos x, análisis por diferencia termal, espectroscopia de infrarrojo, microscopia electrónica de rastreo, los límites de Atterberg, entumecimiento libre, coeficiente de extensión lineal, potencial de entumecimiento unidimensional, índice de expansión, potencial de cambio volumétrico, entre otros. Nelson y Miller (1999) presentan una tabla resumiendo algunas pruebas utilizadas con el fin de identificar y cuantificar el potencial expansivo de los suelos.

Una encuesta realizada en Puerto Rico por Ochoa y Pando (2005) sobre suelos expansivos reveló que existe una falta de consenso sobre la existencia de problemas asociados con suelos expansivos. Algunas reacciones obtenidas en esta encuesta sugieren que los suelos expansivos en Puerto Rico es un problema importante. Otros encuestados sugieren que el problema está sobre estimado y suele usarse como un pretexto para adjudicar daños estructurales que bien pudiera deberse a otros factores como vicios de construcción o mal diseño. Es por tanto

el interés de esta investigación elaborar un trabajo detallado para poder identificar, evaluar y caracterizar suelos expansivos en una región específica de Puerto Rico y arrojar luz sobre esta disyuntiva.

## **Capítulo 3. Plan Experimental (Metodología)**

---

### **3.1. Introducción**

Este capítulo presenta una descripción del plan experimental llevado a cabo para realizar esta investigación. Presenta los métodos utilizados para la colección de muestras y el resumen de los resultados del cuestionario realizado. Explica además las pruebas que fueron escogidas para documentar esta tesis. Estas pruebas se dividen en pruebas de campo y de laboratorio. Las pruebas de laboratorio a su vez están divididas en tres categorías; aquellas en las que se hace caracterización general del suelo, aquellas que están relacionadas a las propiedades mineralógicas del suelo y las que nos permiten tener un conocimiento cualitativo o cuantitativo sobre el potencial expansivo del suelo.

### **3.2. Procedimiento general**

A grandes rasgos esta investigación involucra los siguientes pasos:

- i. Evaluación preliminar del problema (encuesta Ochoa y Pando (2005))
- ii. Revisión de Literatura
- iii. Selección de un sitio de prueba.
- iv. Estudio de campo y muestreo – Tubos Shelby y Trincheras
- v. Caracterización y clasificación de los suelos
- vi. Características de compactación por distintos métodos
- vii. Evaluación mineralógica
- viii. Evaluación del Potencial Expansivo

- ix. Preparación de manuscrito de la tesis
- x. Resumen y conclusiones

### **3.3. Estudio de campo y muestreo**

Esta investigación comenzó con un estudio preliminar sobre las experiencias de algunas compañías de geotecnia en Puerto Rico relacionadas a suelos expansivos. Para recoger estas experiencias, Ochoa y Pando (2005), prepararon una encuesta enfocada a este problema. Dicha encuesta se distribuyó a compañías y consultores ubicados en la región norte, sur y oeste de Puerto Rico. De los resultados obtenidos, se hizo una selección de lugares para esta investigación. Además de la encuesta, se realizaron entrevistas con profesionales y expertos en el tema para que facilitaran la selección de lugares de estudio. De esta manera, se decidió como área de investigación el municipio de Cabo Rojo para los estudios de suelo.

El Dr. Jiménez, consultor en ingeniería geotécnica, nos facilitó muestras de suelo procedentes de un proyecto en el área de Cabo Rojo. Las muestras de suelo consistieron de dieciséis tubos Shelby de varios barrenos exploratorios un proyecto. Se usaron un total de nueve tubos Shelby para la clasificación inicial de los suelos del área de estudio.

Dada la limitación de suelo que presentan los tubos Shelby, se hizo una visita cerca del área del proyecto y se realizaron dos trincheras de exploración con la intención de obtener mayor cantidad de material. La primera trinchera se realizó hasta ocho pies de profundidad y se recogió material en dos pailas. Además se extrajo un tubo Shelby a una profundidad aproximada de seis a ocho pies. La segunda trinchera se realizó a una profundidad de doce pies. En ella se realizó la prueba de penetración dinámica del cono, penetrómetro de bolsillo y contenido de humedad natural. Además se recogió cinco pailas de suelo y dos tubos Shelby. Una tercera visita se realizó al campo para extraer tubos Shelby a una profundidad entre tres a seis pies. Las

trincheras se realizaron gracias a la ayuda del ingeniero Francisco Rodríguez Dosal de TAMRIO, quien hizo las gestiones para facilitarnos la excavadora.

### 3.4. Pruebas de laboratorios

#### 3.4.1. Caracterización del suelo

Antes de comenzar con las pruebas para la determinación de potencial expansivo, se realizaron cinco pruebas básicas para la caracterización del suelo. Estas pruebas fueron realizadas a los tubos Shelby procedentes del estudio privado (Jiménez, 2005) y del suelo extraído de las trincheras. El suelo se caracterizó siguiendo pruebas convencionales dentro de la ingeniería geotécnica. La Tabla 3.1 resume las pruebas de caracterización utilizadas.

Tabla 3.1. Pruebas de caracterización del suelo.

<i>Prueba</i>	<i>Referencia</i>	<i>Observaciones</i>
Clasificación – USCS y AASHTO	ASTM D 422 – Granulometría (Hidrómetro)	Se utilizó Hexametafosfato de Sodio como agente dispersor. Se lavó y tamizó luego de realizar el hidrómetro.
	ASTM D 4318 – Límites de Atterberg	No menos de cuatro puntos se utilizaron para determinar el límite líquido.
Gravedad Específica	ASTM D 854	Se utilizó agua destilada y agua deaireada. Se utilizó la bomba al vacío para deairear la muestra.
Humedad Natural	ASTM D 2216	Se realizó varias veces incluyendo cada vez que se abría un tubo Shelby.
Clasificación Visual	ASTM D 2488	Se realizó a las nueve muestras de los tubos Shelby y a las muestras más críticas de las trincheras.

Se extrajo de tres a cuatro pulgadas de suelo desde la parte inferior de cada tubo Shelby para realizar las pruebas de caracterización. La parte restante del tubo fue sellada nuevamente con cera para evitar la pérdida de humedad. Se realizó varias pruebas de compactación en el suelo con mayor índice de plasticidad.

### 3.4.2. Propiedades de compactación

Las propiedades de compactación fueron estudiadas mediante tres métodos; la prueba Proctor Estándar, la prueba de Harvard Miniatura y el método de Lambe (1960). Estos métodos fueron realizados con el suelo con mayor índice de plasticidad. La prueba Proctor Estándar se llevó a cabo siguiendo las guías de la norma ASTM D 698 (ASTM, 1999) y el equipo mostrado en la Figura 3.1.



Figura 3.1. Equipo de compactación Proctor. Foto: ELE International, [www.eleusa.com](http://www.eleusa.com)

La prueba Harvard Miniatura es un método en el cual se utiliza el equipo mostrado en la Figura 3.2. Esta prueba usa un pistón con resorte que tiende a amasar la arcilla y que tiene una energía específica que depende de la resistencia del resorte, ya sea de 20 libras o 40 libras. La energía específica de compactación puede variar según la resistencia del resorte, el número de capas y la cantidad de apisonamientos. Por tal razón, la energía de compactación podría ser igual o mayor que la energía normalizada en el ensayo del Proctor Estándar. El tercer y último método

descrito por Lambe (1960) fue utilizado para desarrollar la curva de compactación y realizar las pruebas de PVC. Este método imparte una energía de compactación de 55,000 libras-pies/pies<sup>3</sup>. Las distintas energías específicas y los distintos métodos de compactación (amasado e impacto) son las diferencias principales entre estos métodos de compactación.



Figura 3.2. Equipo de compactación Harvard Miniatura. Foto: ELE International, [www.eleusa.com](http://www.eleusa.com)

### *3.4.3. Caracterización mineralógica del suelo*

El interés de estas pruebas fue obtener una descripción de las arcillas que componen el suelo estudiado. Para esto fue necesario realizar una separación textural para separar las arcillas del limo y la arena. Las pruebas realizadas para la caracterización mineralógica del suelo y las arcillas están listadas en la Tabla 3.2. Solo se realizaron estas pruebas a aquellos suelos que preliminarmente fueron considerados potencialmente expansivos. Cada una de las pruebas mencionadas incluye una lista de referencias utilizada para la realización de las mismas.

La preparación del suelo para las pruebas de mineralogía como también las pruebas de área superficial, capacidad de intercambio catiónico, espectroscopia de infrarrojo y pH se realizó

en el laboratorio de Agronomía y Suelos del Departamento de Agronomía y Suelos. Los estudiantes graduados Katherine Quiñones y Emmanuel Feliciano colaboraron grandemente para esta parte de la investigación. El director de la Estación Experimental Federal (TARS), Dr. Ricardo Goenaga, nos facilitó el equipo de absorción atómica bajo la supervisión del químico y técnico Ulises Chardón. El análisis por diferencia termal y termogravimetría se realizó en el Departamento de Ciencias de Ingeniería y Materiales a cargo del técnico Boris Rentería. La fase cualitativa de la difracción de rayos x se realizó en el Departamento de Geología por el técnico Miguel Santiago. La fase cuantitativa de la difracción de rayos x y la fluorescencia de rayos x fueron contratadas al laboratorio *Evans Analytical Group* ubicado en Texas, EE.UU. Por último, la microscopia electrónica de rastreo se llevó a cabo en el Departamento de Biología y estuvo a cargo del técnico José Almodóvar.

**Tabla 3.2. Resumen de pruebas para la caracterización mineralógica.**

<i>Prueba</i>	<i>Método o Referencia</i>	<i>Observaciones</i>
Determinación del pH	N/A	Se utilizó 5 gramos de suelo pasados por el tamiz No. 10. Se utilizó una concentración de suelo/agua de 1:2.
Separación Textural	Kunze y Dixon, 1986; Gee y Bauder, 1986	Se disolvieron los carbonatos con acetato de sodio y se quemó la materia orgánica con peróxido de hidrógeno.
Saturación de las arcillas con Magnesio y Liofilización	Klute et al., 1986	Las arcillas se saturan con Mg <sup>+2</sup> , se congelan y se secan por el método de liofilización.
Determinación del Área Superficial de las Arcillas	Carter et al. 1965; Cihacek y Bremmer, 1979; Ratner-Zohar, et al., 1982	Se utilizó el método del Ethylene Glycol Monoethyl Ether (EGME). Una vez se agrega EGME a la muestra, se pesa constantemente hasta que se estabilice. Las muestras estaban saturadas con Mg <sup>+2</sup> .
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	Rhoades, 1982; Sumner y Miller, 1996	Se le añade cloruro de amonio, NH <sub>4</sub> Cl, a la muestra. Una vez se extraen los cationes intercambiables, se toma lectura mediante absorción atómica. Las muestras estaban saturadas con Mg <sup>+2</sup> .
Difracción de Rayos X (XRD)	Whittig y Allardice, 1986	Se realizaron análisis cualitativos y cuantitativos a alguna de las muestras. Se utilizaron muestras saturadas con Mg <sup>+2</sup> para el análisis cualitativo.
Fluorescencia de Rayos X (XRF)	N/A	Se pudieron determinar aquellos elementos con un número de protones igual o mayores a 12. Los elementos fueron determinados en forma de óxidos.
Espectroscopia de Infrarrojo (IRS)	White y Roth, 1986	Mide la excitación de los átomos. Solo se realizó para las muestras escogidas de los tubos Shelby. Las muestras estaban saturadas con Mg <sup>+2</sup> .
Análisis por Diferencia Termal (DTA)	Tan, Hajek y Barshad, 1986	Se calienta la muestra y se miden los cambios endotérmicos y exotérmicos. Las muestras estaban saturadas con Mg <sup>+2</sup> . Se utilizó un estándar de kaolinita:bentonita a razón de 1:1
Análisis por Termogravimetría (TGA)	Tan, Hajek y Barshad, 1986	Esta prueba se corrió simultáneamente con el DTA, con las mismas muestras.
Microscopia Electrónica de Rastreo (SEM)	N/A	Se obtuvieron fotos a diferentes escalas de todas las muestras con el propósito de comparar el tamaño de partícula y textura. Las muestras estaban saturadas con Mg <sup>+2</sup> .

La saturación con magnesio facilita la distinción entre algunos minerales. Por ejemplo, la vermiculita y la esmectita refleja un distancia entre los planos muy similar en los análisis de difracción de rayos x, sin embargo una saturación con magnesio causa un colapso entre las capas de las esmectitas reduciendo así la distancia entre estas y facilitando su distinción. Para la separación textural primero se realizó una remoción de carbonatos y materia orgánica utilizando acetato de sodio para el primero y peróxido de hidrógeno para el segundo. Es sumamente importante remover los carbonatos y la materia orgánica porque ambos afectan los resultados de las pruebas que se realizan a estos suelos. Por ejemplo el área superficial de la materia orgánica puede alcanzar valores por encima de los 800 m<sup>2</sup>/g.

#### *3.4.4. Medición de potencial expansivo*

Las pruebas que se determinaron para medir el potencial expansivo son, entumecimiento libre, potencial de cambio volumétrico, índice de expansión y potencial de entumecimiento. La prueba de potencial de entumecimiento fue realizada con muestras inalteradas de los tubos Shelby. La prueba de potencial de cambio volumétrico se realizó con muestras compactadas e inalteradas. Las muestras compactadas se prepararon en dos estados: lado seco y lado húmedo de la curva de compactación. Las pruebas realizadas se describen en la Tabla 3.3.

El número de pruebas que se realizó estuvo limitado por la cantidad de muestra de suelo disponible. Una vez realizadas todas las pruebas, se compararon los valores y resultados. Con estos datos se preparó el informe detallado final con los hallazgos y recomendaciones más relevantes concernientes al potencial expansivo de los suelos y su presencia o no en la región oeste del archipiélago puertorriqueño.

**Tabla 3.3. Prueba de medición del potencial expansivo del suelo.**

<i>Prueba</i>	<i>Referencia</i>	<i>Observaciones</i>
(Entumecimiento Libre) <i>Free Swell</i>	Holtz & Gibbs (1956)	Se utiliza una probeta calibrada de 100mL con 100mL de agua destilada y se dejar caer 10 cm <sup>3</sup> de suelo pasando el tamiz no. 40.
Índice de Entumecimiento Modificado <i>Modified Free Swell Index (MFSI)</i>	Sivapullahia, et al. (1987)	Se obtuvieron aproximadamente 10 gramos de suelo seco al horno y se determinó el volumen a base de la gravedad específica.
Potencial de Entumecimiento <i>Swell Potential</i>	ASTM D 4546	Se realizaron los métodos A y B. El tiempo de duración varió entre 10 a 30 días.
Potencial de Cambio Volumétrico <i>Potential Volume Change (PVC)</i>	FHA 701 (Lambe, 1960)	Se realizó para la muestra más crítica en tres humedades distintas: con la humedad natural y por debajo y por encima de la humedad óptima. El método de compactación fue 3 capas compactadas con 7, 7 y 8 golpes para un total de 25 golpes.

## **Capítulo 4. Área de Estudio**

---

---

### **4.1. Introducción**

Este capítulo describe el lugar donde se obtuvieron las muestras de arcilla investigadas en esta tesis. Primero se presenta una descripción general del área del estudio incluyendo topografía, geología y otra información disponible. Luego el capítulo presenta una descripción detallada del sitio de muestreo incluyendo resultados de una investigación geotécnica realizada en el lugar.

### **4.2. Descripción general del área de estudio**

Las muestras de suelo estudiadas en esta tesis fueron obtenidas de un área dentro del municipio de Cabo Rojo, Puerto Rico. Específicamente el área de estudio fue escogida cercano a un proyecto residencial que fue reportado como posiblemente afectado por presencia de suelos con potencial expansivo significativo. Por razones legales este proyecto se mantendrá confidencial y sólo se presentará información general del estudio de suelos, sin revelar nombres de las distintas partes involucradas. Las Figuras 4.1 y 4.2 muestran un mapa general de localización del área de Cabo Rojo.



Figura 4.1. Mapa general de Puerto Rico mostrando área de Cabo Rojo.



Figura 4.2. Localización del área de estudio (Foto de Google Maps 2008).

---

La topografía del área es de una pendiente relativamente llana con una elevación levemente mayor en la parte noreste del proyecto y descendiendo hacia el suroeste. La elevación en toda la zona del proyecto varía aproximadamente entre 5 a 20 metros sobre el nivel del mar. Los cuerpos de agua más cercanos son el Canal de la Mona en toda la costa oeste a una distancia aproximada de dos kilómetros. También a dos kilómetros de distancia en dirección sur se encuentra la Laguna Rincón. La Laguna Cartagena se encuentra a siete kilómetros al este y a más de 10 kilómetros hacia el norte está el río Viejo que conecta con el río Guanajibo. De los estudios geotécnicos realizados, llegando algunos hasta 30 ft de profundidad, no se reportó hallazgo del nivel freático.

Cuando hay presencia de suelos expansivos es importante tomar en cuenta el rango anual de precipitación en el área. Los suelos expansivos causan mayores problemas cuando están en zonas áridas o semiáridas. La región del municipio de Cabo Rojo es una de las más secas de la isla, con un promedio de 46 pulgadas de lluvia anuales, siendo los meses de enero a marzo los más secos (<1 – 2 pulgadas) y de agosto a noviembre los más húmedos (5 – 7 pulgadas). Estos niveles de precipitación de la zona de Cabo Rojo corresponden a una región semiárida. Una región se define como árida o semiárida cuando la cantidad de humedad que podría ser devuelta a la atmósfera por medio de la transpiración o evaporación es mayor a la precipitación promedio anual (Coduto, 2001).

#### *4.2.1. Geología general*

La composición geológica de Puerto Rico se muestra en la Figura 4.3. En la región suroeste se encuentra la formación de Guanajibo además de la presencia de depósitos aluviales y de pantano. También se puede ver la mayor concentración de rocas metamórficas. Esta formación de rocas metamórficas se extiende desde Mayagüez hasta Yauco. En la región sur

está la formación Juana Díaz y la caliza de Ponce. La formación Juana Díaz está expuesta desde el municipio de Juana Díaz hasta el municipio de Lajas. En cuanto a la caliza de Ponce podemos encontrar depósitos por toda la costa suroeste hasta llegar a Cabo Rojo.

En el municipio de Cabo Rojo, donde se ubica el área de estudio, abundan formaciones constituidas por rocas volcánicas y sedimentarias. En la Figura 4.3 se muestra que en este municipio también se encuentran depósitos de la época Cuaternaria que consisten de depósitos aluviales, de pantanos y de playa. En Cabo Rojo también se encuentra la formación Guanajibo perteneciente a la era del Mioceno.

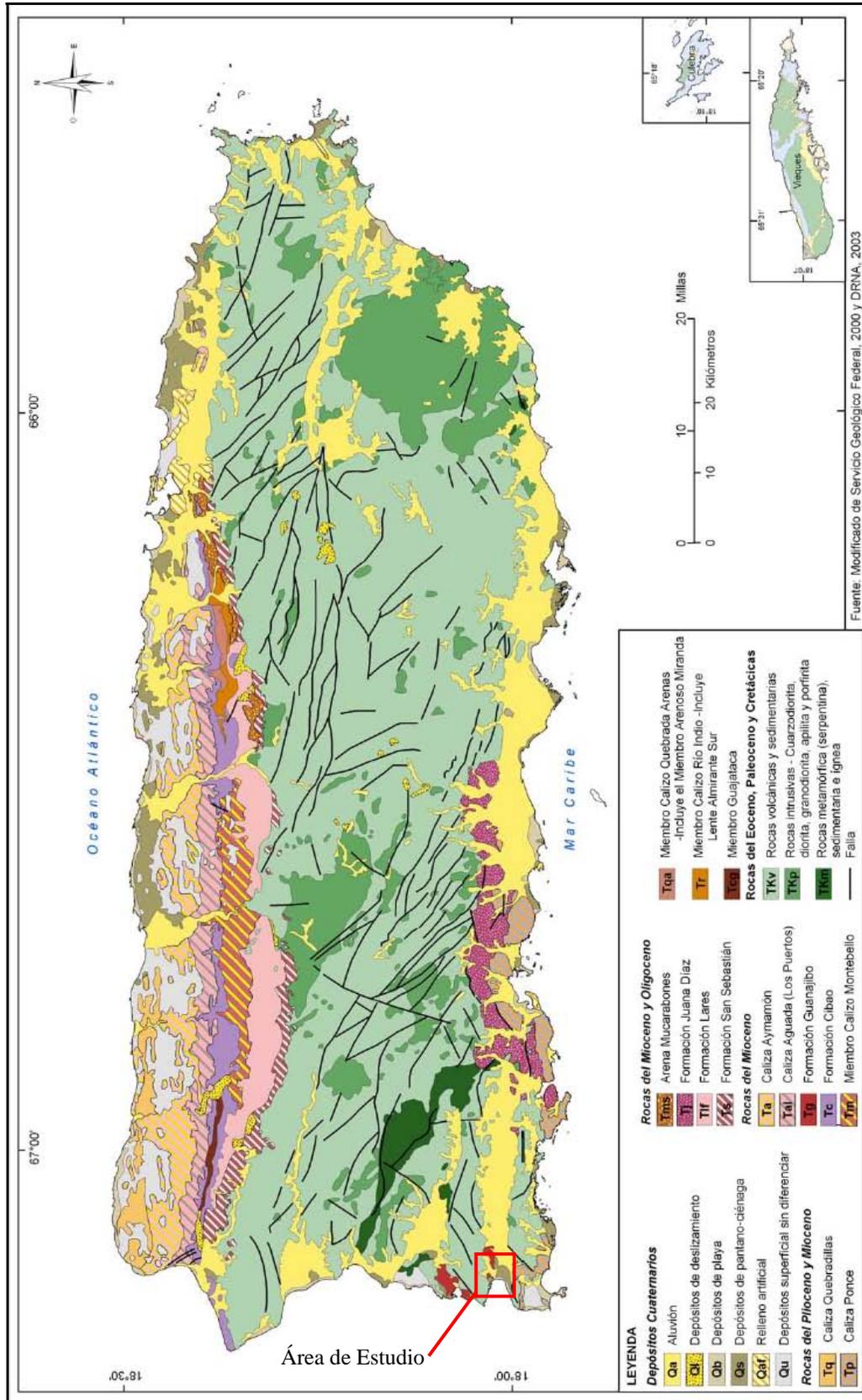


Figura 4.3. Mapa geológico. DRNA, 2004.

Un mapa geológico preparado por Volckmann (1984) para el USGS, muestra en mayor detalle la geología cercana al área de estudio en Cabo Rojo como se muestra en la Figura 4.4. Este mapa muestra la geología del cuadrángulo de Puerto Real, Cabo Rojo. También indica la presencia de diferentes formaciones y depósitos en la región cerca del área de proyecto en Cabo Rojo. El proyecto, identificado con un cuadro rojo en la Figura 4.4, específicamente está ubicado en dos formaciones distintas: la formación Guanajibo (Tg) al norte y los depósitos de arena de cuarzo (Tqs) en el sur. Otras formaciones o depósitos que circunscriben el área del proyecto son los depósitos aluviales (Qal), de playa (Qb), de pantano (Qs), pantano de mangle (Qm), la roca caliza de Cotui (Kc), la formación de Lajas (Kl) y el Basalto de Boquerón (Kb). La Tabla 4.1 resume las descripciones de cada una de estas formaciones y depósitos (Volckmann, 1984).

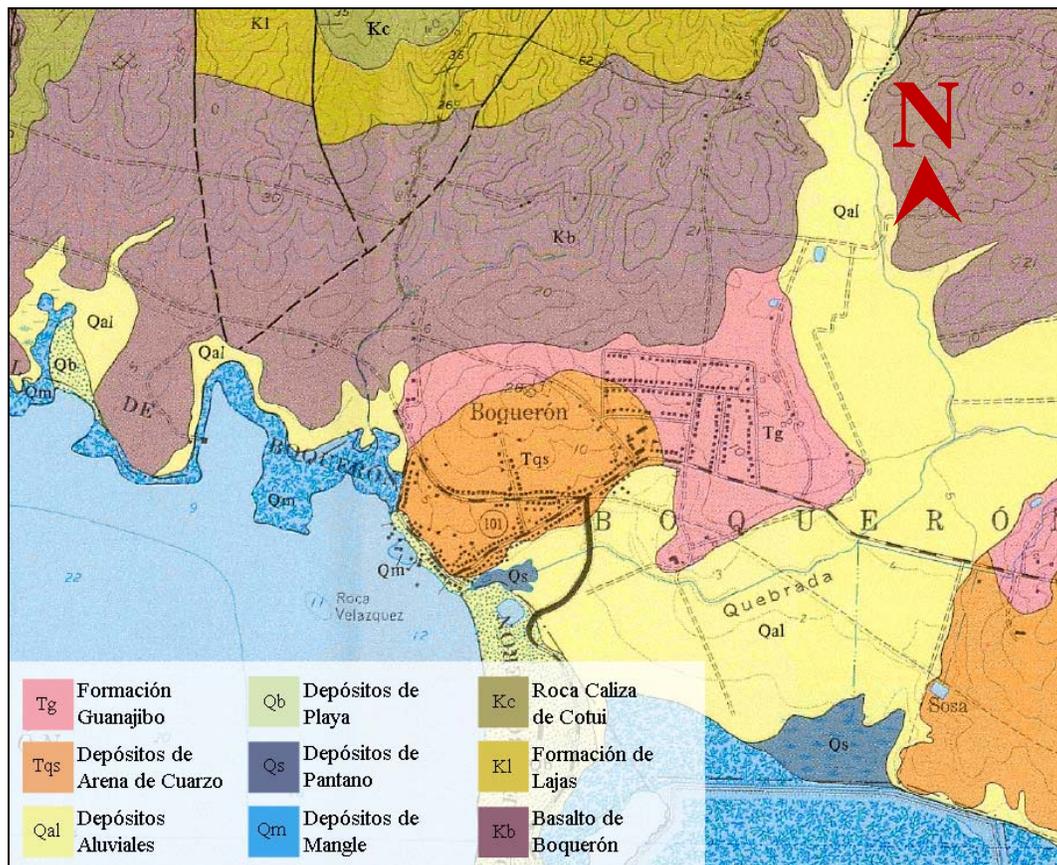


Figura 4.4. Mapa geológico, cuadrángulo de Puerto Real, Cabo Rojo. Adaptado de Volckmann, 1984.

Tabla 4.1. Descripción geológica.

<i>Formación o Depósito</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>
Formación Guanajibo	Tg	La Formación Guanajibo se divide en dos formaciones distintas. La primera tiene depósitos de material de color amarillento entre blanco y anaranjado. Se compone mayormente de calcirudita y calcarenitas conteniendo organismos marinos como conchas de ostras, corales menores y moldes internos de gasterópodos. La segunda contiene material de color marrón rojizo a anaranjado rojizo, arena inter estratificada y grava mediana a gruesa ligeramente cementada con calcita y óxidos de hierro.
Depósitos de Arena de Cuarzo	Tqs	Los Depósitos de arena de cuarzo tienen en menor escala material de hematita limonita y arcilla. La coloración varía en tonalidades rojizas de anaranjado a marrón a amarillo. Los tamaños de partículas que contienen cuarzo tienen un rango de 90 a 380 micrómetros.
Depósitos Aluviales	Qal	Los suelos aluviales pueden tener cualquier tipo de suelo desde arcilla hasta grava. En el valle de Lajas específicamente predominan los suelos arcillosos y limosos con un poco de arena fina y grava en el norte y sur del valle.
Depósitos de Playa	Qb	Estos depósitos consisten mayormente de arena y poca presencia de grava formados de caparzones de caracoles redondeados descompuestos, roca volcánica y cuarzo.
Depósitos de Pantano	Qs	Los depósitos de pantano son suelos compuestos en la mayoría de arcilla, limo y arena y tienen poco drenaje.
Pantano de Mangle	Qm	Área costera con concentraciones de mangles. Consisten de arena fina y limo atrapado por las raíces de los mangles.
Roca Caliza de Cotui	Kc	La roca caliza de Cotui puede tener un color grisáceo con un poco de marrón. Las capas suelen ser gruesas (1 – 2 metros); puede haber roca caliza bioclástica densa. Se componen generalmente de fragmentos de moluscos y se pueden encontrar en abundancia en tamaño micra o en láminas cementadas. En algunos casos puede encontrarse cuarzo, glauconita y hematita. Algunas capas están compuestas por conglomerados de rastros o escombros de la Formación de Lajas y derivados de roca caliza.
Formación Lajas	Kl	La Formación de Lajas tiene una variedad rica en minerales. En esta formación hay roca basáltica y minerales tales como plagioclasas, hornablendas, olivino, piroxena, apatita, zirconio, biotita, cuarzo, magnetita, hematita, calcita, serpentinita, clorita, entre otros. La coloración de los minerales tiende a ser rojizas o grisáceas.
Basalto de Boquerón	Kb	El Basalto de Boquerón se compone mayormente de plagioclasas, piroxena y olivino. Estas se forman desde material fino hasta matrices afaníticas. Las plagioclasas se forman en “twinned laths”, las piroxenas se forman en agregados cristalinos y el olivino surge como una estructura cristalina esquelética. Otros minerales que se pueden encontrar en el Basalto de Boquerón son apatita, magnetita, hematita, clorita, epidotita.

Según el mapa de la Figura 4.4, el área de estudio cae dentro de la formación de Guanajibo (Tg) y depósitos de arena de cuarzo (Tqs). Basado en esto, las descripciones geológicas de la Tabla 4.1, el área de estudio tendría de poca a ninguna presencia de suelos

arcillosos. Sin embargo estudios geológicos que se presentan más adelante en este capítulo muestran presencia de suelos arcillosos. Esta discrepancia puede deberse a la naturaleza general de los mapas geológicos como los de la referencia.

#### 4.2.2. Información de suelos superficiales del área de estudio.

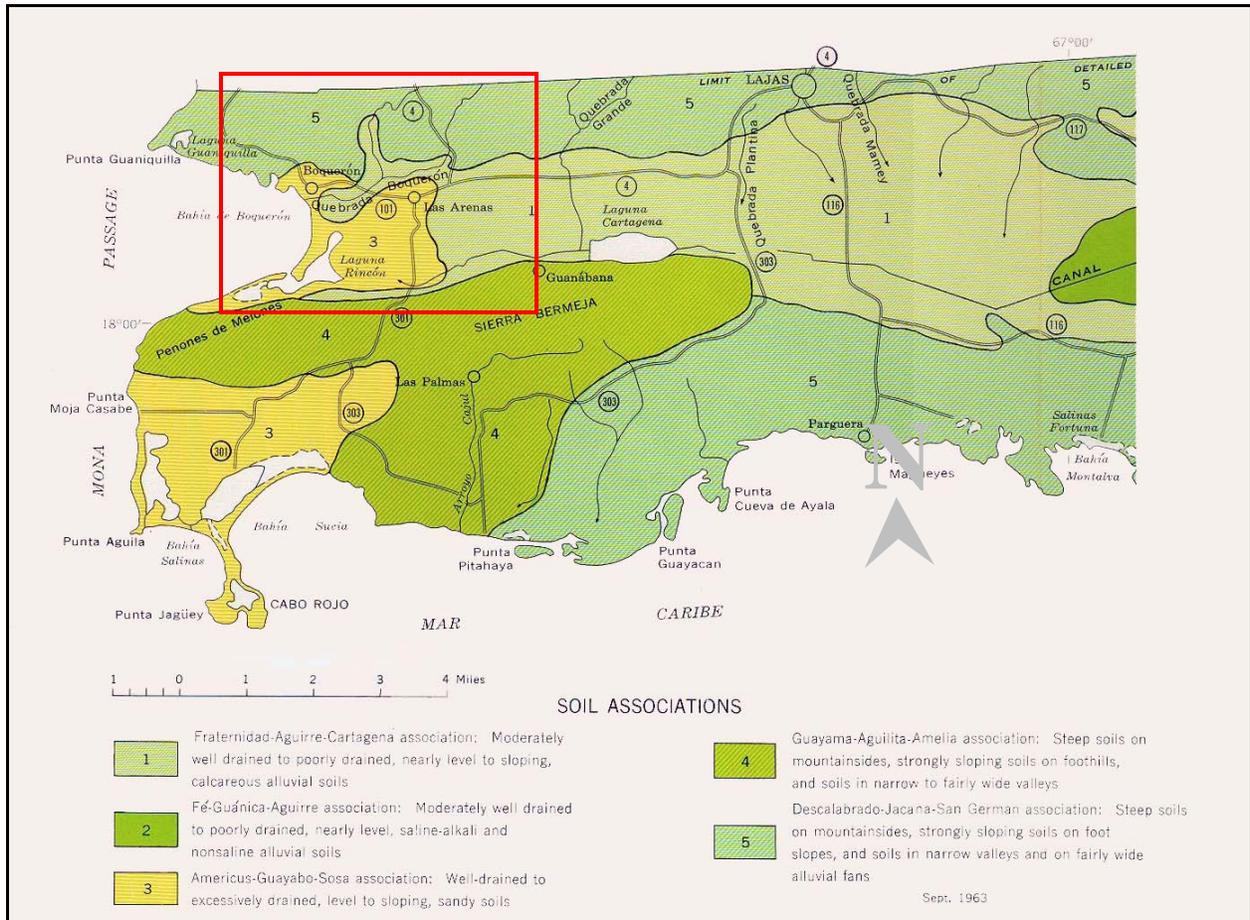


Figura 4.5. Mapa área del Valle de Lajas. USDA, 1963.

El mapa general de suelos para la región del valle de Lajas preparado por el USDA (1963) se muestra en la Figura 4.5. Según esta figura en el área de investigación pueden presentarse tres tipos de suelos. Los tres tipos de suelo que hay presente en el área de interés son: 1. Fraternidad-Aguirre-Cartagena, estos suelos varían de moderadamente bien drenados a pobremente drenados, de poca pendiente y aluviales calcáreos; 2. Americus-Guayabo-Sosa, estos suelos son suelos arenosos desde bien drenados hasta excesivamente drenados, con poca

pendiente; y 3. Descalabrado-Jacana-San Germán, son suelos empinados en montañas y colinas con algunas regiones de valles estrechos y en extensiones aluviales. Estos tres tipos de suelos son descritos como finos a muy finos y los suelos clasificados 1 y 3, pueden tener minerales arcillosos como esmectita. La esmectita, o montmorilonita es considerado uno de los minerales de arcilla más expansivos. Esta información parece corroborar la presencia de suelos expansivos en el área de estudio. Según NRCS (2002) existen nueve tipos de suelos superficiales en el municipio de Cabo Rojo. Estos se listan en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2. Clasificación taxonómica de suelos en Cabo Rojo.**

<i>Serie de Suelo</i>	<i>Clasificación</i>
Caguabo-Mucara	Fine-loamy, mixed, actived-super active, isohyperthermic shallow typic-dystric Eutrudepts
Coloso-Toa-Montegrande	Very fine, mixed, active-super active, isohyperthermic Vertic Endoaquepts-Chromic Hapluderts-Fluvaquentic Hapludolls
Descalabrado-Aguilita-Mariana	Clayey-fine, mixed, superactive-active, isohyperthermic, shallow Typic Haplustolls-Haplohumults
Descalabrado-Jacana-San Germán	Clayey-fine, mixed, superactive, isohyperthermic shallow Typic-Vertic Haloplustolls
Fraternidad-Aguirre-Cartagena	Very-fine, smectitic, isohyperthermic Typic-Sodic Haplusters
Hydraquents-Sosa-Bahía	Fine, kaolinitic, isohyperthermic Aridic-Psammentic Paleustalfs
Pozo Blanco-Guayama	Clayey-fine, mixed, superactive-active, isohyperthermic shallow TypicHaplustalfs Aridic Calciustolls
Rosario-Nipe-Guanajibo	Clayey-fine, ferruginous, parasesquic, isohyperthermic shallow Typic Hapludox-Anionic Acrudox-Plinthic Paleudults
Voladora-Lares-Cataño	Very fine, mixed, active-semiactive, isohyperthermic Aquic Paleudults-Typic Palehumults

*Adaptado del Updated Taxonomic Classification of the Soils of Puerto Rico, 2003.*

### 4.3. Área de proyecto y muestreo

Los suelos estudiados en esta investigación provinieron de unos barrenos de un estudio geotécnico privado (Jiménez, 2005) y de dos trincheras de exploración realizadas como parte de esta tesis. El perfil de la trinchera No. 2 se muestra en la Figura 4.10 y el registro en la Figura 4.16. Para salvaguardar la confidencialidad del proyecto, no se presentan figuras relacionadas al proyecto geotécnico. Las trincheras de exploración se hicieron el 6 y 20 de septiembre de 2007,

época donde ocurre el promedio anual de lluvia mayor en el área. Fotos de las trincheras se muestran en las Figuras 4.8 y 4.9. Las trincheras se realizaron usando una máquina excavadora con una pala de 24 pulgadas de ancho, operada por el Sr. Troche, empleado de TAMRIO. En las Figuras 4.6 y 4.7 se muestra el área de las trincheras y la vegetación del lugar. En la Figura 4.6 se puede notar las grietas en el suelo, efecto de la contracción por la pérdida de humedad.



**Figura 4.6. Área de la exploración geotécnica por trinchera.**



**Figura 4.7.** Vegetación de la zona.



**Figura 4.8.** Trincheras No.1 del 6 de septiembre de 2007.



Figura 4.9. Trinchera No. 2 del 20 de septiembre de 2007.

#### 4.4. Pruebas de campo

En el campo se realizaron tres pruebas en la segunda trinchera, cono dinámico, penetrómetro de bolsillo y humedad natural. Observando a grandes rasgos las tres pruebas realizadas, en la Figura 4.10, se puede ver que cada una de ellas mantiene un patrón consecuente. El cono de penetración dinámica y el penetrómetro de bolsillo tienen resultados muy similares, ambos presentan los primeros cuatro pies con las resistencias más altas. A medida en que se adentran a los cinco pies, el suelo pierde resistencia. La resistencia más baja se puede apreciar empezando los cinco pies hasta llegar aproximadamente a los diez pies. El suelo aparenta desarrollar nuevamente una mayor resistencia a profundidades mayores de los diez pies. Solo hay una pequeña variación entre ambas pruebas que ocurre cerca de los ocho pies, mientras el cono dinámico aumenta levemente, el penetrómetro de bolsillo alcanza su valor más bajo. En

cuanto la humedad natural, se puede decir que va cónsona con las otras dos pruebas. Las resistencias más altas de perfil coinciden con las humedades más bajas, mientras que las humedades más altas coinciden con la región más débil de las trinchera, de cinco a diez pies de profundidad.

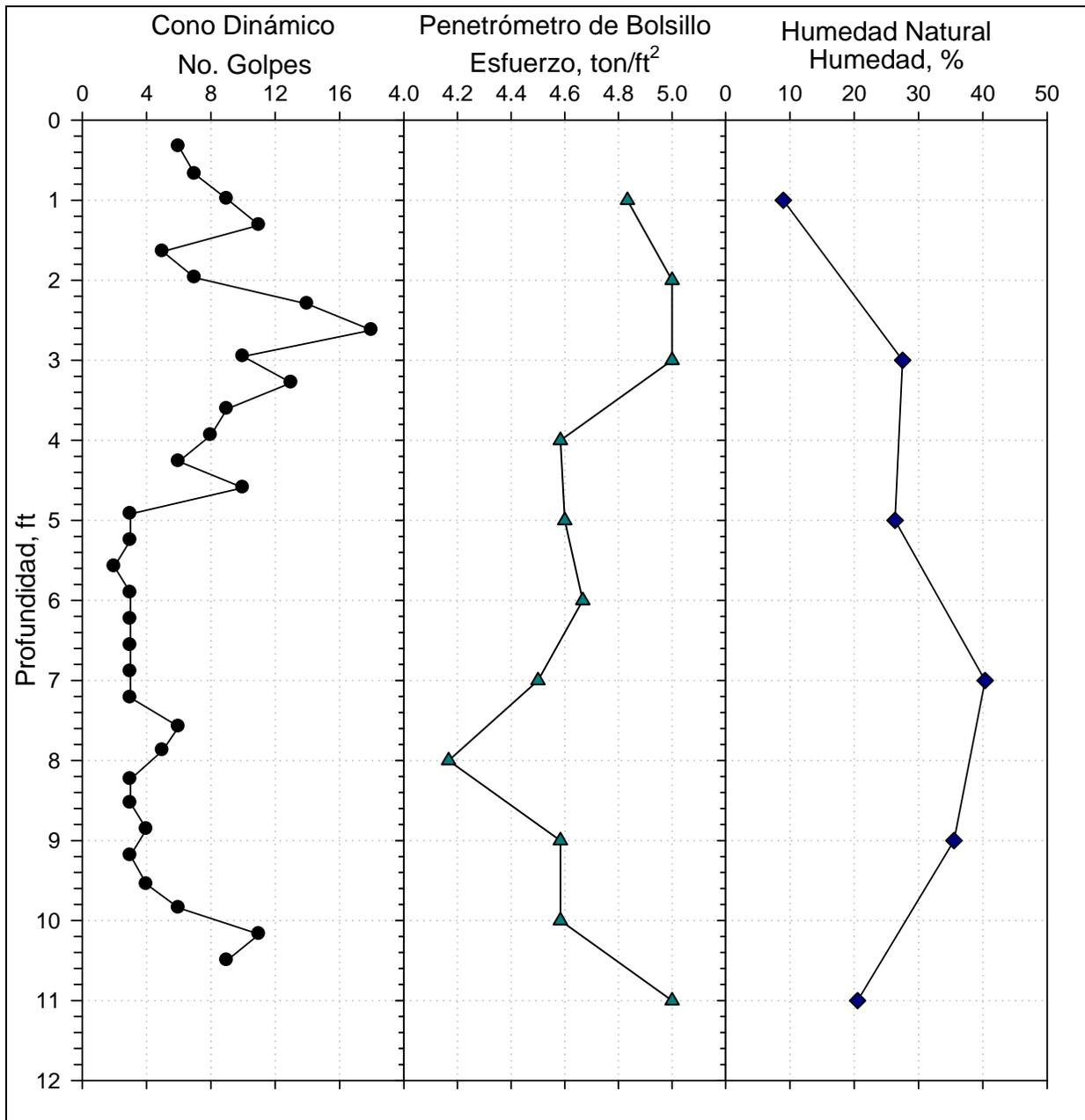


Figura 4.10. Resultados pruebas de campo.

De igual forma, luego de los diez pies, a medida que la humedad va disminuyendo, el suelo adquiere mayor resistencia. Se puede concluir, a base de las pruebas de campo, que la región que es de interés para esta investigación es la región más débil con humedades más altas, o sea de cinco a diez pies de profundidad.

#### 4.5. Caracterización del suelo

Las primeras pruebas se realizaron con los tubos Shelby pertenecientes al estudio privado (Jiménez, 2005). A estas muestras se les hicieron cuatro pruebas iniciales, humedad natural, límites de Atterberg, gravedad específica y análisis granulométrico por el método del hidrómetro y luego por tamices. Además de los tubos Shelby se sumaron eventualmente las muestras extraídas de las trincheras. Unas de las pruebas más importantes son los límites de Atterberg, ya que sus resultados fueron utilizados para decidir con cuáles muestras se procedería a las pruebas siguientes.

**Tabla 4.3. Resumen pruebas de caracterización del suelo.**

Muestra	$W_n$ (%)	Atterberg (%)		Granulometría (%)			$A_c$	Gravedad Específica	AASHTO	USCS
		LL	PI	Arena	Limo	Arcilla				
CM-1-01	15.1	23	10	62.92	18.17	18.91	0.53	2.85	A-4	SC
CM-1-02	15.0	28	12	54.44	22.42	23.14	0.52	2.79	A-6	SC
CM-1-03	19.9	43	23	46.51	12.81	40.68	0.57	2.78	A-7-6	CL
CM-1-04	21.4	101	69	10.34	23.23	66.43	1.04	2.74	A-7-5	CH
CM-1-05	26.0	92	67	20.51	28.17	51.32	1.31	2.88	A-7-6	CH
CM-1-06	28.8	64	39	6.40	71.07	22.53	1.73	2.90	A-7-6	CH
CM-1-07	47.9	138	81	2.42	16.93	80.65	1.00	2.77	A-7-5	MH
CM-1-08	46.5	86	52	2.09	31.98	65.93	0.79	2.83	A-7-6	CH
CM-1-09	12.7	82	58	3.27	50.52	46.21	1.26	2.78	A-7-5	CH
T 2-6 ft	27.0	169	140	13.1	15.48	71.42	1.96	2.65	A-7-6	CH
T 6-8 ft	40.4	155	112	1.61	12.30	86.09	1.30	2.73	A-7-5	CH
T 8-10 ft	35.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T 10-12 ft	20.5	68	-	4.84	51.60	43.56	-	2.74	-	-

---

Para algunas muestras fue necesario realizar ciertas modificaciones en cuanto al tipo de prueba que se realizó y a las normas de la ASTM. La Tabla 4.3 presenta un resumen de las pruebas de humedad natural, límites de Atterberg, granulometría, la actividad de la arcilla, gravedad específica y las clasificaciones de suelo según la AASHTO y el USCS. Los resultados de la prueba de compactación se presentan en la sección referente a dicha prueba.

#### *4.5.1. Descripción visual*

La Figura 4.11 muestra fotos de los tipos de suelos obtenidos de los tubos Shelby del estudio privado (Jiménez, 2005). Es importante aclarar que no todas las muestras de suelo estaban en su estado natural al momento de tomar las fotos. Las primeras tres fotos muestran suelos más arenosos y de muy baja plasticidad. Estos suelos están a una profundidad promedio de uno, tres y cinco pies respectivamente. Se puede apreciar que son los suelos más oscuros del perfil. Uno de los cambios más drásticos es en la transición de la muestra CM-1-03 a la CM-1-04. A una profundidad promedio de los siete pies, la muestra CM-1-04, es un suelo con un color blancuzco aunque presenta rastros del suelo rojizo que se aprecia en la muestra CM-1-03. La apariencia y textura de esta muestra es muy similar a una barra de jabón. La muestra CM-1-05 también tiene suelo blanco aunque con un tono más anaranjado. Este suelo se localiza a una profundidad promedio de 11 pies. A los 13 pies, la muestra CM-1-06 es un tanto polvorosa con una mezcla de colores como blanco, amarillo y negro. A medida en que se profundiza en el suelo, éste se va tornando más anaranjado con tonos amarillentos como se aprecia en las muestras CM-1-07 (17 pies), CM-1-08 (19 pies) y CM-1-09 (28 pies).



Figura 4.11. Fotos de los suelos de tubos Shelby del estudio privado (Jiménez, 2005).

La Figura 4.12 muestra las fotos de los suelos obtenidos de las trincheras. Dado que las trincheras se realizaron tiempo después que ya se habían llevado a cabo algunas pruebas, solo se recogió suelo a partir de la presencia de suelo evidentemente plástico. Es por tanto que no se muestran fotos de los primeros pies de profundidad. El primer suelo, T 2-6 ft, es el estrato más grueso de la trinchera ya que tiene aproximadamente cuatro pies de espesor. En apariencia es muy similar a la muestra CM-1-04. Los primeros pies de este estrato contienen una mezcla de

un suelo rojizo muy quebradizo. Este estrato se va aclarando pasado los tres o cuatro pies. Este suelo se caracteriza por su color blanco (con poca humedad) y gris y por la plasticidad que muestra su textura. El suelo T 6-8 ft muestra una similitud con la muestra CM-1-07, por su color anaranjado. Tiene una textura blanda y plástica. Las muestras restantes, T 8-10 ft y T 10-12 ft, son muestras totalmente diferentes a las primeras dos, ya que en estas se puede palpar al tacto la partícula del suelo, sobre todo la última, que es bastante polvorosa.

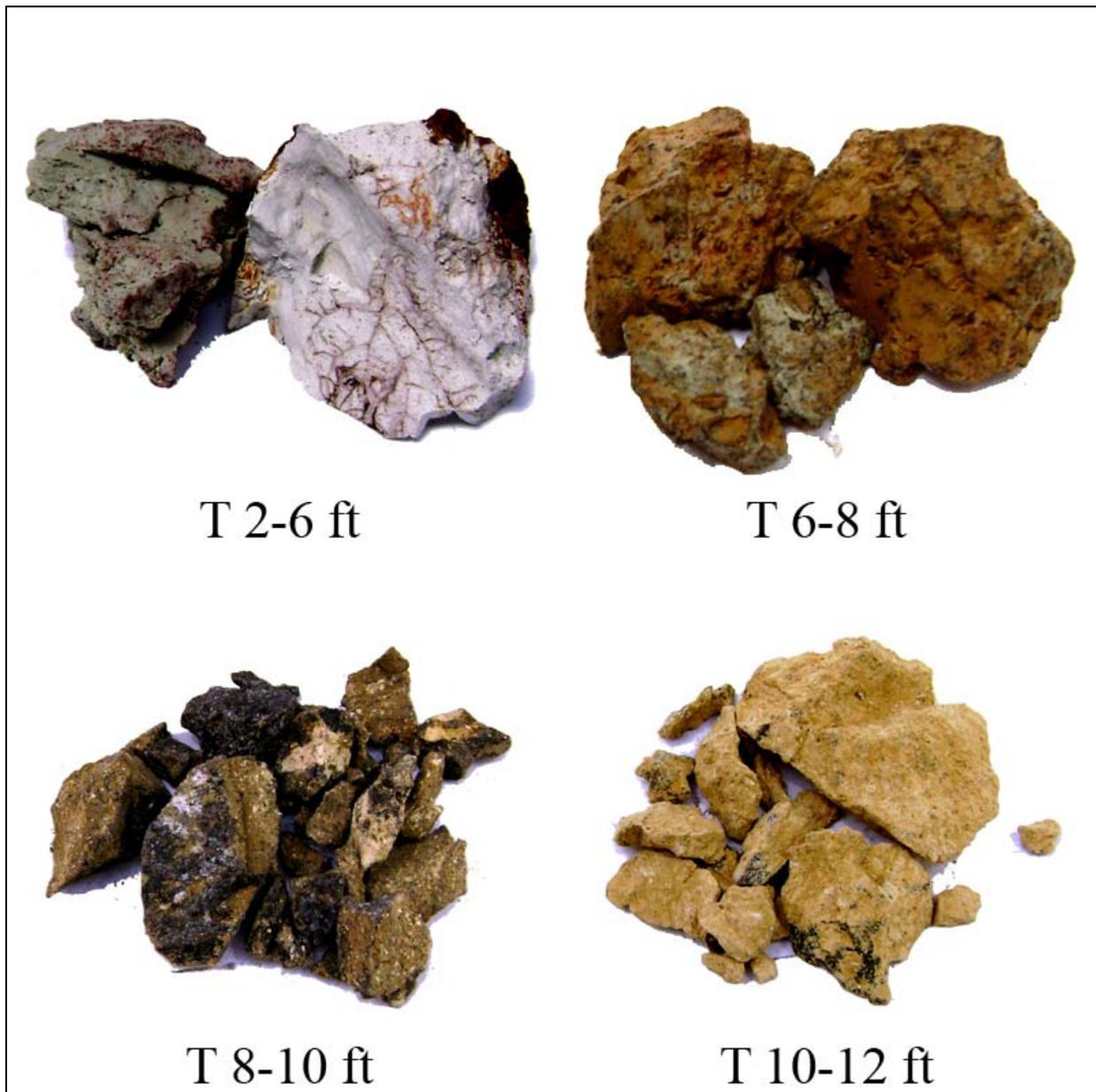


Figura 4.12. Fotos de los suelos de la trinchera de exploración de Cabo Rojo.

