UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

"Efecto del contenido de humedad inicial sobre los límites de consistencia de suelos derivados de ceniza volcánicas en Costa Rica"

Trabajo Final de Graduación

Proyecto final de graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Mauricio Núñez López

Director de Proyecto de Graduación:

Ing. William Vargas Monge, Ph. D.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Costa Rica

Marzo, 2010

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

ingeniería civil

4 de marzo de 2010
IC-270-2010

Señor:
Mauricio Núñez López
Carné A03018

Estimado estudiante:

Según el artículo 39 del reglamento de Trabajos Finales de Graduación, la Escuela de Ingeniería Civil se complace en otorgarle la aprobación con distinción de su Trabajo Final de Graduación denominado "Efecto del contenido de humedad inicial sobre los límites de consistencia de suelos derivados de cenizas volcánicas."

Por este motivo le manifestamos nuestras más sinceras felicitaciones por su dedicación y empeño.

Atentamente,

Ing. Roberto Fernández Morales, M.Eng.C.E.
Director

Cc: archivo
Gabriela Astúa

Miembros del Tribunal Evaluador

Director

Ing. William Vargas Monge

Comité Asesor

Ing. Sergio Sáenz Aguilar Asesor

Inga. Marcia Cordero Sandí Asesora

Ing. Oscar Valerio Salas Asesor

Mauricio Núñez López

Optando por el grado de Licenciado en Ingeniería Civil

Fecha: 5 de marzo 2010

El suscrito, Mauricio Núñez López, cedula 7-0132-0140, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con numero de carne A03018, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación "Efecto del contenido de humedad inicial sobre los límites de consistencia de suelos derivados de ceniza volcánicas en Costa Rica", bajo la Dirección del Ingeniero William Vargas Monge ph.D; quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: decencia, investigación, acción social y divulgación.

Dedicatoria

“A mi madre Zeneida por haberme brindado todo su apoyo y todo su amor, sin ti nada hubiera sido posible”

“A mis queridos hermanos, ya que todos me han ayudado y me han dado animo en los momentos más difíciles, en especial mi hermana Ana”

Reconocimientos

- A ti madre, por tu infinito apoyo: no hay palabra con la que pueda agradecer todo lo que has hecho por mí.
- A toda mi familia que de una u otra forma contribuyó para este logro, en especial a mi hermana por haber sido otra madre para mí.
- Al profesor Ing. William Vargas, quien me ha instruido con todo su conocimiento y me ha enseñado a creer en lo que uno es capaz de hacer, si se lo propone.
- A James Harvey por creer en mí y darme apoyo para poder alcanzar este objetivo.
- Al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) por facilitar laboratorios, recurso y personal técnico para la realización de la investigación.
- A los Ings. Sergio Sáenz Aguilar, Marcia Cordero Sandí y Oscar Valerio Salas, miembros del tribunal asesor por sus valiosos aportes y colaboración.
- A los Técnicos Manrique Vargas, Reyner Villagra, Sergio Castillo y Ronald Sancho, por su colaboración en la realización de muestreos de campo y pruebas con suelos en los Laboratorios de Geotecnia y Agregados de LanammeUCR.
- Al Químico Jorge Salazar y al personal técnico del Laboratorio de Asfaltos de LanammeUCR, por la ayuda brindada en la realización de pruebas químicas.
- A los ingenieros Mauricio Coto y Luis Ángel Vargas de MyV, Soluciones Geotécnicas, S.A. por su aporte con información para implementar la prueba de cono.