#### *4.5.2. Contenido de humedad natural*

El contenido de humedad fue el primer dato que se obtuvo de las muestras sacadas de los tubos Shelby. Cuando se cortaba el tubo unas 3.5 pulgadas, la parte interna se usaba para contenido de humedad y el restante se dejaba secando al aire para luego moler la muestra y realizarle las pruebas de granulometría, gravedad específica, límites de Atterberg y extracción de arcillas. La muestra de suelo más seca resultó ser el CM-1-09 con solo un 12.7% de humedad, mientras que la más húmeda fue la CM-1-07 con 47.9%. La humedad de las muestras de la trinchera se obtuvo del campo siendo la más humedad la T 6-8 ft con 40.4% de humedad y la más seca la T 10-12 ft con 20.5%.

#### *4.5.3. Límites de Atterberg*

Los límites de Atterberg fue el criterio principal que se utilizó para determinar qué suelos fueron los escogidos para realizar un análisis más detallado. Las muestras escogidas fueron aquellas con un índice de plasticidad mayor de 50, ya que está dentro de la categoría de suelos de muy alta plasticidad según varias investigaciones (Burmister, 1949; Chen, 1988). Del estudio privado de Jiménez (2005), cinco de las nueve muestras cayeron bajo este criterio y solo dos muestras de la trinchera. Los rangos de límite líquido e índice de plasticidad varían de 82 a 169% y 52 a 140%, respectivamente, siendo lo valores más altos pertenecientes a las muestras obtenidas de la trinchera. La Figura 4.13 presenta el resumen de los resultados del límite líquido y el índice de plasticidad de las muestras analizadas.

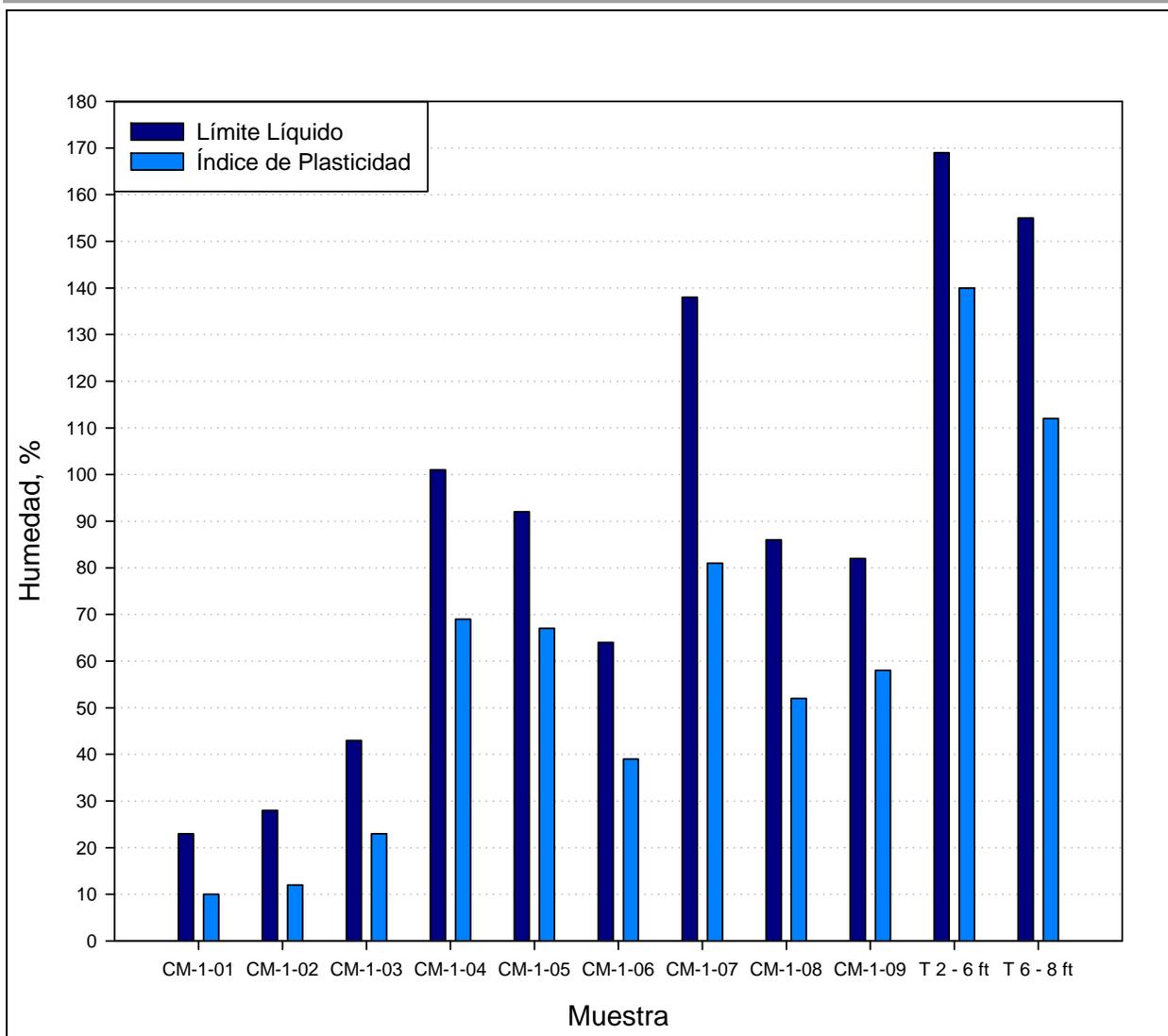


Figura 4.13. Resumen de valores de los límites de Atterberg del estudio en Cabo Rojo.

En la Carta de Plasticidad que se muestra en la Figura 4.14, se puede apreciar que la muestra CM-1-07 es la única que quedó por debajo de la línea A definiendo este suelo como limo inorgánico altamente compresible o arcilla orgánica. Por otro lado, la muestra CM-1-06 cae dentro del rango de arcilla altamente plástica, sin embargo la granulometría establece este suelo como predominantemente limo.

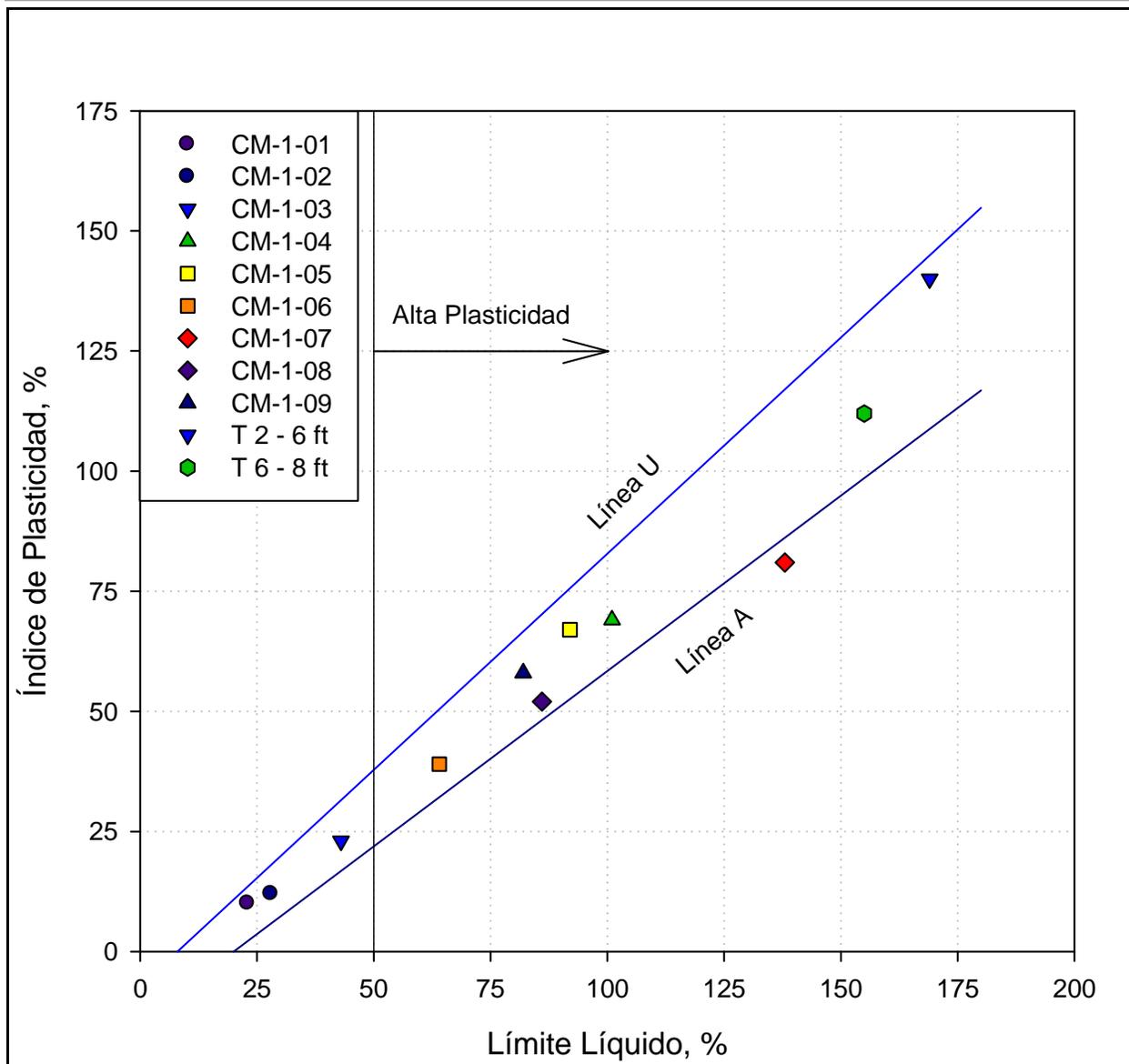


Figura 4.14. Valores de límites de Atterberg y carta de plasticidad del estudio en Cabo Rojo.

En la Figura 4.15 se muestra la variación de humedades del Estudio privado (Jiménez, 2005) y de la Trinchera con respecto a la profundidad. A grandes rasgos se ve claramente que la humedad natural está muy cerca del límite plástico. Esto es una tendencia de suelos que son sobreconsolidados sobre todo aquellos que tienen una humedad natural menor al límite plástico (Das, 2002). El índice líquido de estos suelos es negativo.

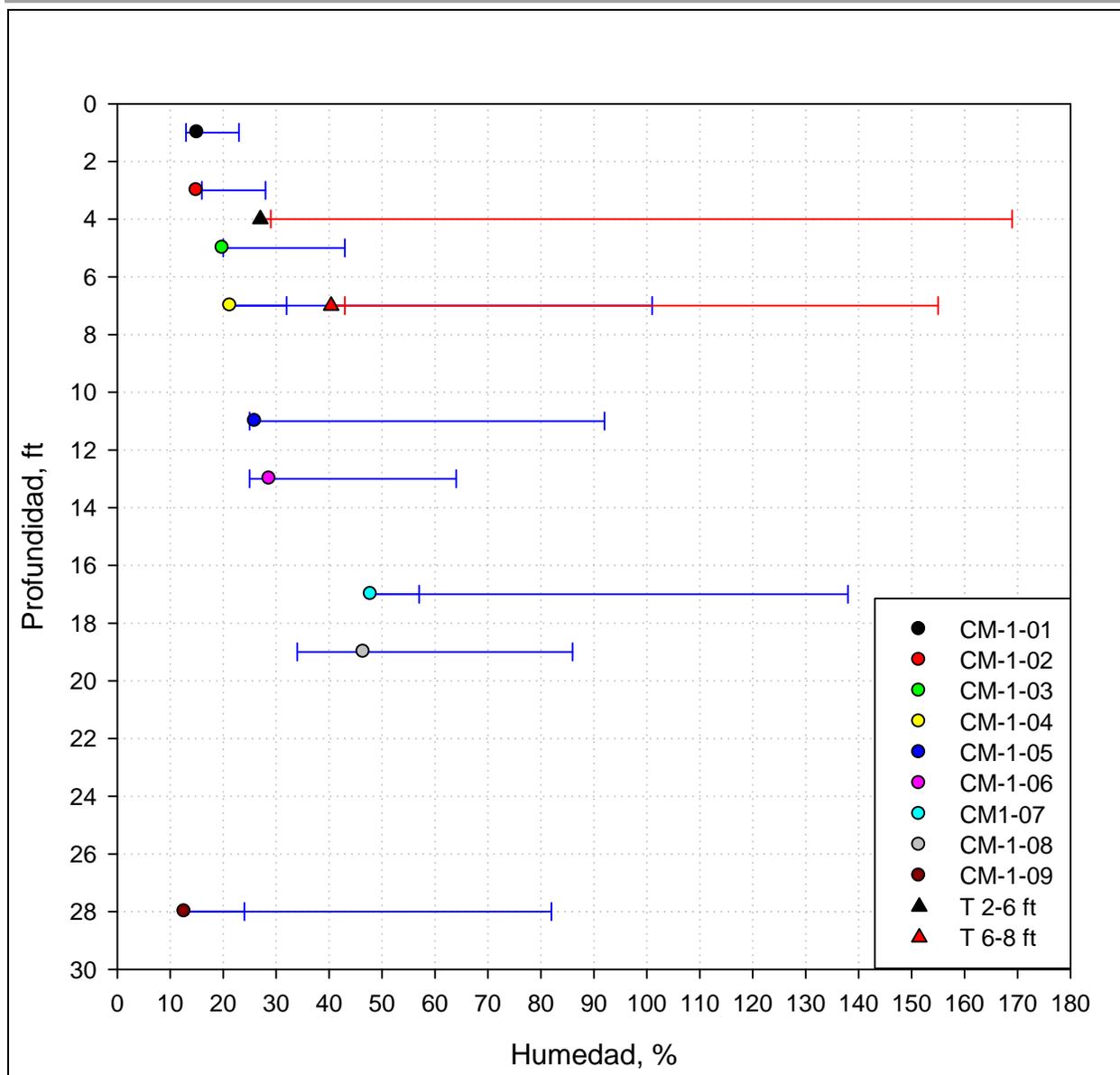


Figura 4.15. Humedad natural, límites plástico y líquido. Muestras de estudio privado y trinchera.

La Figura 4.16 muestra el registro realizado para la trinchera No. 2. La misma incluye la humedad natural (símbolo a color) junto con los límites de Atterberg (extremo de las líneas). El penetrómetro de bolsillo y Penetración Dinámica de Cono también fueron incluidos en el registro. Es importante señalar que los valores del Cono que se muestran en el registro se modificaron para ajustarse a la escala que se usó para dicho registro. El registro muestra además a qué profundidades se tomaron muestras en tubos Shelby.

Proyecto: Caracterización y Evaluación de Suelos Expansivos en la Región de Cabo Rojo							
Fecha: 20 de septiembre de 2007		Método: Trinchera /excavadora					
Lugar: Cabo Rojo, P.R.		Compañía: TAMRIO					
Elev.: 10 m sobre el nivel de mar		Profundidad: 12 pies					
Trinchera: No. 2		Nivel Freático: No encontrado					
Elevación Terreno pies	Símbolo del Suelo	Descripción del suelo	Hum. Natural %	Atterberg LL % PL %		Cono Din.* #/pies	Pen. Bolsillo ton/pies <sup>2</sup>
0.0		ARENA, arcillosa y limosa de color marrón, de poca plasticidad y algunas raíces.					
1.0			9.0	N/D	N/D	22	4.83
2.0	SHELBY	ARCILLA, blanca de alta plasticidad con partículas oxidadas rojizas y filosas de poca plasticidad.				23	5.00
3.0			27.5	169	29	42	5.00
4.0						30	4.58
5.0			26.4	169	29	19	4.60
6.0		ARCILLA, anaranjada de alta plasticidad con partículas grises y negras.				8	4.67
7.0			40.4	155	43	9	4.50
8.0	SHELBY	LIMO, Amarillo de poca plasticidad.				14	4.17
9.0			35.5	N/D	N/D	10	4.58
10.0						13	4.58
11.0		LIMO, Amarillo de poca plasticidad.					
11.0			20.5	68	N/D		5.00
12.0		Fin de Trinchera No se encontró Nivel Freático					

\*Los valores del cono fueron modificados para ajustarlos a la escala de pies de profundidad.  
 Nota: Al finalizar la excavación de la trinchera, se rellenó con el mismo material excavado y se dejó en condiciones similares a las encontradas.

Figura 4.16. Registro de la trinchera No.2

## **Capítulo 5. Resultados y Análisis**

---

---

### **5.1. Introducción**

Este capítulo presenta el resumen de los resultados de las diferentes pruebas realizadas a cada uno de los suelos arcillosos estudiados en esta tesis. Además, se presenta una breve discusión sobre los datos más relevantes de cada una de ellas. Los temas discutidos en esta sección incluyen la clasificación de los suelos, la evaluación mineralógica, el potencial expansivo (basado en diversos índices) y las posibles tendencias y correlaciones halladas durante esta investigación entre el potencial de expansión y las propiedades del suelo. Se incluye además comentarios sobre la compactación del suelo con mayor potencial de expansión.

### **5.2. Clasificación de muestras estudiadas**

#### *5.2.1. Resumen de las muestras*

La Tabla 5.1 presenta el origen de cada muestra. Un resumen de todas las muestras estudiadas junto con su clasificación ingenieril se presenta en la Tabla 5.2. Esta tabla también incluye la humedad natural, los límites de Atterberg, la granulometría, actividad de la arcilla, la gravedad específica y la clasificación de cada muestra según los sistemas AASHTO y USCS. Estas muestras se describieron en el Capítulo 4 y provinieron de un estudio geotécnico cercano (Jiménez, 2005) y de las trincheras excavadas para esta tesis.

**Tabla 5.1. Origen de las muestras estudiadas.**

Muestra	Fuente	Cata	Profundidad pies	Tipo de Muestra <sup>(1)</sup>
CM-1-01	Estudio geotécnico, Jiménez (2005)	Confidencial	0 - 2	Shelby
CM-1-02	Estudio geotécnico, Jiménez (2005)	Confidencial	2 - 4	Shelby
CM-1-03	Estudio geotécnico, Jiménez (2005)	Confidencial	4 - 6	Shelby
CM-1-04	Estudio geotécnico, Jiménez (2005)	Confidencial	6 - 8	Shelby
CM-1-05	Estudio geotécnico, Jiménez (2005)	Confidencial	10 - 12	Shelby
CM-1-06	Estudio geotécnico, Jiménez (2005)	Confidencial	12 - 14	Shelby
CM-1-07	Estudio geotécnico, Jiménez (2005)	Confidencial	16 - 18	Shelby
CM-1-08	Estudio geotécnico, Jiménez (2005)	Confidencial	18 - 20	Shelby
CM-1-09	Estudio geotécnico, Jiménez (2005)	Confidencial	27 - 29	Shelby
T 2-6 ft	Trinchera para tesis	Trincheras 1 y 2	2 - 6	Shelby y Alterada
T 6-8 ft	Trinchera para tesis	Trincheras 1 y 2	6 - 8	Shelby y Alterada
T 8-10 ft	Trinchera para tesis	Trinchera 2	8 - 10	Alterada
T 10-12 ft	Trinchera para tesis	Trinchera 2	10 - 12	Alterada

Nota: (1) Muestra Shelby se considera "inalterada".

**Tabla 5.2. Resumen de muestras estudiadas y pruebas de clasificación.**

Muestra	W <sub>n</sub> (%)	Atterberg (%)		Granulometría (%)			A <sub>c</sub>	Gravedad Específica	Clasificación	
		LL	PI	Arena	Limo	Arcilla			AASHTO	USCS
CM-1-01	15.1	23	10	62.92	18.17	18.91	0.53	2.85	A-4	SC
CM-1-02	15.0	28	12	54.44	22.42	23.14	0.52	2.79	A-6	SC
CM-1-03	19.9	43	23	46.51	12.81	40.68	0.57	2.78	A-7-6	CL
CM-1-04	21.4	101	69	10.34	23.23	66.43	1.04	2.74	A-7-5	CH
CM-1-05	26.0	92	67	20.51	28.17	51.32	1.31	2.88	A-7-6	CH
CM-1-06	28.8	64	39	6.40	71.07	22.53	1.73	2.90	A-7-6	CH
CM-1-07	47.9	138	81	2.42	16.93	80.65	1.00	2.77	A-7-5	MH
CM-1-08	46.5	86	52	2.09	31.98	65.93	0.79	2.83	A-7-6	CH
CM-1-09	12.7	82	58	3.27	50.52	46.21	1.26	2.78	A-7-5	CH
T 2-6 ft	27.0	169	140	13.1	15.48	71.42	1.96	2.65	A-7-6	CH
T 6-8 ft	40.4	155	112	1.61	12.30	86.09	1.30	2.73	A-7-5	CH
T 8-10 ft	35.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T 10-12 ft	20.5	68	-	4.84	51.60	43.56	-	2.74	-	-

---

### *5.2.2. Granulometría*

La granulometría de todas las muestras se realizó mediante el método del hidrómetro. Al inicio de esta investigación, esta prueba presentó un comportamiento poco común para algunas de las muestras. Típicamente, la prueba del hidrómetro se realiza con aproximadamente 50 gramos de suelo cuando se trabaja con limos y arcillas. La primera muestra ensayada fue la CM-1-07. El comportamiento esperado establece que cada lectura del hidrómetro baje con el tiempo. Contrario a lo esperado, para la muestra CM-1-07 las lecturas aumentaban con el tiempo. Para solucionar este problema, varias alternativas se consideraron para tratar de conseguir resultados confiables. Entre las alternativas consideradas estaba reducir la cantidad de suelo de 50 gramos a cantidades menores como 30, 25 y 10 gramos. También se estudió el impacto de variar la cantidad de agente dispersor (Hexametáfosfato de Sodio) por encima y por debajo de los 125 mL que normalmente se utilizan (por encima se utilizó 200 mL y por debajo se usó 60 mL). Finalmente, se encontró que las pruebas de hidrómetro resultaron satisfactorias al utilizar una cantidad entre 25 y 30 gramos de muestra de suelo y 125 mL del agente dispersor. Luego de correr el hidrómetro por un período de 24 horas, se lavó el suelo por el tamiz no. 200, se secó al horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C por espacio de 24 horas y se tamizó. La Figura 5.1 muestra las curvas granulométricas encontradas para los suelos analizados. La Tabla 5.2 muestra los porcentajes encontrados de la fracción de arena ( $\leq 4.75$  mm), fracción de limo (0.075 mm a 4.75 mm) y fracción de arcilla ( $< 0.002$  mm). Con excepción de las muestras CM-1-01 y CM-1-02 todas las demás muestras analizadas presentaron un porcentaje de finos (es decir, fracción de limos y arcillas) mayor a 50%. La muestra con el mayor porcentaje de arcillas fue la T 6-8 ft con un valor de 86.1% (y 98.4% de finos), seguido de las muestras CM-1-07 y T 2-6 ft con porcentajes de arcillas de 80.6% y 71%, respectivamente.

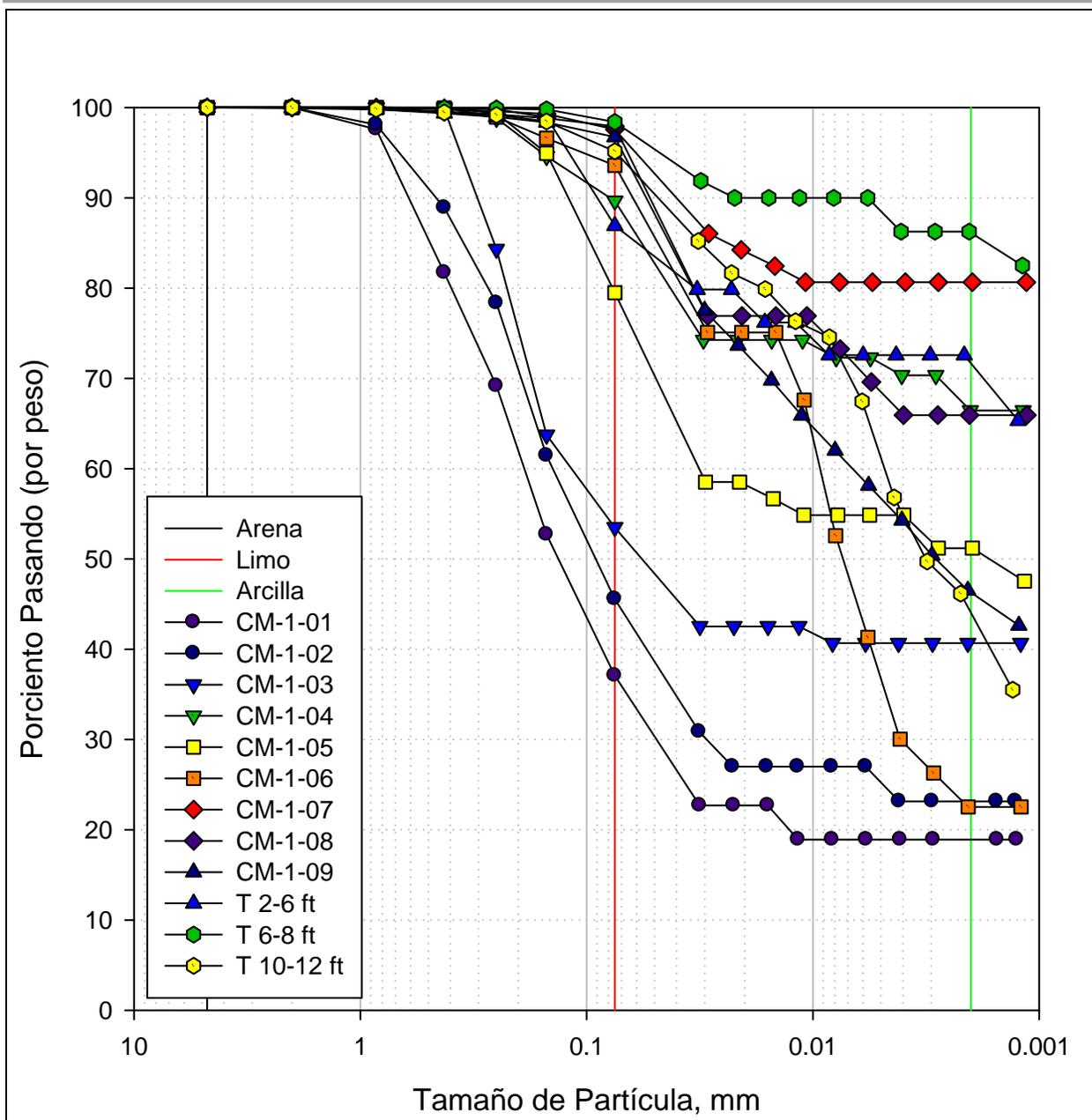


Figura 5.1. Curvas granulométricas de muestras estudiadas.

### 5.2.3. Límites de Atterberg

Como parte de la clasificación ingenieril de las muestras listadas en la Tabla 5.2 se llevaron a cabo pruebas de plasticidad basado en los límites de Atterberg. Estos límites se evaluaron siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D 4318 (ASTM, 2005b). La Tabla 5.2 presenta los valores encontrados de los límites de Atterberg. Estos se muestran en

forma gráfica en la Figura 5.2 que muestra la carta de plasticidad propuesta por Atterberg. Se observa que la mayoría de las muestras presenta alta plasticidad ya que presentaron Límites Líquidos mayores a 50%. Adicionalmente se observa que la mayoría de las muestras cayó en la zona de la carta por encima de la línea A correspondiendo a suelos CH. Los valores más altos de plasticidad fueron de las muestras CM-1-07, T 2-6 ft y T 6-8 ft con límites líquidos por encima de 130%.

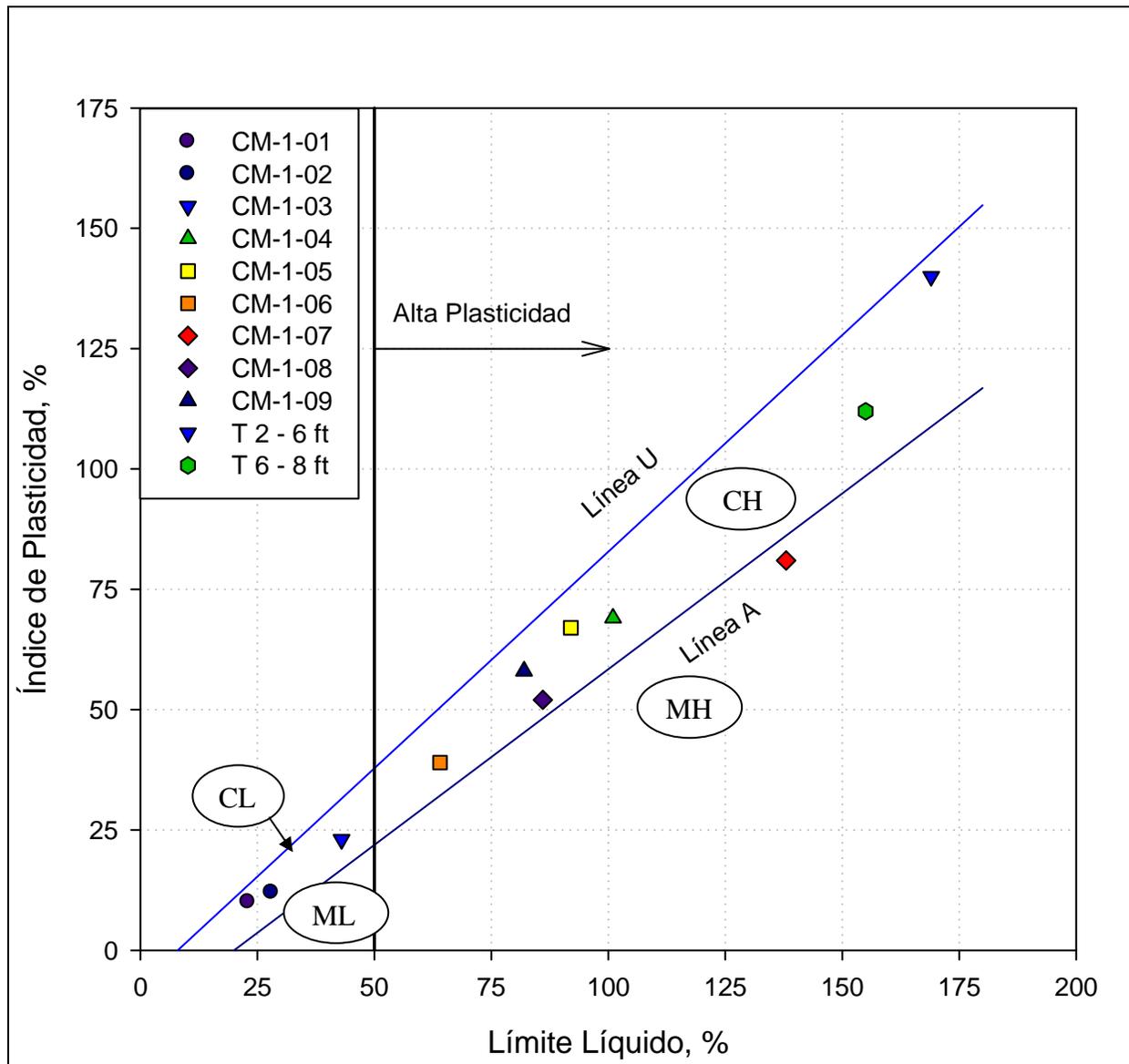


Figura 5.2. Carta de plasticidad.

El hecho de que estos suelos presenten altos contenidos de arcilla sumado a tener altos valores de límite líquido ( $LL > 50\%$ ) e índice de plasticidad ( $PI > 25\%$ ) hacen que estos suelos tengan un potencial altamente expansivos.

#### 5.2.4. Resumen de clasificación.

**Tabla 5.3. Muestras escogidas para investigación.**

<i>Muestra</i>	<i>Fuente</i>	<i>Cata</i>	<i>Profundidad pies</i>	<i>Tipo de Muestra<sup>(1)</sup></i>
CM-1-04	Estudio geotécnico, Jiménez (2005)	Confidencial	6 - 8	Shelby
CM-1-05	Estudio geotécnico, Jiménez (2005)	Confidencial	10 - 12	Shelby
CM-1-07	Estudio geotécnico, Jiménez (2005)	Confidencial	16 - 18	Shelby
CM-1-08	Estudio geotécnico, Jiménez (2005)	Confidencial	18 - 20	Shelby
CM-1-09	Estudio geotécnico, Jiménez (2005)	Confidencial	27 - 29	Shelby
T 2-6 ft	Trinchera para tesis	Trincheras 1 y 2	2 - 6	Shelby y Alterado
T 6-8 ft	Trinchera para tesis	Trincheras 1 y 2	6 - 8	Shelby y Alterado

La mayoría de las muestras presentaron altos porcentajes de arcilla y altos límites de Atterberg. De las muestras extraídas, se escogieron para este estudio detallado aquellas con un alto índice de plasticidad. Un total de siete muestras fueron escogidas para mayores análisis, cinco (5) obtenidas del estudio privado (Jiménez, 2005) y dos (2) de las trincheras exploratorias. Las muestras escogidas se listan en la Tabla 5.3. Las siete muestras escogidas tienen más de 75% de partículas finas ( $<$  tamiz no. 200) de los cuales seis de las siete tienen más del 50% de fracción de arcillas. A base de los valores de los límites de Atterberg, las muestras potencialmente más críticas, en términos de ser posiblemente de alto potencial expansivo, son la CM-1-07 con  $LL = 138\%$  y  $PI = 81\%$ , la T 6-8 ft con  $LL = 155\%$  y  $PI = 112\%$  y la T 2-6 ft con  $LL = 169\%$  y  $PI = 140\%$ .

---

### 5.3. Compactación

A pesar que el enfoque principal de esta investigación no considera estudiar el potencial expansivo de suelos compactados, se decidió incluir una evaluación sobre los mismos. El propósito fue comparar el comportamiento expansivo de muestras compactadas por encima y por debajo de la humedad óptima y a su vez comparar su comportamiento con el de muestras inalteradas provenientes de tubos Shelby. Para esto fue necesario realizar la prueba de compactación. Para esta evaluación preliminar sólo se consideró suelos compactados con una energía de compactación equivalente al ensayo Proctor Modificado de la norma ASTM D 1557 (ASTM, 2002c). Según esta norma la energía específica de compactación es 56,000 pies-libras/pies<sup>3</sup>. Como el propósito es evaluar el potencial expansivo de las muestras compactadas, se utilizó el molde del ensayo *Potential Volume Change* conocido por sus siglas en inglés como ensayo PVC el cual fue descrito en el Capítulo 4.

El ensayo PVC utiliza un molde parecido al del ensayo de consolidación, es decir una anilla rígida que en esta tesis tenía un diámetro de 2.5 pulgadas y una altura de muestra de 0.75 pulgadas. Estas dimensiones corresponden a un volumen de 0.00213 pies<sup>3</sup>. Para este volumen de muestra y para la energía específica de compactación del ensayo Proctor Modificado había que compactar las muestras con una energía de 119.84 pies-libras. Esta energía se aplicó a las muestras compactando la muestra en tres capas con 7, 7 y 8 golpes de un martillo Proctor estándar de 5.5 libras y con una caída libre de 12 pulgadas. Aplicando este procedimiento de compactación resulta en una energía de 121 pies-libra que es levemente mayor (1%) a la energía especificada por el Proctor Modificado. El estudio de compactación de esta tesis involucró solamente el suelo de la muestra T 2-6 ft. Principalmente por ser este el suelo con mayores límites de Atterberg y por ende considerarse con alto potencial de expansión.

La curva de compactación obtenida para el suelo T 2-6 ft, se presenta en la Figura 5.3. Esta curva muestra un peso unitario seco máximo de 102.3 lb/ft<sup>3</sup> correspondiente a una humedad óptima de 19%. En esta figura también se muestra la línea de cero vanos de aire o condición de saturación.

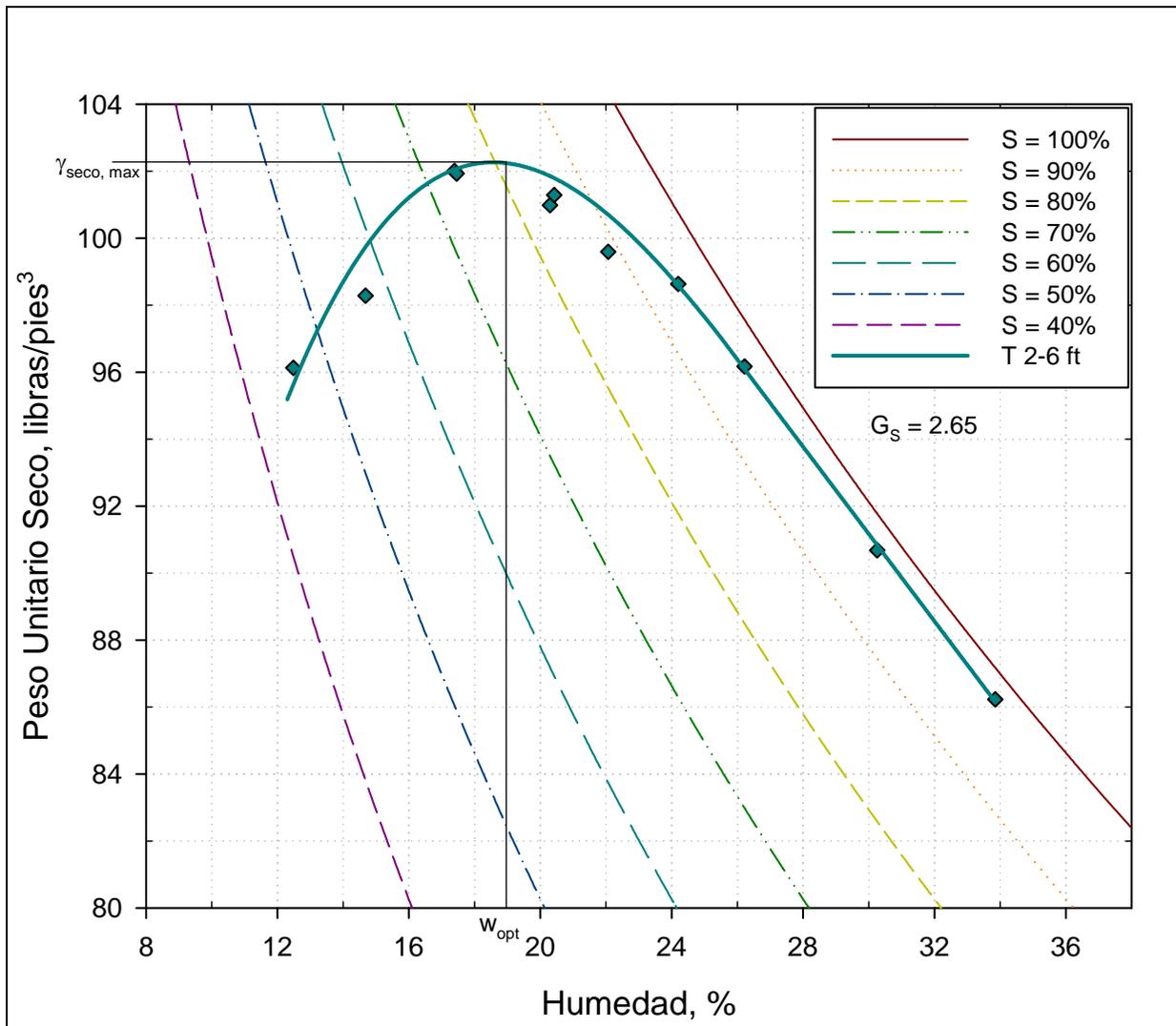


Figura 5.3. Compactación. Muestra T 2-6 ft según energía de Proctor modificado.

Los resultados de PVC para muestras compactadas se presentan más adelante en este capítulo. Se estudiaron tres condiciones: arcilla compactada a una humedad por debajo de la humedad óptima (condición seca); muestra compactada a su humedad natural (por encima de la

humedad óptima); y muestra compactadas a una humedad por encima de la humedad óptima (condición húmeda).

## 5.4. Propiedades mineralógicas del suelo

Como se mencionó en el Capítulo 2, el potencial expansivo está íntimamente ligado a la mineralogía de la muestra. Esta sección presenta los resultados de las pruebas listadas en la Tabla 5.4. Las siguientes sub-secciones presentan los resultados de pH, área superficial, capacidad de intercambio catiónico, difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, espectroscopia de infrarrojo, y análisis por diferencia termal.

Tabla 5.4. Ensayos de propiedades mineralógicas.

<i>Ensayo</i>	<i>Fracción de Suelo Ensayada</i>	<i>Comentarios</i>
pH	Suelos pasando por el Tamiz No. 10	Procedimiento (Capítulo 3)
Área Superficial	Fracción de arcillas	Método EGME (Capítulo 3)
Capacidad de Intercambio Catiónico	Se ensayaron dos casos: suelo sin separar y fracción de arcilla	CIC de K, Mg, Na, Ca y total
Difracción de Rayos X	La parte cualitativa se realizó con la fracción de arcillas. La parte cuantitativa se realizó con suelo pasado por el Tamiz No. 100	El ensayo cualitativo se realizó en UPRM. Ensayo cuantitativos fue realizado por Evans Analytical Group.
Fluorescencia de Rayos X	Se realizó con material pasado por el Tamiz No. 100	Ensayo fue realizado por Evans Analytical Group.
Espectroscopia de Infrarrojo	Fracción de arcillas	El ensayo se realizó en UPRM.
Análisis por Diferencia Termal	Fracción de arcillas	El ensayo se realizó en UPRM.

### 5.4.1. Resultados de pH

Siguiendo el procedimiento descrito en el Capítulo 3 se midió el pH para las muestras seleccionadas para estudio detallado y que fueron listadas en la Tabla 5.3. Los valores de pH encontrados se presentan en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Resultados del pH.

Muestra	Profundidad pies	Atterberg		pH (proporción1:2)
		LL, %	PI, %	
CM-1-04	6 – 8	101	69	5.28
CM-1-05	10 – 12	92	67	4.36
CM-1-07	16 – 18	138	81	6.46
CM-1-08	18 – 20	86	52	7.75
CM-1-09	27 – 29	82	58	9.57
T-2-6 ft	2 – 6	169	140	5.49
T 6-8 ft	6 – 8	155	112	7.51

Los valores de pH variaron entre 4.36 a 9.57 con un valor promedio de 6.97. Las muestras que resultaron ser más alcalinas son la CM-1-08 y la CM-1-09 con valores de pH de 7.75 y 9.57, respectivamente. Los suelos restantes resultaron ser ácidos, siendo la muestra más ácida la CM-1-05 con un pH de 4.36. Dado que hay suelos con índice de plasticidad alto con valores de pH alcalinos y ácidos no existe una tendencia o relación evidente entre ambas propiedades.

### 5.4.2. Resultados de área superficial

Los resultados de área superficial se presentan a la Tabla 5.6. Las tres muestras con mayor área superficial fueron las CM-1-07, T 2-6 ft, T 6-8 ft con áreas superficiales de 446.4, 456.2 y 464.8 m<sup>2</sup>/g, respectivamente. Estas tres muestras son las mismas que presentan la mayor plasticidad, con los valores más altos de límites líquido e índice de plasticidad. La correlación

entre el área superficial y los límites de Atterberg se evalúa gráficamente en las Figuras 5.5a y b. Se observa que la tendencia no es tan eficiente para las muestras menos plásticas. Valores típicos de área superficial para distintos minerales de arcillas fueron presentados en la Tabla 2.2 del Capítulo 2 para la condición de mineral puro. Por ejemplo, las vermiculitas tienen valores de área superficial entre 300 y 500 m<sup>2</sup>/g mientras que las esmectitas tienen valores entre 600 y 800 m<sup>2</sup>/g. Los valores de área superficial de la Tabla 5.6 corresponden a los rangos reportados para minerales de arcilla como la vermiculita. Sin embargo, estos rangos están definidos para minerales puros. En este caso, las muestras son heterogéneas y por lo tanto están compuestas por diferentes minerales y este valor representa un promedio del área superficial de los minerales presentes. Por tal razón, existe la posibilidad de la presencia de esmectita.

Tabla 5.6. Área superficial de las arcillas.

<i>Muestra</i>	<i>Atterberg</i>		<i>Área Superficial, m<sup>2</sup>/g</i>		
	<i>LL, %</i>	<i>PI, %</i>	<i>Prueba 1</i>	<i>Prueba 2</i>	<i>Promedio</i>
CM-1-04	101	69	144.42	210.28	177.35
CM-1-05	92	67	263.31	237.43	250.37
CM-1-07	138	81	489.32	403.51	446.42
CM-1-08	86	52	404.95	435.56	420.26
CM-1-09	82	58	372.16	328.69	350.43
T-2-6 ft	169	140	403.29	509.04	456.17
T 6-8 ft	155	112	485.16	444.49	464.83

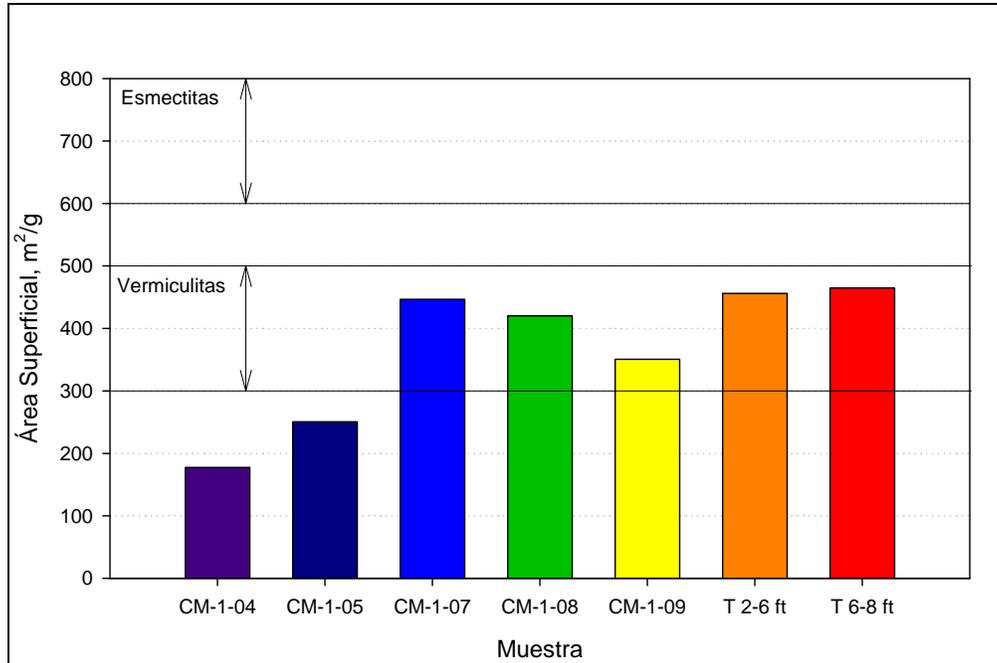


Figura 5.4. Área superficial por el método del EGME.

La Figura 5.5 muestra la relación existente entre los límites de Atterberg y el área superficial de las muestras. Aunque las gráficas no presentan un patrón o tendencia definida, las muestras con límite líquido mayores de 130% son susceptibles a tener valores de área superficial altos.

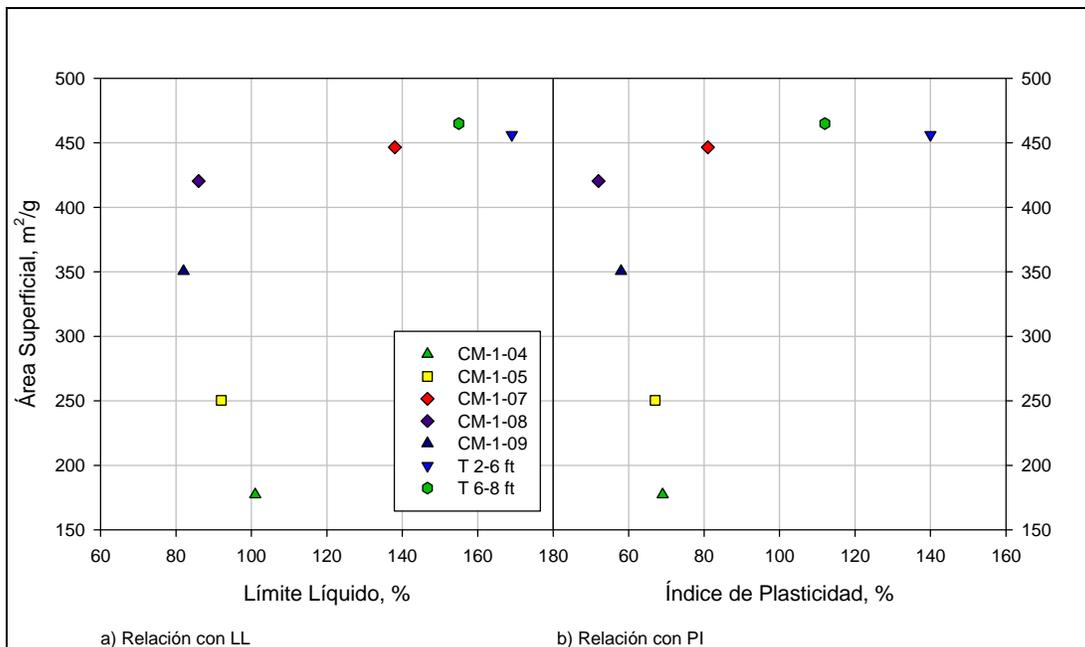


Figura 5.5. Relación entre límites de Atterberg obtenidos y área superficial.

### 5.4.3. Resultados de capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se determinó por el método de absorción atómica y se identificó la presencia de potasio ( $K^+$ ), magnesio ( $Mg^{+2}$ ), sodio ( $Na^+$ ) y calcio ( $Ca^{+2}$ ). La CIC se evaluó para las muestras sin separar y para muestras donde se ensayó solo la fracción de arcilla. Las Tablas 5.7 y 5.8 resumen los valores de CIC individual y total para muestras sin separar y muestras separadas de arcilla. Se puede observar que estos valores de las arcillas fueron considerablemente mayores a los obtenidos en las muestras sin separar y que incluye fracciones de limos y arenas. A pesar de que las arcillas fueron saturadas con magnesio, algunas de ellas resultaron con altas cantidades de calcio. Estos valores de calcio son muy altos para ser originados por CIC y posiblemente provienen de la disolución de carbonatos. Las muestras donde ocurrió esto son la CM-1-08 y la CM-1-09. Estas dos muestras son las que presentaron valores más altos de pH. De igual forma, tomando en cuenta el área superficial y la CIC de las muestras T 2-6 ft y T 6-8 ft, colocan estas muestras en suelos con concentraciones significativas de esmectita y vermiculita.

Tabla 5.7. Resultados de capacidad de intercambio catiónico para el suelo.

Muestra	Atterberg		Capacidad de Intercambio Catiónico, cmol/kg				
	LL, %	PI, %	K	Mg	Na	Ca	Total
CM-1-04	101	69	0.37	2.88	0.58	2.53	6.36
CM-1-05	92	67	0.33	2.24	1.76	11.02	15.35
CM-1-07	138	81	1.03	8.22	5.27	37.40	51.93
CM-1-08	86	52	0.41	7.46	3.02	47.58	58.47
CM-1-09	82	58	0.44	3.72	8.91	34.49	47.56
T 2-6 ft	169	140	0.36	14.02	7.02	21.58	42.98
T 6-8 ft	155	112	0.56	17.94	10.03	38.11	66.63

Tabla 5.8. Resultados de CIC para la fracción de arcilla.

Muestra	Capacidad de Intercambio Catiónica, cmol <sub>c</sub> /kg				
	K	Mg	Na	Ca	Total
CM-1-04	3.41	22.49	4.39	1.48	31.77
CM-1-05	2.45	37.87	3.39	10.78	54.49
CM-1-07	3.94	58.17	3.94	16.17	82.22
CM-1-08	1.67	55.44	3.71	177.3	238.11
CM-1-09	1.37	44.57	3.48	209.1	258.51
T 2-6 ft	2.03	61.52	6.57	15.88	85.99
T 6-8 ft	0.75	79.35	8.73	9.36	98.18

La Figura 5.6 presenta la relación que hay entre la CIC de Mg<sup>+2</sup> y el área superficial. La saturación de las muestras con magnesio permite apreciar la tendencia donde la CIC del magnesio es directamente proporcional al área superficial.

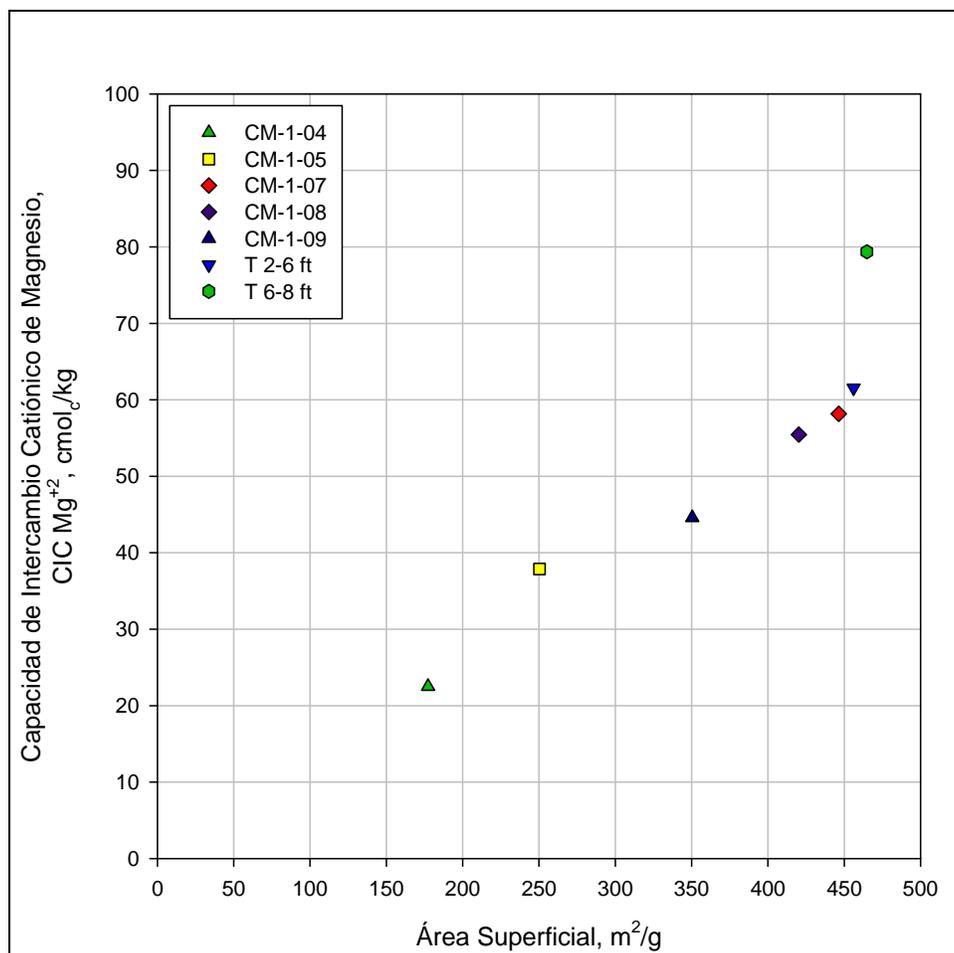


Figura 5.6. Relación entre CIC Mg<sup>+2</sup> y área superficial.

Investigaciones anteriores como Pearing (1963), Holt (1969), McKeen y Hamberg (1981) y Hamberg (1985) han propuesto correlaciones entre el parámetro  $CIA_c$  (Actividad de Intercambio Catiónico) y la actividad de los suelos. El parámetro  $CIA_c$  se define como la CIC total de arcillas normalizada por el porcentaje de arcilla presente en el suelo. La actividad de la arcilla se define como el coeficiente entre el índice de plasticidad y el porcentaje de la fracción de arcilla presente en el suelo. Los valores de este parámetro  $CIA_c$  se presenta en la Tabla 5.9 calculados usando valores de CIC totales para toda la muestra y para sólo la fracción de arcilla. La Figura 5.7 presenta los resultados de las muestras dentro de la gráfica adaptada de Hamberg. La Tabla 5.10 resume la mineralogía de cada región.

Tabla 5.9. Valores del parámetro de actividad de intercambio catiónico

Muestra	Porcentaje de Arcilla	Actividad	CIC Total		$CIA_c$	
			Suelo	Arcilla	Suelo	Arcilla
CM-1-04	66.43	1.04	6.36	31.77	0.10	0.48
CM-1-05	51.32	1.31	15.35	54.49	0.30	1.06
CM-1-07	80.65	1.00	51.92	82.22	0.64	1.02
CM-1-08	65.93	0.79	58.47	238.11	0.89	3.61
CM-1-09	46.21	1.26	47.56	258.51	1.03	5.59
T-2-6 ft	71.42	1.96	42.98	85.99	0.60	1.20
T 6-8 ft	86.09	1.30	66.63	98.18	0.77	1.14

Los valores de actividad de intercambio catiónico ( $CIA_c$ ) pueden utilizarse para identificar la mineralogía del suelo usando la gráfica con grupos mineralógicos propuesta por Pearing (1963) y Holt (1969) que se muestra en la Figura 5.7. En esta gráfica se muestran los valores de  $CIA_c$  de las siete muestras estudiadas en términos de sólo la fracción de arcilla. En esta figura se observa que todas las muestras caen en la región identificada por estos autores como correspondiente a montmorilonita. Hamberg (1985) extendió esta carta de clasificación

mineralógica y dividió la gráfica en cinco regiones. La Figura 5.7 muestra las regiones de Hamberg (1985) y la ubicación de las muestras de este estudio. La composición mineralógica se estima usando la Tabla 5.10. La muestra CM-1-04 es la única muestra fuera de la Región No. 1. Las muestras en la Región No. 1 corresponden a por lo menos 50% de esmectita lo cual concuerda con lo encontrado en la Figura 5.6 donde se había identificado como montmorilonita. La muestra CM-1-04 cae en la Región 5 que según Hamberg (1985) tiene entre 10% y 50% de caolinita y no más de 25% de ilita y trazos de esmectita y vermiculita.

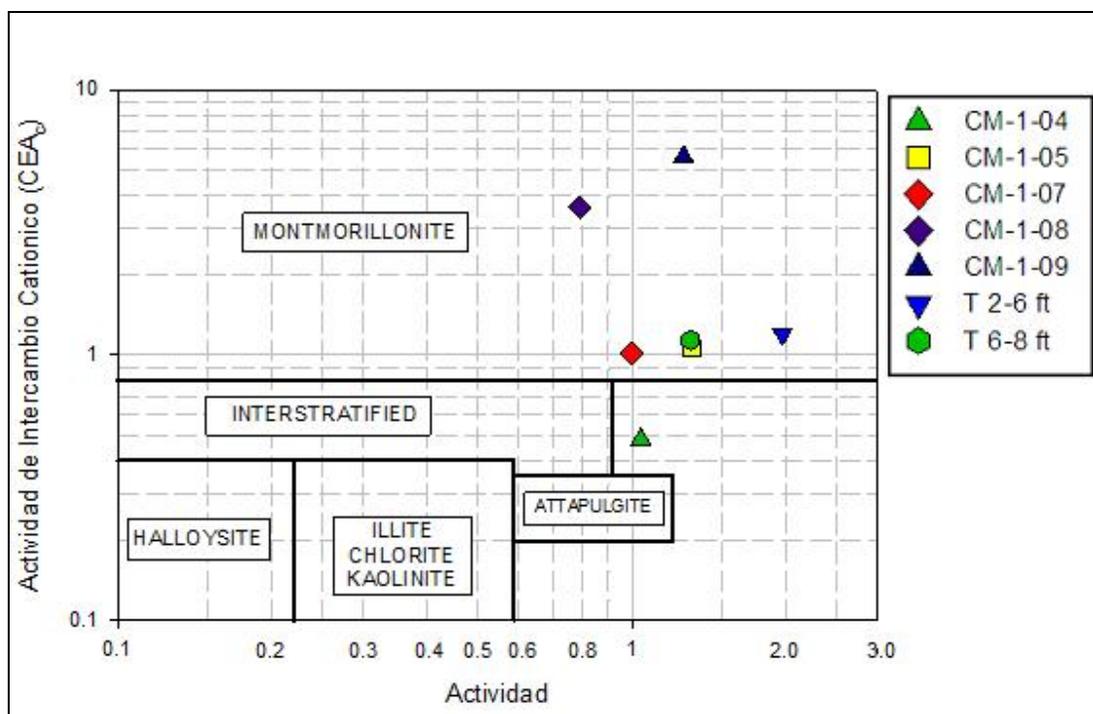


Figura 5.7. Composición mineralógica a base de intercambio catiónico activo vs actividad .

Tabla 5.10. Composición de las regiones mineralógicas. Gráfica  $CIA_c$  vs  $A_c$ . Adaptado de Hamberg, 1985.

Región	Porcentaje de fracción de arcilla			
	Esmectita	Ilita	Caolinita	Vermiculita
1	> 50	Ninguna	Ninguna	Ninguna
2	> 50	tr <sup>a</sup> - 25	tr - 25	Ninguna
3	5 - 50	5 - 25	Ninguna	Ninguna
4	tr - 25	Ninguna	10 - 50	25 - 50
5	tr	tr - 25	10 - 50	tr

<sup>a</sup>tr, trazo < 5 %.

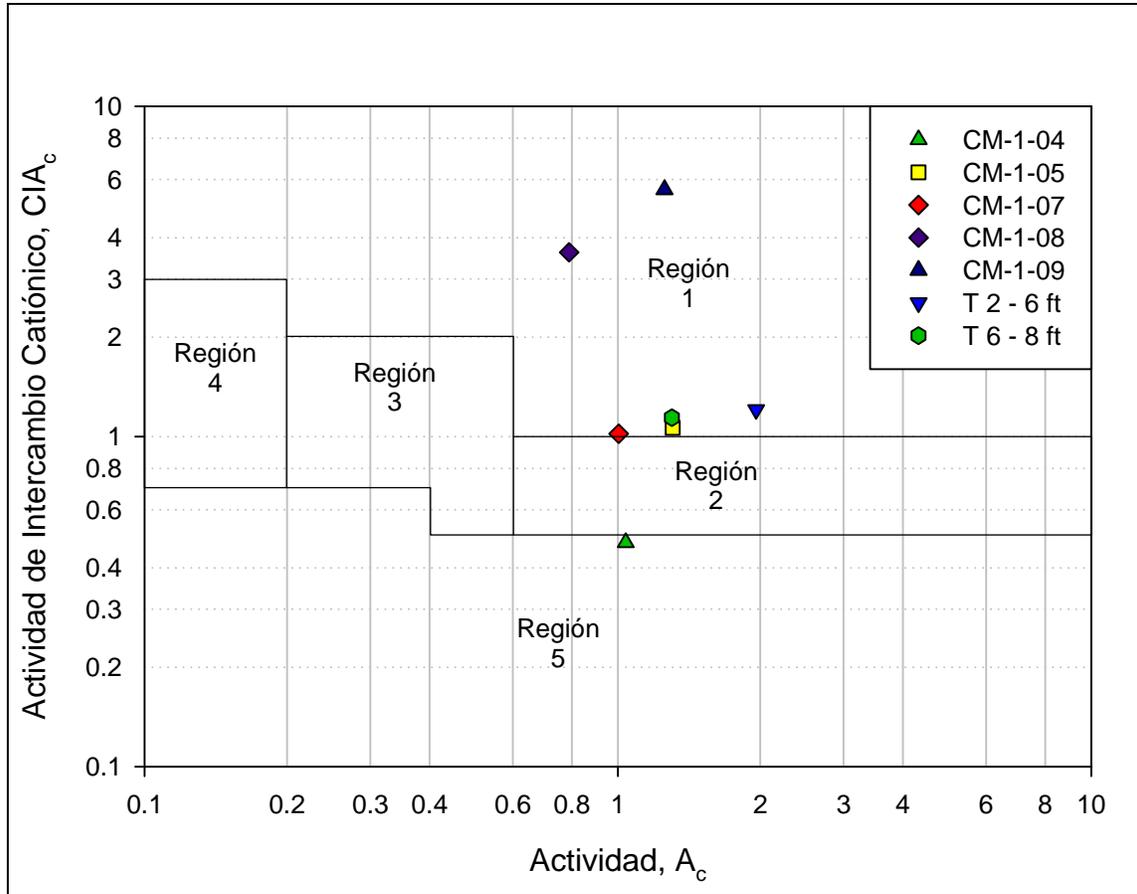


Figura 5.8. Cationes de intercambio activos vs actividad. Adaptado de Hamberg, 1985

#### 5.4.4. Resultados de difracción de rayos X

La difracción de rayos X (XRD) se llevó a cabo de manera cualitativa para las siete muestras escogidas de suelo y de forma cuantitativa para solo cuatro de estas muestras. Los análisis cualitativos para las siete muestras fueron realizados en el Departamento de Geología de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez, mientras que los análisis cuantitativos de las cuatro muestras fueron contratados al laboratorio *Evans Analytical Group*. Las muestras que fueron sometidas al análisis cualitativo eran muestras de arcillas saturadas con magnesio. En cambio, las muestras que fueron analizadas por el método cuantitativo fueron sacadas directamente del tubo Shelby, secadas al horno y tamizadas por el tamiz no. 100.

---

La Tabla 5.11 resume los resultados obtenidos del análisis cuantitativo. Más detalles sobre los ensayos cuantitativos realizados por *Evans Analytical Group*, se presentan en el Apéndice B. De esta tabla y la Figura 5.7 se observa que las muestras CM-1-07, T 2-6 ft y T 6-8 ft tienen principalmente montmorilonita con porcentos por peso de la fracción cristalina de 67.8, 63.6 62.2%, respectivamente. Estas tres muestras presentan también caolinita pero en porcentaje entre el 8.7 y 16.9% calculado en términos del peso de la fracción cristalina. La muestra CM-1-05 por otro lado presenta porcentajes similares de montmorilonita (29.3%) y de caolinita (27.9%). Estos porcentajes se asemejan a las características de un suelo en la Región No. 2 propuesta por Hamberg (1985). En la Figura 5.8 la muestra CM-1-05 cayó bastante cerca con esta región. Sin embargo, las otras muestras también cayeron cerca de la frontera con la Región 2 pero no dieron tanta caolinita. De los XRD cuantitativos concluimos que tres de las cuatro muestras analizadas, el mineral principal presente en la fase cristalina es la montmorilonita. Solo la muestra CM-1-05 resultó tener mayor concentración de cuarzo.

**Tabla 5.11. Resultados XRD cuantitativo. CM-1-05, CM-1-07, T 2-6 ft y T 6-8 ft.**

<i>Muestra</i>	<i>% Cristalinidad</i>	<i>Fase Cristalina</i>	<i>% Peso aproximado de la Fracción Cristalina</i>	<i>% Peso aproximado Total</i>
CM-1-05	53	Montmorilonita	29.3	15.53
		Caolinita	27.9	14.8
		Cuarzo	41.5	22.0
		Goetita	1.2	0.64
CM-1-07	30	Montmorilonita	67.8	20.34
		Caolinita	8.7	2.61
		Cuarzo	20.0	6.00
		Goetita	3.5	1.05
T-2-6ft	40	Montmorilonita	63.6	25.44
		Caolinita	16.9	6.76
		Cuarzo	19.0	7.6
		Goetita	0.4	0.16
T-6-8ft	25	Montmorilonita	62.2	15.55
		Caolinita	10.0	2.5
		Cuarzo	21.5	5.38
		Goetita	6.3	1.57

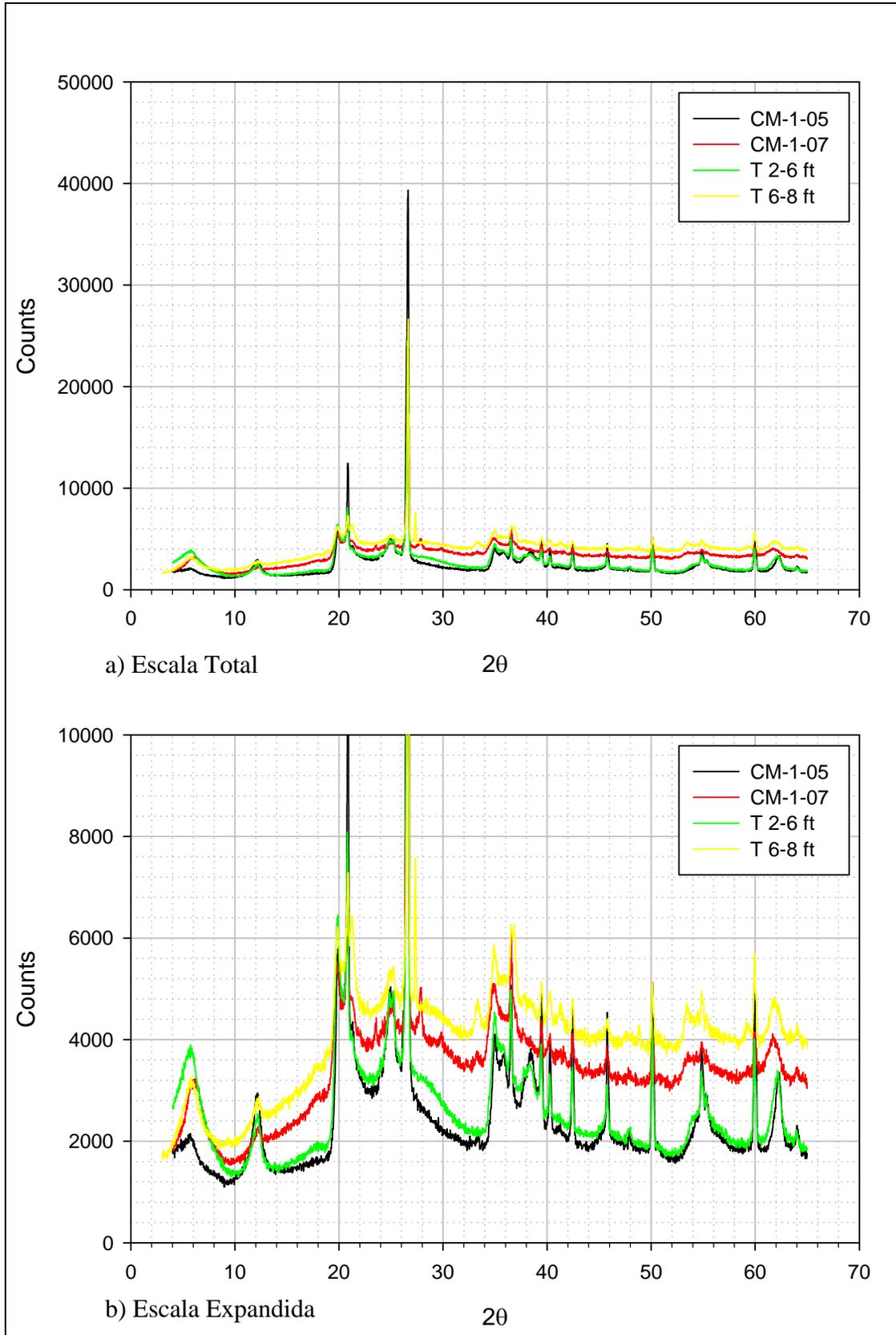


Figura 5.9. Resultados de XRD cuantitativo. Muestras CM-1-05, CM-1-07, T 2-6 ft y T 6-8 ft.

---

Los resultados de XRD cualitativo para las cuatro muestras analizadas por el método cuantitativo mostrados en la Figura 5.9 tienen algo de similitud en los picos de cada una de ellas. Por ejemplo el patrón de las muestras CM-1-05 y T 2-6 ft son muy similares y de igual forma para las muestras CM-1-07 y T 6-8 ft. La muestra CM-1-05 se distingue por su alta concentración de caolinita y cuarzo (picos en los ángulos  $12^\circ$ ,  $21^\circ$  y  $26^\circ$ ) y baja concentración de minerales 2:1 (pico en el ángulo  $6^\circ$ ) en comparación con las otras muestras. Por el contrario la muestra T 2-6 ft resulta con un pico mejor definido y más elevado en el ángulo  $6^\circ$ .

Los análisis cualitativos de XRD se muestran en las Figura 5.10 a la 5.17. Se puede apreciar en estas figuras similitudes y diferencias entre las muestras. La muestra CM-1-04 presenta poca intensidad en la región de los  $6^\circ$  lo que denota poca presencia de minerales 2:1 como la esmectita o vermiculita, pero tiene picos intensos de caolinita y cuarzo. Estos resultados coinciden con valores bajos de CIC y área superficial de esta muestra. La muestra CM-1-08 tiene cierta similitud con las muestras CM-1-07 y T 6-8 ft a partir del ángulo  $16^\circ$ , con alguna pequeña variación. Las similitudes están en los picos representativos de caolinita y cuarzo aunque aparenta tener poca caolinita. De igual manera presenta patrones con pequeños picos de calcita y cuarzo. La muestra CM-1-09 es la que mayor concentración de calcita y cuarzo tiene ya que los picos son mucho más marcados que en la muestra CM-1-08. Estos patrones se distinguen por los picos en los ángulos 21, 23, 26.6, 29.2, 36, 39.2, 43.2. Esto se refleja en los altos valores de  $\text{Ca}^{+2}$  observados durante la determinación de CIC,

En términos generales, los minerales más notables en todas las muestras son la caolinita y el cuarzo. No se puede descartar la presencia de minerales 2:1 como la esmectita y la vermiculita. La muestra CM-1-09 presenta los resultados más diferentes a todas las demás muestras ya que presenta un pico indicando presencia considerable de calcita. Esta muestra

presentó una alta concentración de cationes intercambiables de Ca y un pH alto que combinado con los patrones en los resultados de XRD son evidencia que probablemente sustenta la existencia de calcita. Para confirmar esto se tomó una pequeña porción del suelo de la muestra CM-1-09 y se le agregó varias gotas de ácido clorhídrico (HCl) para ver si la misma reaccionaba. Esto resultó en una efervescencia inmediata confirmando la presencia de calcita.

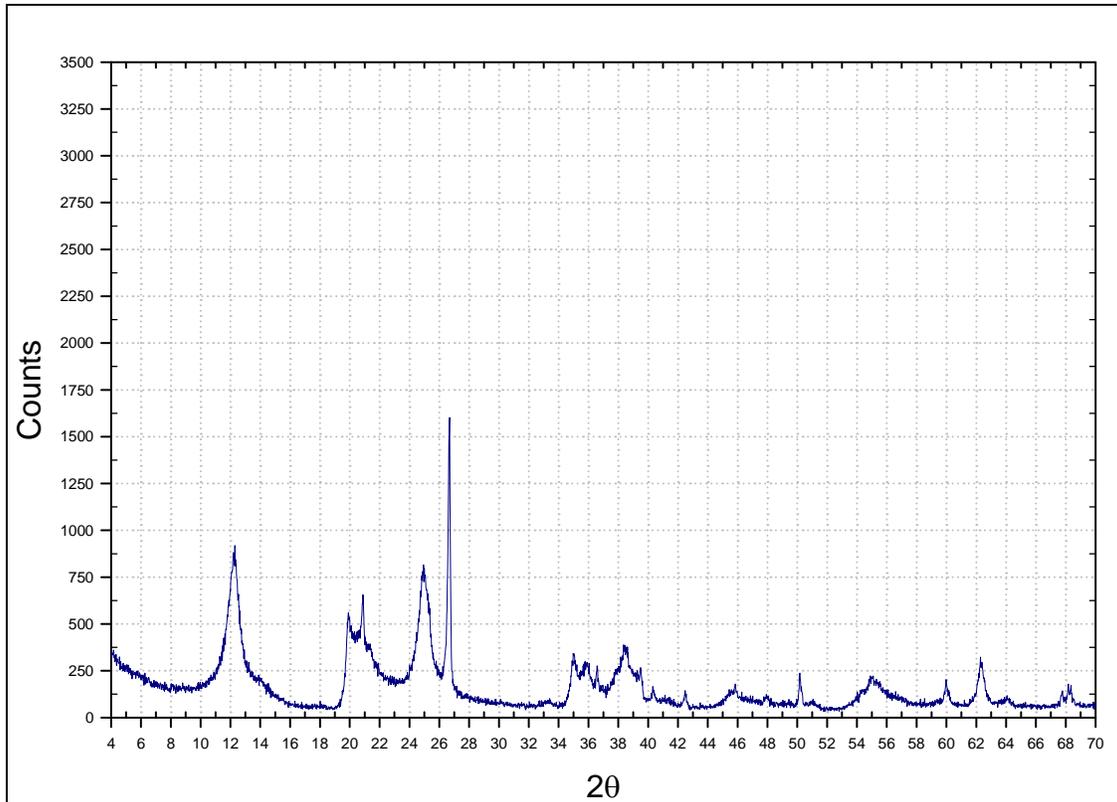


Figura 5.10. Resultado de XRD – Muestra CM-1-04.

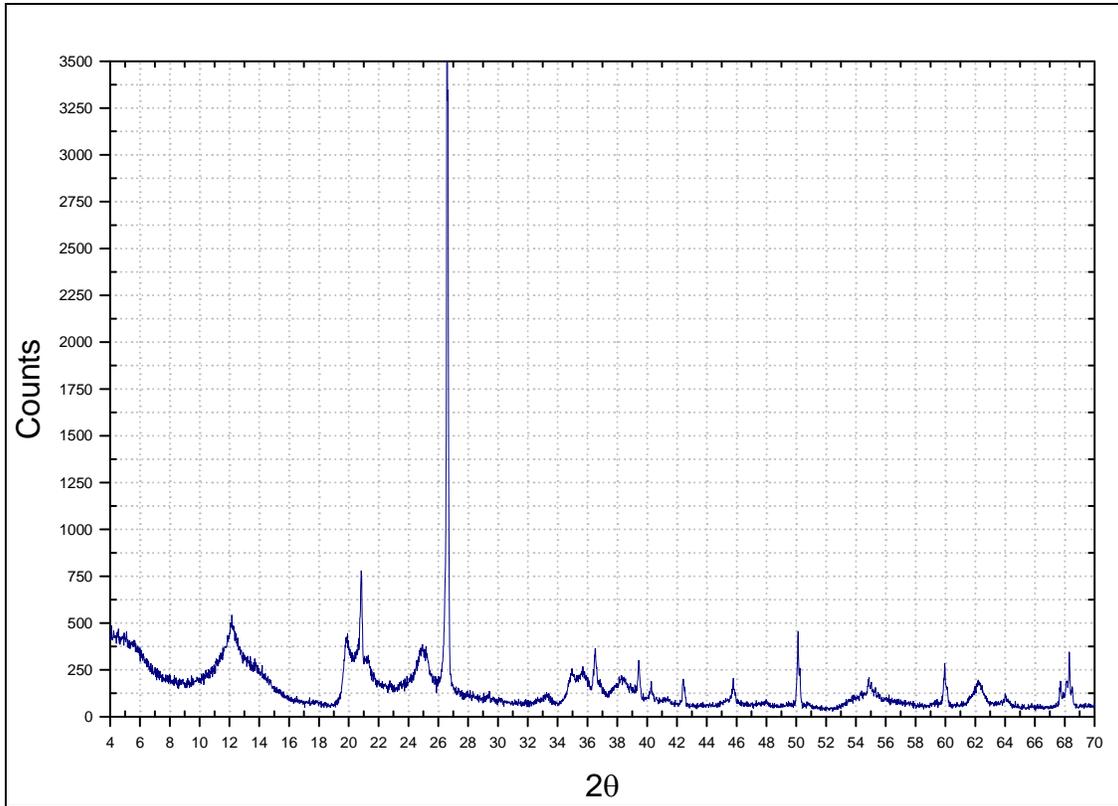


Figura 5.11. Resultado de XRD – Muestra CM-1-05.

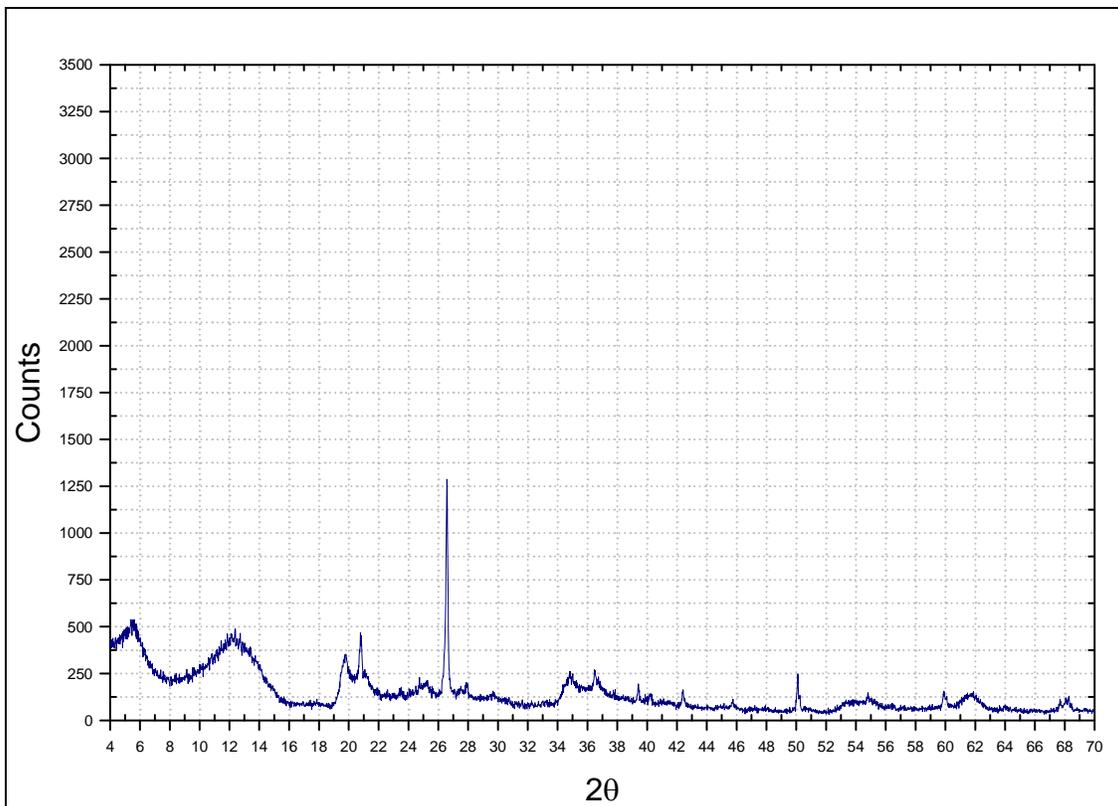


Figura 5.12. Resultado de XRD – Muestra CM-1-07.

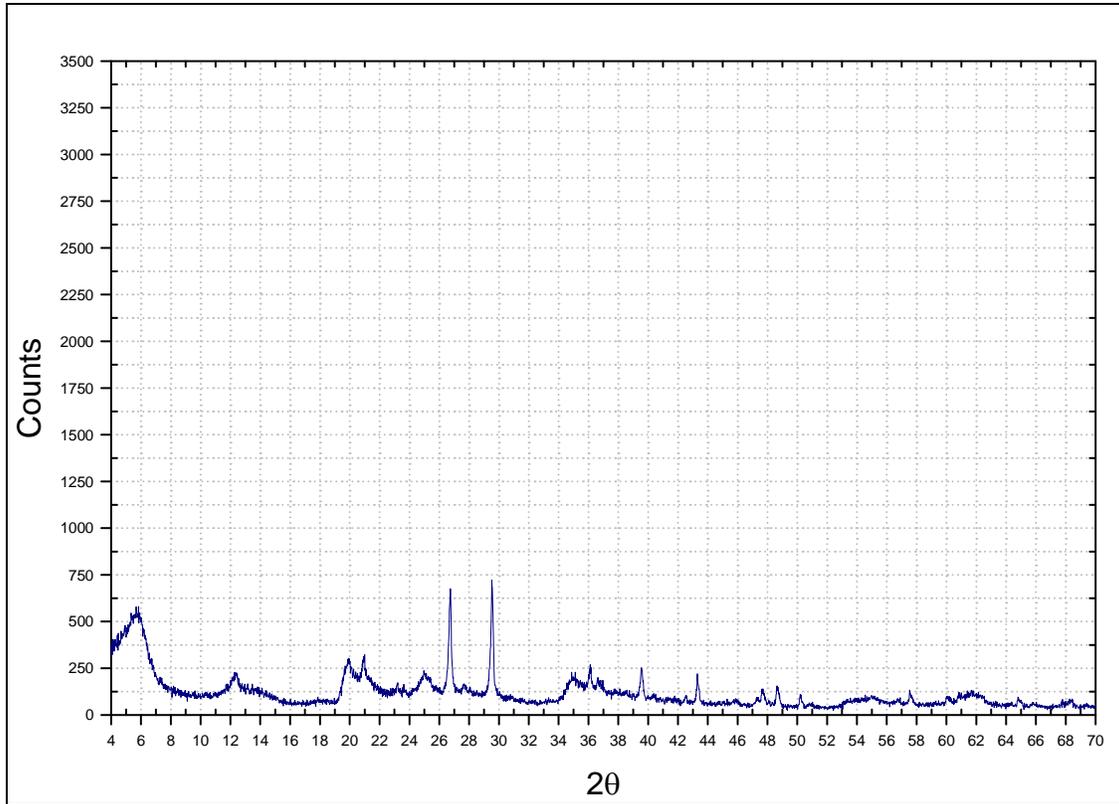


Figura 5.13. Resultado de XRD – Muestra CM-1-08.

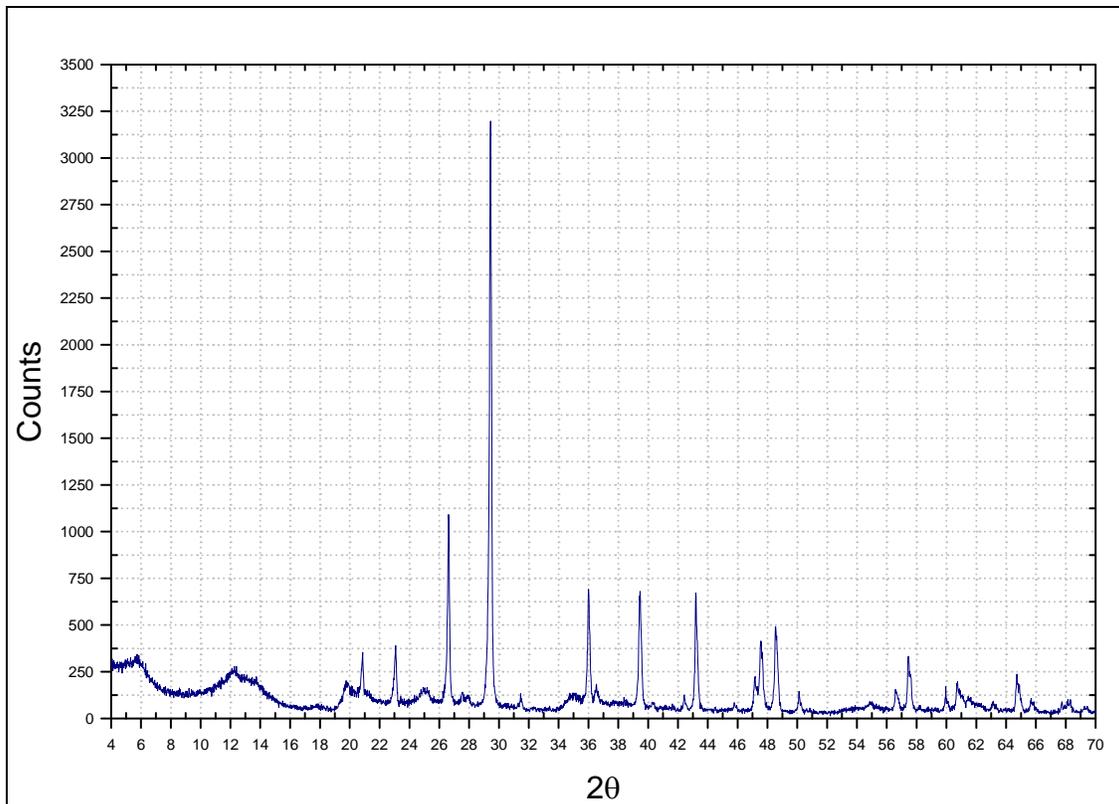


Figura 5.14. Resultado de XRD – Muestra CM-1-09.

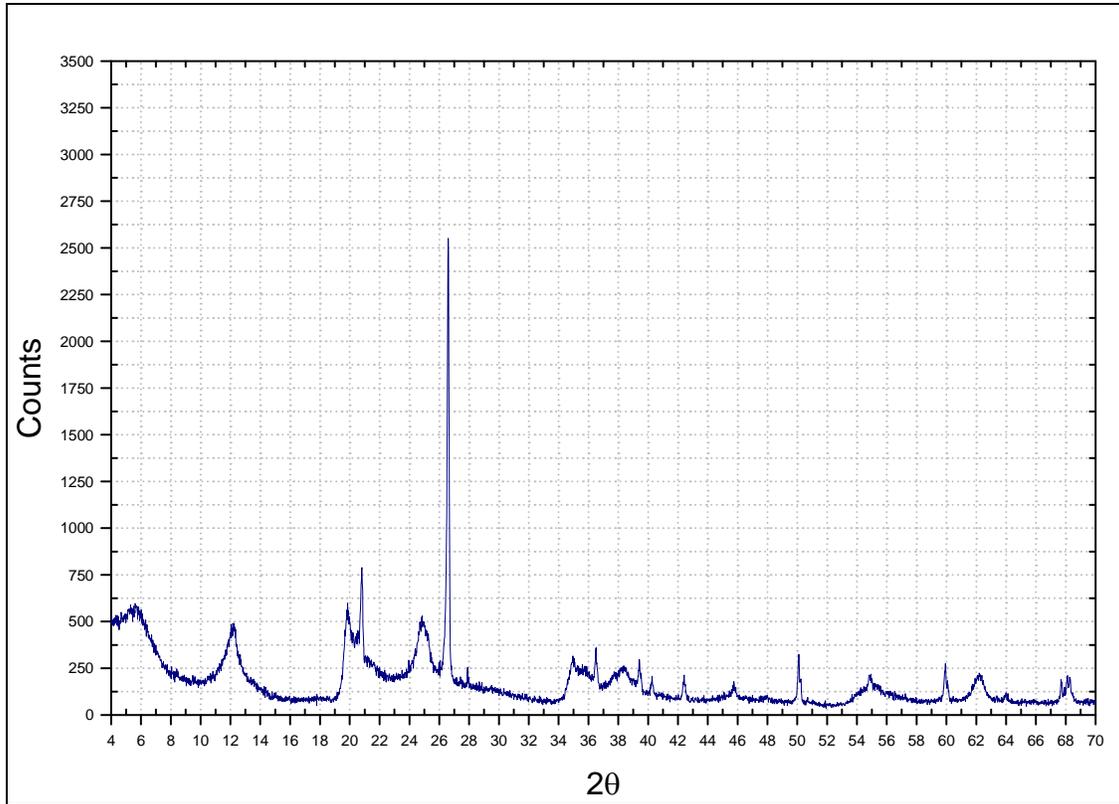


Figura 5.15. Resultado de XRD – Muestra T 2-6 ft.

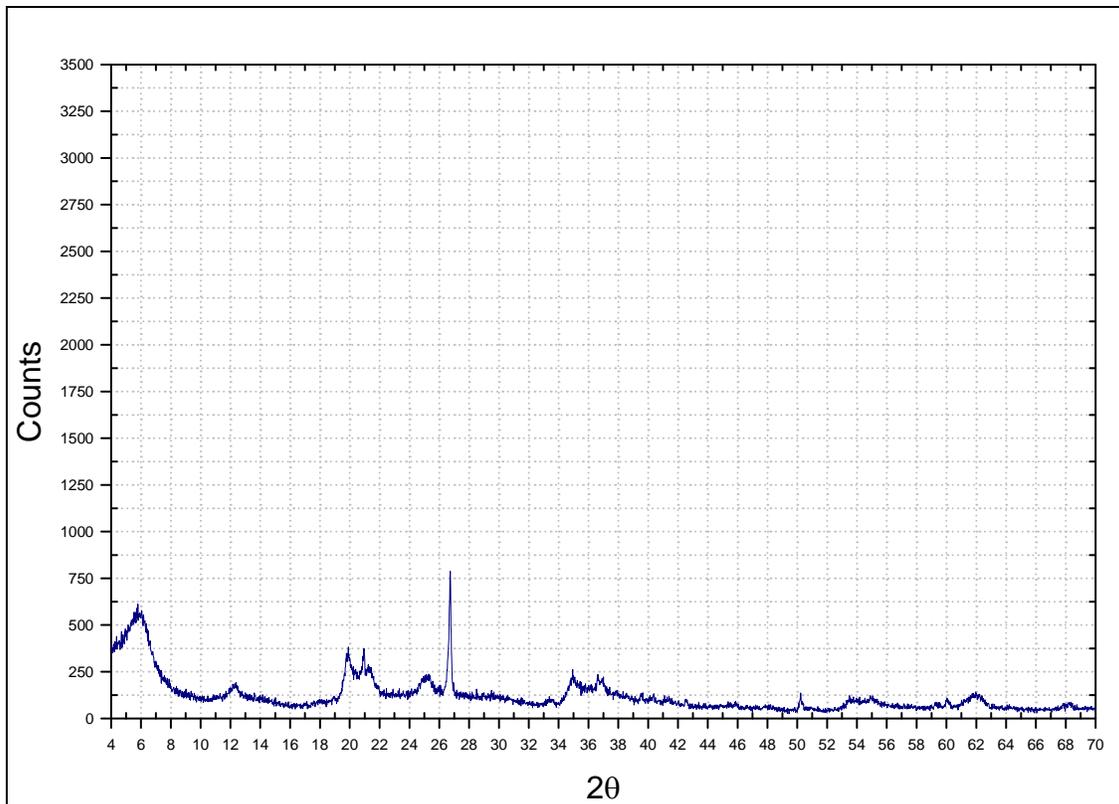


Figura 5.16. Resultado de XRD – Muestra T 6-8 ft.

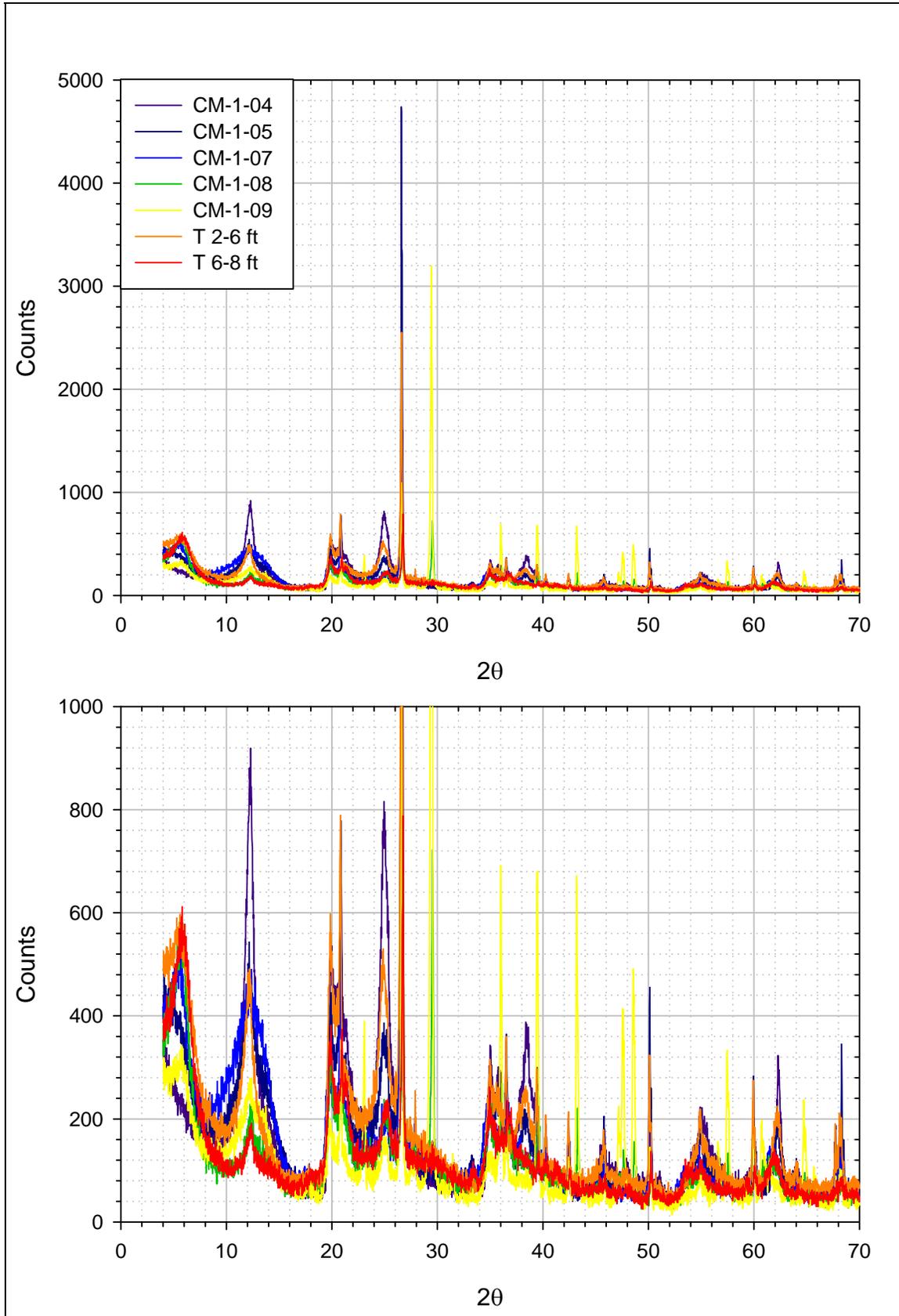


Figura 5.17. Resultados de XRD – Cualitativo. Todas la muestras.

### 5.4.5. Resultados de fluorescencia de rayos X

Ensayos de fluorescencia de rayos X (XRF) se realizaron a las mismas 4 muestras a las que se le hicieron XRD cuantitativos. Estos análisis fueron realizados por el laboratorio de *Evans Analytical Group*. Los ensayos de XRF permiten determinar los porcentajes de los distintos elementos en el suelo. La Tabla 5.12 resume los resultados obtenidos. Como se puede apreciar en dicha tabla, los componentes principales en las cuatro muestras son el silicio ( $\text{SiO}_2$ ), aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), azufre ( $\text{SO}_4$ ) y el hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Si se comparan las muestras utilizando estos elementos principales, nuevamente se marca la similitud entre las muestras CM-1-05 y T 2-6 ft y las muestras CM-1-07 y T 6-8 ft. Lamentablemente, esta prueba fue capaz de determinar los elementos cuyo número atómico es mayor de 13, por lo tanto no fue posible determinar la concentración de sodio en las muestras. La montmorilonita a base de sodio es una de las arcillas con el índice de plasticidad, actividad de arcillas, área superficial y potencial expansivo más altos (Nelson y Miller, 1999).

Tabla 5.12. Resultados de fluorescencia de rayos X.

Compuesto	CM-1-05	CM-1-07	T-2-6 ft	T-6-8 ft
$\text{Al}_2\text{O}_3$	9.51	6.68	8.16	7.52
$\text{SiO}_2$	74.64	68.53	75.51	64.69
$\text{SO}_4$	7.83	8.57	7.96	8.45
$\text{K}_2\text{O}$	0.28	1.04	0.50	0.59
$\text{CaO}$	0.38	0.90	0.60	0.63
$\text{TiO}_2$	1.87	1.92	2.17	2.16
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0.28	0.43	0.23	0.43
$\text{MnO}$	ND	ND	ND	1.32
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3.39	9.75	3.20	12.22
$\text{NiO}$	ND	ND	ND	0.06
$\text{CuO}$	0.11	0.09	0.08	0.09
$\text{ZnO}$	0.23	0.59	0.10	0.33
$\text{Y}_2\text{O}_3$	ND	0.02	ND	0.02

---

#### *5.4.6. Resultados del análisis por diferencia termal (DTA)*

Análisis de diferencia termal (DTA) se llevaron a cabo en UPRM analizando solo la fracción de arcillas. La Figura 5.18 presenta los resultados del DTA de las siete muestras principales. Para fines comparativos esta figura también incluye resultados de una mezcla de caolinita y bentonita en proporciones 1:1. La Figura 5.18 muestra que todas las muestras presentan principalmente dos picos endotérmicos (picos hacia abajo). El primer pico endotérmico que ocurre a temperaturas bajas entre 100 y 200 °C y es debido a la pérdida de agua adsorbida. Este pico con este rango de temperaturas, ocurre mayormente en minerales 2:1 como vermiculita, illita, esmectitas. Aunque también puede ocurrir en la haloisita y en minerales amorfos como el alofán. El segundo pico endotérmico ocurre entre 500 y 600 °C y es característico de la caolinita debido a un proceso de deshidroxilación. Nótese que la mezcla de bentonita:caolinita muestra este pico endotérmico a una temperatura cercana a 550 °C. Analizando los resultados por cada muestra individualmente, podemos ver otros comportamientos. La muestra CM-1-05 tiene un doble pico endotérmico en las temperaturas bajas. Este comportamiento parece ser debido a la pérdida de agua adsorbida de varios minerales tales como esmectitas, illita, y haloista. La muestra CM-1-08 presenta otro pico endotérmico cerca de los 775 °C, mientras que la muestra CM-1-09 tiene un pico endotérmico cercano a los 835 °C. Aunque no se encontró referencia que sugiera alguna identificación de estos picos, los resultados de las otras pruebas permiten la posibilidad de que sean referentes a calcita o dolomita. Las muestras CM-1-07, CM-1-08 y T 6-8 ft tienen un leve pico endotérmico cerca de los 300 °C. Este pico a esta temperatura podría representar la deshidroxilación de la gibsitita. Las muestras CM-1-05 y T 2-6 ft tienen un pequeño hombro exotérmico cerca de los 925 °C mientras que las muestras CM-1-07 y T 6-8 ft presentan este mismo pico desfasado a los 885 °C.

El primer pico representa la posible recristalización de minerales tales como montmorilonita, vermiculita e ilita. El segundo podría ser la formación de aluminatos de haloisita y alofán.

La interpretación de resultados de DTA requiere experiencia y no es cuantitativa. Basado en los resultados obtenidos podemos concluir que los resultados son similares a la muestra de referencia de una mezcla de caolinita y bentonita. Esto parece confirmar presencia de caolinita y montmorilonita. Sin embargo las proporciones de cada mineral es difícil de estimar con estos ensayos.

Adicional a DTA se hicieron ensayos de TGA. Estos resultados fueron similares a los obtenidos por el DTA. Los resultados de los análisis por TGA se presentan en el Apéndice C.