Contenido

Capítulo 1: Introducción 1
1.1 El problema y su importancia 1
1.2 Objetivos 4
1.3 Alcances y limitaciones 5
1.4 Antecedentes (Resumen descriptivo) 6
1.5 Metodología del proyecto 9
Capítulo 2: Marco Teórico 12
2.1 Origen de los suelos 12
2.2 Suelos residuales 15
2.3 Suelos lateriticos 17
2.4 Suelos transportados y residuales derivados de cenizas volcánicas 18
2.5 Elementos constitutivos del suelo 20
2.5.1 El esqueleto sólido (forma) 20
2.5.2 El agua en el suelo 20
2.5.3 El aire en el suelo 21
2.6 Clasificación de los suelos 21
2.7 Identificación de suelos 23
2.7.1 Color 23
2.7.2 Textura 23
2.7.3 Contenido de material orgánico 23
2.7.4 Propiedades superficiales de una partícula arcillosa 23
2.7.5 Efecto del agua adsorbida en las arcillas 25
2.7.6 Capacidad de intercambio catiónico 25
2.8 Mineralogía de las arcillas 26
2.9 Química y microestructura de los minerales arcillosos más comunes 37
2.10 Minerales arcillosos y tipos de suelo según sus límites de consistencia 40
2.11 Influencia del contenido de alófana en las propiedades ingenieriles de los suelos volcánicos 42
2.12 Métodos para obtener mineralogía y la microestructura del suelo 47
Capitulo 3. Pruebas de laboratorio e información geotécnica recopilada del Valle Central 49
3.1 Marco metodológico 49
3.1.1 Metodología 49
3.1.2 Esquema metodológico 50
3.2 Ensayos de laboratorio/campo (normativa) 51

3.2.1 Contenido de humedad ASTM D-2216-05 51
3.2.2 Densidad (in situ) BS-1377(90) 51
3.2.3 Análisis granulométrico ASTM D-421 y ASTM D-422 y ASTM D-2487-06 para clasificación de suelos con fines ingenieriles (sistema SUCS) 52
3.2.4 Gravedad específica ASTM D-854-06 53
3.2.5 Límites de consistencia en suelos cohesivos (ASTM D4318 & BS-1377) 55
3.2.6 Clasificación según la norma ASTM D2487(06) y el sistema SUCS 65
3.3 Análisis químico para determinar alófana y materia inorgánica amorfa en suelos volcánicos. 67
3.3.1 Resumen de los métodos previos existentes al presente estudio 67
3.3.2 Eliminación de la materia orgánica mediante Peróxido de Hidrógeno 68
3.3.3 Disolución alterna con HCl y NaOH para cuantificar alófana 70
Capítulo 4: Caracterización General de los Materiales 74
4.1 Ubicación geográfica 74
4.2 Topografía 76
4.3 Ubicación geológica 77
4.4 Ubicación geotécnica 80
4.5 Ubicación climática 83
4.6 Resultados de ensayos de campo 84
4.7 Resultados de ensayos de laboratorio 85
4.7.1 Contenido de humedad (ASTM D2216) 85
4.7.2 Curvas de variabilidad de la humedad en suelos 87
4.7.3 Densidad del suelo en muestras inalteradas (BS-1377) 90
4.7.4 Gravedad específica (ASTM D854) 91
4.7.5 Límites de consistencia (ASTM D4318) 92
4.7.6 Límites de consistencia por el método británico (BS-1377) 98
4.7.7 Clasificación SUCS y otros parámetros ASTM 101
4.7.8 Contenido de materia orgánica 103
4.7.9 Contenido de alófana 104
Capítulo 5: Análisis de resultados 107
5.1 Análisis y efecto del contenido de humedad inicial sobre los límites de consistencia obtenidos por dos métodos de laboratorio distintos 107
5.1.1 Pacayas 107
5.1.2 Patio de Agua 108
5.1.3 Las Nubes 110
5.1.4 Río Grande 111