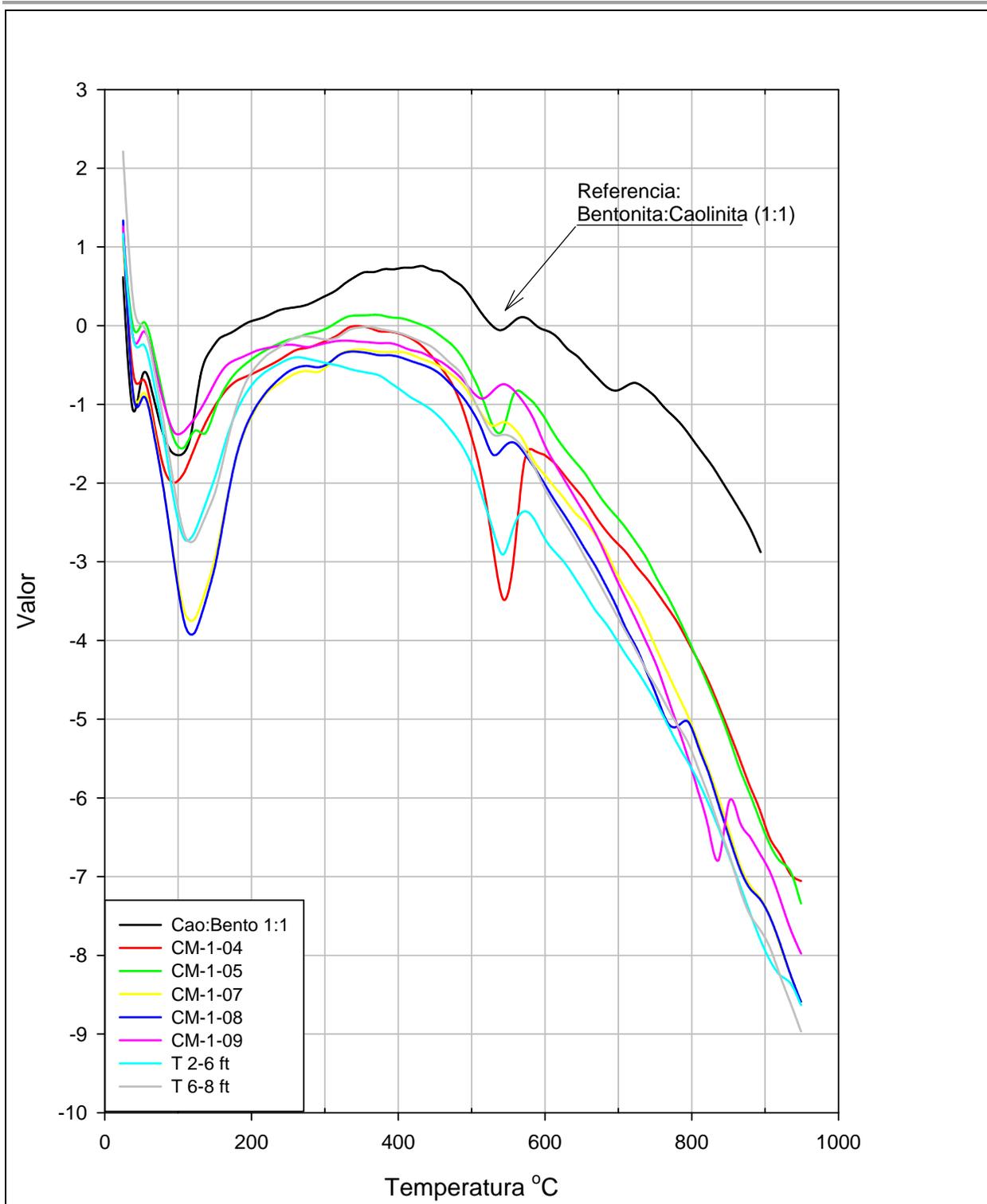


Figura 5.18. Resultados de análisis por diferencia termal de las muestras selectas.

---

#### *5.4.7. Resultados de espectroscopia de infrarrojo*

Las siete muestras de la Tabla 5.3 también se ensayaron mediante espectroscopia de infrarrojo (IRS). La espectroscopia de infrarrojo permite la identificación de los posibles minerales presentes en las muestras. Los resultados de IRS se presentan en las Figuras 5.19 a la 5.23. Estas gráficas presentan los resultados en términos de absorbancia versus el largo o número de onda. Cada muestra tiene picos característicos. Por ejemplo, los picos más característicos de la caolinita se encuentran entre números de onda de 3,700 a 3,600  $\text{cm}^{-1}$  y se atribuyen a vibraciones de grupos OH basales (hidroxilos libres). La caolinita también presenta un doble pico muy intenso entre números de onda de 1,038 y 1,012  $\text{cm}^{-1}$  debido a las vibraciones de los enlaces Si-O. Este doble pico se aprecia únicamente en las muestras CM-1-04 y CM-1-05. La montmorilonita por su parte tiene un pico bien definido cerca del número de onda de 3,620  $\text{cm}^{-1}$  correspondiente a las vibraciones de los grupos OH estructurales internos y un pico ancho poco definido que se extiende desde un número de onda de 3,600 a 3,200  $\text{cm}^{-1}$  siendo el punto más elevado típicamente cercano a 3,400  $\text{cm}^{-1}$ , también se puede apreciar un pico bien definido en el largo de onda 1,600  $\text{cm}^{-1}$  además de un pico muy intenso en el largo de onda 1,040  $\text{cm}^{-1}$  con un pequeño hombro en 1,100  $\text{cm}^{-1}$ . El cuarzo se puede identificar en los largo de onda de 1,172  $\text{cm}^{-1}$  como un pequeño hombro. El cuarzo además tiene tres pequeños picos característicos en 800, 780 y 697  $\text{cm}^{-1}$ . La presencia de calcita se confirma con la presencia de un pico ancho pero bien definido alrededor de 1,435  $\text{cm}^{-1}$ . En la muestra CM-1-09 también se observa un pico delgado y bien definido alrededor de 877  $\text{cm}^{-1}$ . Este pico también se observa en la muestra CM-1-08, pero de menor intensidad. La composición mineralógica se determina entonces comparando los resultados de IRS con la respuesta típica de minerales conocidos como montmorilonita y caolinita.

Todas las muestras con excepción de la CM-1-04 presentan estos picos característicos de la montmorilonita. Las más definidas son las CM-1-07, CM-1-08 y CM-1-09. Picos parecidos a la caolinita se aprecian en las muestras CM-1-04 y CM-1-05. Presencia de cuarzo se infiere por los picos observados en los IRS de las muestras CM-1-04, CM-1-05 y CM-1-07. Los resultados de las muestras CM-1-08 y CM-1-09 parecen indicar presencia de calcita. Esto parece ser más marcado en la muestra CM-1-09.

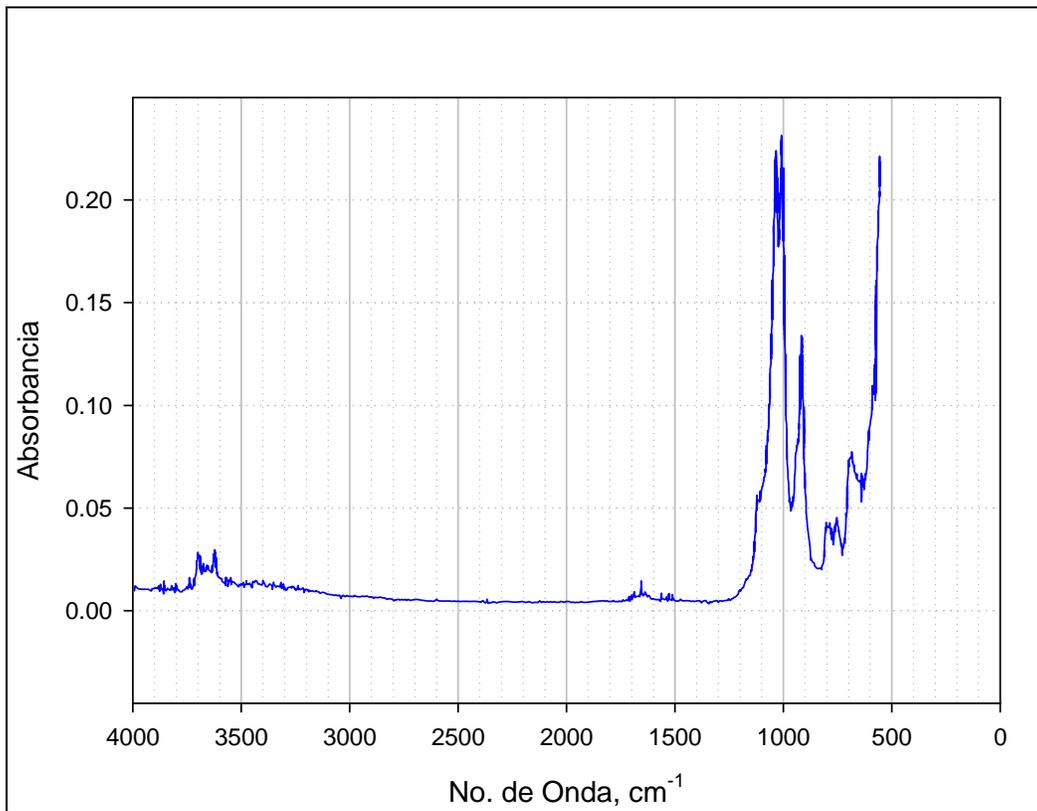


Figura 5.19. Espectro CM-1-04. Absorbancia.

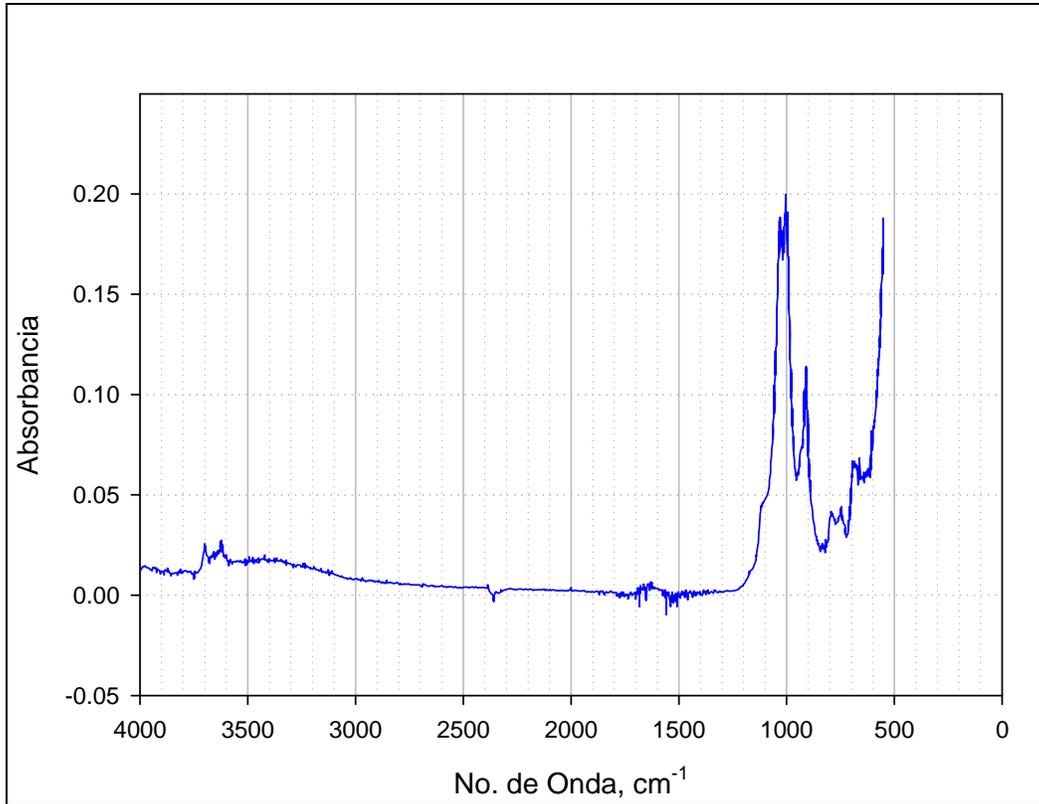


Figura 5.20. Espectro CM-1-05. Absorbancia.

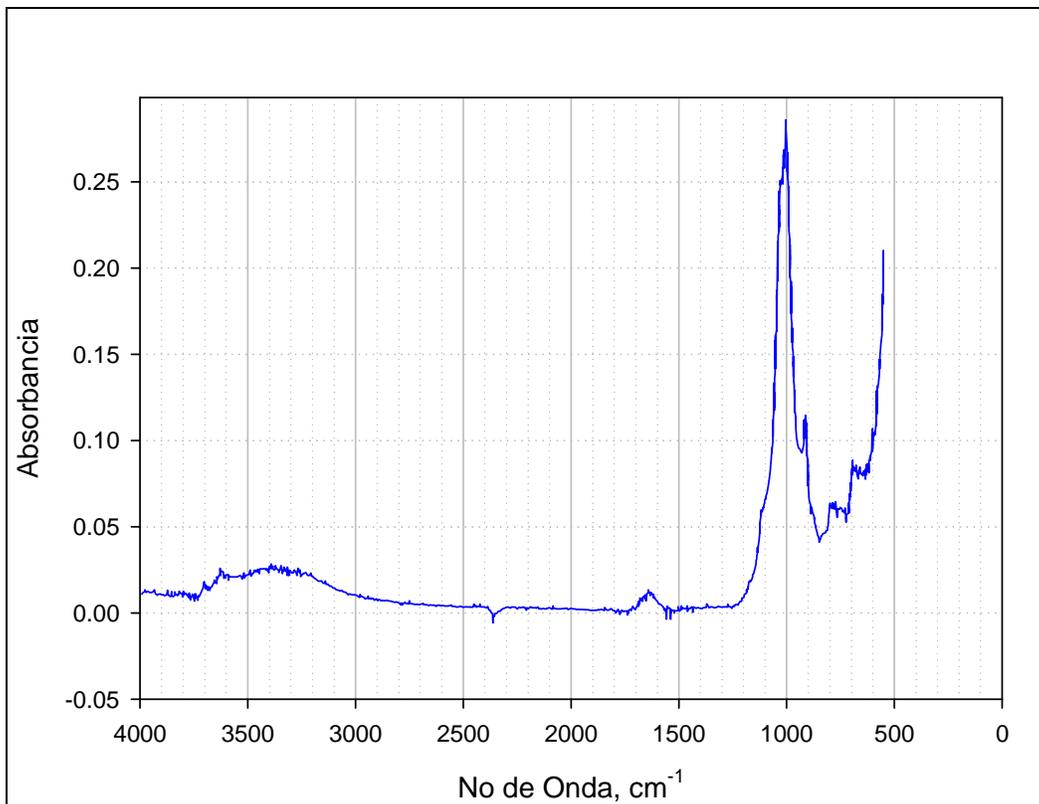


Figura 5.21. Espectro CM-1-07. Absorbancia.

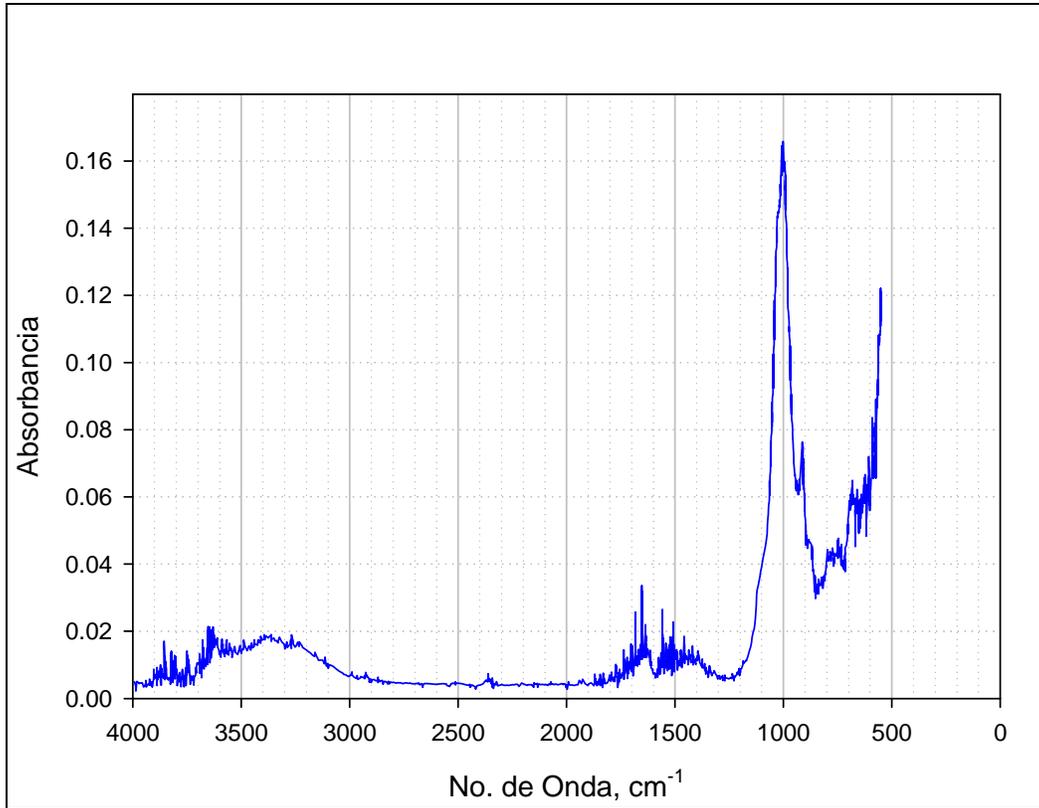


Figura 5.22. Espectro CM-1-08. Absorbancia.

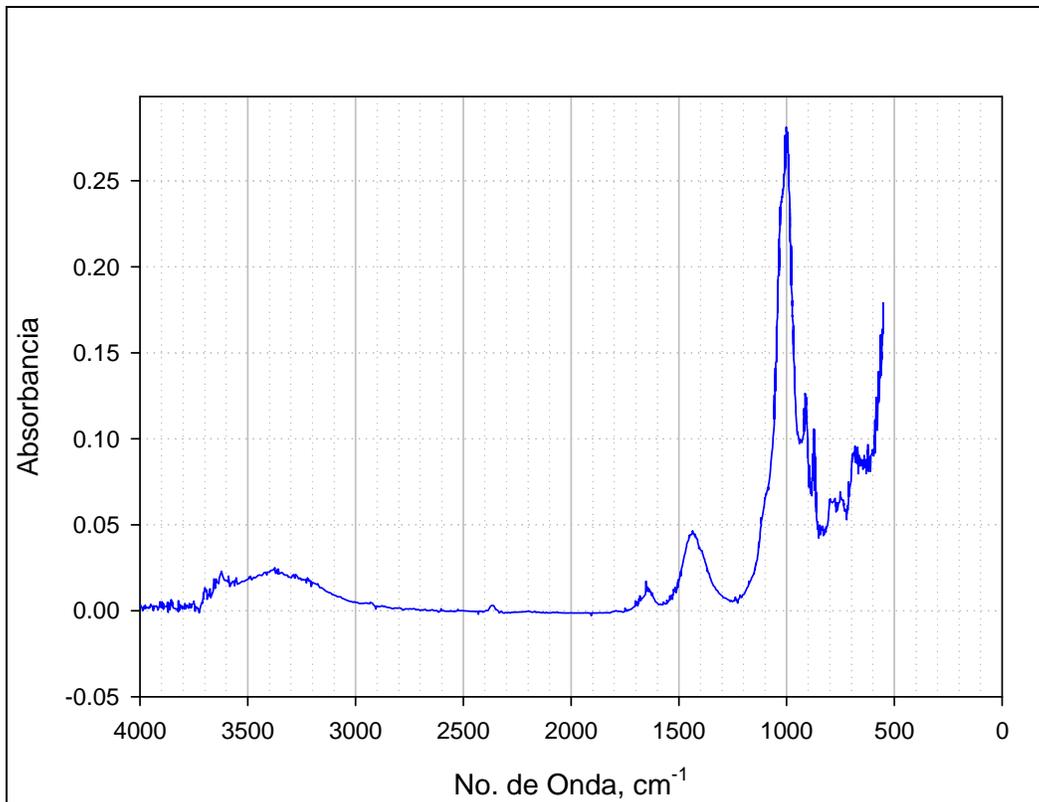


Figura 5.23. Espectro CM-1-09. Absorbancia.

En resumen, los resultados de IRS sirvieron para confirmar los minerales que se resumen en la Tabla 5.13.

**Tabla 5.13. Resumen de minerales identifiacos con IRS.**

<i>Muestra</i>	<i>Mineral Identificado</i>			
	<i>Caolinita</i>	<i>Montmorilonita</i>	<i>Cuarzo</i>	<i>Calcita</i>
CM-1-04	✓	✗	✓	✗
CM-1-05	✓	✓	✓	✗
CM-1-07	✗	✓	✓	✗
CM-1-08	✗	✓	✗	✓ <sup>1</sup>
CM-1-09	✗	✓	✗	✓ <sup>1</sup>
T 2-6 ft	N/D <sup>2</sup>	N/D	N/D	N/D
T 6-8 ft	N/D	N/D	N/D	N/D

*Nota:* (1) Asumido a base de otras pruebas.  
 (2) N/D = No determinado.

#### 5.4.8. Microscopia electrónica de rastreo

Las siete muestras escogidas (Tabla 5.3) fueron estudiadas con fotos tomadas por microscopia electrónica de rastreo. El equipo utilizado para estas fotos fue el JEOL JSM-5410 LV *Scanning Microscope*. Todas las fotos fueron tomadas de la fracción de arcilla previamente saturadas con magnesio. Para poder obtener estas fotos fue necesario rosear las muestras con una cubierta de oro con el fin de tener una buena calidad de imagen.

Tres juegos de fotos se presentan en las Figuras 5.24, 5.25 y 5.26 correspondiente a tres escalas distintas (500X, 3,500X y 7,500X), respectivamente. En cada juego de fotos se puede apreciar el rango aproximado de tamaño de partículas de cada una de las muestras. Todas las muestras presentan tamaños de partículas mayores a los 10 µm como también menores a un micrón (1 µm). Se puede observar que las partículas más pequeñas pertenecen a las muestras CM-1-04 y CM-1-07, seguidas de las muestras CM-1- 08, CM-1-09 y T 6-8 ft; y por último las

muestras CM-1-05 y T 2-6 ft las cuales son las que presentan los mayores tamaño de partículas. En todas las fotos se puede apreciar la irregularidad de las partículas las cuales tienden a ser muy angulares o con forma de hojuelas. Cabe aclarar que aunque las muestras fotografiadas son de fracción de arcilla estas tienen partículas mayores a los dos micrones. Esto se debe a que la separación se hace por centrifuga y no se controla exactamente el tamaño máximo de partícula.

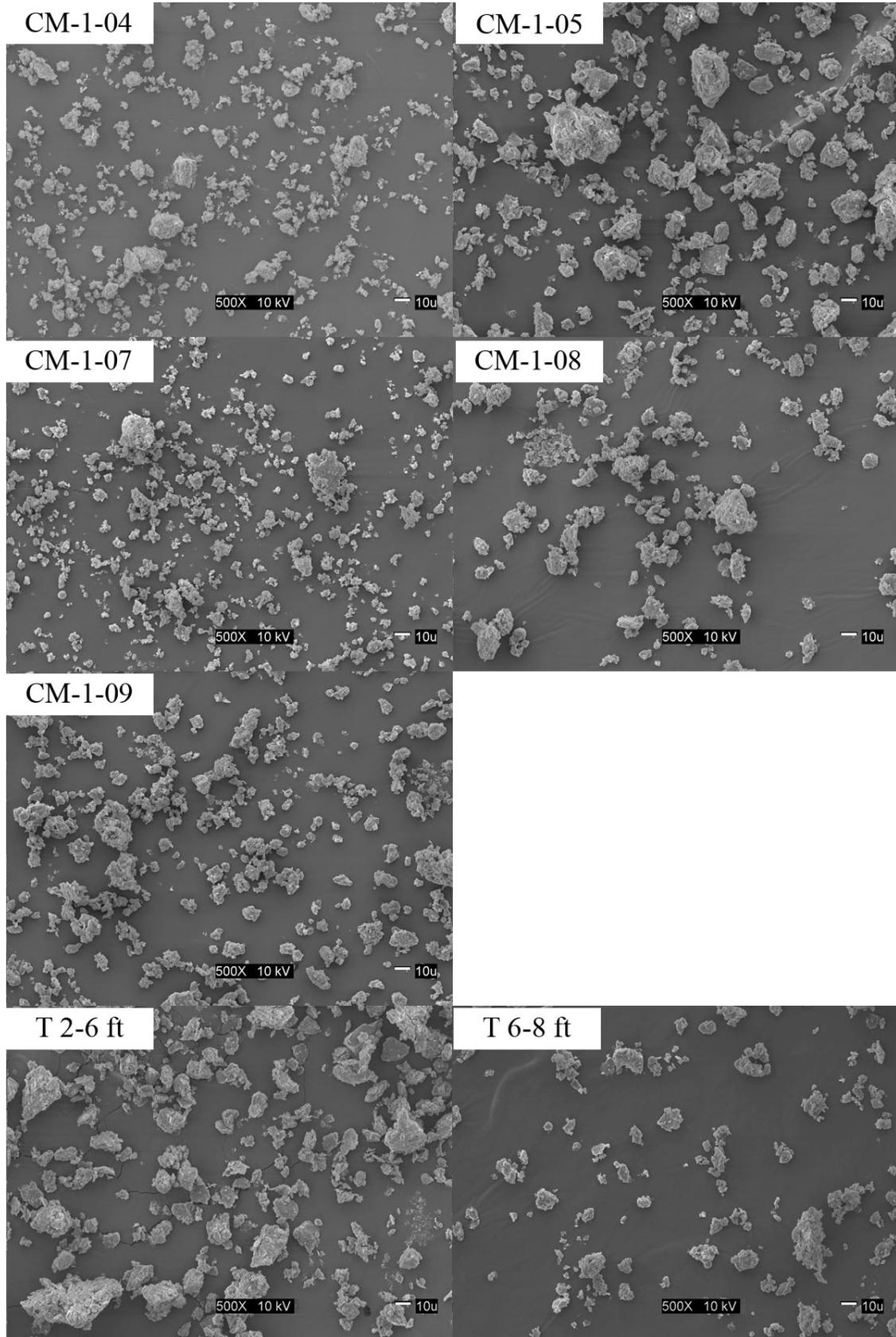


Figura 5.24. Fotos microscópicas con SEM. Resolución 500X 10kV.

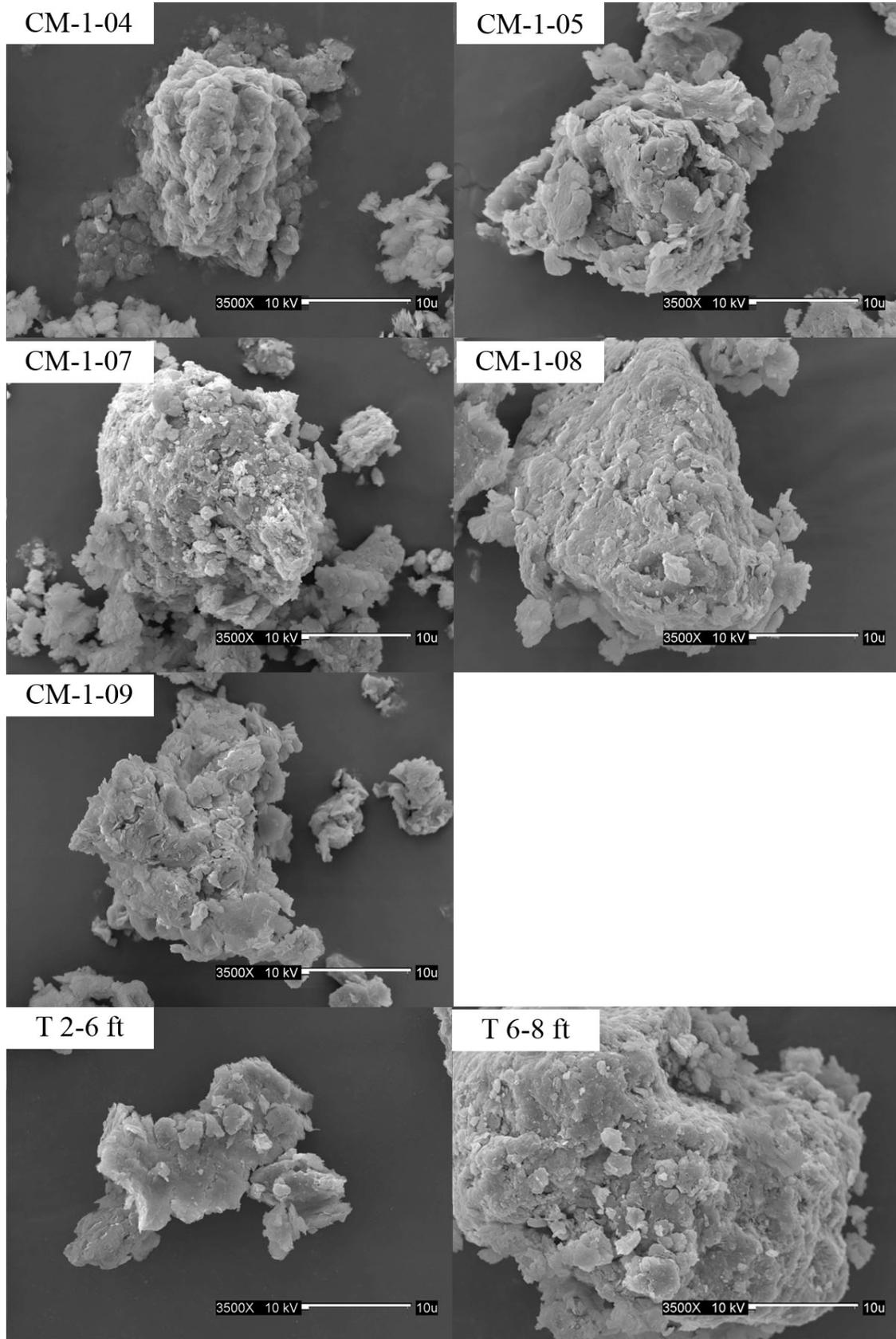


Figura 5.25. Fotos microscópicas con SEM. Resolución 3,500X 10kV.

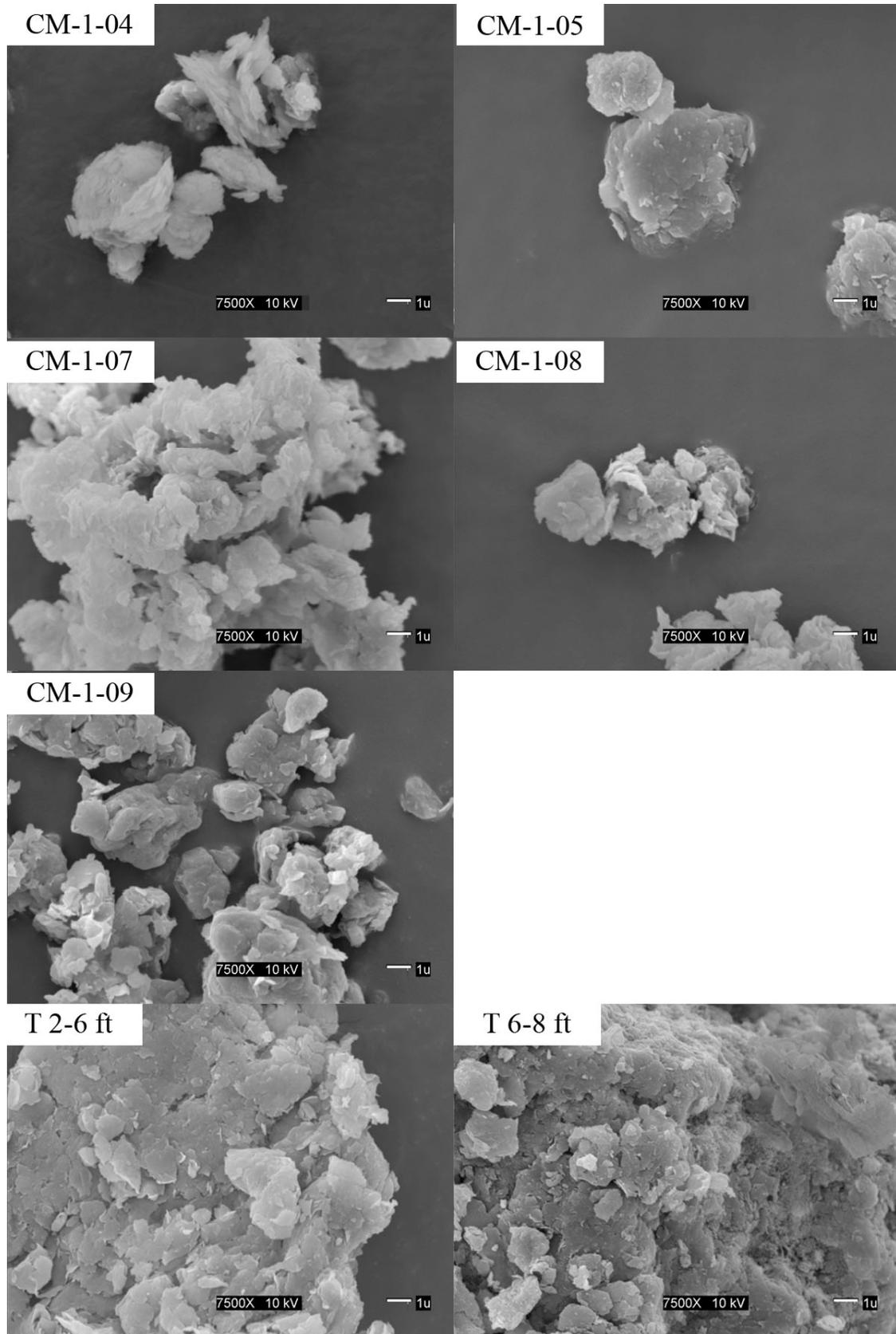


Figura 5.26. Fotos microscópicas con SEM. Resolución 7,500X 10kV.

### 5.4.9. Resumen de resultados del análisis mineralógico

La composición mineralógica de las siete muestras listadas en la Tabla 5.3 se evaluó usando varias técnicas incluyendo área superficial, capacidad de intercambio catiónico, difracción y fluorescencia de rayos X, análisis por diferencia termal y espectroscopia de infrarrojo. La Tabla 5.14 muestra un resumen de las pruebas de pH, área superficial y capacidad de intercambio catiónico en suelo y arcillas. Se incluye el límite líquido e índice de plasticidad a modo de referencia. La composición mineralógica de las siete muestras se resume en las Tablas 5.15 a la 5.21. Estas tablas resumen la interpretación de los resultados de las pruebas realizadas. Estas tablas indican si las pruebas realizadas sugieren la presencia o ausencia de los minerales seleccionados.

**Tabla 5.14. Resumen de las propiedades mineralógicas obtenidas.**

Muestra	Atterberg		pH 1:2	Área Superficial m <sup>2</sup> /g	Capacidad de Intercambio Catiónico, cmol/kg					XRD <sup>1</sup> %Crist
	LL, %	PI, %			K	Mg	Na	Ca	Total	
CM-1-04	101	69	5.28	177.35	0.37	2.88	0.58	2.53	6.36	N/A
					<i>3.41</i>	<i>22.49</i>	<i>4.39</i>	<i>1.48</i>	<i>31.77</i>	
CM-1-05	92	67	4.36	250.37	0.33	2.24	1.76	11.02	15.35	C
					<i>2.45</i>	<i>37.87</i>	<i>3.39</i>	<i>10.78</i>	<i>54.49</i>	41.5
CM-1-07	138	81	6.46	446.42	1.03	8.22	5.27	37.40	51.93	M
					<i>3.94</i>	<i>58.17</i>	<i>3.94</i>	<i>16.17</i>	<i>82.22</i>	67.8
CM-1-08	86	52	7.75	420.26	0.41	7.46	3.02	47.58	58.47	N/A
					<i>1.67</i>	<i>55.44</i>	<i>3.71</i>	<i>177.3</i>	<i>238.11</i>	
CM-1-09	82	58	9.57	350.43	0.44	3.72	8.91	34.49	47.56	N/A
					<i>1.37</i>	<i>44.57</i>	<i>3.48</i>	<i>209.1</i>	<i>258.51</i>	
T 2-6 ft	169	140	5.49	456.17	0.36	14.02	7.02	21.58	42.98	M
					<i>2.03</i>	<i>61.52</i>	<i>6.57</i>	<i>15.88</i>	<i>85.99</i>	63.6
T 6-8 ft	155	112	7.51	464.83	0.56	17.94	10.03	38.11	66.63	M
					<i>0.75</i>	<i>79.35</i>	<i>8.73</i>	<i>9.36</i>	<i>98.18</i>	62.2

Notas: Los valores *itálicos* son resultado de las arcillas.

(1) C = caolinita; M = montmorilonita

Tabla 5.15. Resumen de composición mineralógica de la muestra CM-1-04.

Prueba	Mineral					
	Caol.	Montmo.	Cuarzo	Calcita	Vermi.	Otro(s)
Área Superficial	✗	✗	✗	✗	✗	✓
CIC Total	✓	✗	✗	✗	✗	✗
Fig 5.7 CIA <sub>c</sub> vs A <sub>c</sub>	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Fig 5.8 CIA <sub>c</sub> vs A <sub>c</sub>	✓	✓	✓	✗	✓	✓
XRD	✓	✗	✓	✗	✗	✗
DTA	✓	✓	✗	✗	✓	✓
IRS	✓	✗	✓	✗	✗	✗

Nota: ✓ = Presencia, ✗ = Ausencia

Tabla 5.16. Resumen de composición mineralógica de la muestra CM-1-05.

Prueba	Mineral					
	Caol.	Montmo.	Cuarzo	Calcita	Vermi.	Otro(s)
Área Superficial	✗	✗	✗	✗	✗	✓
CIC Total	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Fig 5.7 CIA <sub>c</sub> vs A <sub>c</sub>	✗	✓	✗	✗	✗	✗
Fig 5.8 CIA <sub>c</sub> vs A <sub>c</sub>	✓	✓	✗	✗	✗	✓
XRD	✓	✓	✓	✗	✓	✗
DTA	✓	✓	✗	✗	✓	✓
IRS	✓	✓	✓	✗	✗	✗

Nota: ✓ = Presencia, ✗ = Ausencia

Tabla 5.17. Resumen de composición mineralógica de la muestra CM-1-07.

Prueba	Mineral					
	Caol.	Montmo.	Cuarzo	Calcita	Vermi.	Otro(s)
Área Superficial	✗	✗	✗	✗	✓	✗
CIC Total	✗	✓	✗	✗	✗	✗
Fig 5.7 CIA <sub>c</sub> vs A <sub>c</sub>	✗	✓	✗	✗	✗	✗
Fig 5.8 CIA <sub>c</sub> vs A <sub>c</sub>	✓	✓	✗	✗	✗	✓
XRD	✓	✓	✓	✗	✓	✗
DTA	✓	✓	✗	✗	✓	✓
IRS	✗	✓	✓	✗	✗	✗

Nota: ✓ = Presencia, ✗ = Ausencia

Tabla 5.18. Resumen de composición mineralógica de la muestra CM-1-08.

Prueba	Mineral					
	Caol.	Montmo.	Cuarzo	Calcita	Vermi.	Otro(s)
Área Superficial	✗	✗	✗	✗	✓	✗
CIC Total	✗	✗	✗	✓	✓	✗
Fig 5.7 CIA <sub>c</sub> vs A <sub>c</sub>	✗	✓	✗	✗	✗	✗
Fig 5.8 CIA <sub>c</sub> vs A <sub>c</sub>	✗	✓	✗	✗	✗	✗
XRD	✓	✓	✗	✓	✓	✗
DTA	✓	✓	✗	✓	✓ <sup>1</sup>	✓
IRS	✗	✗	✗	✗	✓	✗

Nota: ✓ = Presencia, ✗ = Ausencia  
 (1) Asumido a base de otras pruebas.

Tabla 5.19. Resumen de composición mineralógica de la muestra CM-1-09.

Prueba	Mineral					
	Caol.	Montmo.	Cuarzo	Calcita	Vermi.	Otro(s)
Área Superficial	✗	✗	✗	✗	✓	✗
CIC Total	✗	✗	✗	✓	✓	✗
Fig 5.7 CIA <sub>c</sub> vs A <sub>c</sub>	✗	✓	✗	✗	✗	✗
Fig 5.8 CIA <sub>c</sub> vs A <sub>c</sub>	✗	✓	✗	✗	✗	✗
XRD	✓	✗	✓	✓	✓	✗
DTA	✓	✓	✗	✓	✓ <sup>1</sup>	✓
IRS	✗	✗	✗	✓	✓	✗

Nota: ✓ = Presencia, ✗ = Ausencia  
 (1) Asumido a base de otras pruebas.

Tabla 5.20. Resumen de composición mineralógica de la muestra T 2-6 ft.

Prueba	Mineral					
	Caol.	Montmo.	Cuarzo	Calcita	Vermi.	Otro(s)
Área Superficial	✗	✗	✗	✗	✓	✗
CIC Total	✗	✓	✗	✗	✗	✗
Fig 5.7 CIA <sub>c</sub> vs A <sub>c</sub>	✗	✓	✗	✗	✗	✗
Fig 5.8 CIA <sub>c</sub> vs A <sub>c</sub>	✓	✓	✗	✗	✗	✓
XRD	✓	✓	✓	✗	✓	✓
DTA	✓	✓	✗	✗	✓	✓
IRS	N/D <sup>1</sup>	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D

Nota: ✓ = Presencia, ✗ = Ausencia  
 (1) N/D = No determinado.

Tabla 5.21. Resumen de composición mineralógica de la muestra T 6-8 ft.

Prueba	Mineral					
	Caol.	Montmo.	Cuarzo	Calcita	Vermi.	Otro(s)
Área Superficial	×	×	×	×	✓	×
CIC Total	×	✓	×	×	×	×
Fig 5.7 CIA <sub>c</sub> vs A <sub>c</sub>	×	✓	×	×	×	×
Fig 5.8 CIA <sub>c</sub> vs A <sub>c</sub>	✓	✓	×	×	×	✓
XRD	✓	✓	✓	×	✓	×
DTA	✓	✓	×	×	✓	✓
IRS	N/D <sup>1</sup>	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D

Nota: ✓ = Presencia, × = Ausencia  
 (1) N/D = No determinado.

## 5.5. Medición de potencial expansivo

En esta sección se presentan los resultados de las diferentes pruebas escogidas para evaluar el potencial expansivo de los suelos estudiados. Estas pruebas fueron listadas en la Tabla 3.3, pero se repite en la Tabla 5.22. Estas pruebas se utilizan para medir de diversas propiedades incluyendo presiones, deformaciones, cambios volumétricos, cambios de humedad, entre otros. Además de las pruebas listadas en la Tabla 5.22, se presentan correlaciones de algunos parámetros determinados previamente con índices utilizados para evaluar el potencial expansivo de los suelos.

**Tabla 5.22. Prueba de medición del potencial expansivo del suelo.**

Prueba	Referencia	Observaciones
Entumecimiento Libre <i>Free Swell</i>	Holtz & Gibbs (1956)	Se utiliza una probeta calibrada de 100mL con 100mL de agua destilada y se dejar caer 10 cm <sup>3</sup> de suelo pasando el tamiz no. 40.
Índice de Entumecimiento Modificado <i>Modified Free Swell Index (MFSI)</i>	Sivapullahia, et. al. (1987)	Se obtuvieron aproximadamente 10 gramos de suelo seco al horno y se determinó el volumen a base de la gravedad específica.
Potencial de Entumecimiento <i>Swell Potential</i>	ASTM D 4546	Se realizaron los métodos A y B. El tiempo de duración varió entre 10 a 30 días.
Potencial de Cambio Volumétrico <i>Potential Volume Change (PVC)</i>	FHA 701 (Lambe, 1960)	Se realizó para la muestra más crítica en tres humedades distintas: con la humedad natural y por debajo y por encima de la humedad óptima. El método de compactación fue 3 capas compactadas con 7, 7 y 8 golpes para un total de 25 golpes.

### 5.5.1. Índice de entumecimiento libre y MFSI

Siguiendo el procedimiento descrito en el Capítulo 3, se obtuvieron los resultados con una expansión libre o entumecimiento libre que se resumen en la Tabla 5.23. También se evaluó el entumecimiento libre usando el procedimiento modificado que utiliza muestras secadas al horno. Los resultados del procedimiento modificado se presentan en términos del MFSI (*Modified Free Swell Index*) en la Tabla 5.24.

**Tabla 5.23. Resultados del entumecimiento libre (*Free Swell*).**

Muestra	Límites de Atterberg		Volumen Inicial cm <sup>3</sup>	Volumen Final cm <sup>3</sup>	Entumecimiento Libre %
	LL, %	PI, %			
CM-1-04	101	69	10	22	120
CM-1-05	92	67	10	25	150
CM-1-07	138	81	10	32	220
CM-1-08	86	52	10	29	190
CM-1-09	82	58	10	25	150
T 2-6 ft	169	140	10	35	250
T 6-8 ft	155	112	10	32	220

Tabla 5.24. Clasificación del potencial de entumecimiento según MFSI y  $LL_{\text{volumen}}$ .

Muestra	Volumen	Volumen	MFSI	Límite	Potencial de	
	Inicial cm <sup>3</sup>	Final cm <sup>3</sup>		Líquido <sub>volumen</sub> <sup>1</sup> (%)	MFSI	$LL_{\text{volumen}}$
CM-1-04	4.00	21	4.25	276	Moderado	Moderado
CM-1-05	3.50	26.25	6.50	263	Moderado	Moderado
CM-1-07	4.00	32	7.00	382	Moderado	Moderado
CM-1-08	4.00	28	6.00	243	Moderado	Moderado
CM-1-09	4.00	20	4.00	229	Moderado	Moderado
T 2-6 ft	4.00	40	9.00	447	Moderado	Alto
T 6-8 ft	4.00	33	7.25	426	Moderado	Alto

Nota: (1) El límite líquido por volumen se obtiene multiplicando el límite líquido por peso multiplicado por la gravedad específica del suelo.

De estas dos tablas se puede apreciar que los suelos con menor potencial de entumecimiento son la muestra CM-1-04, CM-1-05 y CM-1-09. Los valores de entumecimiento libre para CM-1-04, CM-1-05 y CM-1-09 fueron 120, 150 y 150%, respectivamente. Los valores del índice MFSI también fueron los más bajos. En contraste las muestras más expansivas según estos ensayos fueron la CM-1-07 y las T 2-6 ft y T 6-8 ft. Estas muestras presentaron entumecimientos libre mayores de 200% y valores de MFSI por encima de 7. También se observa en la Tabla 5.23 que las muestras con altos valores de entumecimiento libre tienen altos valores de Atterberg. La Tabla 5.25 muestra valores del índice de MFSI que propuso Sivapullaiah et al. (1987). Estos autores correlacionaron los valores de MFSI con el potencial expansivo del suelo (ver Tabla 5.25). Según esta correlación todas las muestras clasifican como de potencial expansivo moderado. Sivapullaiah et al. (1987) también propuso usar el límite líquido volumétrico (Líquido Líquido gravimétrico por  $G_s$ ) para estimar el potencial volumétrico del suelo (ver Tabla 5.25). Según esta segunda correlación las muestras son consideradas de potencial expansivo moderado excepto las muestras T 2-6 ft y T 6-8 ft que clasifican ahora de potencial expansivo alto. Los valores de entumecimiento libre medidos en función del MFSI se

muestran gráficamente en la Figura 5.27. La relación entre MFSI y el límite líquido volumétrico se muestra en la Figura 5.28. Según la Tabla 5.12 que desarrolló Sivapullaiah et al. (1987) utilizando los resultados del MFSI, estas muestras de suelos tienen un potencial expansivo moderado. En cambio, utilizando el Límite Líquido, las muestras de la trinchera tienen un potencial expansivo alto.

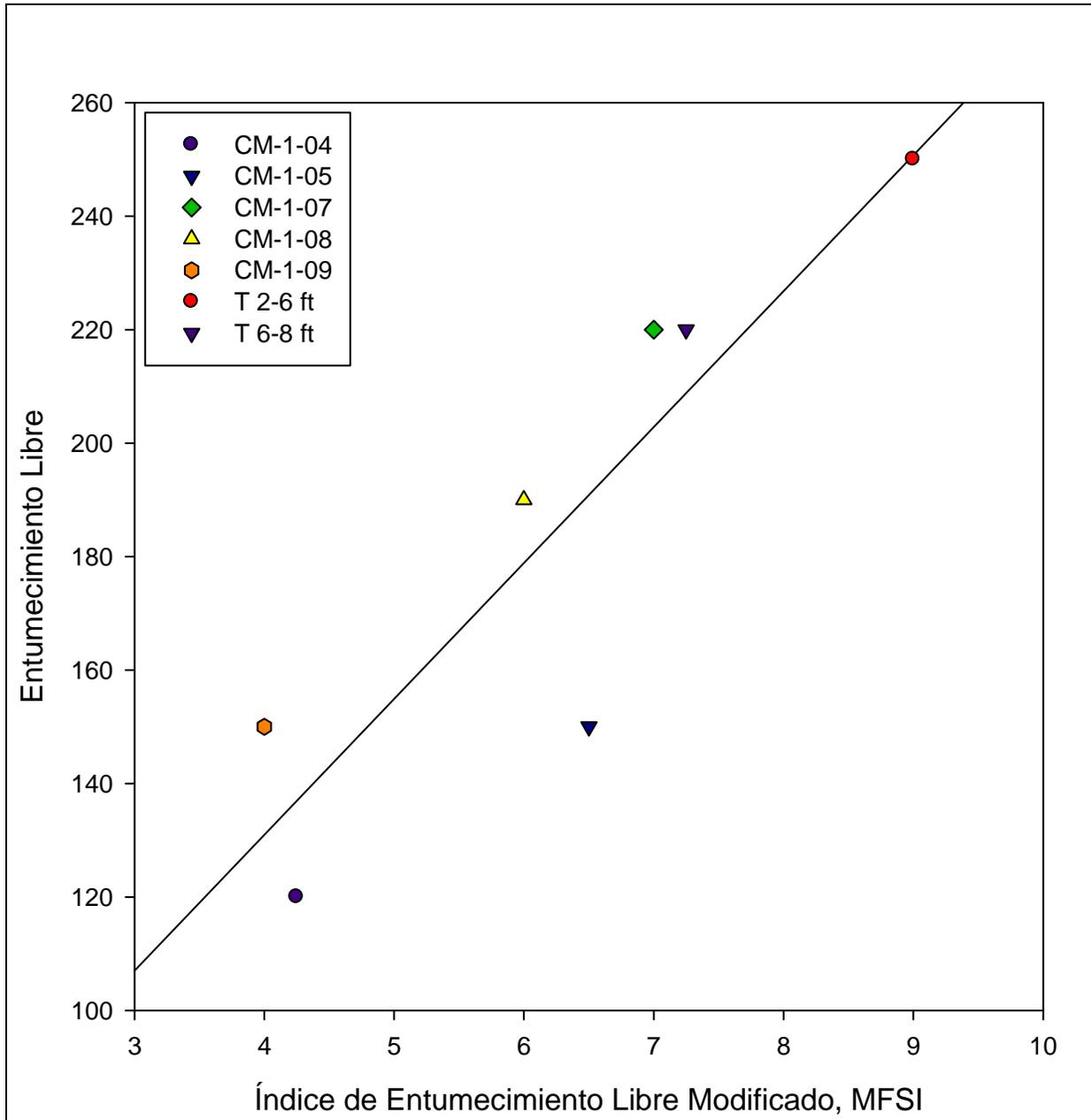


Figura 5.27. Relación entre entumecimiento libre y MFSI.

Tabla 5.25. Potencial de entumecimiento basado en el MFSI. Adaptado de Sivapullaiah et al., 1987.

Límite Líquido, % (basado en volumen)	MFSI	Potencial de Entumecimiento
< 200	< 2.5	Despreciable
200 a 400	2.5 a 10.0	Moderado
400 a 550	10.0 a 20.0	Alto
> 550	> 20.0	Muy Alto

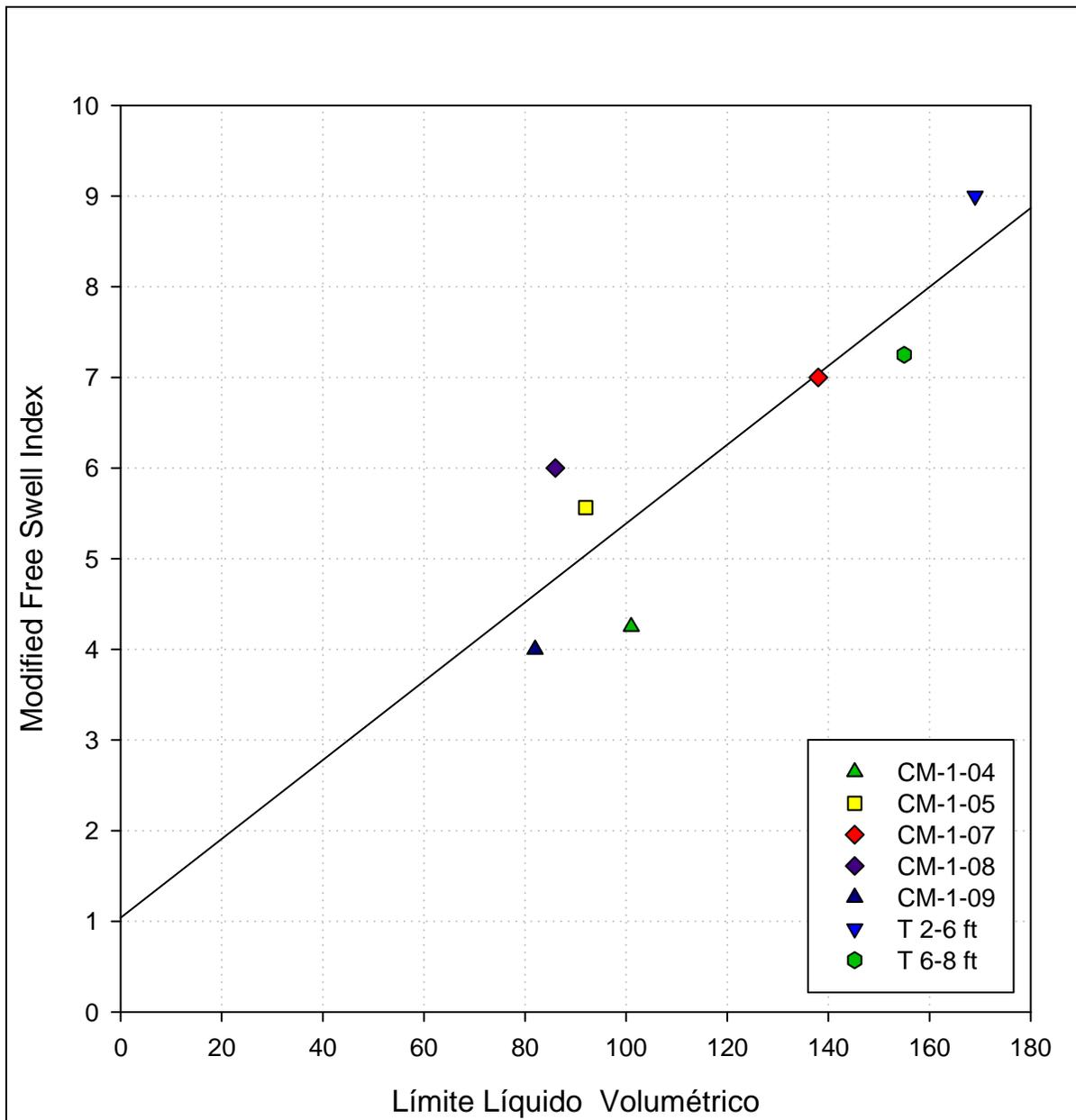


Figura 5.28. MFSI vs límite líquido volumétrico.

### *5.5.2. Potencial de entumecimiento*

El potencial de entumecimiento se midió utilizando la prueba descrita por la norma ASTM D 4546 (ASTM, 2003a) la cual se discutió en el Capítulo 2. En el Capítulo 2 se describieron dos métodos para este ensayo: el método A y el método B. En el método A se empleó la opción de aplicarle a la muestra una presión igual al esfuerzo vertical efectivo in-situ por un período de tiempo no mayor de cinco minutos, esto se hizo antes de inundar la muestra. El método B por el contrario consistió en aplicarle a la muestra una presión equivalente al esfuerzo vertical efectivo in-situ de manera permanente antes de inundar la muestra.

La muestra CM-1-09 no se pudo someter a esta prueba debido a que la humedad dentro del tubo Shelby era muy baja y la muestra se fracturaba cada vez que se intentaba extraer una porción de suelo fuera del tubo. La escasez de material de la muestra CM-1-05 no permitió que a ésta se le realizara la prueba por el método B. El resto de las muestras fueron analizadas por ambos métodos. Todas las pruebas se realizaron en muestras inalteradas obtenidas con tubos Shelby de pared delgada.

Para el método A se utilizó una presión de fijado entre 30 y 32 libras por pie cuadrado el cual es equivalente al peso del cabezal superior y la piedra porosa. El método A permite obtener la presión de entumecimiento, el porcentaje de levantamiento y el entumecimiento libre. Para el método B la presión fija fue la presión igual al esfuerzo efectivo in-situ de cada muestra. El método B permite obtener la presión de entumecimiento y el porcentaje de levantamiento. La Tabla 5.26 resume los resultados obtenidos de la presión de entumecimiento para ambos métodos. La Figura 5.29 presenta los resultados gráficamente.

Tabla 5.26. Resumen pruebas de potencial de entumecimiento.

Muestra	Atterberg		Profundidad pies	Presión de Entumecimiento, lb/pies <sup>2</sup>	
	LL, %	PI, %		Método A	Método B
CM-1-04	101	69	7	9,462	8,058
CM-1-05	92	67	11	12,491	No Ensayada
CM-1-07	138	81	17	4,253	3,639
CM-1-08	86	52	19	4,612	4,270
CM-1-09	82	58	28	No Ensayada	No Ensayada
T 2-6 ft	169	140	4	32,483	37,051
T 6-8 ft	155	112	7	13,098	17,134

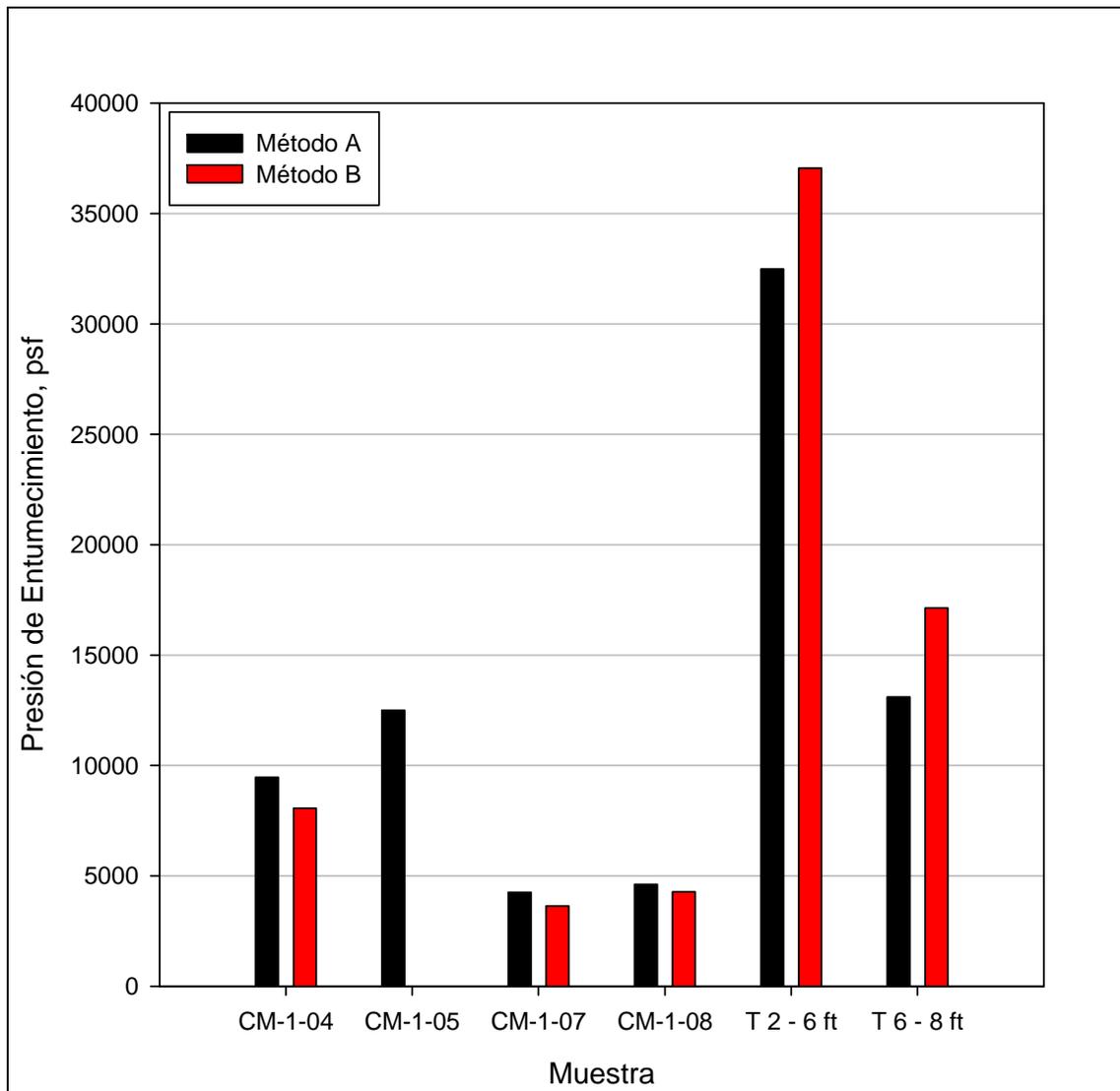


Figura 5.29. Resultados de la presión de entumecimiento. Métodos A & B.

Se observa de estos resultados que la muestra T 2-6 ft fue la que resultó en las presiones de entumecimiento más altas con valores cercanos a 35,000 libras/pies<sup>2</sup>. La muestra con el segundo valor más alto de presiones de entumecimiento fue la T 6-8 ft con valores cercanos a 15,000 libras/pies<sup>2</sup>. Este segundo nivel de valores es menor al 50% de los valores obtenidos para la muestra T 2-6 ft. El tercer valor más alto fue obtenido para la muestra CM-1-05 por el método A con aproximadamente 12,500 libras/pies<sup>2</sup>. Los porcentajes de levantamiento (Método A y B) y de entumecimiento libre se resumen en la Figura 5.30.

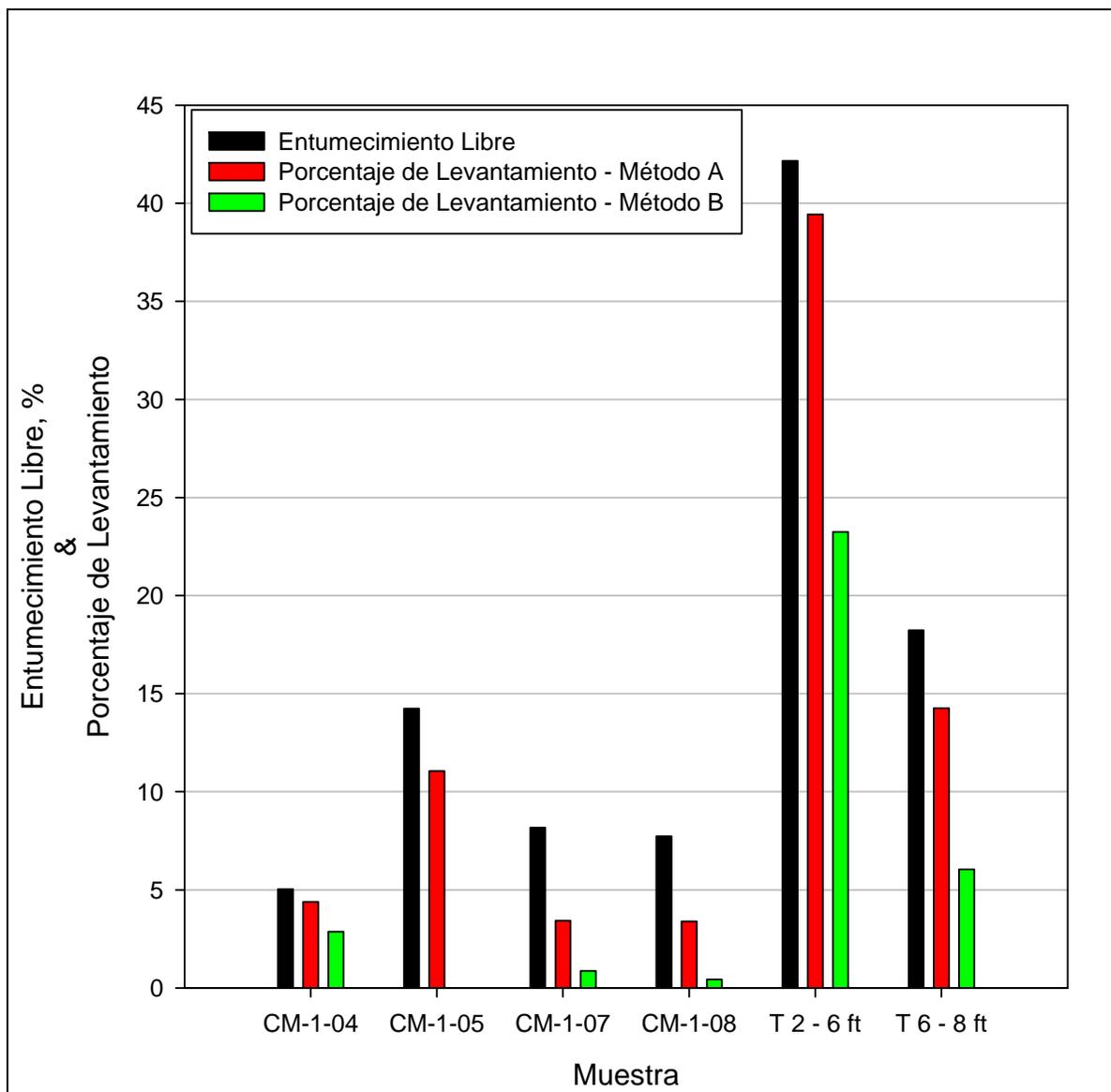


Figura 5.30. Resultados de entumecimiento libre y porcentaje de levantamiento.

En la Figura 5.30 se observa nuevamente que el entumecimiento y levantamiento mayor ocurre en la muestra T 2-6 ft, seguido de la T 6-8 ft y la CM-1-05. Los resultados de entumecimiento y levantamiento están en listados en la Tabla 5.27.

**Tabla 5.27. Resultados de entumecimiento libre y porcentaje de levantamiento.**

<i>Muestra</i>	<i>Profundidad pies</i>	<i>Entumecimiento Libre, %</i>		<i>Porcentaje de Levantamiento</i>	
		<i>Método A</i>	<i>Método B</i>	<i>Método A</i>	<i>Método B</i>
CM-1-04	7	5.03	-	4.38	2.86
CM-1-05	11	14.25	-	11.06	-
CM-1-07	17	8.17	-	3.43	0.87
CM-1-08	19	7.74	-	3.40	0.44
CM-1-09	28	-	-	-	-
T 2-6 ft	4	42.16	-	39.43	23.25
T 6-8 ft	7	18.23	-	14.26	6.04

La Figura 5.31 muestra el entumecimiento de las muestras con respecto al tiempo obtenidos usando ambos métodos. Teniendo en cuenta de que las muestras miden en promedio 0.75 pulgadas, la muestra T 2-6 ft tuvo una lectura final de 0.3164 pulgadas por encima de la altura inicial. Esto significa que la muestra aumentó en más de un 40 %. Si por ejemplo fuera posible llevar al campo las mismas condiciones de la prueba en el laboratorio, para un espesor de cuatro (4) pies de este material, el suelo experimentaría un aumento de 1.6 pies en su espesor. Esto sin duda es una expansión muy crítica.

En la Figura 5.31 se puede notar además que todas las muestras, con excepción de las T 2-6 ft y CM-1-05, alcanzaron su entumecimiento primario cerca de las primeras dos horas. Estas dos muestras necesitaron cerca de 72 horas para llegar al entumecimiento primario. Las Figuras 5.32 y 5.33 resumen los resultados a base de la deformación vertical unitaria con respecto al esfuerzo vertical efectivo aplicado de ambos métodos.

Para determinar los parámetros que se obtienen a base de estas pruebas, se utilizaron dos criterios. El primer criterio consistió en tomar la última lectura del reloj de deformación como la

---

lectura final tanto para la fase de entumecimiento como para la fase de consolidación (aplicación de carga). El segundo criterio utilizado fue separar los resultados a base de entumecimiento primario y secundario y consolidación primaria y secundaria. Con este criterio se usaron los valores obtenidos a base del 100% del entumecimiento primario y consolidación primaria. Las diferencias se pueden apreciar en las Figuras 5.34 – 5.39. Para obtener una fidelidad de los resultados de las pruebas bajo el primer criterio, las muestras debieron tener el mismo tiempo de entumecimiento al igual que el mismo tiempo de carga aplicada en cada incremento. Desafortunadamente esto no ocurrió así con todas las muestras. Esto se debe a que todas las pruebas se corrieron en dos etapas y las primeras muestras fueron consolidadas con veinticuatro (24) horas bajo una carga constante, mientras que algunas de las muestras del segundo grupo requirieron hasta setenta y dos (72) horas en algunos de los incrementos. No pese a esto, todos los análisis fueron realizados con el primer criterio a menos que se indique lo contrario.

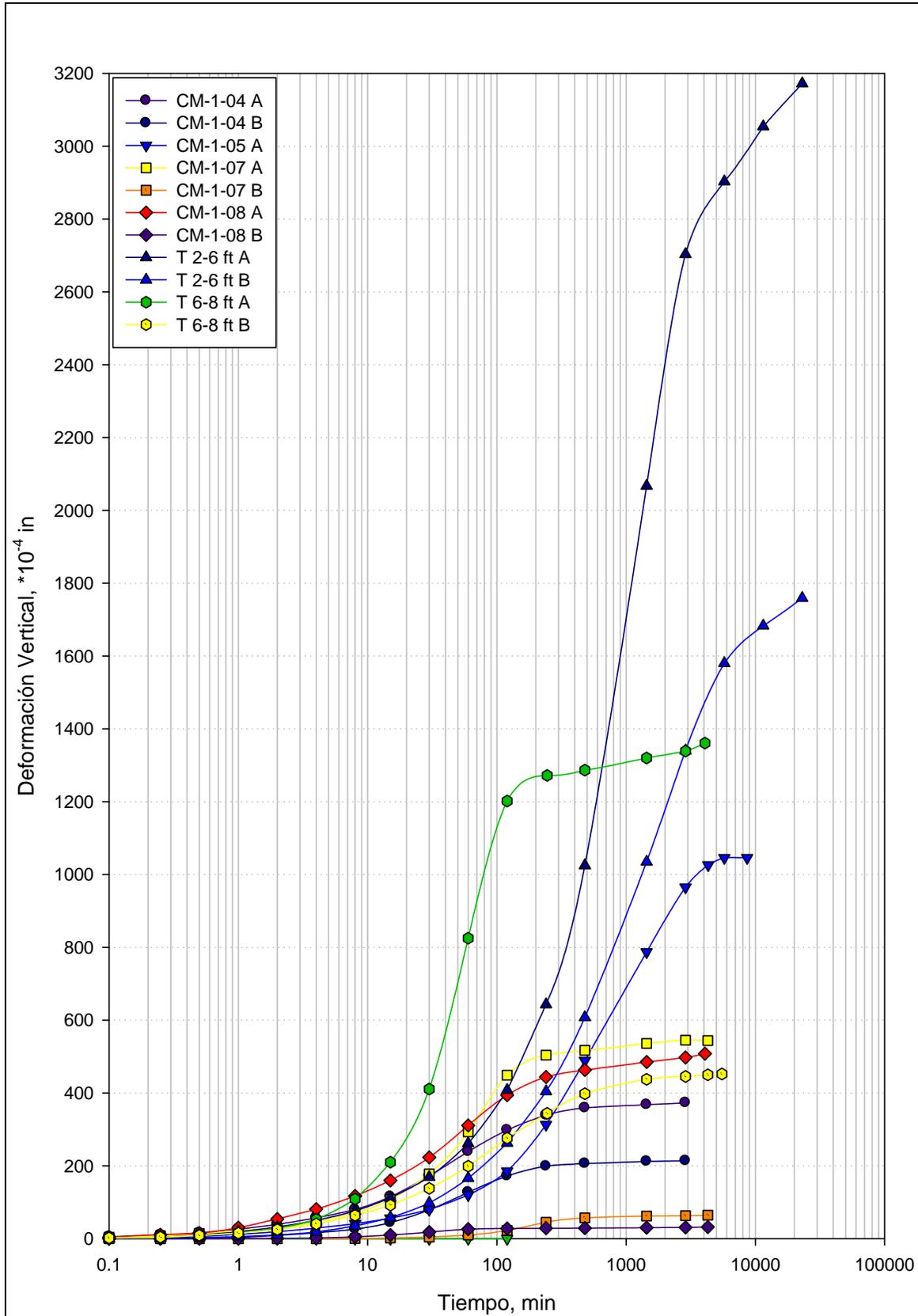


Figura 5.31. Entumecimiento vs tiempo.

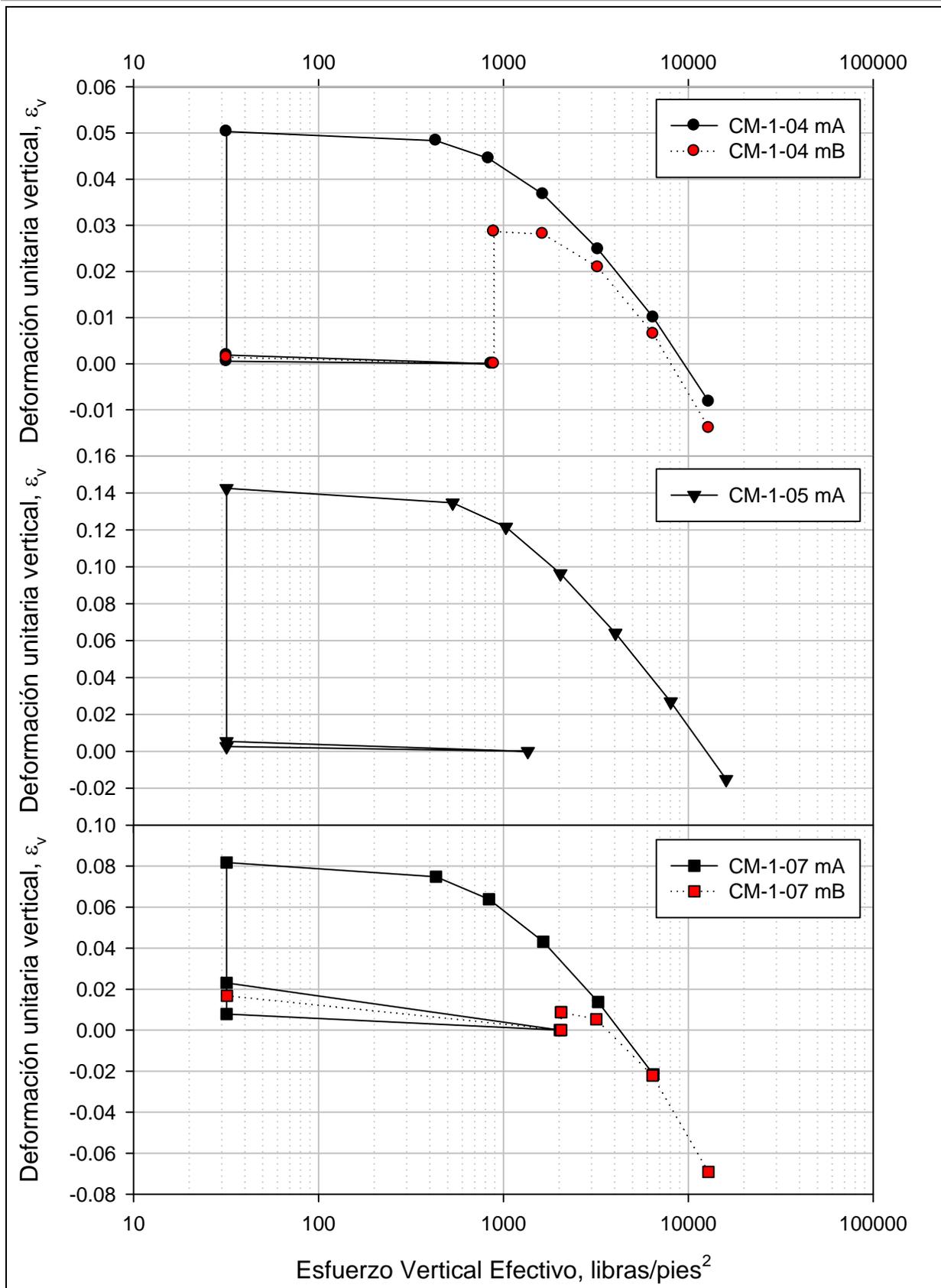


Figura 5.32. Presión de entumecimiento. Métodos A y B. Muestras CM-1-04, CM-1-05 y CM-1-07.

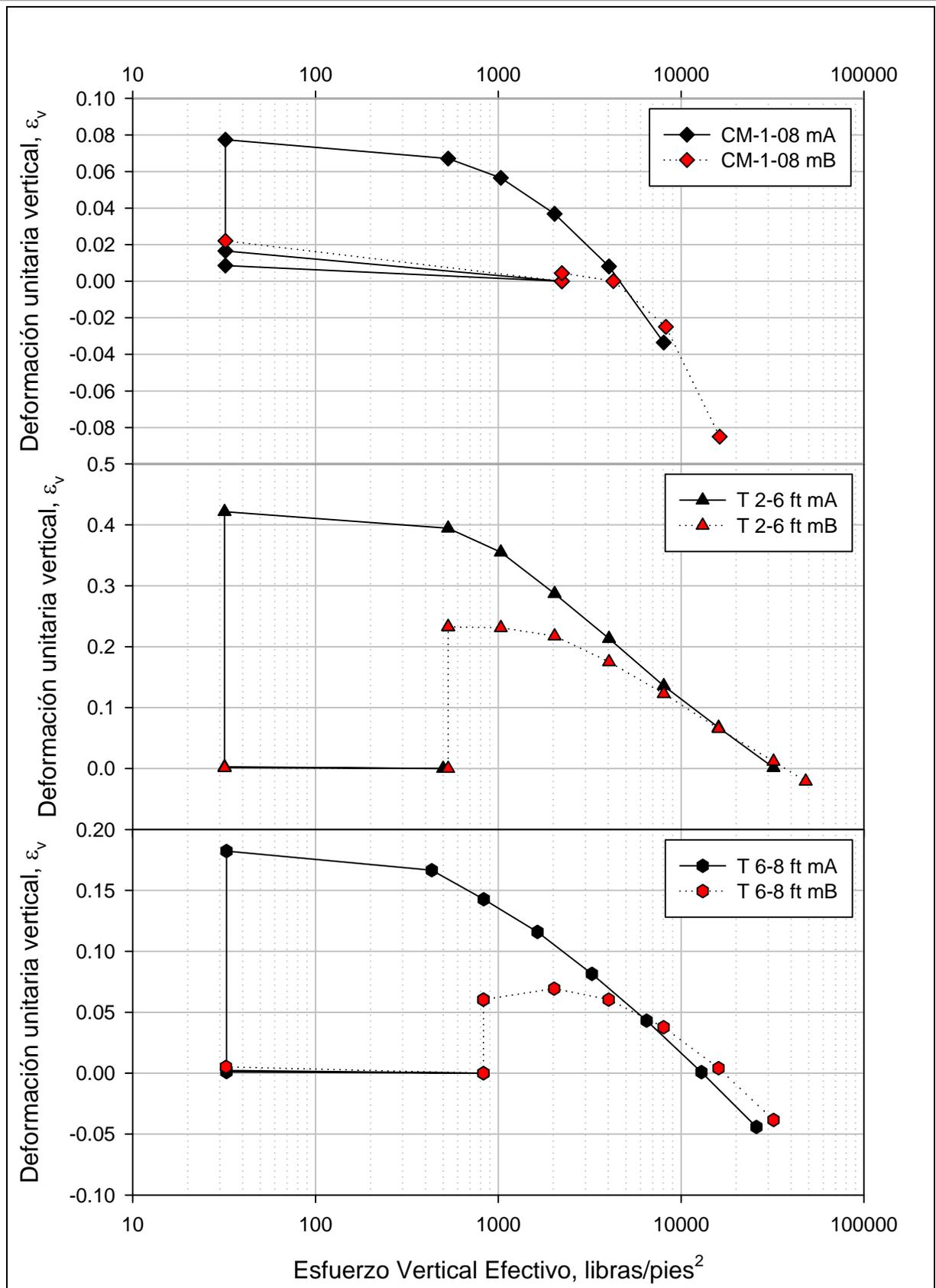


Figura 5.33. Presión de entumecimiento. Métodos A y B. Muestras CM-1-08, T 2-6 ft y T 6-8 ft.

Las Figuras 5.32 y 5.33 presentan los resultados de las muestras a base de la deformación vertical unitaria con respecto a la presión aplicada. Esto nos permite comparar desde un mismo punto de origen los cambios de las muestras. A pesar de que los resultados en presión de entumecimiento entre los métodos A y B tienen una variación a veces considerable, aquí se puede apreciar que ambos métodos tienen la misma tendencia y el mismo comportamiento. La Tabla 5.15 resume efecto producido en la razón de vanos para cada una de las muestra por ambos métodos. En algunos de los casos la diferencia en cambio de razón de vanos se eleva hasta diez veces mayor en el método A que en el método B.

**Tabla 5.28. Resumen cambio en razón de vanos.**

<i>Muestra</i>	<i>Método A</i>			<i>Método B</i>		
	<i>e<sub>inicial</sub></i>	<i>e<sub>final</sub></i>	<i>Δe</i>	<i>e<sub>inicial</sub></i>	<i>e<sub>final</sub></i>	<i>Δe</i>
CM-1-04	0.6612	0.7448	0.0836	0.7673	0.8179	0.0506
CM-1-05	0.9045	1.1758	0.2713	-	-	-
CM-1-07	1.3562	1.5488	0.1926	1.4929	1.5146	0.0217
CM-1-08	1.5494	1.7467	0.1973	1.8158	1.8281	0.0123
T 2-6 ft	0.9149	1.7222	0.8073	0.7981	1.2161	0.4180
T 6-8 ft	1.1923	1.5920	0.3997	1.1499	1.2881	0.1382

Las variaciones entre los valores obtenidos por los métodos utilizados para realizar los análisis con la última lectura o el 100% del entumecimiento y consolidación primario ( $E_p$  y  $C_p$ ) se presentan en las Figuras 5.34 – 5.39. Estas figuras reflejan diferencias considerables en los parámetros que son determinados por estas pruebas en algunas muestras. Las muestras con mayor discrepancia en la presión de entumecimiento son la CM-1-04 y la T 6-8 ft. Ambas muestras duplican su presión de entumecimiento en el método A de 9,461 a 18,815 libras/pies<sup>2</sup> para la primera y de 13,098 a 27,993 libras/pies<sup>2</sup> para la segunda. Las muestras CM-1-07, CM-1-08 y T 2-6 ft tuvieron una reducción en el entumecimiento total mayor que el resto de las muestras. Todas las muestras en ambos métodos A y B tienen una tendencia en una reducción en

entumecimiento y aumento en la presión de entumecimiento cuando se realiza el análisis a base del 100% de  $E_p$  y  $C_p$  con excepción de la muestra T 2-6 ft, que tuvo una reducción en la presión de entumecimiento.

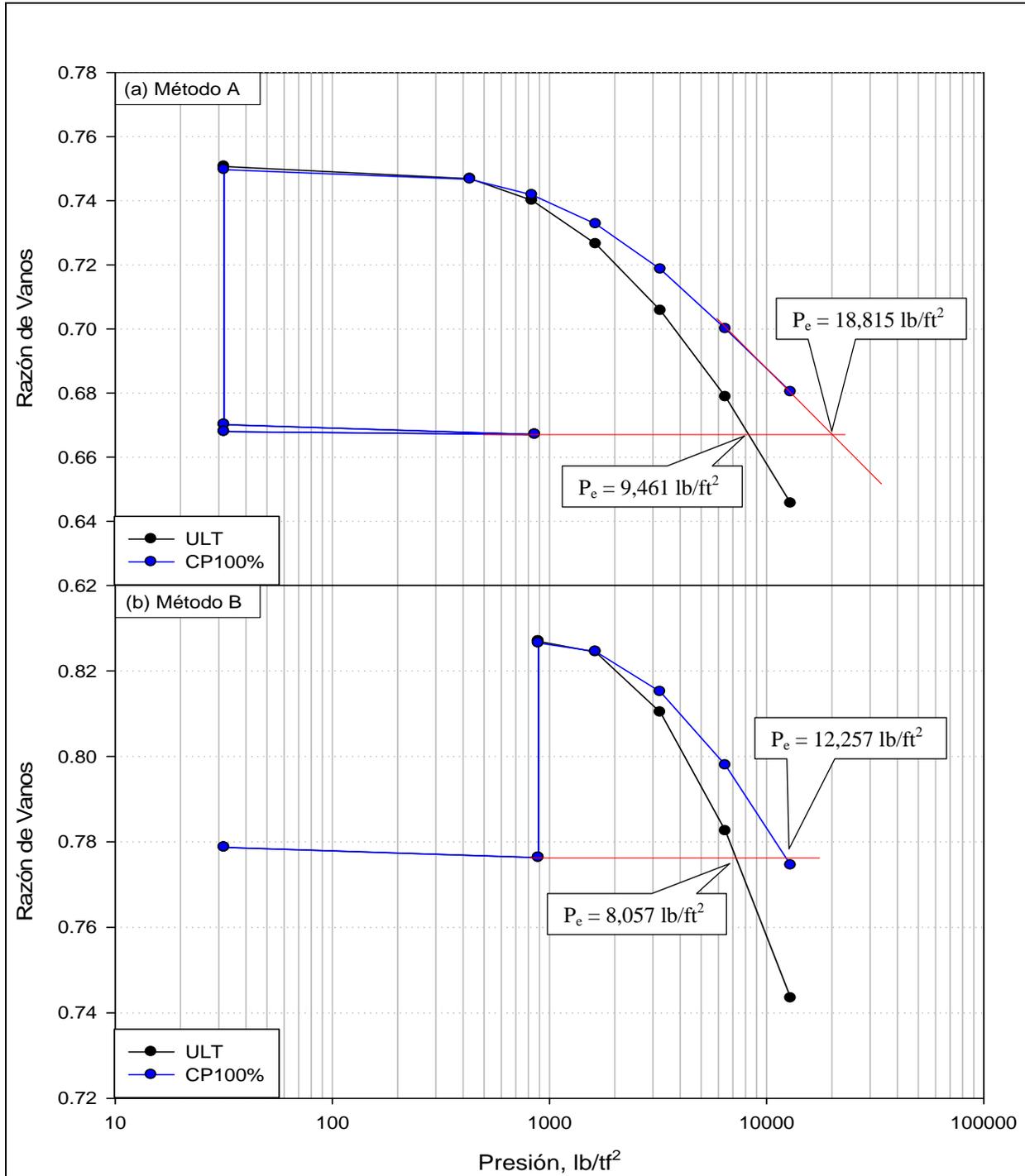


Figura 5.34. Presión de entumecimiento. CM-1-04, Métodos A y B.

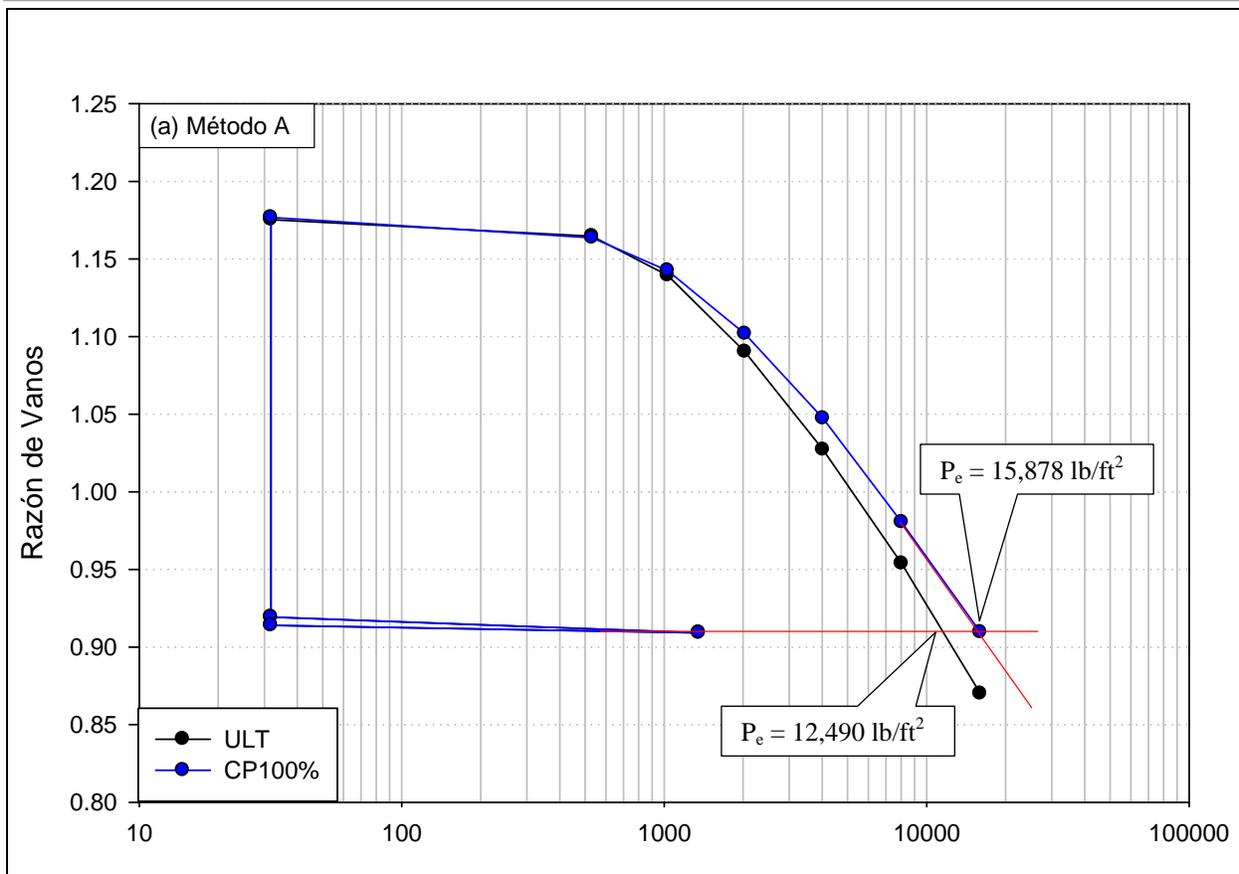


Figura 5.35. Presión de entumecimiento. CM-1-05, Método A.

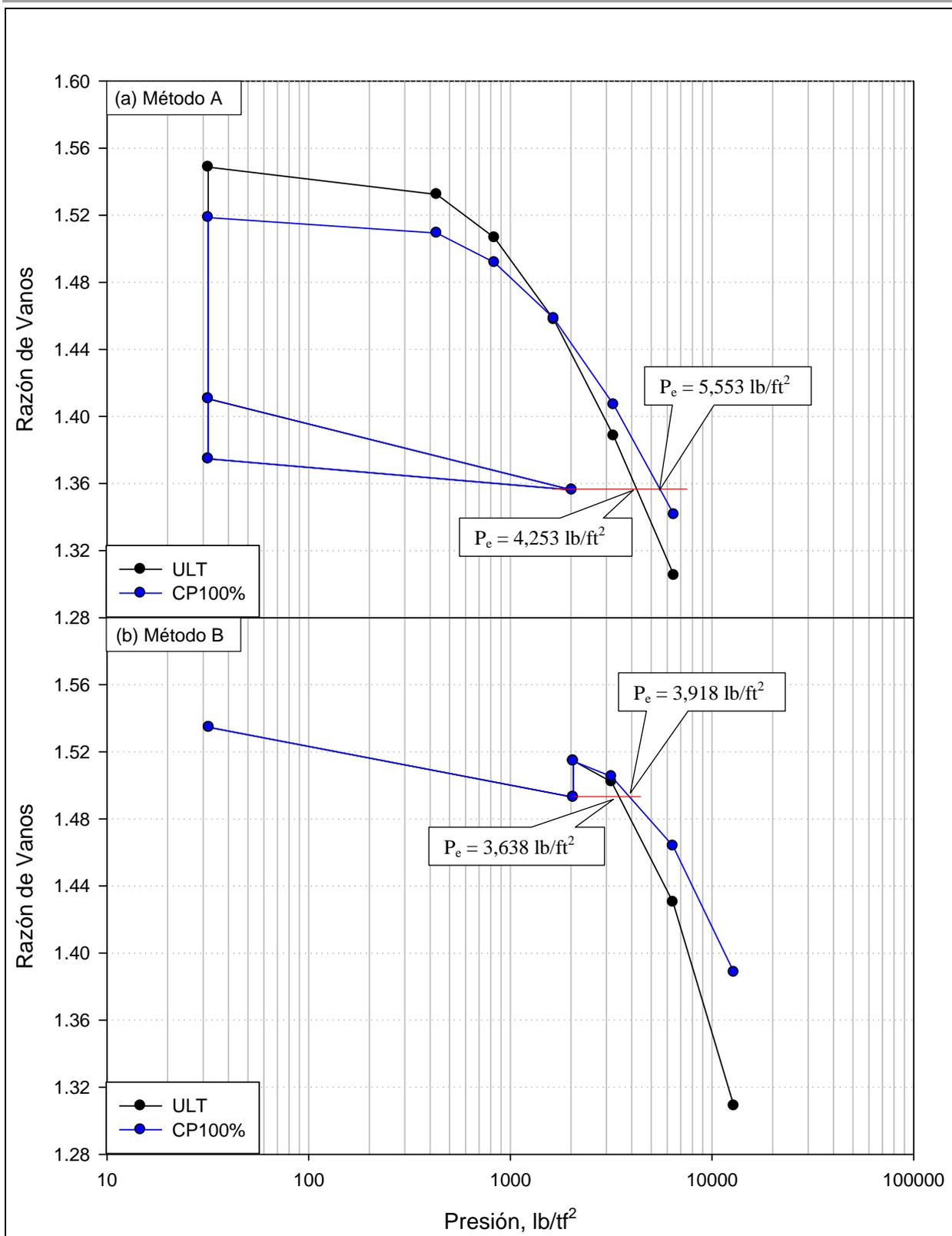


Figura 5.36. Presión de entumecimiento. CM-1-07, Métodos A y B.

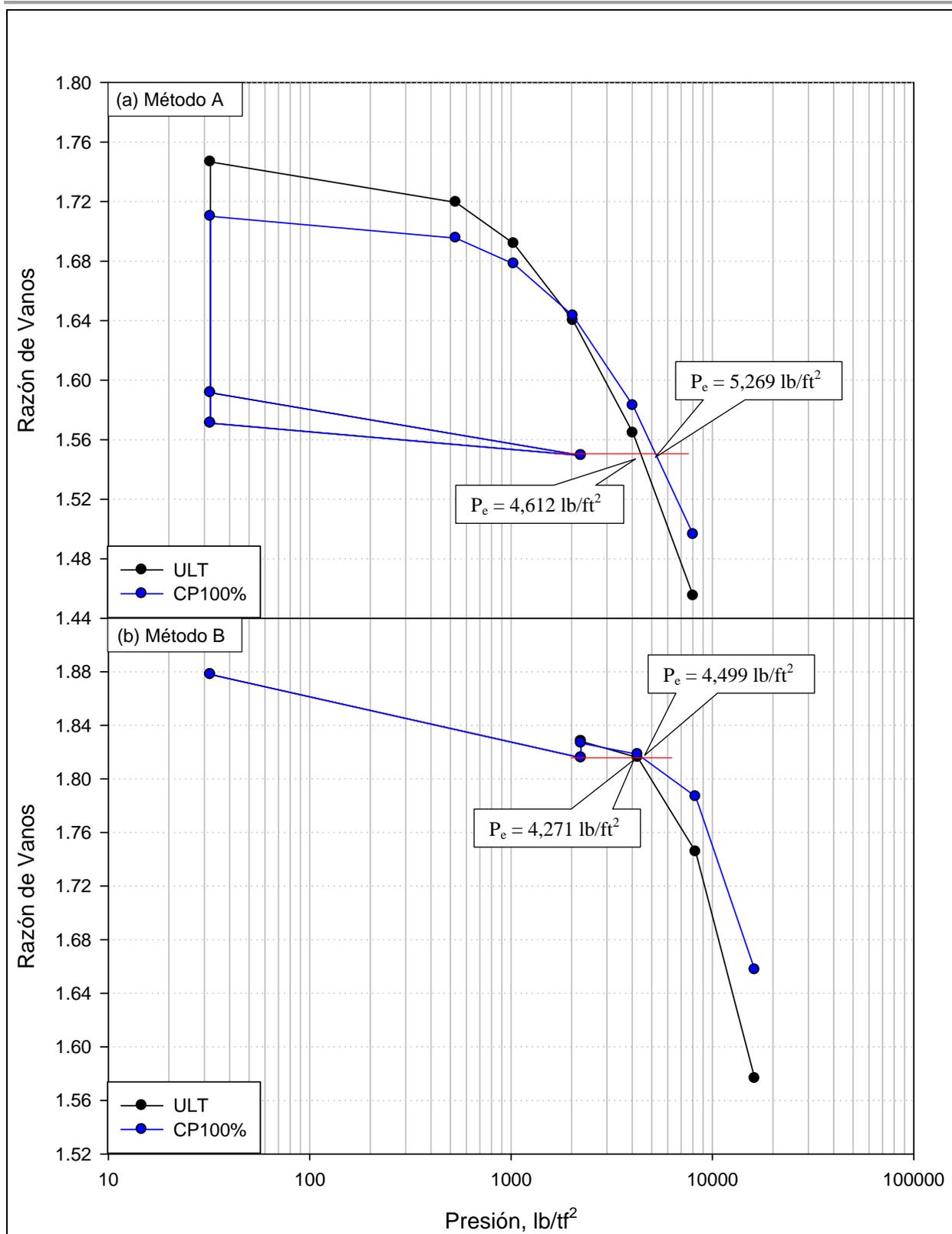


Figura 5.37. Presión de entumecimiento. CM-1-08, Métodos A y B.

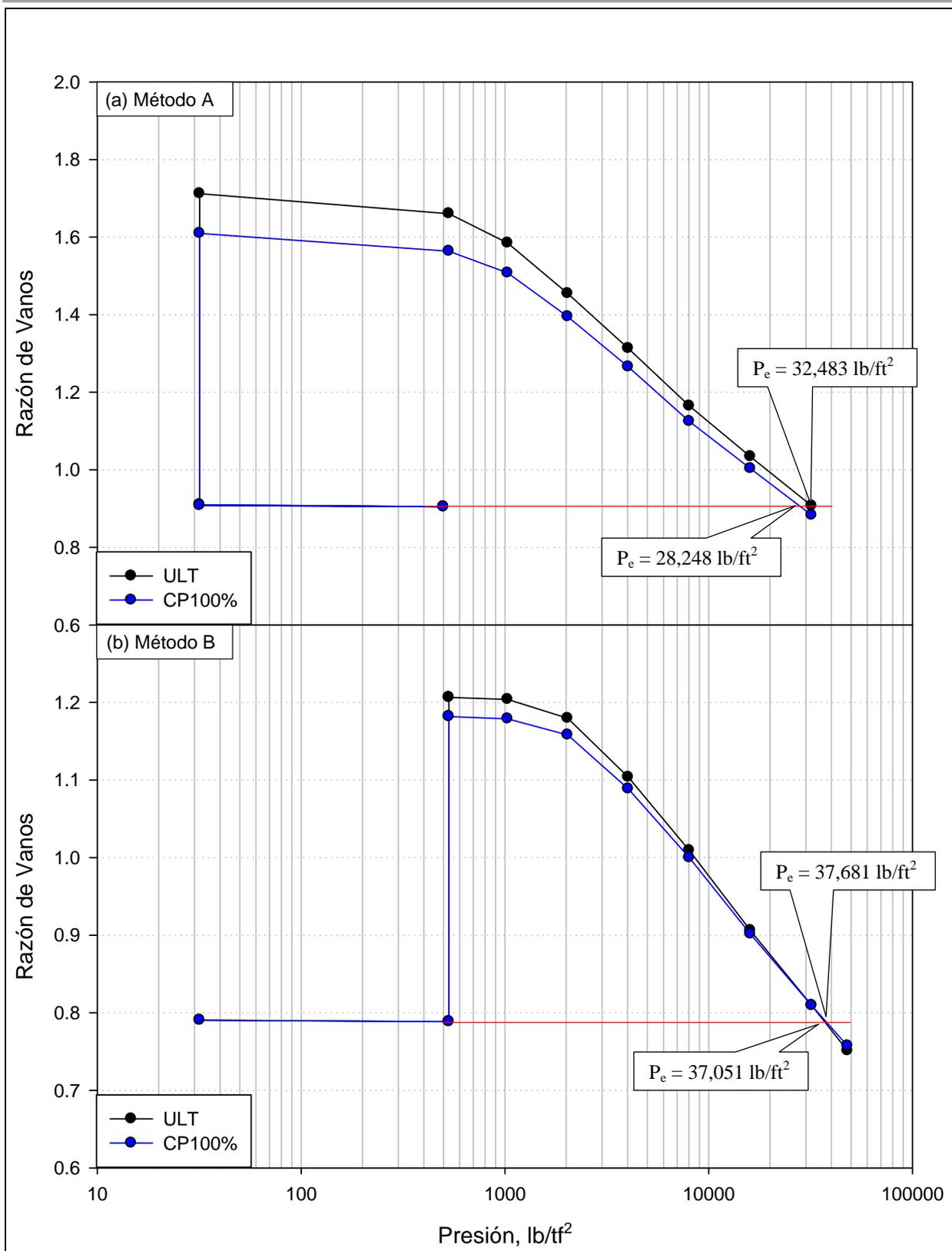


Figura 5.38. Presión de entumecimiento. T 2-6 ft, Métodos A y B.