5.2 Relación del contenido de alófana y los sitios estudiados 112
5.3 Análisis de las propiedades índice del suelo con la presencia del contenido de alófana 115
5.4 Relación de los límites de consistencia con las propiedades índice 118
5.5 Carta de plasticidad para suelos del Valle Central y análisis comparativo con los suelos de Japón 122
5.6 Consecuencias por secado de muestras de suelo en los sistemas de clasificación con fines ingenieriles 126
5.7 Implicaciones 130
Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones 131
6.1 Conclusiones 131
6.2 Recomendaciones 132
6.3 Bibliografía y referencias 134
ANEXO I 139
Caracterización de los sitios estudiados 139
ANEXO II 143
Pruebas de laboratorio 143
Humedad higroscópica 144
Contenido de materia orgánica con Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2) 144
Contenido de alófana 145
Pruebas de contenido de humedad natural 148
1. Pacayas (Cartago) 148
2. Río Grande (Alajuela) 161
3. Matinilla, Salitral de Santa Ana 167
4. Patio de Agua, Coronado (San José) 172
5. Las Nubes, Coronado (San José) 183
ANEXO III 194
Recopilación de resultados para suelos de la GAM 194

Índice de Figuras

Figura 1.1. Distribución de andosoles en Costa Rica 2

Figura 1.2. Observaciones en comportamiento mecánico de suelos secos al aire 6

Figura 2.1. Ciclo evolutivo de las rocas 12

Figura 2.2. Resumen de aspectos teóricos sobre meteorización química de productos volcánicos 14

Figura 2.3. Perfil de varios suelos residual y coluvión 16

Figura 2.4. Condiciones ambientales para la formación de andosoles en Costa Rica 19

Figura 2.5. Clasificación granulométrica de los suelos 22

Figura 2.6. Modo de asociación de partículas en suspensión de arcilla 24

Figura 2.7. Forma de la estructura de los hidro-alumino-silicatos (llamados filosilicatos) 27

Figura 2.8. Esquema del tubo estructural de la partícula de imogolita 29

Figura2.9. Alófana en partículas y grumos que van de (4 µm ancho de foto) 30

Figura 2.10. Fotografías con microscopio electrónico de varias formas de halloysita 31

Figura 2.11. Fotografía por microscopio electrónico de una caolinita (1 µm) 32

Figura 2.12. Fotografía por microscopio electrónico de una montmorillonita (2 µm) 33

Figura 2.13. Fotografías con microscopio electrónico de una ilita (sin escala) 35

Figura 2.14. Fotografía por microscopio electrónico de gibbsita (5 µm) 35

Figura 2.15. Fotografías con microscopio electrónico de cloritas (100 µm) 36

Figura 2.16. Proceso esquemático de formación de minerales a partir de elementos básicos 38

Figura 2.17. Formación de minerales arcillosos según el grado de meteorización 39

Figura 2.18. Posibles rutas para la formación de minerales arcillosos durante la meteorización 39

Figura 2.19. Valores de **LL** e **IP** y minerales en la carta de plasticidad de Casagrande 40

Figura 2.20. Efecto del secado en los límites de consistencia de suelos tropicales 41

Figura 2.21. Contenido de alófana (A_p) en suelos volcánicos (densidad y humedad óptima) y su influencia sobre la curva de compactación 43

Figura 2.22. Carta de clasificación según contenido de humedad 44

Figura 2.23. Contenido de alófana y humedad en suelos volcánicos 45

Figura 2.24. Carta de clasificación según coeficiente de flujo 46

Figura 3.1. Aparato de Casagrande utilizado para obtener límites de consistencia 55

Figura 3.2. Determinación del límite plástico según ASTM 56

Figura 3.3. Equipo alternativo para obtener los límites de consistencia en suelos 57

Figura 3.4. Modelo lineal logarítmico para estimar ambos límites de consistencia 58