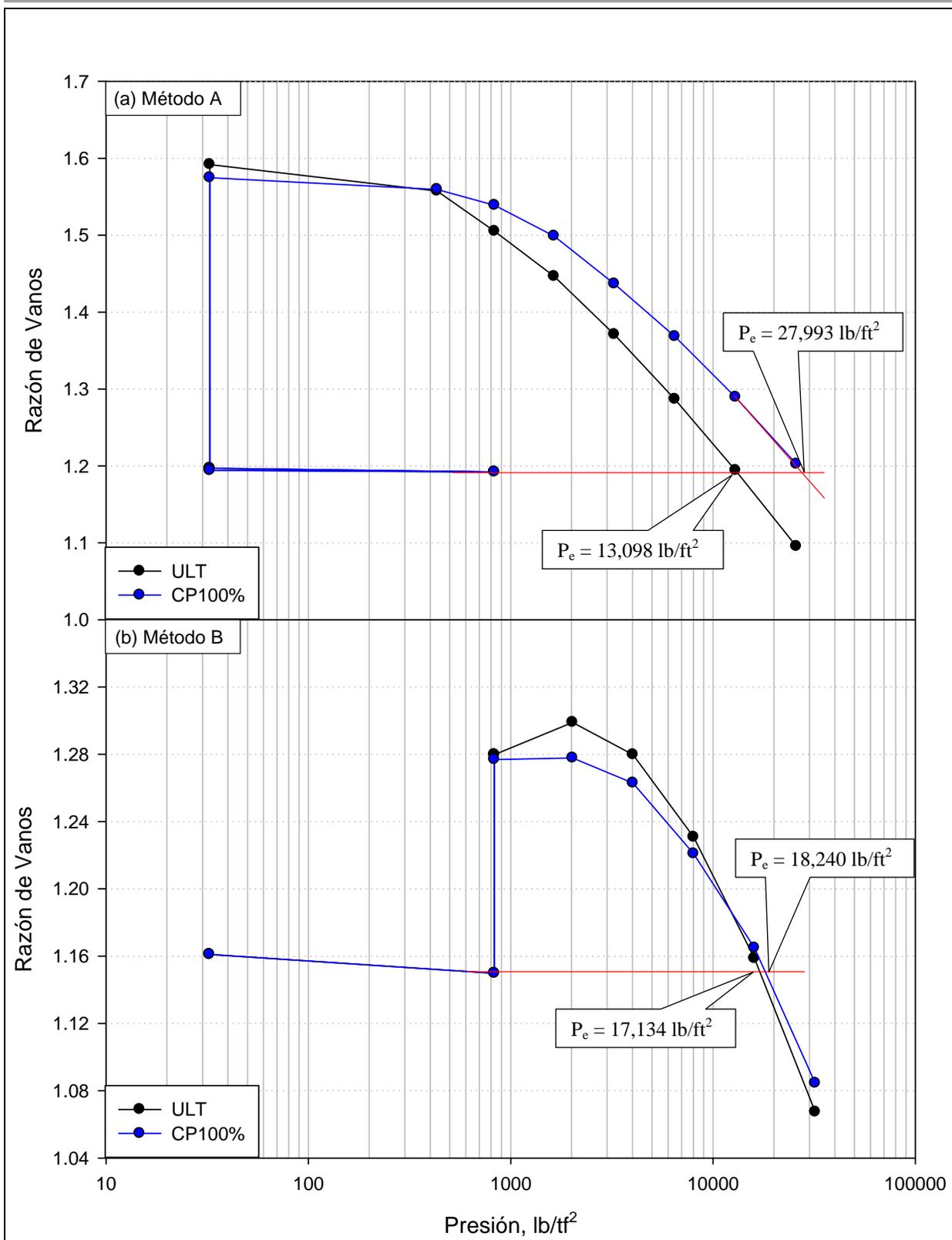


Figura 5.39. Presión de entumecimiento. T 6-8 ft, Métodos A y B.

### 5.5.3. Potencial de cambio volumétrico

El Potencial de Cambio Volumétrico (PVC) se realizó en tres estados; (1) muestra compactada a una humedad por encima de la humedad óptima a base de la prueba Proctor Modificado de compactación, (2) muestra compactada a una humedad por debajo de la humedad óptima y (3) una muestra inalterada con su humedad natural. La Tabla 5.29 resume los resultados obtenidos. Contrario a lo que se esperaba, la muestra más crítica fue la que se preparó por encima de la humedad óptima. En este caso la muestra más húmeda resultó con un índice de expansión de 20,500 psf. La gráfica que propuso Lambe (1,960) sólo define los parámetros hasta un índice de entumecimiento de 8,000 psf. A partir de un índice de entumecimiento de 4,725 psf el potencial de cambio volumétrico se considera muy crítico, por lo tanto todas las muestras caen dentro de esta categoría.

**Tabla 5.29. Resultados PVC.**

Muestra	Índice de Entumecimiento libras/pies <sup>2</sup>	Estado	Peso Unitario Seco libras/pies <sup>3</sup>	Humedad %	PVC	
					Valor	Categoría
T 2-6 ft – 1	20,500	w > w <sub>opt</sub>	92.5	26.1	>> 9	Muy Crítico
T 2-6 ft – 2	12,000	Natural	96.5	25.8	> 9	Muy Crítico
T 2-6 ft – 3	11,025	w < w <sub>opt</sub>	84.4	13.8	> 9	Muy Crítico
T 6-8 ft – 1	6,200	Natural	78.9	39.9	7.7	Muy Crítico

Nota: (1) Estado natural significa muestra de tubo Shelby sin compactar ( $w = w_{nat}$ )  
 (2)  $w_{opt} = 19\%$

Según la prueba de PVC la lectura final se toma dos horas después de haber inundado la muestra. Como se puede apreciar en la Figura 5.40, a las dos horas la muestra T 2-6 ft-1 aún no ha llegado a su capacidad máxima, inclusive no había alcanzado la mitad de su índice de entumecimiento máximo. Por tanto no debe haber un límite de tiempo al momento de determinar este parámetro. En este caso haber detenido la prueba a las dos horas, hubiese afectado el resultado categórico de la prueba. Sin embargo, no todos los suelos se comportan de

la misma manera. La muestra T 6-8 ft se incluyó en la prueba para demostrar esta aseveración. A las dos horas esta muestra tiene un índice de entumecimiento de poco más de 2,120 libras/pies<sup>2</sup> para una categoría de 2.5 clasificando como marginal cuando en realidad genera un índice de entumecimiento de 6,000 libras/pies<sup>2</sup> cayendo en la categoría de 7.5 con una clasificación de muy crítico.

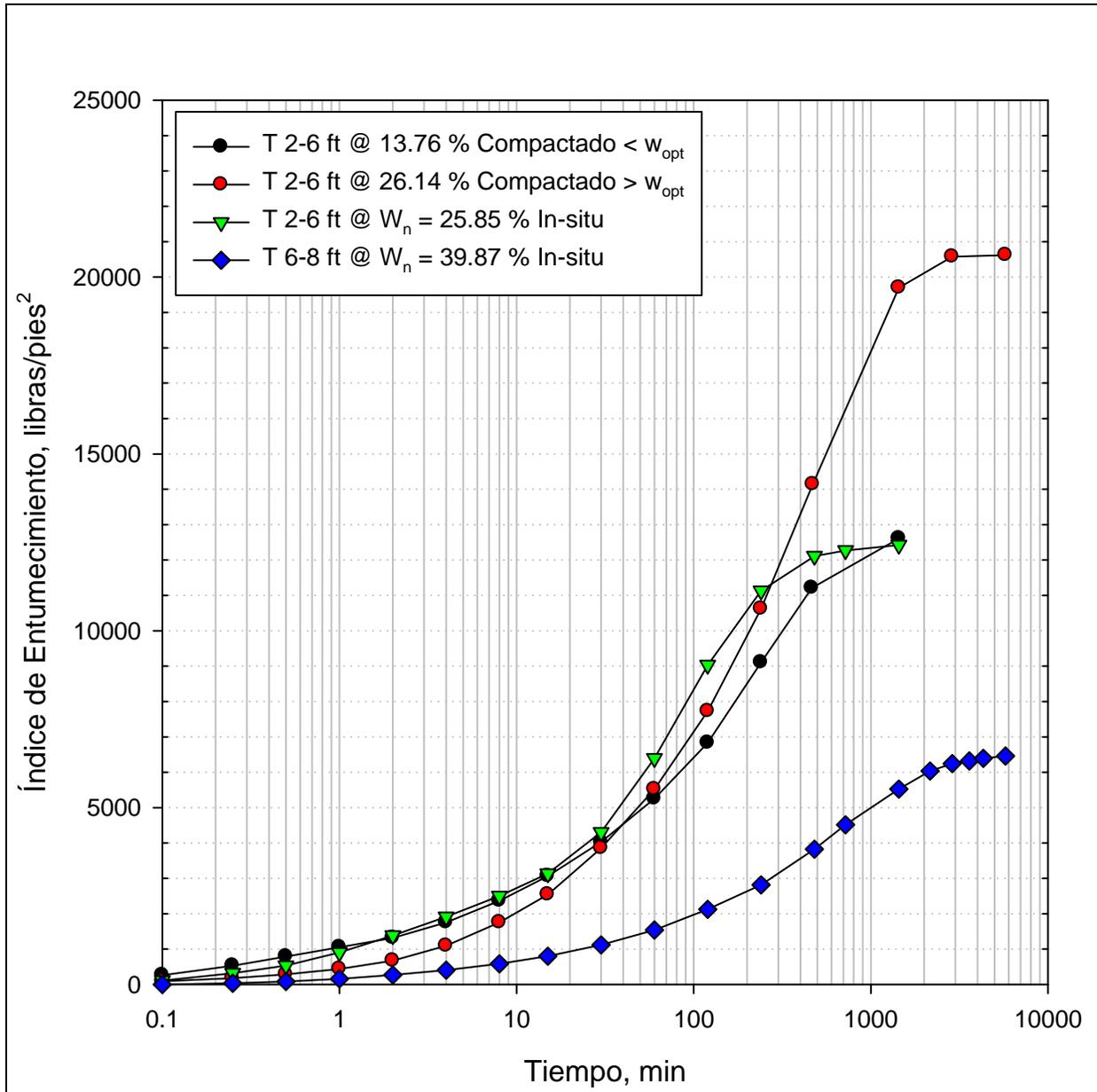


Figura 5.40. Resultados potencial de cambio volumétrico.

En la Figura 5.41 se aprecia cómo se afectan las muestras cuando son inundadas. Éstas sufren un aumento en humedad y una reducción en su peso unitario seco. Las muestras alteradas no coincidieron con la curva debido a que fueron compactadas en el molde original del equipo del PVC y no en la anilla de consolidación.

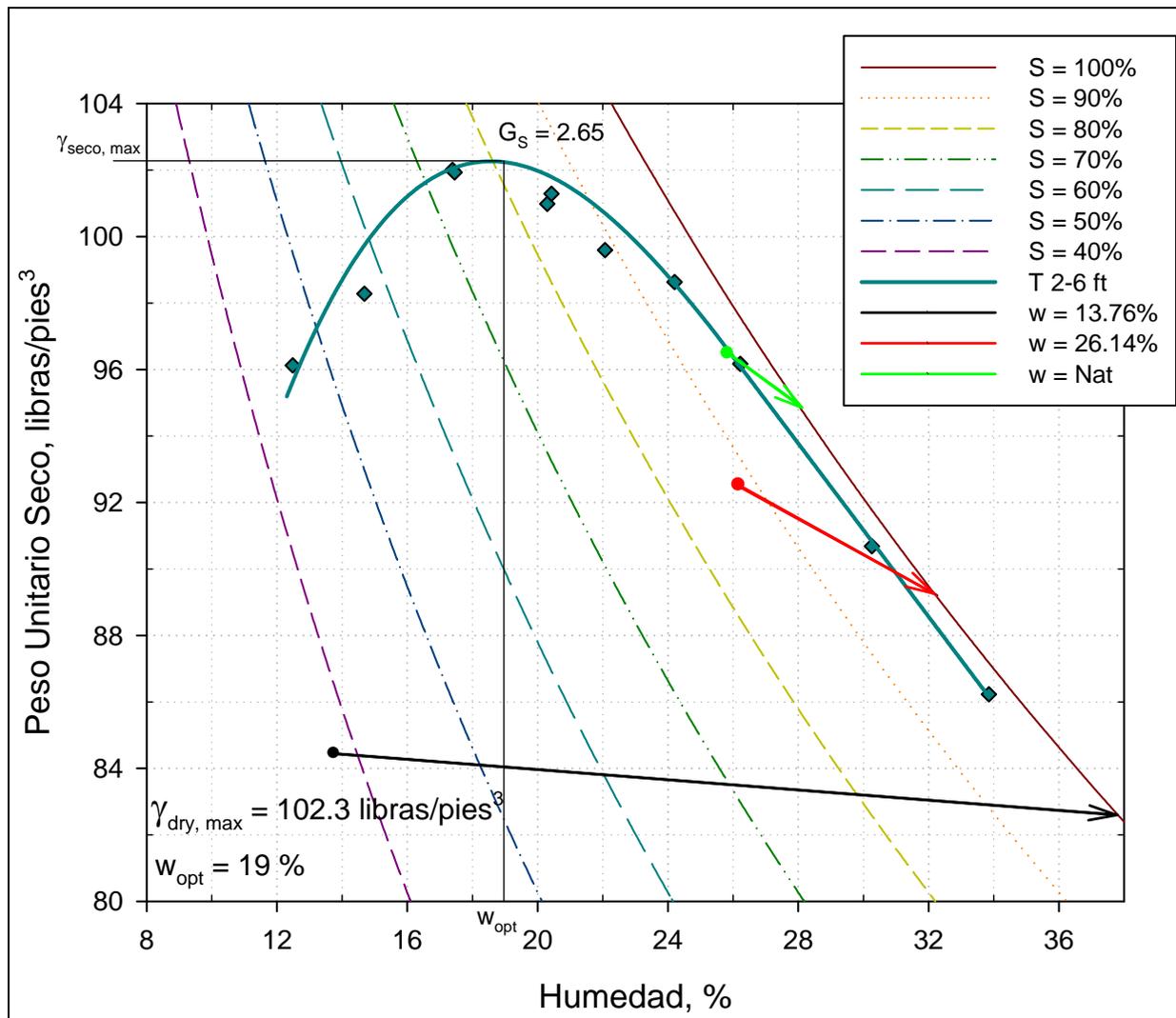


Figura 5.41. Cambio en las muestras debido a la expansión.

#### 5.5.4. Coeficiente de extensión lineal (COLE)

El ensayo COLE es un ensayo de encogimiento utilizado por el Servicio Nacional de Conservación de Suelo (USSCS) y se basa en medir las deformaciones unitarias de muestras inalteradas sin confinar al pasar de un estado inicial con succión de 5 psi a un estado final seco al

horno (succión de 150,000 psi). El ensayo lo describe Brasher et al. (1966). Este ensayo no se llevó a cabo en esta tesis. Sin embargo se estimaron los valores de COLE usando la metodología propuesta por Hamberg (1985) que se basa en la región de la arcilla definida en la Sección 5.4 que se basa en valores de  $CIA_c$  y  $A_c$ . Hamberg (1985) propone estimar los valores de COLE usando la región del suelo (ver Figura 5.42) y la Figura 5.43 que propone diferentes líneas que relacionan COLE con el porcentaje de arcillas del suelo según la región del mismo. La Figura 5.43 muestra que suelos que estén en las Regiones 1 y 2 se consideran con un alto o muy alto potencial de expansión (valores altos de COLE). La Figura 5.43 muestra las siete muestras estudiadas ubicadas según su región (Figura 5.42) y su porcentaje de arcillas. Los valores de COLE estimados con esta metodología de Hamberg (1985) se presenta en la Tabla 5.30.

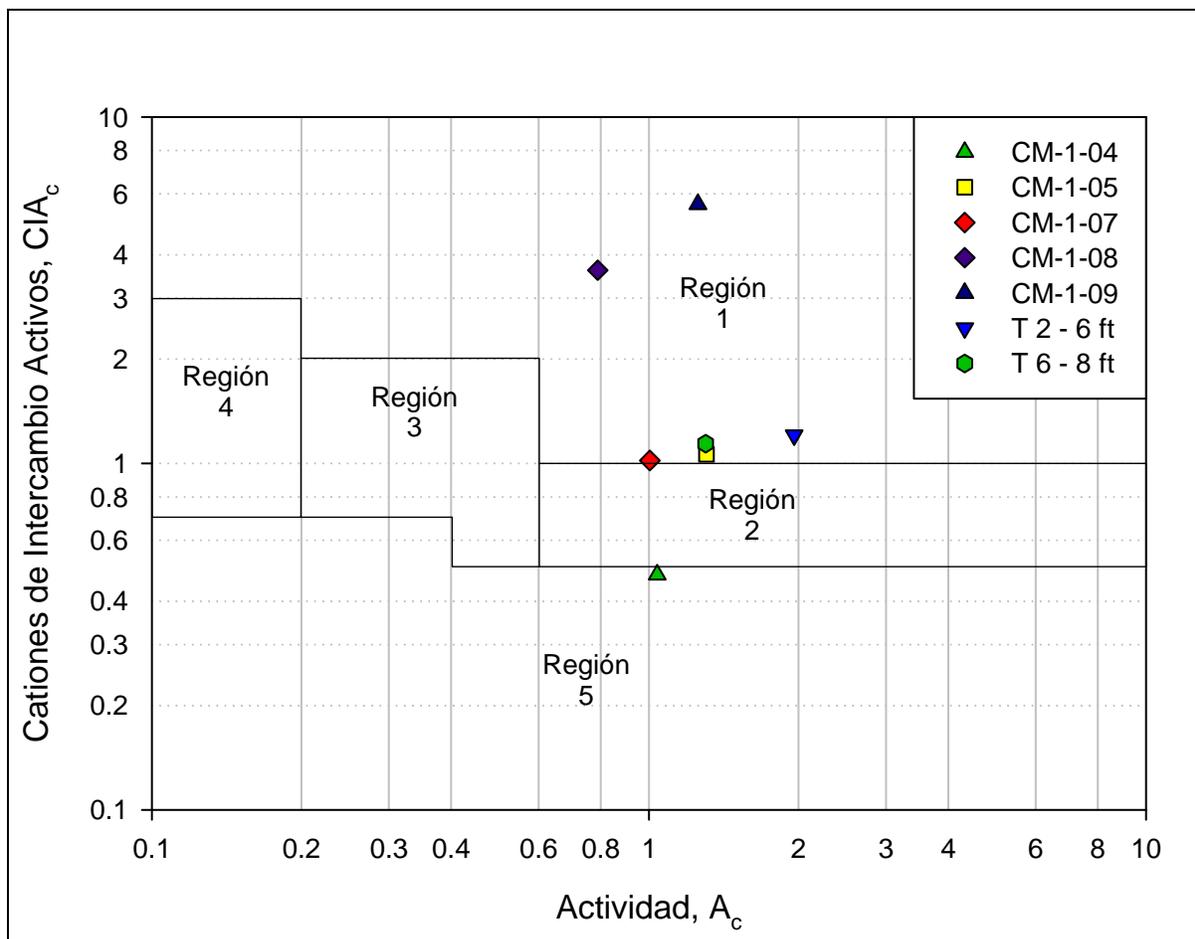


Figura 5.42. Cationes de intercambio activos vs actividad. Adaptado de Hamberg, 1985

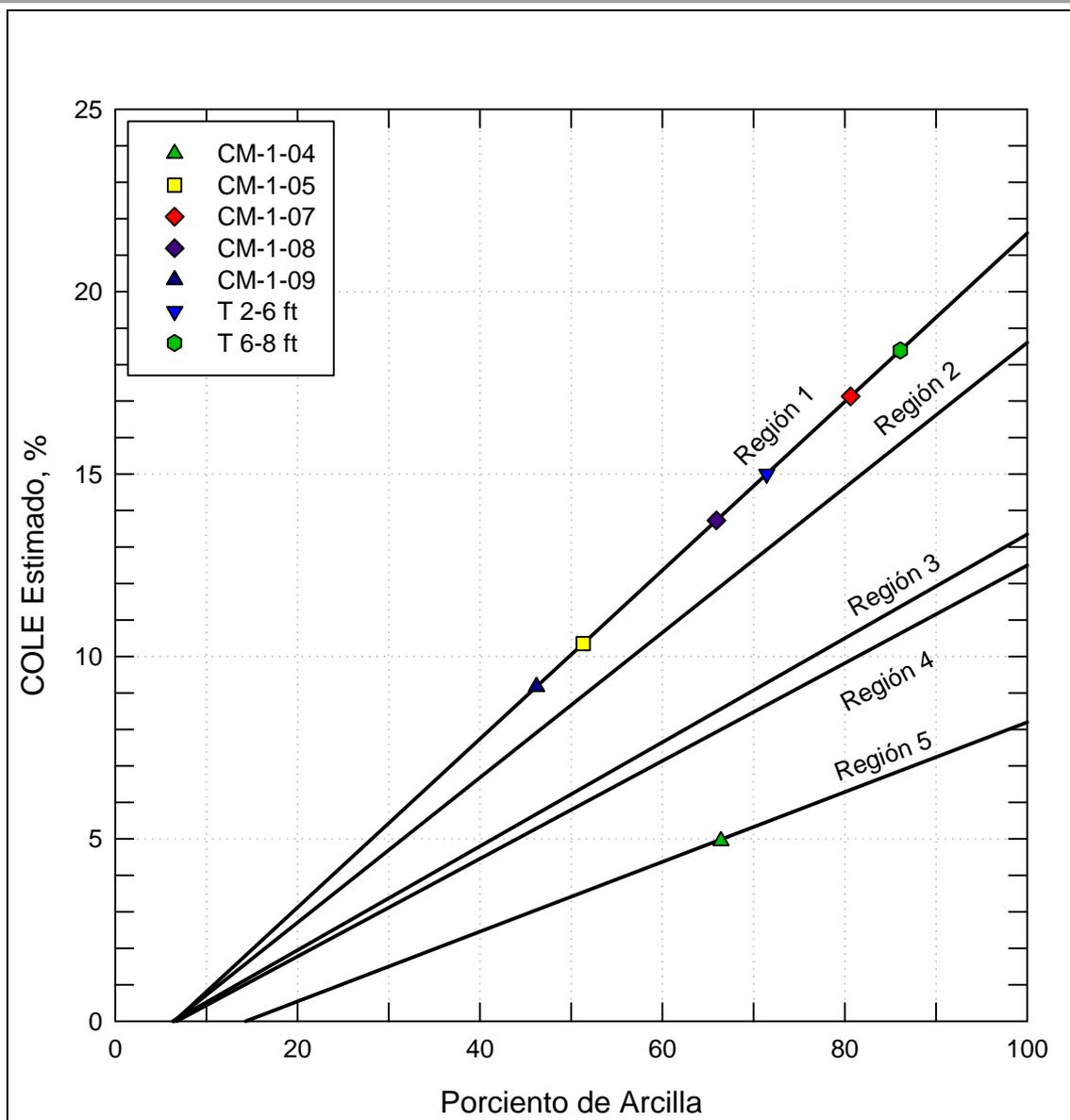


Figura 5.43. Valor del COLE estimado en función del % de arcilla y las regiones de la Figura 5.42

Tabla 5.30. Resumen % de arcilla, región y COLE estimado.

<i>Muestra</i>	<i>% de Arcilla</i>	<i>Región</i>	<i>COLE Estimado</i>	<i>Potencial Expansivo según la Región</i>
CM-1-04	66	5	5	Bajo
CM-1-05	51	1	10	Muy Alto
CM-1-07	81	1	17	Muy Alto
CM-1-08	66	1	14	Muy Alto
CM-1-09	46	1	9	Muy Alto
T 2-6 FT	71	1	15	Muy Alto
T 6-8 FT	86	1	18	Muy Alto

---

Se puede observar que todas las muestras excepto la CM-1-04 son consideradas de un potencial expansivo muy alto. Además en la sección anterior se determinó que por estar estas muestras en la Región No.1 tenían principalmente mineral de montmorilonita ya que es considerado altamente expansivo.

#### *5.5.5. Resumen de mediciones del potencial expansivo*

En esta sección se presentaron los resultados de las diferentes pruebas para determinar parámetros relacionados a la expansión de los suelos. Las muestras más críticas a nivel global fueron las obtenidas de la trinchera. Las muestras CM-1-05 y CM-1-07 también resultaron con valores relativamente altos aunque no siempre estuvieron en categorías críticas. Estas cuatro muestras demostraron tener grandes cantidades de montmorilonita en su mineralogía. La Tabla 5.31 resume la mayoría de los parámetros determinados y su relación con el potencial de entumecimiento de las muestras más críticas.

La Tabla 5.31 presenta que la muestra más crítica es la T 2-6 ft. Con excepción del entumecimiento libre de Holtz y Gibbs (1956) y el MFSI, todas las otras propiedades resultaron estar con valores entre los rangos altos y muy altos. La segunda muestra más crítica lo fue la T 6-8 ft. Ésta presenta valores altos en la mayoría de las propiedades, similar a la muestra T 2-6 ft con excepción de la actividad. Hay una apreciable reducción en los resultados obtenidos entre las muestras de las trincheras y las muestras de los tubos Shelby. La mayoría de las propiedades de estas muestras resultaron con valores moderados. Algunas de las clasificaciones utilizadas en las pruebas aquí presentes son muy amplias y no permiten una distinción acertada para el potencial de entumecimiento entre cada una de las muestras. Otras aparentan no tener una relación tan evidente para asociarla con un alto potencial de expansión. Algunas de las propiedades que no ofrecen mucha información o que requieren una mejor definición para su

rango de clasificación son, la actividad, el COLE, el entumecimiento libre de Holtz & Gibbs (1956) y el MFSI. Para poder categorizar los parámetros obtenidos de la prueba de potencial de entumecimiento de la norma ASTM D 4546 (ASTM, 2003a) es necesario establecer cuál fue la presión de fijado utilizada. Como fue evidenciado, uno de los factores más influyentes en la expansión del suelo es la presión a la que el suelo esté sometido, por tanto la clasificación obtenida está basada en valores que parten de una presión aplicada en específico. En este caso, la presión de fijado fue de 30 libras/pies<sup>2</sup> en todas las muestras.

Tabla 5.31. Resumen de los resultados de las pruebas.

<i>Prueba</i>	<i>CM 1-04</i>	<i>CM 1-05</i>	<i>CM 1-07</i>	<i>CM 1-08</i>	<i>CM 1-09</i>	<i>T 2-6 ft</i>	<i>T 6-8 ft</i>
Índice de Plasticidad, %	A <sup>1</sup> 69	A 67	MA <sup>1</sup> 81	A 52	A 58	EA <sup>1</sup> 140	EA 112
Límite Líquido, %	MA 101	A 92	MA 138	A 86	A 82	EA 169	EA 155
Actividad	M <sup>1</sup> 1.04	M 1.31	M 1.00	M 0.79	M 1.26	A 1.96	M 1.30
Área Superficial, m <sup>2</sup> /g	M 177.4	M 250.4	A 446.4	A 420.3	M 350.4	A 456.2	A 464.8
CIC Total <sup>2</sup> , cmol <sub>c</sub> /kg	M 31.8	M 54.5	A 82.2	MA 238.1	MA 258.5	A 86.0	A 98.2
Entumecimiento Libre, %	M 120	M 150	M 220	M 190	M 150	M 250	M 220
MFSI	M 4.25	M 6.50	M 7.00	M 6.00	M 4.00	M 9.00	M 7.25
Presión de Entumecimiento <sup>3,4</sup> , libras/pies <sup>2</sup>	M 9,462	A 12,491	M 4,253	M 4,612	N/D <sup>1</sup>	EA 32,483	A 13,098
Entumecimiento Libre <sup>3,4</sup> , %	M 5.03	M 14.25	M 8.17	M 7.74	N/D	MA 42.16	A 18.23
Porcentaje de Levantamiento <sup>3,4</sup>	M 4.38	M 11.06	M 3.43	M 3.40	N/D	MA 39.43	A 14.26
PVC <sup>5</sup>	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	EA 12,000	EA 6,200
COLE Estimado	B <sup>1</sup> 5	MA 10	MA 17	M 14	MA 9	MA 15	MA 18

Nota: (1) B = Bajo; M = Moderado; A = Alto; EA = Extremadamente Alto; N/D = No Determinado  
 (2) CIC a base de la fracción de arcilla  
 (3) Basado en el Método A del estándar ASTM D 4546.  
 (4) Resultados a base de una presión de fijado de 30 libras/pies<sup>2</sup>  
 (5) Basado en la muestra con humedad natural.

---

## **5.6. Tendencias y relaciones entre los resultados**

Muchas investigaciones han consistido en relacionar diferentes pruebas y parámetros con el potencial de expansión o factores relacionados como la presión de entumecimiento, entumecimiento libre, entre otros (Avsar, et al., 2005; Ulusay y Erguler, 2003; Thomas, P. J., 1998; Thomas, et al., 2000). En esta sección se presentan relaciones o correlaciones que aparentan tener algunas de las muestras con los métodos utilizados en esta investigación. También se comparan algunas de las propiedades determinadas en algunas de las pruebas. La misma tiene como propósito servir de guía para la búsqueda de más y mejores aproximaciones y métodos de identificar suelos con potencial de expansión.

Los resultados de potencial de entumecimiento de la gráfica propuesta por Seed, et al. (1962), se presentan en la Figura 5.44. Estos resultados se resumen en la Tabla 5.32. Como se puede ver, las muestras que resultaron con altos índices de plasticidad, son las que según la Figura 5.44 son más propensas a expandirse. Estos resultados concuerdan con los resultados del Entumecimiento Libre y el MFSI donde las muestras más críticas son la CM-1-07, T 2-6 ft y T 6-8 ft, siendo la segunda de estas muestras, la más crítica de todas. Esta gráfica también concuerda con los resultados obtenidos en las muestras de las trincheras tanto para la prueba de potencial de entumecimiento como la prueba de PVC.

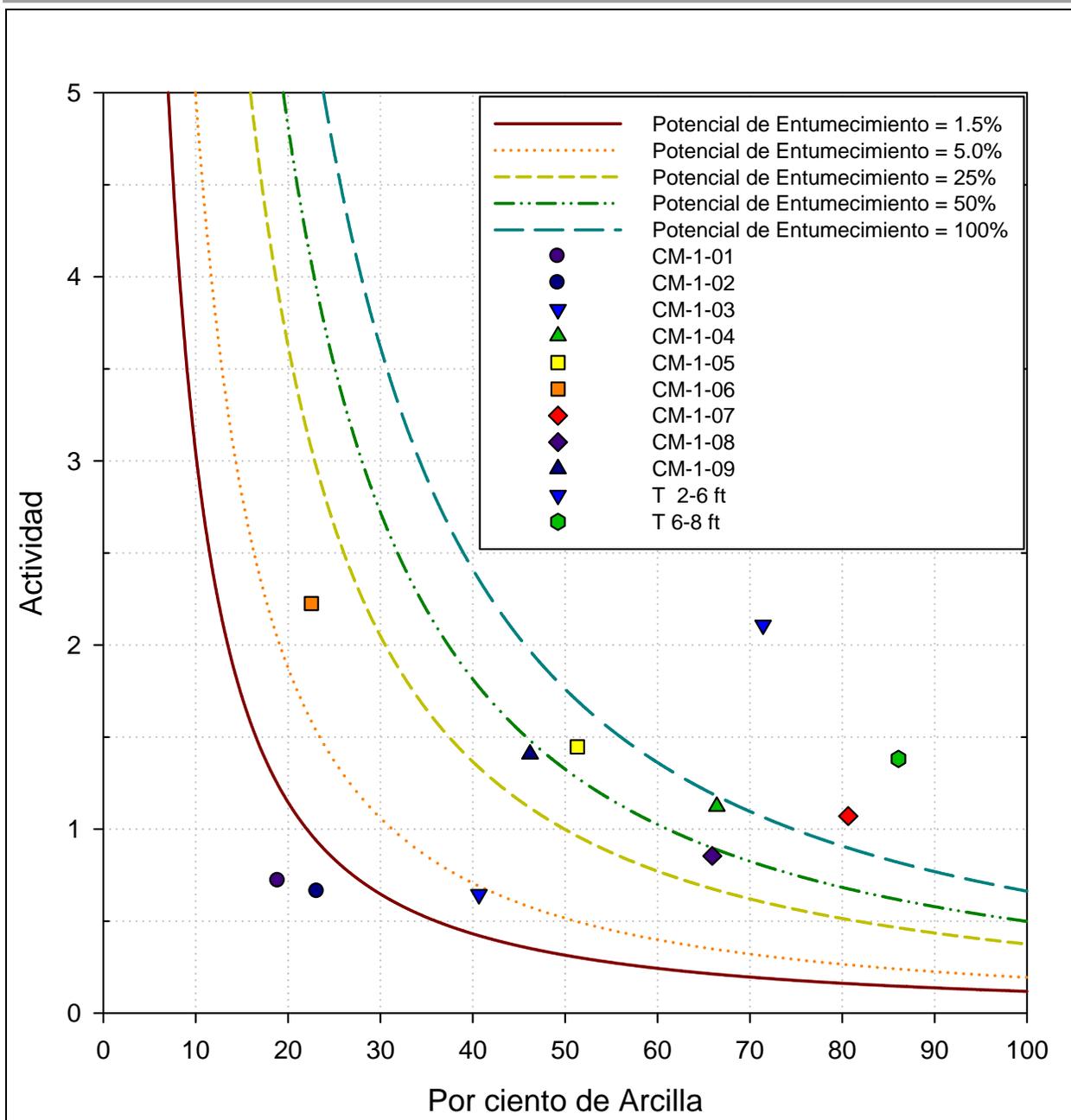


Figura 5.44. Relación entre actividad y potencial de entumecimiento usando relación de Seed et al. (1962).

Tabla 5.32. Resumen Potencial de entumecimiento. Figura 5.44.

<i>Muestra</i>	<i>% de Arcilla</i>	$A = \frac{PI}{C - n}$	<i>Potencial de Entumecimiento</i>
CM-1-01	15.13	0.99	Bajo
CM-1-02	23.61	0.64	Bajo
CM-1-03	36.98	0.72	Medio
CM-1-04	62.52	1.20	Muy Alto
CM-1-05	47.66	1.57	Muy Alto
CM-1-06	18.77	2.83	Alto
CM-1-07	76.25	1.14	Muy Alto
CM-1-08	62.26	0.91	Muy Alto
CM-1-09	42.33	1.55	Muy Alto
T 2-6 ft	67.80	2.23	Muy Alto
T 6-8 ft	82.34	1.45	Muy Alto

Una característica importante en estas pruebas es la absorción de agua de las muestras. Por tanto, la Tabla 5.33 resume el cambio en contenido de humedad de las muestras obtenidas de los métodos A y B de la prueba ASTM D 4546 (ASTM, 2003a). Estos cambios de humedades tienen un efecto directo sobre la presión de entumecimiento, el entumecimiento libre y el porcentaje de levantamiento de las muestras. Esta tabla muestra que a mayor presión aplicada (Método A vs Método B), los cambios en humedades se reducen drásticamente. En las Figuras 5.45 y 5.46 se aprecian el efecto que tiene este factor en los parámetros determinados por estas pruebas. A base de estas gráficas se puede interpretar que a mayor incremento en humedad, mayores son los efectos experimentados por las muestras.

En la Figura 5.45 se observa que las muestras son más sensitivas al cambio de humedad cuando están sometidas a unas presiones mayores. Esto es, que para un mismo incremento en humedad, las muestras analizadas por el método B resultaron en una presión de entumecimiento mayor que las muestras analizadas por el método A. Por ejemplo, una muestra que tenga un 20% en incremento de humedad, puede generar una presión de entumecimiento de 9,000 libras/pies<sup>2</sup> bajo el método A y 18,000 libras/pies<sup>2</sup> bajo el método B.

**Tabla 5.33. Cambio de humedades ASTM D 4546 Método A y Método B.**

Muestra  ID	Método A				Método B			
	Contenido de Humedad				Contenido de Humedad			
	Inicial %	Final %	$\Delta$	% aumento	Inicial %	Final %	$\Delta$	% aumento
CM-1-04	23.23	27.18	3.95	17.01	25.71	29.85	4.14	16.10
CM-1-05	30.2	40.82	10.62	35.18	-	-	-	-
CM-1-07	43.99	55.91	11.92	27.10	47.40	54.68	7.28	15.36
CM-1-08	51.33	61.72	10.39	20.24	57.62	64.60	6.98	12.11
CM-1-09	-	-	-	-	-	-	-	-
T 2-6 ft	34.58	64.99	30.41	87.94	29.84	48.29	18.45	61.84
T 6-8 ft	41.45	58.31	16.86	40.69	40.50	46.88	6.38	15.75

El incremento en humedad resultó tener un efecto directamente proporcional con el entumecimiento libre y el porcentaje de levantamiento en ambos métodos. La Figura 5.46 es muestra de esta aseveración. Al igual que la presión de entumecimiento, esta relación también aparenta ser lineal para ambos parámetros. De esta figura se aprecia que a pesar de existir cierta variación con las regresiones, las mismas están muy cercanas entre sí. Las Tablas 5.34 y 5.35 resumen los cambios en razón de vanos, humedad y saturación para cada una de las muestras. Estos valores representan los cambios desde el punto más bajo hasta el punto más alto durante el entumecimiento de la muestra.

**Tabla 5.34. Cambios en razón de vanos, humedad y saturación, Método A.**

<i>ID Muestra</i>	<i>Humedad Inicial %</i>	<i>e Inicial</i>	<i>Saturación Inicial %</i>	<i>Humedad Final %</i>	<i>e Final</i>	<i>Saturación Final %</i>
CM-1-04	23.23	0.6612	96.27	27.18	0.7448	100.00
CM-1-05	30.20	0.9045	96.16	40.82	1.1758	100.00
CM-1-07	43.99	1.3562	89.85	55.91	1.5488	100.00
CM-1-08	51.33	1.5494	93.76	61.72	1.7467	100.00
CM-1-09	-	-	-	-	-	-
T 2-6 ft	34.58	0.9149	100.16	64.99	1.7222	100.00
T 6-8 ft	41.45	1.1923	94.91	58.31	1.5920	100.00

**Tabla 5.35. Cambios en razón de vanos, humedades y saturación, Método B.**

<i>ID Muestra</i>	<i>Humedad Inicial %</i>	<i>e Inicial</i>	<i>Saturación Inicial %</i>	<i>Humedad Final %</i>	<i>e Final</i>	<i>Saturación Final %</i>
CM-1-04	25.71	0.767	91.81	29.85	0.818	100.00
CM-1-05	-	-	-	-	-	-
CM-1-07	47.4	1.493	87.95	54.68	1.515	100.00
CM-1-08	57.62	1.816	89.80	64.60	1.828	100.00
CM-1-09	-	-	-	-	-	-
T 2-6 ft	29.84	0.798	99.09	48.29	1.216	100.00
T 6-8 ft	40.5	1.150	96.15	46.88	1.280	100.00

Otra observación realizada es el efecto de la actividad de las arcillas sobre los parámetros determinados en la prueba de potencial de entumecimiento. La Figura 5.47 presenta los comportamientos observados. Como se puede apreciar, a medida en que la actividad de la arcilla es mayor, todos los parámetros también son mayores. En esta ocasión, el efecto que tiene la actividad no es lineal como aparenta serlo con el incremento porcentual de la humedad.

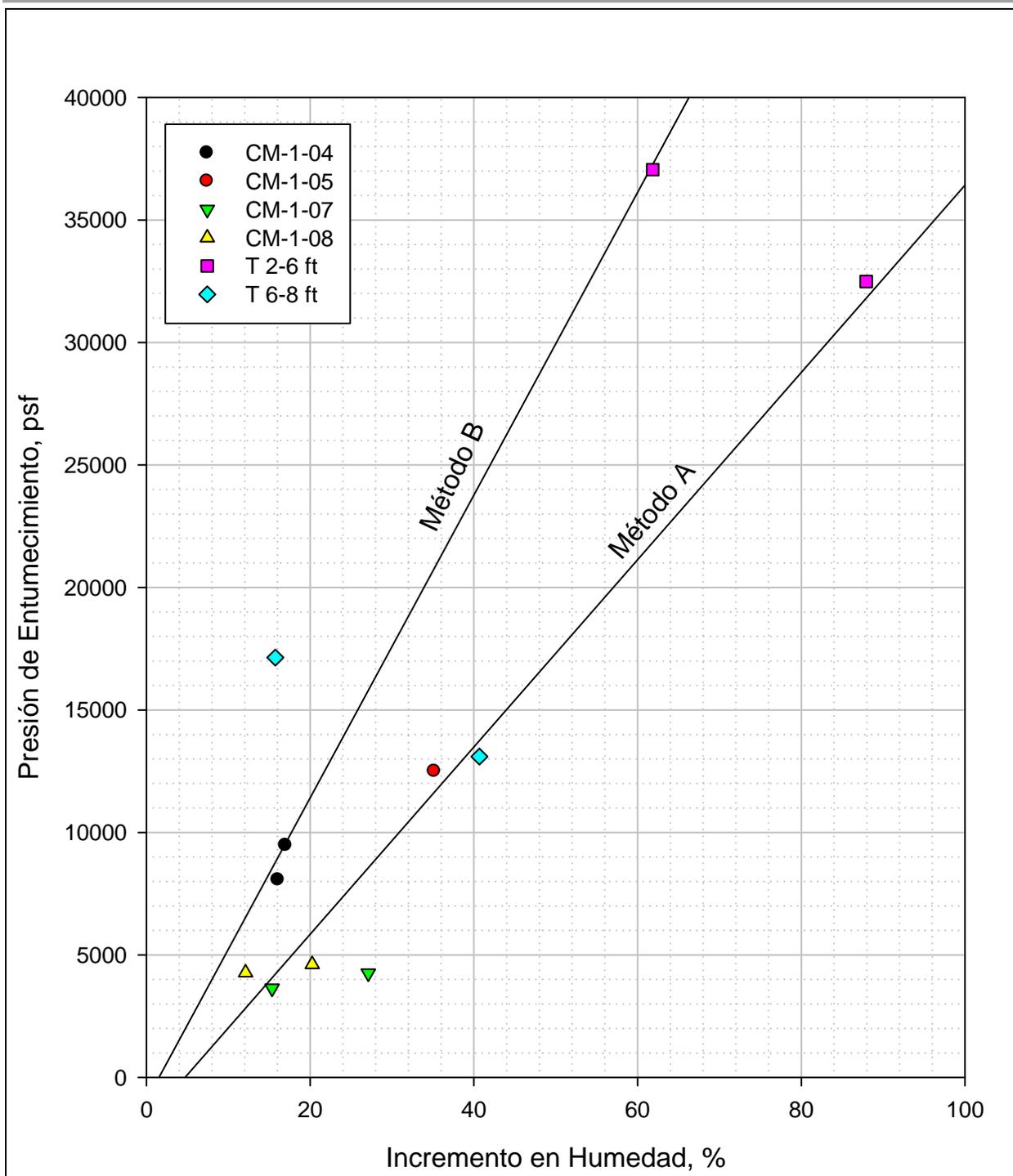


Figura 5.45. Relación entre la presión de ennumecimiento y el incremento en humedad medido.

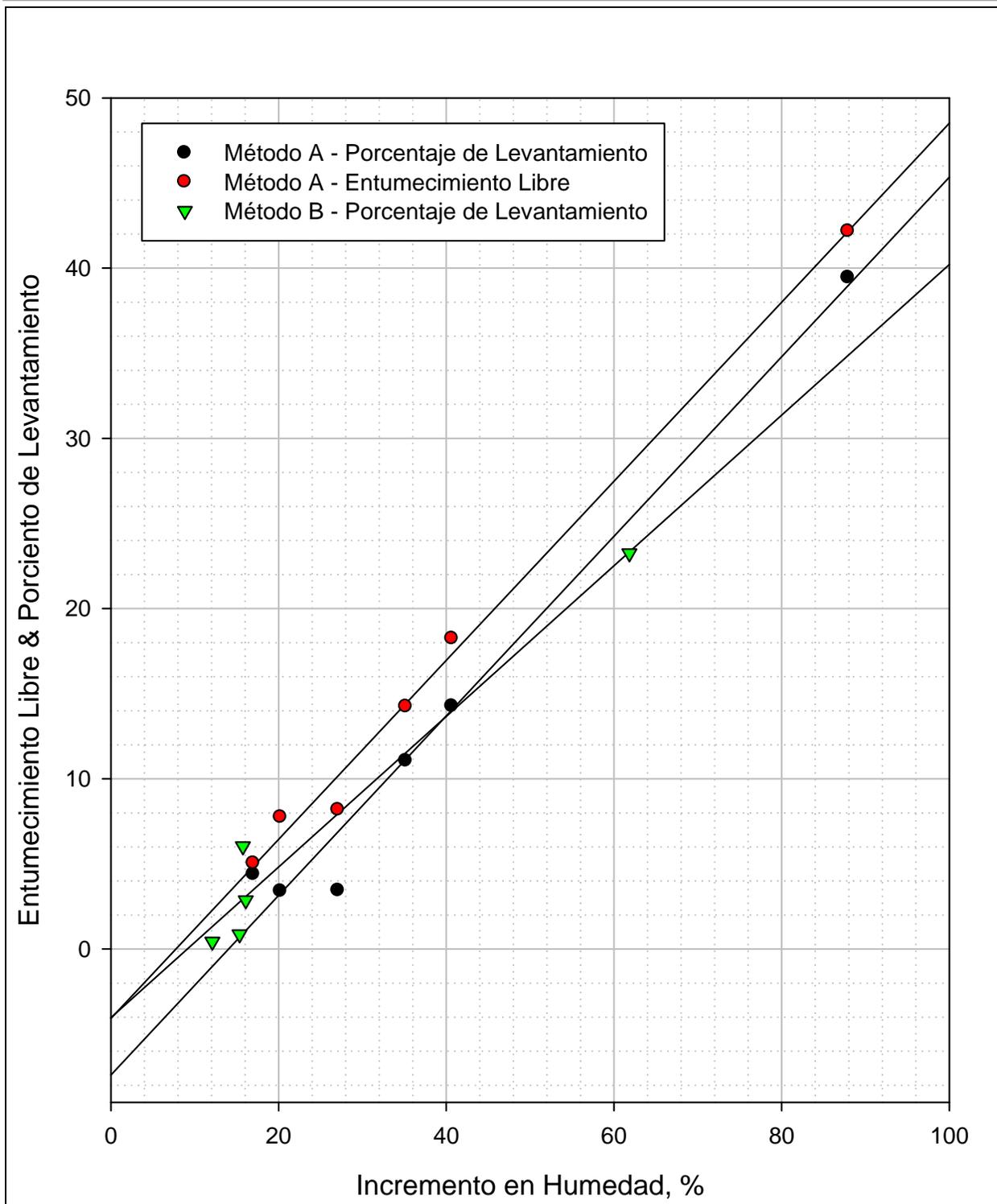


Figura 5.46. Relación entre entumecimiento libre y porcentaje de levantamiento vs incremento en humedad medido.

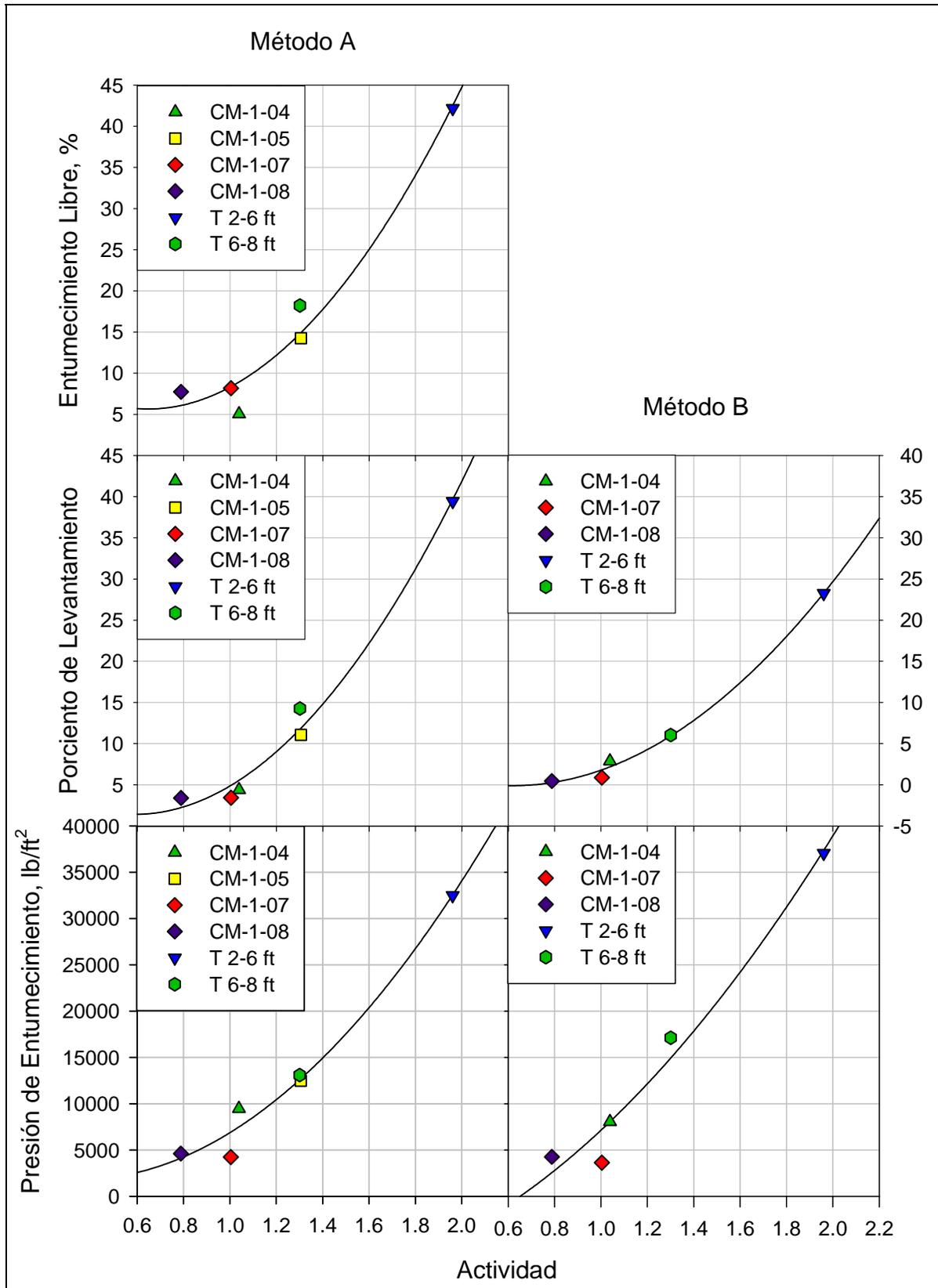


Figura 5.47. Regresiones entre parámetros de presión de entumecimiento y la actividad.

Las diferencias entre los métodos A y B de la prueba de potencial de entumecimiento, demostró que uno de los factores más influyentes en la capacidad del suelo para generar presiones y deformaciones es la presión in-situ o la presión a la que estará sometido el suelo debido a la estructura que vaya a ser construida sobre el mismo. La Figura 5.48 muestra el efecto que tiene la presión in-situ sobre las muestras estudiadas. Como se aprecia en esta figura, a medida en que el suelo está sometido a una mayor presión, menor será la presión de entumecimiento.