Figura 3.5. Curvas de flujo para varios suelos con límite líquido diferentes 59

Figura 3.6. Repetitividad de la prueba por varios técnicos de laboratorio 59
Figura 3.7. Comparación entre métodos de obtener límites de consistencia 60
Figura 3.8. Límite plástico según BS-1377 en comparación con ASTM D4318 61
Figura 3.9. Curva esfuerzo deformación según límites de consistencia y contenido de humedad 62
Figura 3.10. Relación al esfuerzo cortante no drenado (C_{uu}) e índice de liquidez (IL) 63
Figura 3.11. Carta de plasticidad para clasificación (SUCS) 66
Figura 3.12. Resumen del método para eliminar y cuantificar materia orgánica 70
Figura 3.13. Curvas de disolución para muestra en HCl 8M y NaOH 0.5M 71
Figura 3.14. Resumen del método para eliminar y cuantificar alófana 73
Figura 4.1. Ubicación de los sitios de muestreo del Valle Central 75
Figura 4.2. Mapa de pendientes del Valle Central 76
Figura 4.3. Mapa geológico para el Área Metropolitana de Costa Rica 78
Figura 4.4. Tipos de suelos de la G.A.M 81
Figura 4.5. Extracción de muestras inalteradas en el sitio de Pacayas 86
Figura 4.6. Contenido de humedad Natural 87
Figura 4.7. Contenido de humedad de material seco al aire (humedad higroscópica) 88
Figura 4.8. Contenido de humedad de los suelos “in situ” en la estación seca 89
Figura 4.9. Pérdida de humedad en las muestras almacenadas 90
Figura 4.10. Curva de masa acumulada por humedad pérdida total 91
Figura 4.11. Perdida de contenido de humedad con el tiempo de secado 91
Figura 4.12. Pérdida de saturación con el tiempo de secado 92
Figura 4.13. Variación de la gravedad específica según el contenido de humedad inicial 94
Figura 4.14. Variación de los límites de consistencia ASTM (**Pacayas**) 97
Figura 4.15. Variación de los límites de consisitencia por el método ASTM (**Patio de Agua**) 98
Figura 4.16. Análisis de los límites de consisitencia por el método ASTM (**Las Nubes**) 98
Figura 4.17. Análisis de límites de consistencia por la ASTM (**Matinilla**) 99
Figura 4.18. Análisis de límites de consistencia por la ASTM (**Río Grande**) 99
Figura 4.19. Variación de los límites de consistencia BS-1377 (**Pacayas**) 101
Figura 4.20. Variación de límites de consistencia por el método BS-1377 (**Patio de Agua**) 101
Figura 4.21. Variación de límites de consistencia por el método BS-1377 (**Las Nubes**) 102
Figura 4.22. Granulometría (Resumen comparativo de curvas) 104
Figura 4.23. Determinación del contenido de alófana (Pacayas) 107
Figura 4.24. Relación entre la distancia mínima al cono volcánico y el contenido de alófana 109
Figura 4.25. Relación entre elevación y el contenido de alófana 110

Figura 4.26. Relación clasificación según Bogantes y el contenido de alófana 111
Figura 5.1. Comparacion entre métodos de laboratorio para obtener límites de consistencia 111
Figura 5.2. Comparación del índice de plasticidad entre ambos métodos de laboratorio 112
Figura 5.3. Comparacion entre métodos de laboratorio para obtener límites de consistencia 112
Figura 5.4. Comparación del índice de plasticidad obtenido por ambos métodos de laboratorio 113
Figura 5.5. Comparacion entre métodos de laboratorio para obtener límites de consistencia 114
Figura 5.6. Comparación del índice de plasticidad entre ambos métodos de laboratorio 115
Figura 5.7. Comparacion entre métodos de laboratorio para obtener límites de consistencia 116
Figura 5.8. Correlación del límite líquido por ambos metodos 116
Figura 5.9. Contenido de alófana (Ap) vs máximo contenido de humedad natural 117
Figura 5.10. Comparación entre Japón y Costa Rica (A_p vs LL) 118
Figura 5.11. Comparación entre Japón y Costa Rica (Ap vs LP) 119
Figura 5.12. Comparación entre Japón y Costa Rica (A_p vs IP) 119
Figura 5.13. Comparación entre Japón y Costa Rica (A_p vs IL) 120
Figura 5.14. Comparación entre Japón y Costa Rica (w vs LL) 121
Figura 5.15. Análisis de LP vs w_n de 51 muestras nacionales 121
Figura 5.16. Análisis 51 muestras nacionales (LP vs IP) 122
Figura 5.17. Análisis de 51 muestras nacionales (LL vs IP) 122
Figura 5.18. Análisis 51 muestras nacionales (LP vs IP) 123
Figura 5.19. Análisis de 51 muestras nacionales (LL vs LP) 124
Figura 5.20. Limos de la GAM en la carta de plasticidad (SUCS) 125
Figura 5.21. Comparación entre datos Japón- Costa Rica (51 muestras CR y 120 JPN) 126
Figura 5.22. Comparación entre datos de Japón y Costa Rica (51 CR y 120 JPN) 127
Figura 5.23. Efecto del secado en los límites de consistencia (carta de la SUCS) 128
Figura 5.24. Variación de la clasificación japonesa con la humedad inicial ASTM 129
Figura 5.25. Análisis de variación del coeficiente de flujo (ASTM D4318) 130
Figura 5.26. Clasificación por humedad para suelos de la GAM (51 muestras) 131
Figura 5.27. Carta de clasificación para suelos de la GAM (51 muestras) 131