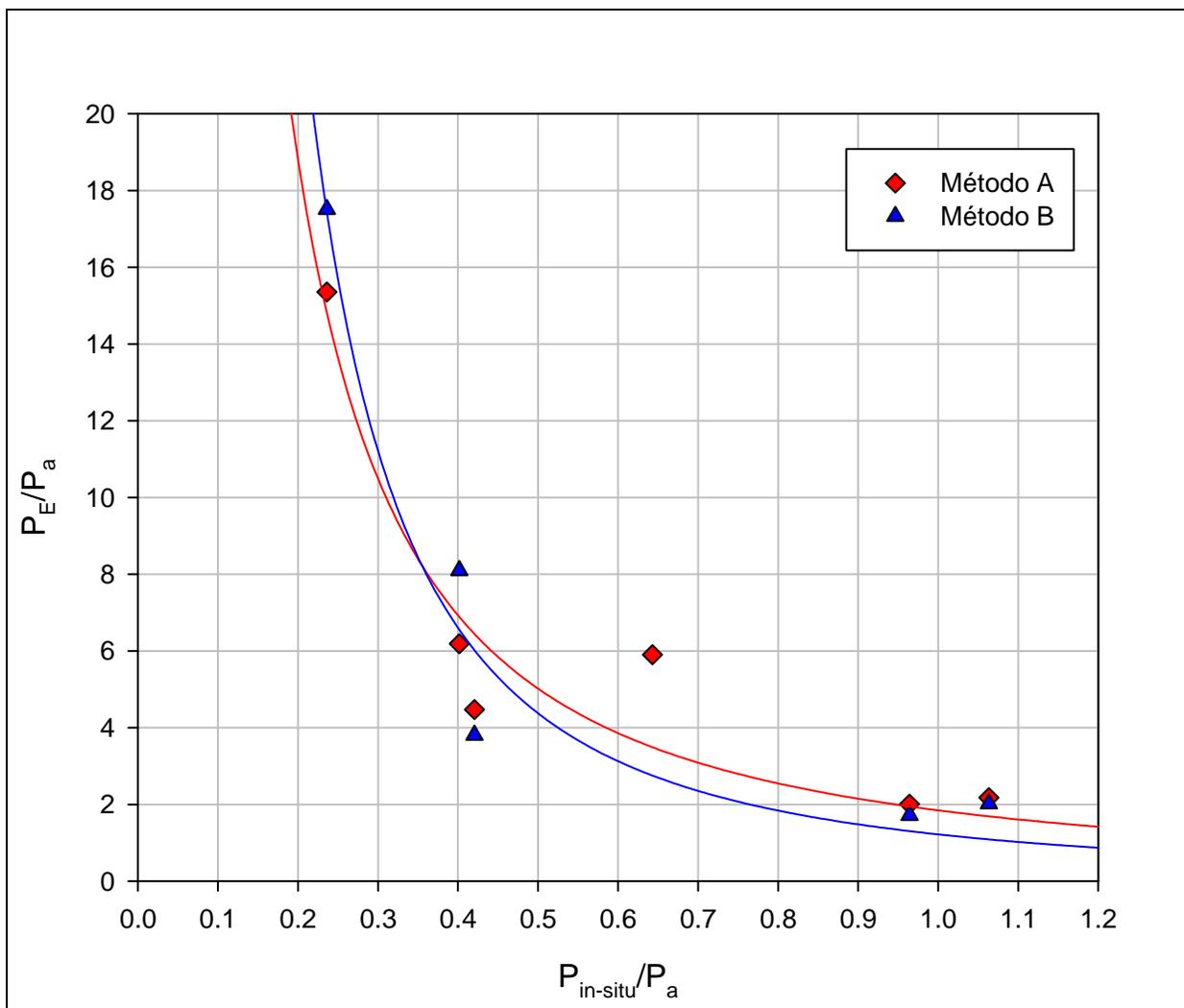


Figura 5.48. Regresión entre presión de entumecimiento y la presión in-situ.

Si utilizamos las regresiones presentadas en las Figura 5.47 para estimar la presión de entumecimiento a base de la actividad del suelo podríamos obtener valores con un porcentaje de error promedio mayor del 20%. Este margen de error hace ineficiente la regresión presentada. De igual forma si estimáramos la presión de entumecimiento utilizando las regresiones de la Figura 5.48 tendríamos un porcentaje de error promedio muy alto. Aunque estas regresiones aparentan ser un patrón lógico en estas muestras, matemáticamente no se pueden sostener. Sin embargo, utilizando ambas regresiones, los resultados pueden mejorarse considerablemente. Una combinación de las regresiones puede reducir el porcentaje de error promedio por debajo del 5%.

Las regresiones que aquí se presentan corresponden a las obtenidas por el método A. Las regresiones obtenidas por el método B tienen resultados menos exactos. Las ecuaciones utilizadas para las dos aproximaciones determinadas son las siguientes:

$$C = B*(2.251*A^{-1.21}) \quad (5.1)$$

$$E = 11.729*D^2 - 7.998*D + 3.146 \quad (5.2)$$

donde;  $A = \frac{\sigma_{in-situ}}{\sigma_{atm}}$ , la presión in-situ normalizada por una (1) atmósfera

$B = \frac{\sigma_{in-situ}}{\sigma_{atm}} * \sigma_{atm}$ , para cambiar la ecuación a las unidades deseadas

$C$  = presión de entumecimiento a base de la presión in-situ, en la unidad deseada

$D$  = Actividad

$E$  = presión de entumecimiento a base de la actividad, en ksf

$$\text{Presión de Entumecimiento Estimado} = 0.339*C + 0.711*E \quad (5.3)$$

La Tabla 5.36 resume los resultados obtenidos por cada una de las ecuaciones utilizadas. La Figura 5.49 muestra la relación entre el resultado medido y el resultado estimado.

Tabla 5.36. Resumen de valores estimados para las ecuaciones propuestas. Método A.

Muestra	$\sigma_{pe}$ Medido ksf	$\sigma_{in-situ}/\sigma_{am}$ ksf/ksf	$\sigma_{pe}$ Estimado ksf	Actividad	$\sigma_{pe}$ Estimado ksf	$\sigma_{pe}$ Corregido ksf
CM-1-04	9.462	0.42	13.583	1.04	7.493	9.93
CM-1-05	12.491	0.64	8.132	1.31	12.695	11.78
CM-1-07	4.253	0.96	4.979	1.00	6.944	6.63
CM-1-08	4.612	1.06	4.422	0.79	4.134	4.44
CM-1-09	-	1.60	2.703	1.26	11.585	9.15
T 2-6 ft	32.483	0.24	27.290	1.96	32.537	32.39
T 6-8 ft	13.098	0.40	14.360	1.30	12.592	13.82

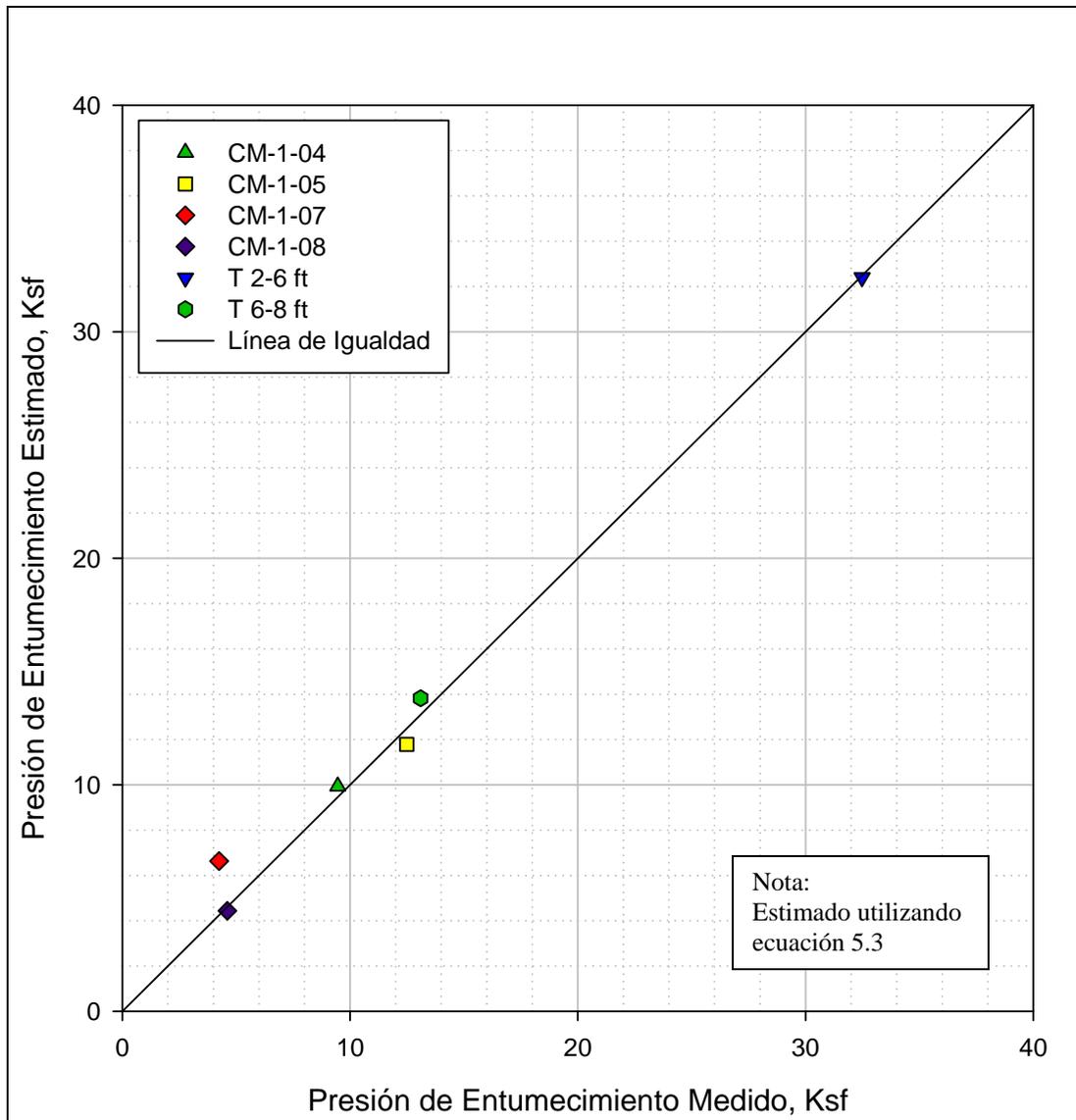


Figura 5.49. Comparación entre la presión de entumecimiento estimada y los valores medidos.

Como se muestra en la Tabla 5.36 los valores estimados con las ecuaciones de forma individual no son consecuentes con la certeza de los resultados. En cambio, puede apreciarse una convergencia mejor cuando se combinan ambas ecuaciones. La Figura 5.49, compara los valores medidos y los estimados con la línea de igualdad. Todas las muestras con excepción de la muestra CM-1-07 tienen resultados muy similares. Los resultados de esta muestra en las ecuaciones individuales presentan errores mayores del 40%.

Todas las correlaciones que se presentan en esta sección no pueden definirse como certeras. Las tendencias y ecuaciones aunque parecen ser razonables carecen de una cantidad significativa de muestras y resultados que puedan servir como base de una asunción sólida. Por lo tanto, estas correlaciones y ecuaciones son únicamente preliminares y aplican a suelos que sean similares a los aquí estudiados. Más investigaciones deben surgir al respecto para corroborar los argumentos que han sido planteados. Sin embargo estas tendencias y correlaciones mencionadas abren la posibilidad a nuevos métodos de aproximación para la determinación de los parámetros como la presión de entumecimiento, el entumecimiento libre y el porcentaje de levantamiento. Poder aproximar estos parámetros de una manera más eficiente y sencilla permite obtener un concepto más seguro del potencial expansivo de un suelo.

## **Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones**

---

---

### **6.1. Resumen**

Esta tesis tenía como objetivo central el evaluar y clasificar el potencial expansivo de unos suelos arcillosos del área de Cabo Rojo, Puerto Rico. Para esto se siguió la siguiente metodología:

- Revisión de literatura detallada dividida en dos temas centrales: 1) revisión de literatura relacionada al tema general de la tesis, es decir suelos expansivos (detección, evaluación, y caracterización); 2) revisión de literatura sobre estudios previos sobre el tema de suelos expansivos pero específicamente para Puerto Rico.
- Selección de un área de estudio basado en geología y experiencia previa con suelos expansivos en el área (basado en entrevistas a compañías consultoras geotécnicas).
- Estudio detallado del área de muestreo. Esto involucró primero estudios preliminares de información geológica, geotécnica, estudios de suelos agrícolas, etc. Luego se realizó un estudio geotécnico que consistió en excavar dos trincheras de exploración para muestreo, pruebas in-situ de cono dinámico y penetrómetro de bolsillo, descripción visual de los suelos in-situ, etc. Preparación de un perfil detallado de las trincheras usando datos de campo y pruebas de laboratorio como humedad natural, granulometría, límites de Atterberg, gravedad específica, entre otras. La mayoría de las muestras inalteradas se reservaron para evaluación mineralógica de los suelos y para la determinación de las distintas propiedades de expansión.

- 
- Estudio de laboratorio detallado de muestras seleccionadas. Esta parte involucró dos componentes principales: 1) estudio mineralógico de muestras selectas; 2) estudio detallado del potencial expansivo de muestras selectas.
    - El componente experimental de laboratorio del estudio mineralógico incluyó las siguientes pruebas: pH, área superficial, capacidad de intercambio catiónico específico y total (CIC), difracción de rayos X (XRD) cualitativos y cuantitativos, ensayos de fluorescencia de rayos X (XRF), análisis por diferencia termal (DTA), espectroscopia de infrarrojo (IRS), y microscopia electrónica de rastreo (imágenes de SEM).
    - El componente experimental de laboratorio del estudio de potencial expansivo incluyó las siguientes pruebas: entumecimiento libre y el índice MFSI, potencial de entumecimiento (presión de entumecimiento y deformaciones), potencial de cambio volumétrico (PVC), estimado del coeficiente de extensión lineal (COLE), y un análisis de resultados y estimados usando correlaciones con propiedades de los suelos.

En la revisión de literatura se encontró que no existía mucha información o estudios sobre suelos expansivos en Puerto Rico. Una entrevista a compañías consultoras de ingeniería geotécnica por Ochoa y Pando (2005) encontró que varias compañías consideran que existen suelos expansivos en Puerto Rico (principalmente reportaron esto en Dorado, San Sebastián, y Cabo Rojo) y que es un problema importante que amerita mayor estudio y evaluación. Este mismo estudio encontró que había algunos consultores que consideraban el problema sobredimensionado y exagerado ya que muchos problemas que se adjudicaban a la presencia de

---

suelos expansivos podían deberse a vicios de construcción o mala ingeniería. Esta falta de consenso fue una de las motivaciones de este estudio.

Esta tesis busca aportar información valiosa sobre la problemática de suelos expansivos en Puerto Rico. Específicamente este estudio se enfocó en evaluar el potencial expansivo de algunos suelos arcillosos del área de Cabo Rojo, Puerto Rico. El estudio encontró que los suelos estudiados tienen altos contenidos de montmorilonita y presentaron propiedades ingenieriles (presión de entumecimiento, entumecimiento libre o *free swell*, PVC, etc) características de suelos con un potencial expansivo alto a muy alto. La siguiente sección presenta las conclusiones principales de este estudio.

## 6.2. Conclusiones

El trabajo experimental de campo y laboratorio presentado en esta tesis constituye un aporte original al tema de suelos expansivos en Puerto Rico. Específicamente el estudio se enfocó en estudiar el potencial expansivo de algunos suelos arcillosos del área de Cabo Rojo, Puerto Rico. Basado en los resultados obtenidos en este trabajo podemos sacar las siguientes conclusiones:

- Los suelos arcillosos muestreados en el área de estudio ubicado en Cabo Rojo, Puerto Rico presentaron principalmente mineral montmorilonita y en menor grado caolinita. Esta observación se basó en distintas pruebas mineralógicas como XRD, XRF, DTA, CIC, entre otras. La presencia de montmorilonita indica un alto potencial expansivo ya que este comportamiento de este tipo de mineral arcilloso ha sido documentado ampliamente.
- Varios de los suelos arcillosos estudiados (especialmente las muestras T-2-6 y T-6-8) presentaron límites de Atterberg muy altos en términos de límite líquido ( $LL > 150\%$ ) e

---

índice de plasticidad ( $PI > 110\%$ ). Estas pruebas sencillas parecen ser una buena herramienta para hacer una evaluación preliminar del potencial expansivo de un suelo. Esta observación es consistente con lo encontrado en la revisión de literatura donde muchos autores recomiendan usar los límites de Atterberg para hacer evaluaciones preliminares del potencial expansivo de suelos arcillosos.

- La prueba de laboratorio más útil y eficiente en evaluar el potencial expansivo de los suelos estudiados fue la del potencial de entumecimiento o *swell potential* (ASTM D 4546). Es la que provee mayor información útil desde el punto ingenieril pero es la prueba más compleja y más costosa por el tiempo requerido para llevarse a cabo.
- La prueba PVC, aunque útil, suele usarse con suelos compactados que no necesariamente reflejan la estructura de la arcilla in-situ. Cabe mencionar que en esta tesis se intentó ensayar una muestra inalterada con el equipo PVC pero este equipo no suele estar diseñado para esto. El ensayo PVC aunque útil tiene el inconveniente mencionado arriba. Una variación relativamente sencilla es hacer el ensayo con la anilla del odómetro donde se puede medir la fuerza generada al inundarse la muestra a la vez que se restringe su expansión vertical. En esta tesis no se hizo esta modificación.
- La evaluación mineralógica de las muestras es fundamental para una buena evaluación del potencial expansivo de los suelos. Se encontró que en Puerto Rico no es muy fácil hacer evaluaciones mineralógicas cuantitativas hasta el punto que se tuvo que enviar varias muestras a un laboratorio en Texas para permitir esta evaluación. Cabe mencionar que en EEUU tampoco se encontraron muchos laboratorios con esta capacidad experimental.

- 
- Este trabajo puede servir a las compañías geotécnicas que trabajan con suelos potencialmente expansivos en Puerto Rico. La tesis provee información útil sobre suelos del área de Cabo Rojo pero también presenta información relacionada a la metodología experimental de distintas pruebas así como recomendaciones de las pruebas más idóneas o efectivas.

### 6.3. Recomendaciones para trabajos futuros

Como resultado de esta tesis de maestría, se hacen las siguientes recomendaciones para trabajos futuros:

- Extender este tipo de trabajo a otras áreas de Puerto Rico donde se han identificado la presencia de suelos potencialmente expansivos (por ejemplo, San Sebastián, Dorado, etc.).
- Preparar un manual o guía práctica para la identificación de suelos expansivos que incluya información de las distintas pruebas, las correlaciones existentes.
- Extender la metodología experimental a la medición de succión del suelo ya que se ha reportado en la literatura que el problema de suelos expansivos es ideal para estudiarse dentro de un marco de mecánica de suelos no saturados.
- Extender el plan experimental a distintas presiones de fijado (*seating load pressure*) para evaluar la influencia de esta en las propiedades como la presión de entumecimiento, el entumecimiento libre (*free swell*) entre otras. En esta tesis se usó una sola presión de fijado equivalente al valor del esfuerzo vertical in-situ de la muestra que es una de las recomendaciones de la norma ASTM D 4546. En esta misma prueba también se puede evaluar la influencia de la humedad inicial de la muestra.

- Extender el estudio a la evaluación de distintas alternativas de mitigación del potencial expansivo. Esto puede incluir estudio de usar aditivos como cenizas volantes y cal, métodos constructivos para variar el sistema de cimentación de las estructuras a fundarse sobre suelos potencialmente expansivos, etc.
- Desarrollar mapas de zonificación de suelos expansivos para distintos municipios de Puerto Rico. Estos mapas aunque útiles no pretenden sustituir estudios geotécnicos específicos para cada proyecto.

## Referencias

---

---

Ameta, N. K., Purohit, D. G. M. y Wayal, A. S. (2008). Characteristics, Problems and Remedies of Expansive Soils of Rajasthan, India. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* Vol.: 13, No.: A, 2008.

ASTM (1993). Test Method D 2488 – 93 Standard Test Methods for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure). 1993 Edition. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

ASTM (1999). Test Method D 698 – 99 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. 1999 Edition. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

ASTM (2002a). Test Method D 422 – 63 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. 2002 Edition. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

ASTM (2002b). Test Method D 854 – 02 Standard Test Method for Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. 2002 Edition. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

ASTM (2002b). Test Method D 1557 – 02 Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>

ASTM (2003a). Test Method D 4546 – 03 Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils. 2003 Edition. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

ASTM (2003b). Test Method D 4829 – 03 Standard Test Methods for Expansion Index of Soils. 2003 Edition. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

ASTM (2005a). Test Method D 2216 – 05 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. 2005 Edition. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

ASTM (2005b). Test Method D 4318 – 05 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. 2005 Edition. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

---

ASTM (2006). Test Method D 5890 – 06 Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners. 2006 Edition. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

Avsar, E., Ulusay, R. y Abiddin Erguler, Z. (2005). Swelling Properties of Ankara (Turkey) Clay with Carbonate Concretions. *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. XI, No. 1, February 2005. pp. 73 – 93.

Azam, S. (2003). Influence of mineralogy on swelling and consolidation of soils in eastern Saudi Arabia. *Can. Geotech. J.* Vol. 40, pp. 964 – 975.

Barla, M., Ferrero, S. y Barla, G. (2003). A new approach for predicting the swelling behaviour of expansive clays in tunnelling. *IC en New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering ZM 2003*, Lefkosa, Turkish Republic of Northern Cyprus, 29-31 May 2003.

Beinroth, F. H., Engel, R. J., Lugo, J. L., Santiago, C. L., Ríos, S y Brannon, G. R. (2003). Updated Taxonomic Classification of the Soils of Puerto Rico, 2002. Universidad de Puerto Rico Recinto de Mayaguez, Puerto Rico.

Brasher, B. R., Franzmeier, D. P., Valassis, V. y Davidson, S. E. (1966). Use of saran resin to coat natural soil clods for bulk density and water retention measurements. *Soil Science*. 101:108.

Burmister, D. M. (1949). Principles and Techniques of Soil Identification. *Proceeding, Annual Highway Research Board meeting, National Research Council, Washington, D.C.*, Vol. 29

Carter, D. L., Heilman, M.D. y González, C.L. (1965). Ethylene glycol monoethyl ether for determining surface area of silicate minerals. *Soil Sci.* Vol. 100, pp. 365 – 360.

Chabrilat, Sabine, and Goetz, Alexander F.H. (2004). “The Search for Swelling Clay along the Colorado Front Range: The Role of AVIRIS Resolution in Detection.” disponible en internet: <<http://cires.colorado.edu/cses/research/soils/expansive/avi99.html#5.0>> (accesado octubre 25, 2005).

Chen, F. H. (1975). *Foundations on Expansive Soils, Developments in Geotechnical Engineering* 12, Elsevier Scientific, New York.

Chen, F. H. (1988). *Foundations on Expansive Soils*, 2da Ed. *Developments in Geotechnical Engineering* Vol. 54, Elsevier, Amsterdam.

Cihacek, L. J. y Bremmer, J.M. (1979). A simplified ethylene glycol monoethyl ether procedure for assessment of soil surface area. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 43, pp. 821 – 822.

Coduto, D. P. (2001). *Foundation Design: Principles and Practices*. 2nd Ed. Prentice Hall Inc, NJ.

Das, Braja M. (2002). *Principles of Geotechnical Engineering*. 5th Ed. Brook/Cole, CA.

---

---

Departamento de Recursos Naturales. (2004). Inventario de Recursos de agua de Puerto Rico Borrador.

Department of Building and Safety (1991). "Living with Expansive Soils." disponible en internet: <<http://www.toronet.com/city/dept/bldg/soils.htm>> (accesado agosto 28, 2005).

ELE International. disponible en internet: <<http://www.eleusa.com>> (accesado en noviembre 4, 2008)

Gibbs, H. J. (1969). Discussion of Holtz, W. G. "The Engineering Problems of Expansive Clay Subsoils, Proceedings of the Second International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils. Texas A&M, College Station, TX.

Gee, G.W. y Bauder, J.W. (1986). Particle-size Analysis. In Methods of Soil Analysis Part I. Physical and Mineralogical Methods Second Edition. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pp. 383 – 409.

Hamberg, D. J. (1985). A simplified method for predicting heave in expansive soils. Tesis de Maestría, Colorado State University, Fort Collins, CO.

Hamilton, J.J. (1977). "Foundations on Swelling or Shrinking Subsoils." disponible en internet: <[http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/cbd/cbd184\\_e.html](http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/cbd/cbd184_e.html)> (accesado septiembre 10, 2005).

Hardcastle, J. H. (2003). Evaluation and Treatment of Expansive Volcanic Soils US95, Owyhee County, Idaho. Final Report. ITD # 2000-185.

Holtz, W. G. (1969). "Volume Change in Expansive Soils and Control by Lime Treatment", Proceedings of the Second International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils. Texas A&M, College Station, TX.

Holtz, W. G. and Gibbs, H. J. (1956). "Engineering Properties of Expansive Clays," Transactions – ASCE, Vol. 121, pp. 641-677.

IS: 2720 Part XL. (1977). Determination of Free Swell Index of Soils.

JCP Geologists (2001). "Hazard Information – Expansive Soils." disponible en internet: <<http://www.jcpereports.com/html/articles/expsoil.html>> (accesado agosto 28, 2005).

Jiménez, P. (2005). Exploración geotécnica privada en Cabo Rojo. Comunicación personal.

Jones, D. E., and Holtz, W. G. (1973). "Expansive Soils – The Hidden Disaster," Civil Engineering – ASCE, Vol. 43, No. 8, New York, NY, August, pp 49-51.

Jones, D. E. y Jones, K. A. (1987). "Treating Expansive Soils", Civil Engineering, Vol. 57, ASCE.

- 
- Klute, A., Campbell, G. S., Jackson, R. D., Mortland, M. M. (1986). *Methods of Soil Analysis Part I: Physical and Mineralogical Methods*. 2nd Ed. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
- Krenz, J., Lee, B. y Owens, P. (2006). *Swelling Clays and Septic Systems. Rural Wastewater. Perdue Extension, RW-3-W*. Perdue University.
- Kunze, G.W. y Dixon, J.B. (1986). Pretreatment for Mineralogical Analysis. In *Methods of Soil Analysis Part I. Physical and Mineralogical Methods Second Edition*. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pp. 91 – 99.
- Lambe, William T. (1958). *Compacted Clay: Structure*. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*. Vol. 84, No. SM 2, pp. 1 – 35.
- Lambe, William T. (1960). *The Character and Identification of Expansive Soils*. A report completed for the Technical Studies Program of the Federal Housing Administration.
- Li, J. y Cameron, D. A. (2002). *Case Study of Courtyard House Damaged by Expansive Soils*. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. Vol. 16, No. 4. Pp. 169 – 175.
- McKeen, R. G. y Hamberg, D. J. (1981). *Characterization of expansive soils*. *Trans. Res. Rec. 790*, *Trans. Res. Board*.
- Mitchell, J. K. y Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*. 3ra Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Nelson. J. D. y Miller D. J. (1999). *Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*. John Wiley & Sons, Inc. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- Nusier, O. K. y Alawneh, S. (2002). *Damage of Reinforced Concrete Structure due to Severe Soil Expansion*. *Journal of Performance of Constructed Facilities*.
- Ochoa, M. y Pando, M. A. (2005). *Expansive Soils in Puerto Rico*. Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez.
- Olive, W., Chleborad, A., Frahme, C., Shlocker, J., Schneider, R. y Schuster, R. (1989). "Swelling Clays Map of the Conterminous United States" Map I-1940. USGS Miscellaneous Investigations Series. disponible en internet: <<http://geology.com/articles/soil/>> (accesado enero 31, 2008).
- Ortigano, J. A. R., Loures, T. R. R., Nogueira, C., y Alves, L. S. (1997). *Slope Failures in Tertiary Expansive OC Clays*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Pajak-Komorowska, A. (2003). *Swelling, expansion and shrinkage properties of selected clays in the Mazowsze province, central Poland*. *Geological Quaterly*. Vol. 47, No. 1, P. 55 – 62.
-

- Parcher, J. V. y Liu, P-C. (1965). Some Swelling Characteristics of Compacted Clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. Vol. 91, No. SM 3.
- Pearing, J. R. (1963). A study of basic mineralogical, physical-chemical, and engineering index properties of laterite soils. *Disertación*. Universidad de Texas A&M, College Station, TX.
- Ratner-Zohar, Y., Banin, A. y Chen, Y. (1983). Oven drying as a pretreatment for surface area determination of soil clays. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 47, pp. 1056 – 1058.
- Rhoades, J. D. (1982). Cation Exchange Capacity, p. 149 – 157. In Page A. L. (ed.) *Methods of Soil Analysis Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wis. 1159 p.
- Schulze, D.G. (2002). An Introduction to Soil Mineralogy. In *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. Soil Science Society of America, Madison WI, pp. 1 – 35.
- Seed, H. B., Woodward, R. J. y Lundgren, R. (1962). Prediction of Swell Potential for Compacted Clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. Vol. 83, No. SM 3
- Sivapullaiah, P. V., Sitharam, G. T. y Subba Raol, K. S. (1987). Modified Free Swell Index for Clays. *Technical Note*. American Society for Testing and Materials.
- Snethen, D. R. (1979). An Evaluation of Methodology for Prediction and Minimization of Detrimental Volume Change of Expansive Soils in Highway Subgrades, 2 Volumes, Report Nos. FHWA-RD-79-49 and –50.
- Snethen, D. R. y Johnson, L.D. (1977). An Investigation of the Natural Microscale Mechanisms That Cause Volume Change in Expansive Clays, Report No. FHWA-RD-77-75.
- Summer, M. E. y Miller, W.P. (1996). Cation Exchange Capacity and Exchange Coefficients, p. 1201 – 1229. In Sparks D. L. (ed.) *Methods of Soil Analysis Part 3. Chemical Methods*. Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wis. 1390 p.
- Taboada, M. (2003). *Soil Shrinkage Characteristics in Swelling Soils*. Departamento de Ingeniería Agrícola y Uso de la Tierra, Facultad de Agronomía UBA, Buenos Aires, Argentina.
- Tan, K.H., Hajek, B.F y Barshad. I. (1986). Thermal Analysis Techniques. In *Methods of Soil Analysis Part I. Physical and Mineralogical Methods Second Edition*. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pp. 151 – 181.
- Thomas, P.J. (1998). *Quantifying Properties and Variability of Expansive Soils in Selected Map Units*. *Disertación Doctoral*. Virginia Polytechnic Institute and State University.
-

---

Thomas, P. J., Baker, J. C. y Zelany, L. W., (2000). An Expansive Soil Index for Predicting Shrink-Swell Potential. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 64, January – February. Pp: 268 – 274.

Ulusay, R. y Erguler, Z. A. (2002). A simple test and predictive models for assessing swell potencial of Ankara (Turkey) Clay. *Engineering Geology*. Vol. 67, Pp: 331 – 352.

Vallejos, Horacio R. (2001). “Suelos Expansivos y Relación con las Obras Viales.” disponible en internet: <<http://www.gecgr.co.cu/infoconst/bvirtual/carreteras/espanol/0285.pdf>> (accesado septiembre 15, 2005).

Volckmann, R. P. (1984). Geologic Map of the Puerto Real Quadrangle, Southwest Puerto Rico. US Geological Survey Miscellaneous Investigations Series Map I-1559.

White, J.L. y Roth, C.B. (1986). Infrared Spectrometry. In *Methods of Soil Analysis Part I. Physical and Mineralogical Methods Second Edition*. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pp. 291 – 327.

Whittig, L.D. y Allardice, W.R. (1986). X – Ray Diffraction Techniques. In *Methods of Soil Analysis Part I. Physical and Mineralogical Methods Second Edition*. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pp. 331 – 361.

Wu, L. y Huang, R. (2006). Landslide mechanism and strengthening analysis of cutting slopes in expansive soil areas in China. The Geological Society of London. IEG2006 Paper number 690.

Yitagesu, F. A. (2006). Spectroscopy to derive Engineering Parameters of Expansive Soils. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands.

## Apéndices

---

---

### Apéndice A.

## Técnicas y Ensayos Utilizados para Determinar el Potencial Expansivo en los Suelos.

### *A.1. Medición del Área Superficial.*

El uso de Ethylene Glycol Monoethyl Ether o EGME es un método conocido para determinar el área superficial de las partículas del suelo. En esta prueba, se le agrega a la muestra de suelo (arcilla) una cantidad de EGME –usualmente de 1 a 3 mL– y se toma el peso de la muestra. El EGME es una sustancia volátil, por lo tanto, las muestras se colocan al vacío para acelerar la evaporación del EGME. Las moléculas del EGME que están en contacto con la superficie del suelo se quedan atrapadas y las que no se evaporan. Se mantiene un registro del peso de las muestras hasta que se estabilicen.

### *A.2. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).*

La capacidad de intercambio catiónico se puede medir de forma parcial o total. Cuando se dice de forma parcial se refiere a que se mide la capacidad de los cationes que más influyen a esta cualidad del suelo. Estos cuatro cationes son el calcio, el potasio, el magnesio y el sodio. Esto se puede realizar mediante absorción atómica. Además de conocer la CIC total, saber la concentración por catión nos permite tener una mejor idea del tipo de mineral que podría encontrar en el suelo que se está investigando.

### *A.3. Difracción de Rayos X (XRD).*

La difracción de rayos x es una de las pruebas claves para conocer el tipo de mineral que existe. Por medio de la luz que incide en la estructura cristalina de los minerales y de la manera en que se refleja, se registra un patrón de intensidad que se asocia a un mineral específico. Cada mineral tiene un registro único. Por ejemplo, se conoce que los minerales 2:1 tienen un pico cerca del  $6^\circ 2\theta$ . Este pico puede representar la presencia de vermiculita, esméctica, entre otros. Esta prueba se puede realizar de manera cualitativa o de manera cuantitativa.

### *A.4. Fluorescencia de Rayos X (XRF)*

La fluorescencia de rayos x se utiliza para determinar la composición elemental de la muestra. Para esto se utiliza la intensidad de rayos x o secundarios fluorescentes que son emitidos por la muestra al ser bombardeada por rayos x primarios.

### *A.5. Espectroscopia de Infrarrojo (IRS).*

La espectroscopia de infrarrojo nos permite conocer ciertas propiedades del suelo característico de cada mineral. Esta prueba provee información sobre la naturaleza, reactividad y arreglo estructural de los grupos funcionales. Permite determinar la presencia de proteínas y carbohidratos y la presencia o ausencia de impurezas inorgánicas. En mineralogía, se puede diferenciar los minerales 1:1 de los 2:1 y saber si es dioctaedral o trioctaedral. Además, se pueden realizar estudios de sustitución isomórfica, hidratación de minerales y adsorción.

### *A.6. Análisis por Diferencia Termal (DTA).*

El análisis por diferencia termal nos permite conocer por medio de la aplicación de calor cómo se va alterando los minerales en el suelo y de esta manera captar los registro y cambio que van sufriendo a medida que la temperatura aumenta hasta que se descompone el mineral. Los minerales cuando son sometidos a estos cambios en temperatura pueden experimentar liberación de energía o calor, cambio de peso, liberación de compuestos volátiles o cambios estructurales. Estas alteraciones se manifiestan como cambios endotérmicos o exotérmicos. Por ejemplo, la deshidratación, deshidroxilación, fusión, evaporación y sublimación son cambios en el mineral debido a procesos endotérmicos. En cambio, la ocurrencia de oxidación, formación de estructuras cristalinas o la descomposición de la muestra son procesos exotérmicos.

### *A.7. Microscopia Electrónica de Rastreo (SEM)*

La microscopia electrónica de rastreo consiste en tomar fotos microscópicas a las muestras de suelo. Esto se logra mediante la incidencia de un haz de electrones sobre la muestra. Una vez los electrones hacen contacto con la muestra, ésta es excitada y a su vez emite electrones que son detectados por el equipo logrando digitalizar una imagen amplificada. Para poder lograr esto, es importante que la muestra esté seca para evitar daños severos al equipo. Esto le reduce considerablemente a la muestra la capacidad de conducir electrones por lo cual se le debe aplicar una capa delgada de algún material electro-conductivo. El SEM nos permite ver no tan solo el tamaño de las partículas, sino también, su forma y arreglo estructural.

## Apéndice B:

Informe de los Resultados de Difracción de Rayos X y  
Fluorescencia de Rayo X según reportado por el Laboratorio *Evans  
Analytical Group*.



10 Jun 2008

Miguel Pando  
University of Puerto Rico  
PO Box 9041  
Mayaguez, PR 00681

Subject: X-ray Diffraction (XRD) Analysis Report  
Job Number: T08U0543  
Purchase Order Number:

Dear Miguel Pando:

Please find enclosed the final report for the XRD analysis of your samples, as detailed in the following table.

Date received:	01 May 2008
Results faxed/emailed:	10 Jun 2008
Results emailed to:	mpando@uprm.edu
Number of samples:	4
Number of units:	4.00
Priority Surcharge	0%

Your samples will be retained for eight weeks after their receipt. After this time they will be disposed of, unless you specifically request otherwise. We will maintain copies of the report and data files for three years.

Thank you for using the analytical services of the Evans Analytical Group. We appreciate your business and welcome any suggestions you may have for improving the quality and efficiency of our service. Please do not hesitate to call us if you have any questions regarding this report.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Delrose Winter', is positioned above the typed name.

Delrose Winter  
Senior Scientist, XRD  
(Tel. 512-671-9500; Email: [dwinter@eaglabs.com](mailto:dwinter@eaglabs.com))



**X-RAY DIFFRACTION (XRD)  
ANALYSIS REPORT**

**10 Jun 2008**

**JOB NUMBER T08U0543**

**PO NUMBER**

for

Miguel Pando

University of Puerto Rico

PO Box 9041

Mayaguez, PR 00681

Prepared by:

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Delrose Winter", written in a cursive style.

---

Delrose Winter

Senior Scientist, XRD

(Tel. 512-671-9500; [dwinter@eaglabs.com](mailto:dwinter@eaglabs.com))

Reviewed by:

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Scott Baumann", written in a cursive style.

---

Scott Baumann

Director of Analytical Services, Texas

(Tel. 512-671-9500; [sbaumann@eaglabs.com](mailto:sbaumann@eaglabs.com))

Evans Analytical Group  
425 Round Rock West  
Round Rock, TX 78681 USA

Requester:  
 Job Number:  
 Analysis Date:

Miguel Pando  
 T08U0543  
 10 Jun 2008

X-RAY DIFFRACTION ANALYSIS REPORT

**Purpose: XRD – X-ray Diffraction Analysis for Qualitative and Quantitative analysis on four clay/soil samples**

**Results:**

Best Matches from the ICDD/ICSD data bases

Sample ID	% crystallinity	Crystalline Phases	Approx Wt% of crystalline fraction
CM-1-05	53	Ca <sub>0.2</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O – Montmorillonite-15A Hexagonal P PDF# 00-013-0135	29.3
		Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub> – Kaolinite 1A Triclinic C1 PDF# 01-080-0885	27.9
		SiO <sub>2</sub> – Quartz Hexagonal P321 PDF# 01-078-1252	41.5
		FeO(OH) – Goethite Orthorhombic Pbnm PDF# 01-081-0462	1.2
T-2-6ft	40	Ca <sub>0.2</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O – Montmorillonite-15A Hexagonal P PDF# 00-013-0135	63.6
		Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub> – Kaolinite 1A Triclinic C1 PDF# 01-080-0885	16.9
		SiO <sub>2</sub> – Quartz Hexagonal P321 PDF# 01-078-1252	19.0
		FeO(OH) – Goethite Orthorhombic Pbnm PDF# 01-081-0462	0.4

Best Matches from the ICDD/ICSD data bases

Sample ID	% crystallinity	Crystalline Phases	Approx Wt% of crystalline fraction
T-6-8ft	25	Ca <sub>0.2</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O – Montmorillonite-15A Hexagonal P PDF# 00-013-0135	62.2
		Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub> – Kaolinite 1A Triclinic C1 PDF# 01-080-0885	10.0
		SiO <sub>2</sub> – Quartz Hexagonal P321 PDF# 01-078-1252	21.5
		FeO(OH) – Goethite Orthorhombic Pbnm PDF# 01-081-0462	6.3
CM-1-07	30	Ca <sub>0.2</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O – Montmorillonite-15A Hexagonal P PDF# 00-013-0135	67.8
		Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub> – Kaolinite 1A Triclinic C1 PDF# 01-080-0885	8.7
		SiO <sub>2</sub> – Quartz Hexagonal P321 PDF# 01-078-1252	20.0
		FeO(OH) – Goethite Orthorhombic Pbnm PDF# 01-081-0462	3.5

Data was collected in standard  $\theta:2\theta$  coupled focusing mode, with variable slits and diffracted beam monochromator. Note that the wt% reported in the table above represents the wt% of the “crystalline” fraction of material. The numbers would be scaled according to the overall % crystallinity numbers to obtain the wt% in the samples.

The XRD analysis shows that the primary difference between these samples is in the overall % crystallinity. The difference in crystallinity is evident by viewing the overlay comparison plot (first two plots in report below).

The crystalline phases formed are very similar, as the same phases are basically present in all four samples. The crystalline fractions of all four samples are primarily composed of SiO<sub>2</sub> – quartz, Ca<sub>0.2</sub>(Al,Mg)<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O – Montmorillonite-15A, Al<sub>2</sub>(Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)(OH)<sub>4</sub> – Kaolinite and FeO(OH)-Goethite.

It should be noted that Kaolinite and Montmorillonite are general classes of clay mineral. They do not represent specific phase structures or chemical formulas. Since the XRD patterns for these four samples show a significant amount of disorder, the wt% of the phases can only be approximated (e.g. the patterns do not produce a high Figure of Merit match from the ICDD/ICSD data base, so only Best Matches can be listed in the table above). Also, since XRD is not used to determine the exact chemical formula, but rather obtains structural information from the crystalline diffraction pattern, the actual formulas for the Kaolinite and Montmorillonite may be somewhat different than those listed in the table above. It is most likely that other elements, such as Mg, Ca, Na... are also present in this aluminum silicate hydroxide matrix. The "approximate" quantitative wt% in the table above was determined via the RIR (Reference Intensity Ratio) method, which uses areas under one or more deconvoluted peaks from each phase. Most peaks could not be deconvoluted due to high amorphous background and overlapping broad peaks.

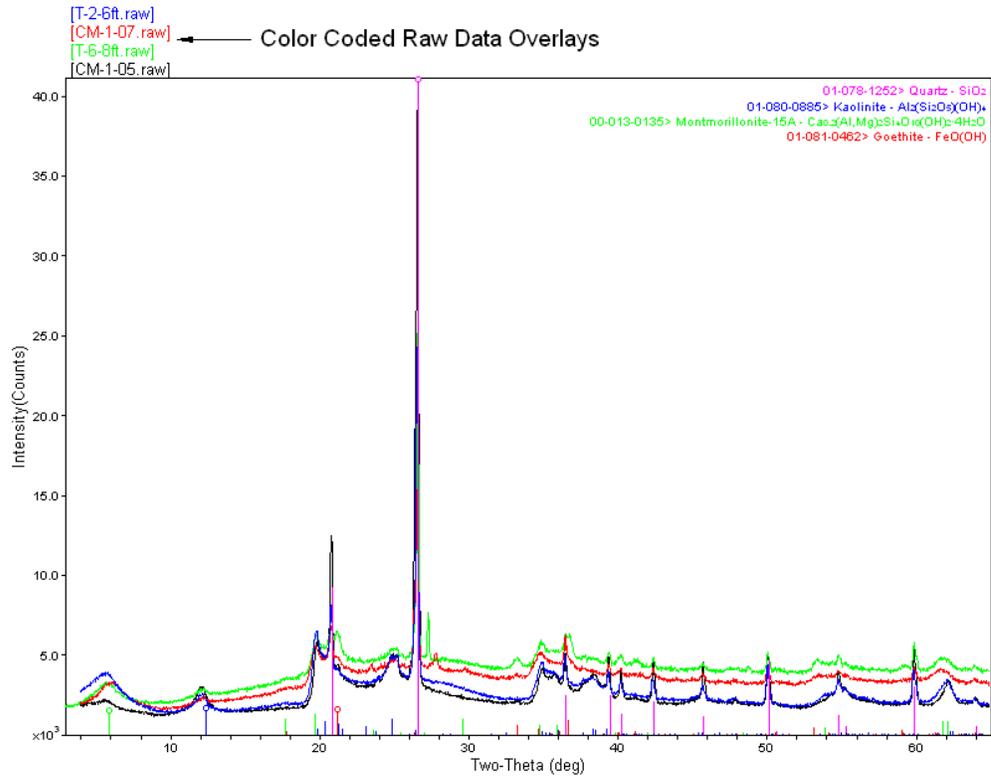
Percent crystallinity is calculated by collecting both an XRD pattern of the material under investigation and a background scan on the identical instrument and configuration with no sample in place. The background scan intensity is subtracted from the unknown sample scan (instrumental background scatter is removed). Next, Compton's Scatter is removed. Compton's scatter is an exponential type curve which subtracts a different intensity value from each individual measured data point, and the subtracted intensity is a function of the total intensity under the plot of the unknown sample.

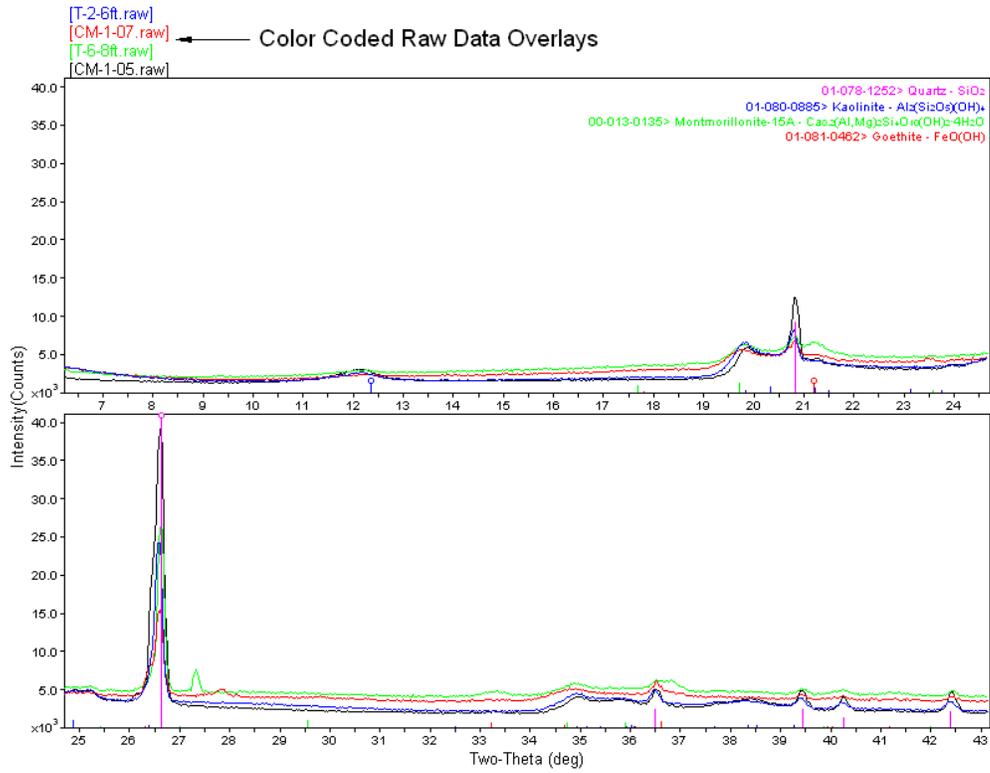
Finally the resulting peaks are profile fit, and assigned as either amorphous or crystalline, depending upon such factors as density of material, standard (modeled) locations of amorphous peaks, FWHM (full width at half maximum) of the peak, and signal to noise ratios. Once all peaks are assigned, the % crystallinity is simply calculated as:

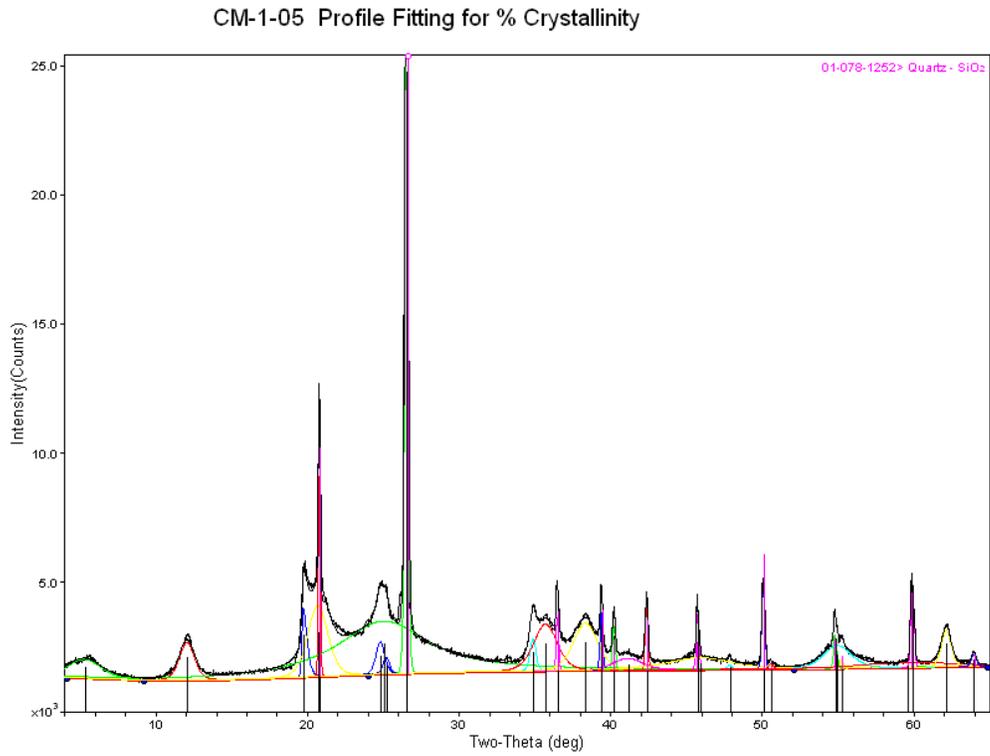
$$\% \text{ crystallinity} = \text{Total area of crystalline peaks} / \text{Total area of all peaks}$$

(where the total area of all peaks includes both crystalline peaks and amorphous scatter intensity).

It should be noted that % crystallinity via XRD does require significant subjectivity, since the diffractionist assigns the peak intensities to either crystalline diffraction or amorphous scatter. In many cases, this is judgmental, since a small crystallite size may produce a broad peak which appears to be amorphous scatter.







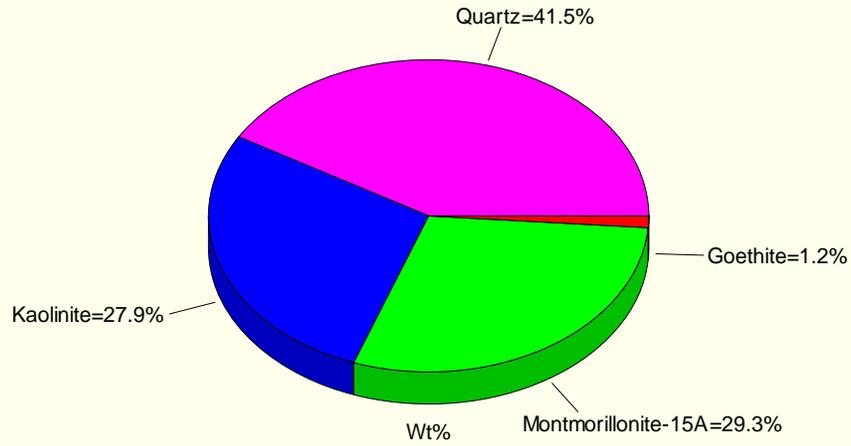
Profile Fitting Report  
[CM-1-05.raw] Soil

R = 6.48%, Total Area = 1363528, Crystallinity = 53.04%

2-Theta d(Å)	Height	Area(a1)	Area%	FWHM
5.355 16.48948	462	39152	9.0	2.597
12.099 7.30891	933	40808	9.4	1.162
19.742 4.49327	1732	25327	5.8	0.389
20.742 4.27890	1770	102891	23.7	1.545
20.832 4.26068	5647	27504	6.3	0.129
24.860 3.57866	806	20449	4.7	0.674
25.058 3.55077	1316	433261	100.0	7.155
25.240 3.52564	415	7800	1.8	0.500
26.573 3.35174	23396	190820	44.0	0.217
34.920 2.56731	824	13340	3.1	0.431
35.741 2.51019	1157	79447	18.3	1.825
36.525 2.45809	1685	9144	2.1	0.144
38.379 2.34348	1178	82986	19.2	1.873
39.431 2.28335	1839	11012	2.5	0.159
40.261 2.23821	1379	8893	2.1	0.171
41.170 2.19085	292	24784	5.7	2.253
42.420 2.12915	2106	13087	3.0	0.165
45.768 1.98086	1914	10643	2.5	0.148
45.935 1.97406	301	65211	15.1	4.956
47.890 1.89794	125	1415	0.3	0.300
50.103 1.81916	2862	18888	4.4	0.175
50.590 1.80279	138	1833	0.4	0.353
54.842 1.67264	1178	7281	1.7	0.164
54.986 1.66861	568	46149	10.7	2.159
55.270 1.66070	320	1662	0.4	0.138
59.620 1.54951	124	31711	7.3	7.273
59.925 1.54234	3236	18758	4.3	0.154
62.171 1.49191	942	25162	5.8	0.711
63.977 1.45408	356	4111	0.9	0.307

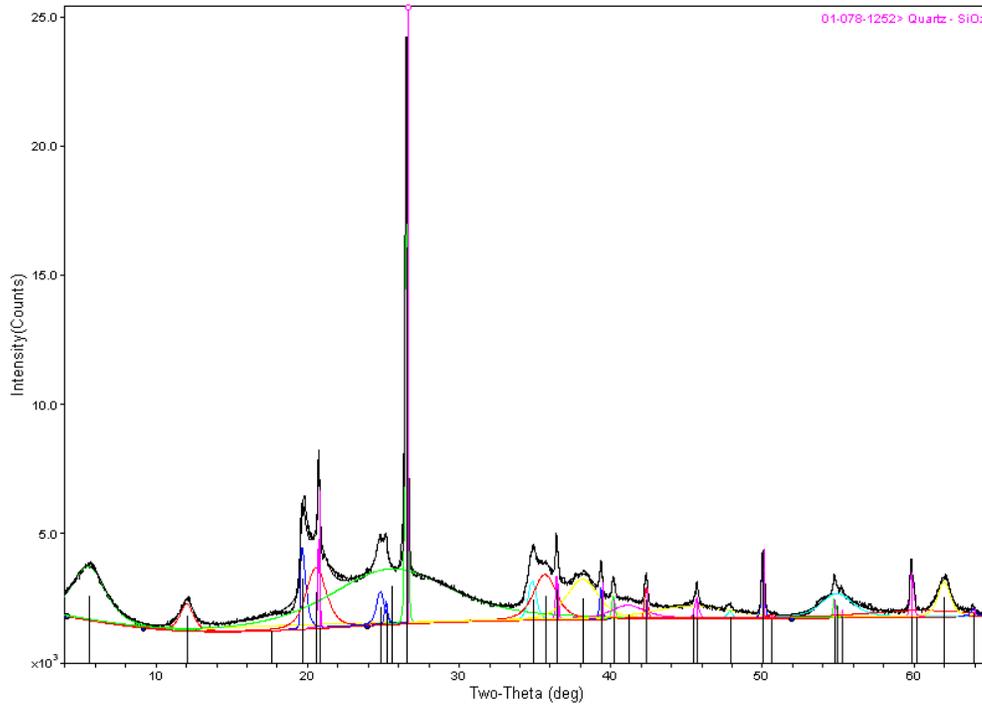
CM-1-05 Quantitative Analysis via RIR

- Quartz -  $\text{SiO}_2$  <Wt%=41.5(12.8)>
- Kaolinite -  $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$  <Wt%=27.9(8.6)>
- Montmorillonite-15A -  $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  <Wt%=29.3(9.0)>
- Goethite -  $\text{FeO}(\text{OH})$  <Wt%=1.2(0.4)>



**Quantitative Analysis from Profile-Fitted Peaks**

T-2-6ft Profile Fitting for % Crystallinity



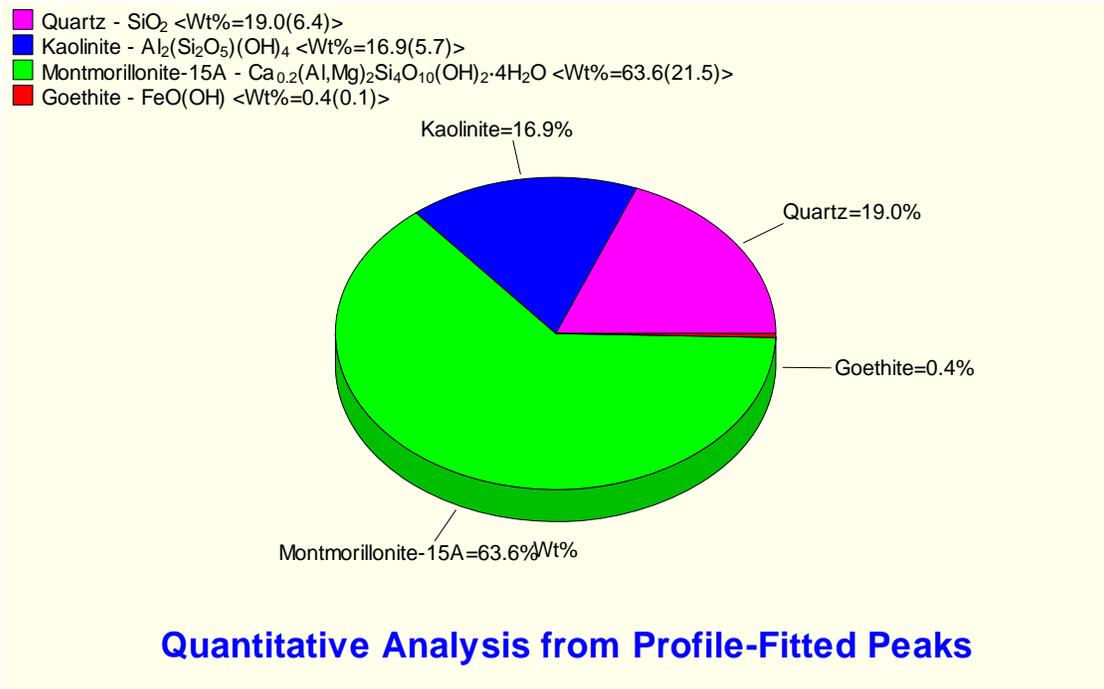
Profile Fitting Report

[T-2-6ft.raw] Soil

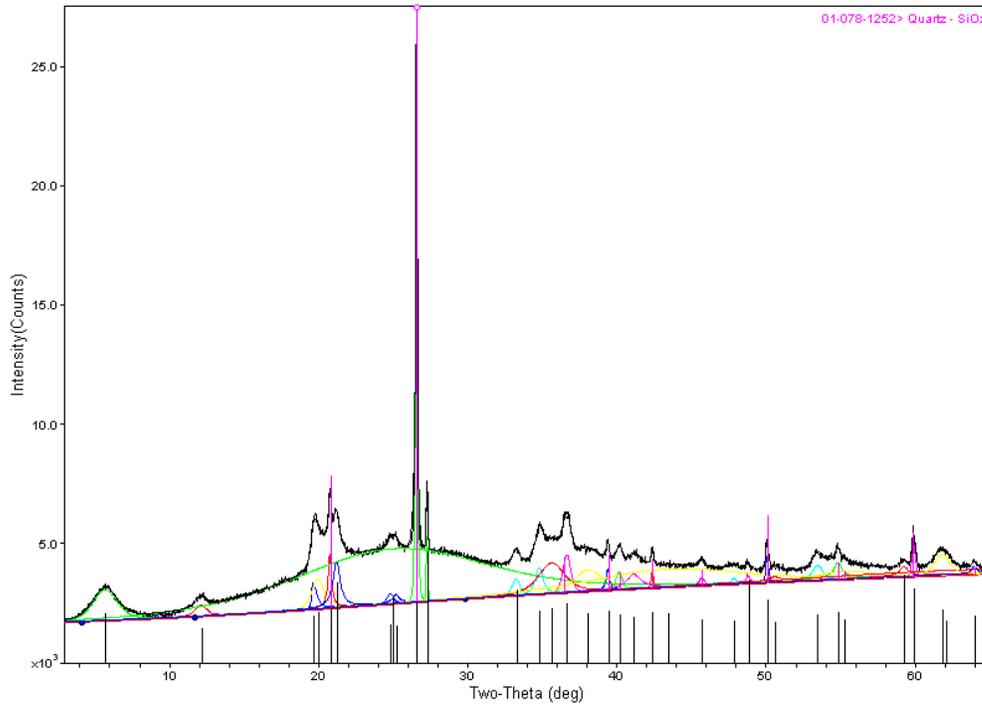
R = 4.12%, Total Area = 1400866, Crystallinity = 40.01%

2-Theta d(Å)	Height	Area	Area%	FWHM
5.628 15.68961	1321	119096	24.2	2.604
12.093 7.31261	655	25777	5.2	1.015
17.664 5.01702	99	39564	8.0	10.758
19.657 4.51251	2040	30756	6.2	0.389
20.623 4.30326	1493	88675	18.0	1.531
20.796 4.26792	2537	12083	2.5	0.123
24.860 3.57866	805	18536	3.8	0.594
25.240 3.52564	590	4694	1.0	0.205
25.543 3.48444	1358	492447	100.0	9.322
26.569 3.35224	14738	94319	19.2	0.165
34.874 2.57060	968	22316	4.5	0.595
35.703 2.51278	1108	75451	15.3	1.755
36.489 2.46045	1357	7638	1.6	0.145
38.185 2.35499	979	91085	18.5	2.399
39.407 2.28473	985	5692	1.2	0.149
40.230 2.23986	646	4735	1.0	0.189
41.170 2.19085	318	31936	6.5	2.588
42.383 2.13093	921	6568	1.3	0.184
45.462 1.99348	295	65410	13.3	5.904
45.719 1.98287	561	5656	1.1	0.260
47.890 1.89794	178	2072	0.4	0.300
50.075 1.82012	1933	13341	2.7	0.178
50.590 1.80279	67	1247	0.3	0.479
54.819 1.67328	640	3650	0.7	0.147
54.938 1.66995	585	55251	11.2	2.437
55.270 1.66070	165	828	0.2	0.129
59.899 1.54295	1808	11853	2.4	0.169
60.188 1.53623	142	36614	7.4	7.533
62.024 1.49509	860	31534	6.4	0.946
63.930 1.45503	215	2042	0.4	0.245

T-2-6ft Quantitative Analysis via RIR



T-6-8ft Profile Fitting for % Crystallinity



Profile Fitting Report

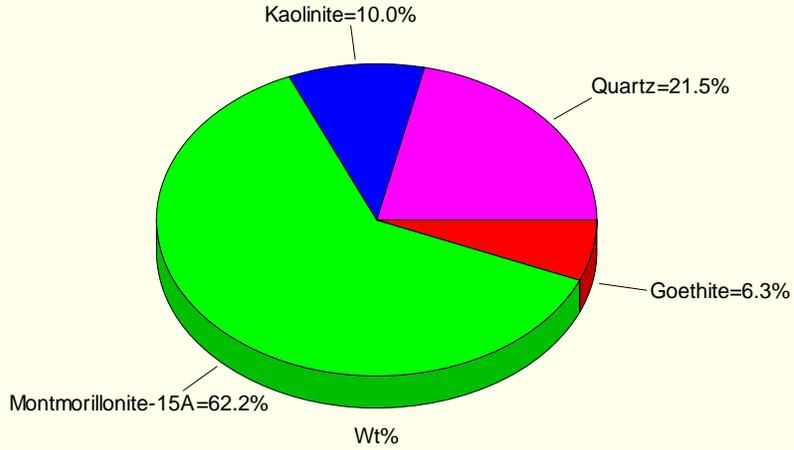
[T-6-8ft.raw] Soil

R = 2.51%, Total Area = 1739906, Crystallinity = 25.34%

2-Theta d(Å)	Height	Area	Area%	FWHM
5.755 15.34446	819	58489	7.1	1.911
12.165 7.26944	290	10006	1.2	0.895
19.649 4.51446	713	11959	1.5	0.389
20.009 4.43391	808	29016	3.5	0.955
20.812 4.26472	1493	21220	2.6	0.263
21.262 4.17541	1231	36964	4.5	0.585
24.860 3.57866	267	5052	0.6	0.502
24.991 3.56023	1468	823298	100.0	15.000
25.240 3.52564	236	8752	1.1	0.500
26.618 3.34610	17450	87360	10.6	0.117
27.325 3.26114	2280	8571	1.0	0.100
33.289 2.68931	439	10582	1.3	0.588
34.841 2.57295	715	18118	2.2	0.586
35.670 2.51502	805	65609	8.0	2.083
36.693 2.44719	1013	22845	2.8	0.599
38.105 2.35970	566	45984	5.6	2.157
39.441 2.28281	685	8347	1.0	0.185
40.194 2.24177	482	8083	1.0	0.445
41.170 2.19085	386	22869	2.8	1.125
42.427 2.12879	563	3495	0.4	0.156
43.455 2.08080	477	216267	26.3	11.901
45.732 1.98236	240	3128	0.4	0.300
47.890 1.89794	175	6513	0.8	0.300
48.840 1.86322	340	5567	0.7	0.115
50.106 1.81905	1036	5527	0.7	0.142
50.590 1.80279	133	5424	0.7	1.088
53.486 1.71182	397	13100	1.6	0.799
54.842 1.67265	486	31475	3.8	0.603
55.270 1.66070	209	34106	4.1	4.345
59.261 1.55802	285	15350	1.9	0.642
59.937 1.54206	1460	8785	1.1	0.155
62.076 1.49396	116	55277	6.7	20.215
61.825 1.49941	555	26051	3.2	1.181
63.997 1.45366	269	6715	0.8	0.239

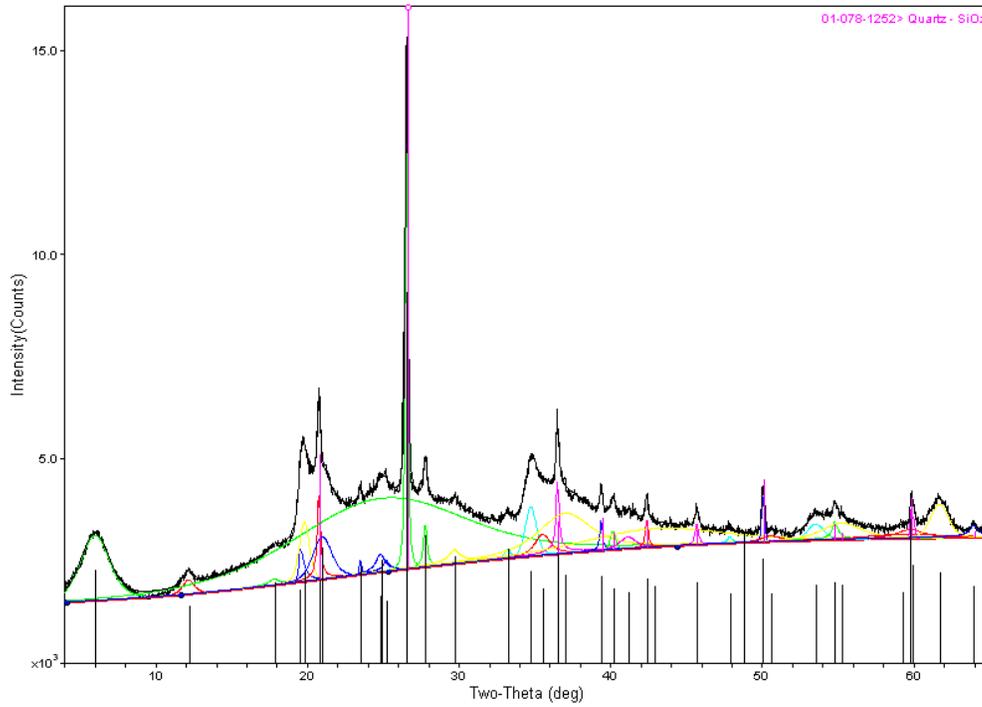
T-6-8Ft Quantitative Analysis via RIR

- Quartz -  $\text{SiO}_2$  <Wt%=21.5(2.9)>
- Kaolinite -  $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$  <Wt%=10.0(1.3)>
- Montmorillonite-15A -  $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  <Wt%=62.2(8.3)>
- Goethite -  $\text{FeO}(\text{OH})$  <Wt%=6.3(0.9)>



**Quantitative Analysis from Profile-Fitted Peaks**

CM-1-07 Profile Fitting for % Crystallinity



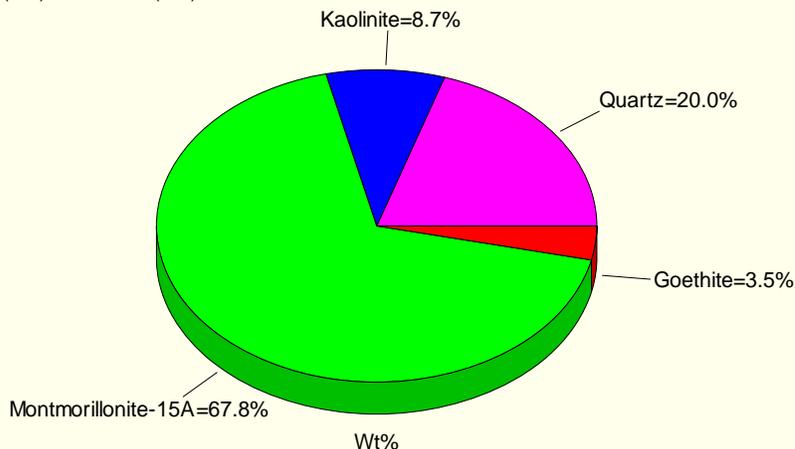
Profile Fitting Report  
[CM-1-07.raw] Soil

R = 3.09%, Total Area = 1328801, Crystallinity = 29.68%

2-Theta d(Å)	Height	Area	Area%	FWHM
6.038 14.62479	1020	83205	14.6	2.251
12.198 7.25011	219	7236	1.3	0.871
17.849 4.96527	93	4055	0.7	0.748
19.541 4.53913	523	9411	1.7	0.389
19.851 4.46884	932	27049	4.7	0.772
20.801 4.26685	1391	20373	3.6	0.243
21.020 4.22302	659	36499	6.4	1.473
23.540 3.77626	250	1403	0.2	0.149
24.860 3.57866	275	10981	1.9	0.747
24.882 3.57551	1157	570257	100.0	13.159
25.240 3.52564	166	9589	1.7	0.500
26.581 3.35072	7728	63611	11.2	0.184
27.820 3.20424	691	9745	1.7	0.272
29.740 3.00162	216	20963	3.7	1.000
33.236 2.69341	137	2454	0.4	0.476
34.781 2.57722	781	24693	4.3	0.841
35.543 2.52374	325	16832	3.0	1.199
36.539 2.45721	1352	24153	4.2	0.187
37.035 2.42542	626	112569	19.7	4.170
39.423 2.28380	596	5481	1.0	0.149
40.186 2.24219	295	4396	0.8	0.396
41.170 2.19085	177	9098	1.6	1.258
42.427 2.12882	520	5056	0.9	0.179
42.949 2.10412	285	111029	19.5	10.372
45.722 1.98274	402	4122	0.7	0.192
47.890 1.89794	108	2160	0.4	0.300
48.840 1.86322	35	37	0.0	0.030
50.086 1.81974	944	6130	1.1	0.173
50.590 1.80279	85	4702	0.8	1.472
53.550 1.70992	251	11603	2.0	1.229
54.835 1.67284	320	10568	1.9	0.366
55.270 1.66070	255	31694	5.6	3.100
59.337 1.55621	65	13514	2.4	5.512
59.776 1.54582	134	12129	2.1	2.080
59.921 1.54244	741	4176	0.7	0.150
61.713 1.50188	534	27022	4.7	1.338
63.985 1.45392	202	10803	1.9	0.620

CM-1-07 Quantitative Analysis via RIR

- Quartz -  $\text{SiO}_2$  <Wt%=20.0(5.4)>
- Kaolinite -  $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$  <Wt%=8.7(2.4)>
- Montmorillonite-15A -  $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  <Wt%=67.8(18.4)>
- Goethite -  $\text{FeO}(\text{OH})$  <Wt%=3.5(1.0)>



**Quantitative Analysis from Profile-Fitted Peaks**

After reviewing this report, you may assess our services using an electronic service evaluation form. This can be done by clicking on the link below, or by pasting it into your internet browser. Your comments and suggestions allow us to determine how to better serve you in the future.

<http://www.eaglabs.com/evaluate.htm?job=T08U0543>



06 Jun 2008

Miguel Pando  
University of Puerto Rico  
PO Box 9041  
Mayaguez, PR 00681

Subject: XRF (X-ray Fluorescence) Analysis Report  
Job Number: T08U0543  
Purchase Order Number: Credit Card

Dear Miguel:

Please find enclosed the final report for the XRF analysis of your samples, as detailed in the following table.

Date received:	01 May 2008
Results faxed/emailed:	06 Jun 2008
Results emailed to:	mpando@uprm.edu
Number of samples:	4
Number of units:	4.00
Priority Surcharge	0%

Your samples will be retained for eight weeks after their receipt. After this time they will be disposed of, unless you specifically request otherwise. We will maintain copies of the report and data files for three years.

Thank you for using the analytical services of the Evans Analytical Group. We appreciate your business and welcome any suggestions you may have for improving the quality and efficiency of our service. Please do not hesitate to call us if you have any questions regarding this report.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Scott Baumann", written in a cursive style.

Scott Baumann  
Director of Analytical Services, Texas  
(Tel. 512-671-9500; Email: [sbaumann@eaglabs.com](mailto:sbaumann@eaglabs.com))  
Enclosures:



**X-RAY FLUORESCENCE (XRF)  
ANALYSIS REPORT  
06 Jun 2008  
JOB NUMBER T08U0543  
PO NUMBER**

for  
Miguel Pando  
University of Puerto Rico  
PO Box 9041  
Mayaguez, PR 00681

Prepared by:

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Scott Baumann", written over a horizontal line.

---

Scott Baumann  
Director of Analytical Services, Texas  
(Tel. 512-671-9500; [sbaumann@eaglabs.com](mailto:sbaumann@eaglabs.com))

Reviewed by:

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Richard Ortega", written over a horizontal line.

---

Richard Ortega, PhD.  
Senior Scientist, XRD  
(Tel. 512-671-9500; [rortega@eaglabs.com](mailto:rortega@eaglabs.com))

Evans Analytical Group  
425 Round Rock West  
Round Rock, TX 78681 USA

## XRF SURFACE ANALYSIS REPORT

Requester:  
Job Number:  
Analysis Date:

Miguel Pando  
T08U0543  
06 Jun 2008

### Purpose:

The purpose of this analysis was to determine the composition of four soil samples using X-ray Fluorescence Analysis (XRF).

### Samples:

CM-1-05, CM-1-07, T-2-6-FT, T-6-8-FT

### Experimental:

X-ray Fluorescence (XRF) is a non-destructive technique that identifies the elemental constituents of a sample and their relative abundances. It is capable of detecting elements of atomic number (Z) 13 (aluminum) through atomic number 92 (uranium) at concentrations from parts per million (ppm) to 100%. The XRF equipment used was a Thermo Electron VXR Analysis System

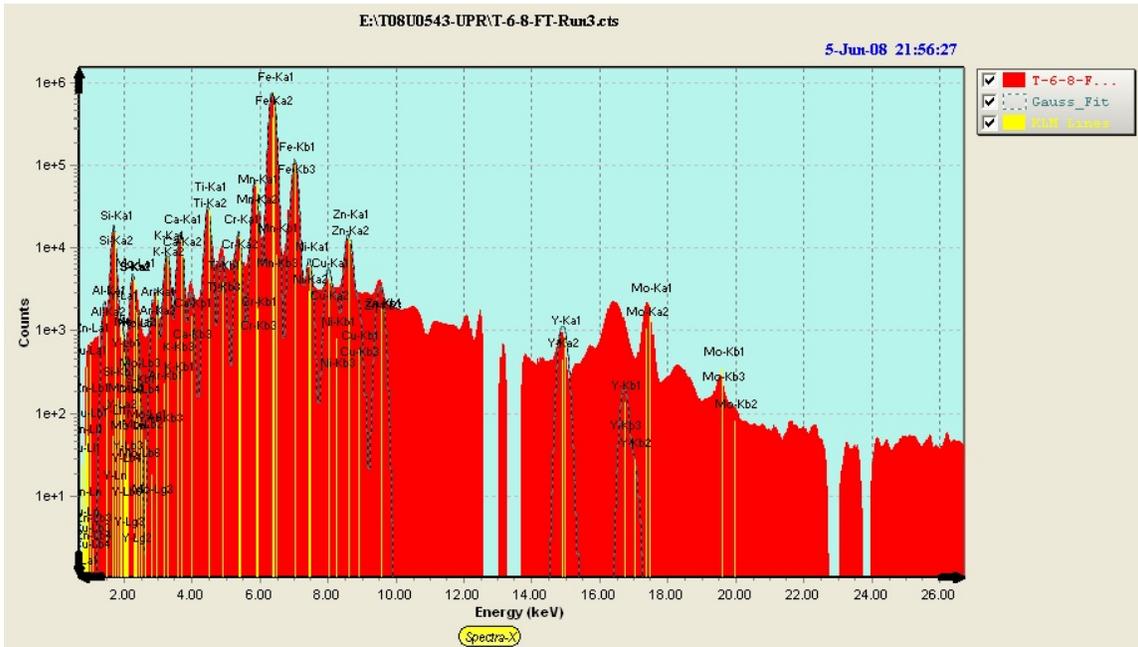
The sample was prepared by grinding with a mortar and pestle in order to homogenize the material. The sample was then pressed into a pellet and analyzed under X-rays from a molybdenum X-ray tube operating at 47 kV with a beam diameter of ~100 microns. The X-ray beam was rastered over an area about 2mm x 2mm in size in order to obtain a representative sample of the material.

Quantification was performed using NIST soil reference sample #2710. Since XRF cannot detect elements lighter than Al, all of the compounds were assumed to be in the form of oxides. For example, XRF detects Si, and the Si was assumed to be in the form of SiO<sub>2</sub>.

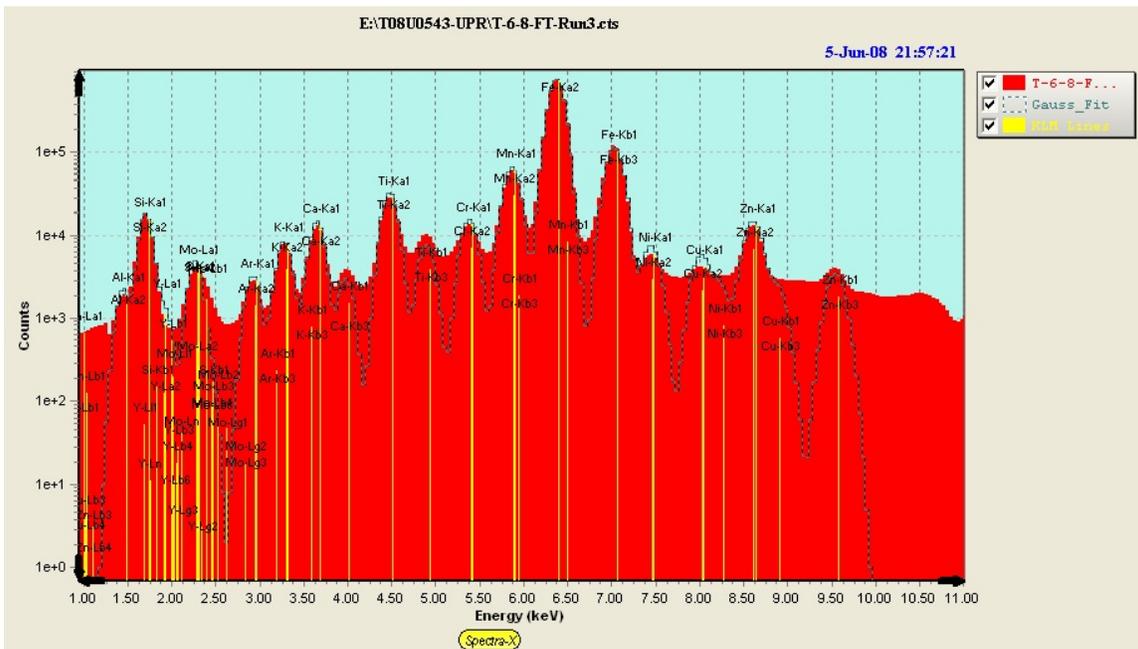
### Results and Discussion:

The results are presented in the attached Excel spreadsheet. A representative spectrum from sample T-6-8-FT is shown below.

There is an uncertainty of approximately 10-20% in the stated concentrations for major constituents. Uncertainties increase as the concentration of a given element goes down, so the uncertainty in the concentrations of trace elements can be a factor of 2X or more. The uncertainties for S is approximately 2X due to the presence of an interfering peaks from the Mo source X-rays.



Spectrum from sample T-6-8-FT



Spectrum from sample T-6-8-FT (plotted on expanded X-axis).

After reviewing this report, you may assess our services using an electronic service evaluation form. This can be done by clicking on the link below, or by pasting it into your internet browser. Your comments and suggestions allow us to determine how to better serve you in the future.  
<http://www.eaglabs.com/evaluate.htm?job=T08U0543>

### **X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) Description Appendix**

X-ray Fluorescence (XRF) is a non-destructive technique that identifies the elemental constituents of a sample and their relative abundance. It is capable of detecting elements of atomic number (Z) 13 (aluminum) through atomic number 92 (uranium) at concentrations from ~100 ppm to 100%.

X-rays from the molybdenum x-ray tube excite atoms in the sample to fluoresce x-rays characteristic of those atoms. These characteristic x-rays are collected by a Si drift detector and classified by the multichannel analyzer electronics to give a number-of-x-rays-counted versus energy-of-x-ray spectrum. The spectrum of the characteristic x-ray is unique for each atom. Therefore, each element in the sample from magnesium through uranium can be identified by its spectral pattern. Different voltages can be applied to the x-ray tube to optimize the x-ray fluorescence in different regions of the x-ray energy spectrum.

By using an appropriate elemental and matrix reference standard, accurate quantification of the elemental make-up of the sample can be performed.

## Apéndice C.

### Resultados del Análisis por Termogravimetría.

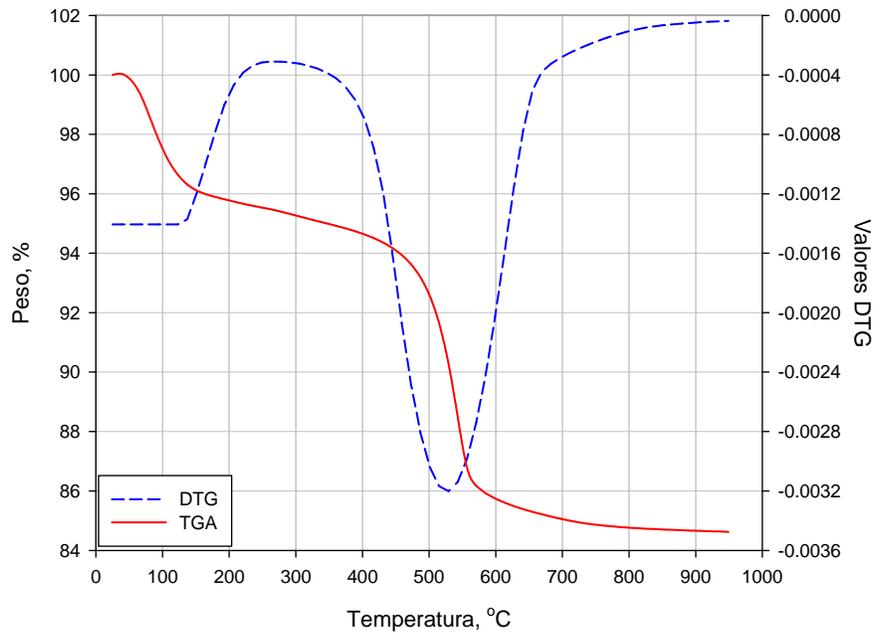


Figura D.1. Resultado de Termogravimetría Muestra CM-1-04.

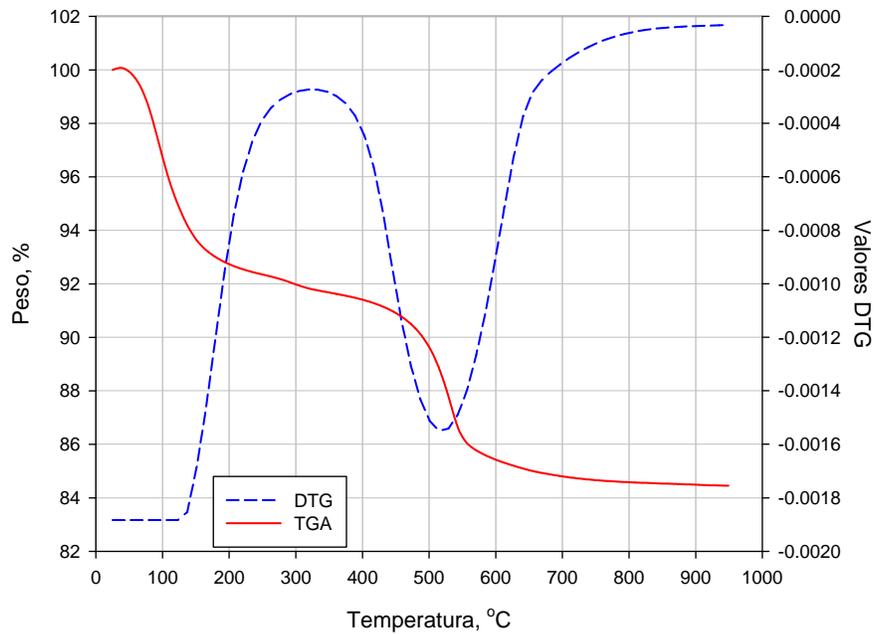


Figura D.2. Resultado de Termogravimetría Muestra CM-1-05.

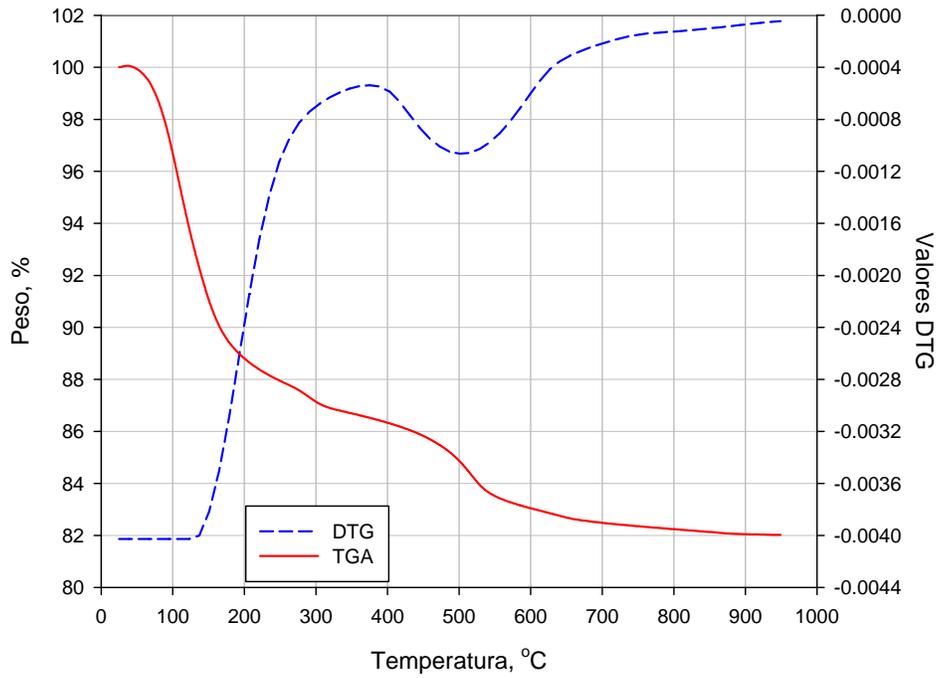


Figura D.3. Resultado de Termogravimetría Muestra CM-1-07.

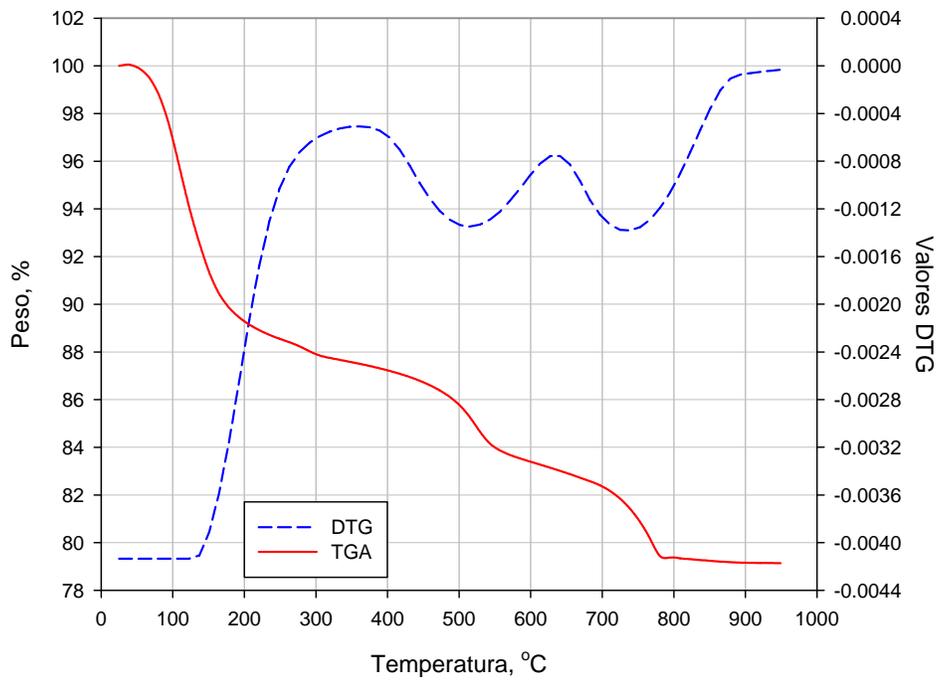


Figura D.4. Resultado de Termogravimetría Muestra CM-1-08.

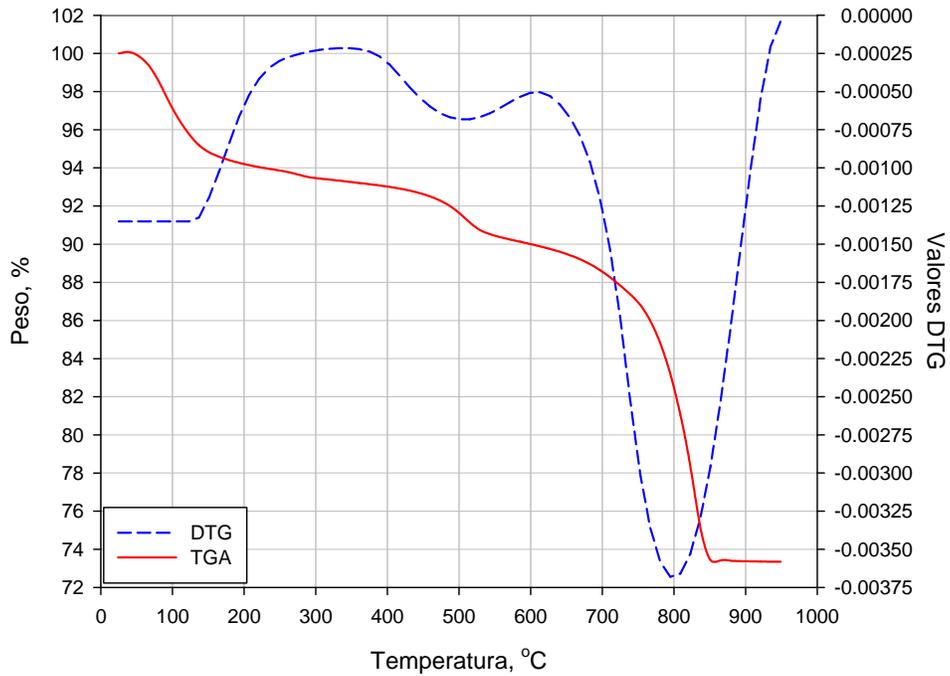


Figura D.5. Resultado de Termogravimetría Muestra CM-1-09.

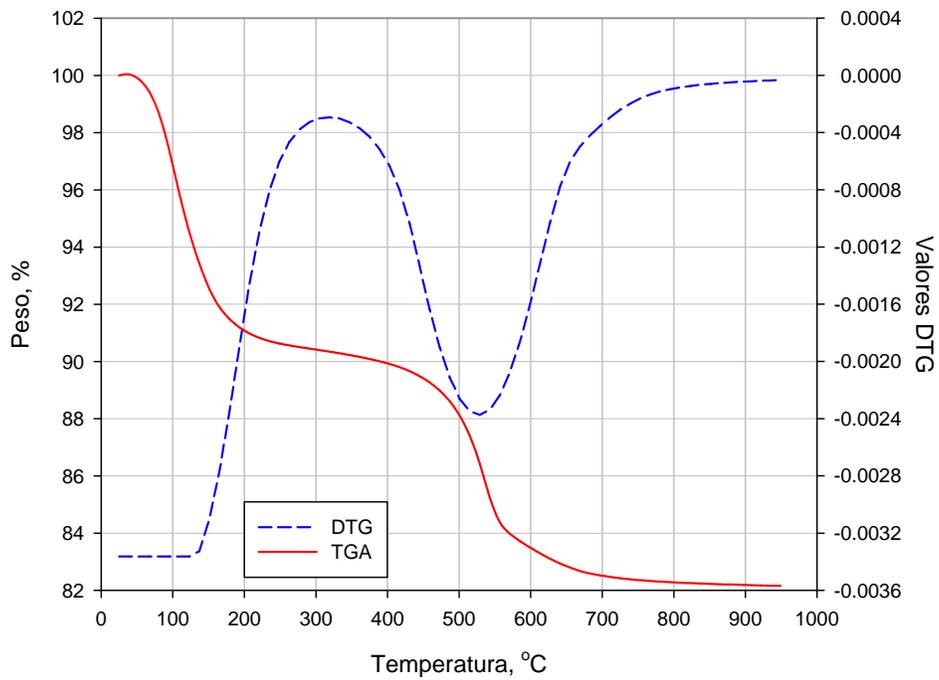


Figura D.6. Resultado de Termogravimetría Muestra T 2-6 ft.

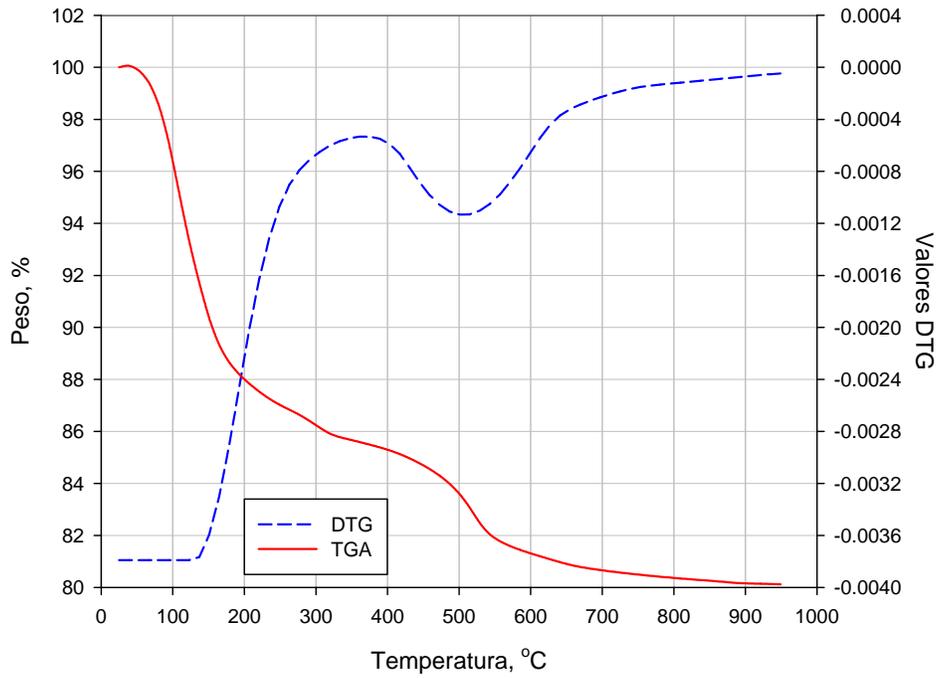


Figura D.7. Resultado de Termogravimetría Muestra T 6-8 ft.

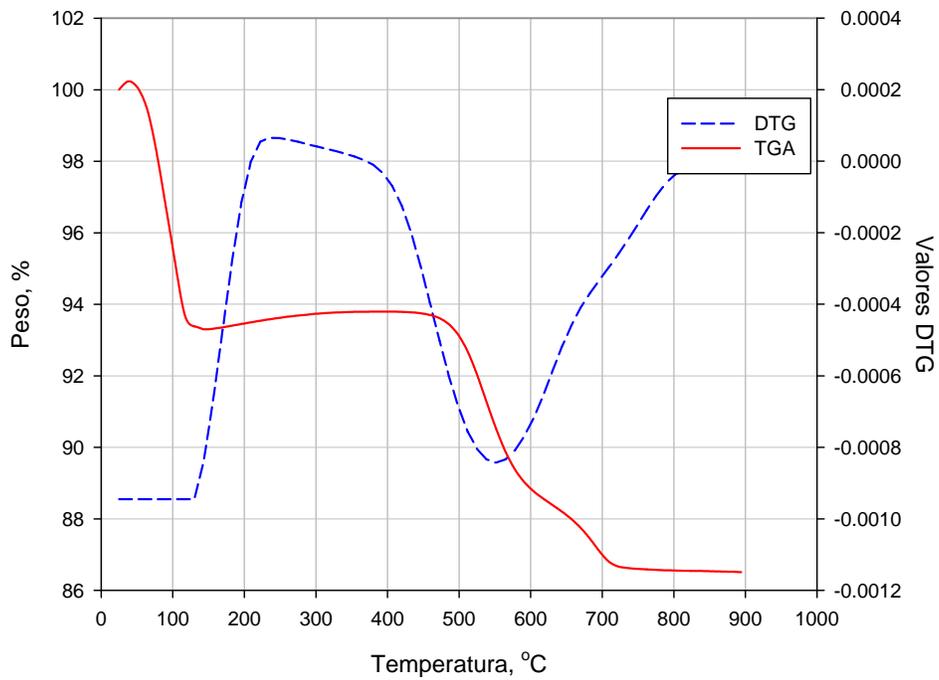


Figura D.8. Resultado de Termogravimetría Muestra Caolinita:Bentonita 1:1.

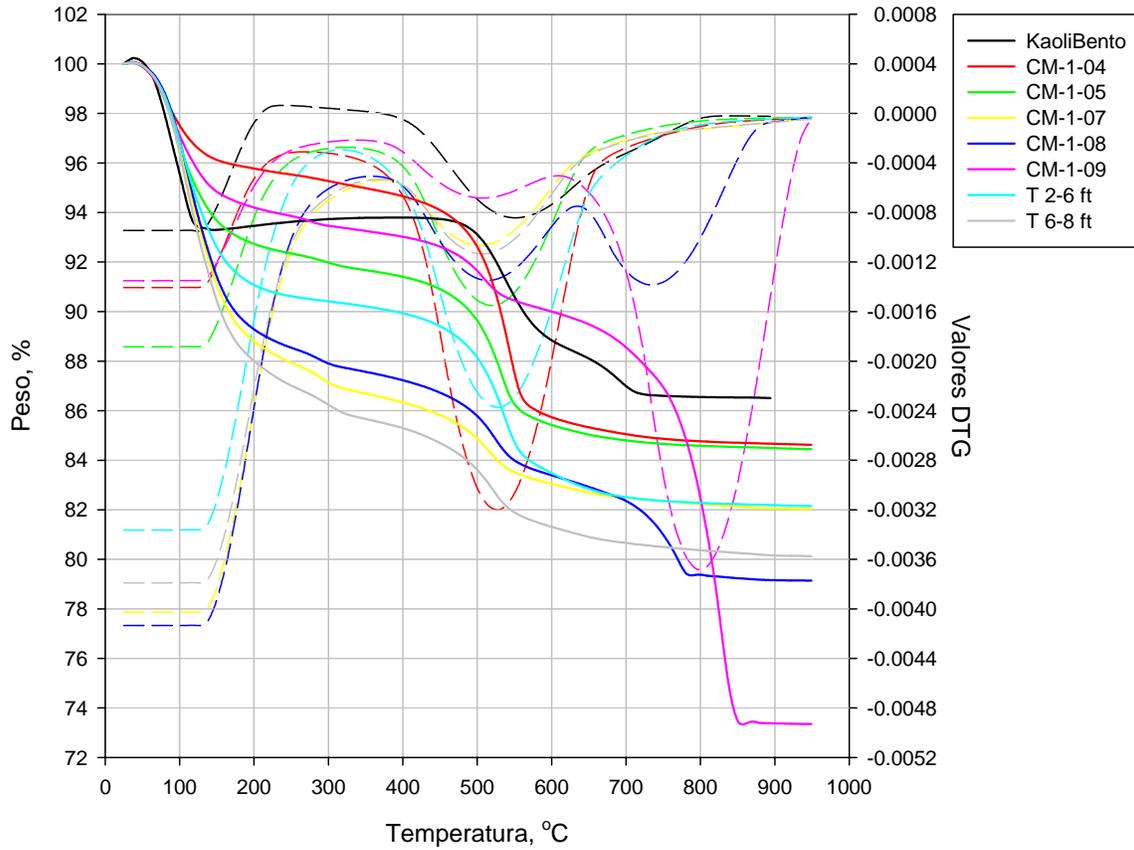


Figura D.9. Resultado de Termogravimetría Todas las muestras.