Índice de tablas

Tabla 1.1. Propiedades geotécnicas típicas de los limos de baja resistencia 8

Tabla 2.1. Tipo general de mineral formado en los suelos residuales 16

Tabla 2.2. Descripción de los minerales según su génesis para el Valle Central de Costa Rica 20

Tabla 2.3. Lateritas arcillificadas de Costa Rica y valor porcentual (análisis taxonómico) 26

Tabla 2.4. Composición química de los diferentes minerales 37

Tabla 2.5. Valores de los límites de consistencia para minerales arcillosos 41

Tabla 2.6. Notación para la sub-clasificación y comparar suelos MH y ML 44

Tabla 2.7. Notación para la clasificación (IL vs β) 46

Tabla 3.1. Descripción de los suelos según su densidad seca 52

Tabla 3.2. Gravedad específica (G_s) según tipo de suelo 54

Tabla 3.3. Gravedad específica (G_s) según el mineral que conforma el suelo 54

Tabla 3.4. Criterio de actividad para varios minerales arcillosos 64

Tabla 3.5. Criterios de actividad para suelos arcillosos 65

Tabla 4.1. Coordenadas Lambert de los sitios elegidos 74

Tabla 4.2. Distancias de los sitios de muestreo a los principales volcanes del Valle Central 75

Tabla 4.3. Características geológicas de los sitios estudiados 77

Tabla 4.4. Litología de las unidades geológicas del área en estudio 79

Tabla 4.5. Litología de las unidades geológicas de origen volcánico en el área de estudio 85

Tabla 4.6. Humedad natural, higroscópica y humedad para saturación total 89

Tabla 4.7. Densidad de materiales con humedad natural “in situ” 92

Tabla 4.8. Resumen de resultados de gravedad específica 92

Tabla 4.9. Partículas con tamaño mayor a malla #40 (0,425 mm) 95

Tabla 4.10. Análisis de límites para la humedad natural 96

Tabla 4.11. Análisis de límites para la humedad seca al aire 96

Tabla 4.12. Análisis de límites para muestreo (seco in situ) 96

Tabla 4.13. Análisis de límites por caída de cono, para la humedad natural 100

Tabla 4.14. Análisis de límites por caída de cono, muestra seca al aire 100

Tabla 4.15. Análisis de límites por caída de cono, muestra seca al aire 100

Tabla 4.16. Porcentaje pasando la malla #200 103

Tabla 4.17. Clasificación de suelos por distintos sistemas internacionales 104

Tabla 4.18. Determinación de materia orgánica por disolución en Peróxido de Hidrógeno 106

Tabla 4.19. Determinación de alófana por el método exacto en disolución de HCl y NaOH 107

Simbología

β: coeficiente de flujo que sirve de parámetro de clasificación japonesa

γ_T: peso volumétrico unitario total

γ_d: peso volumétrico unitario seco

µm: micrómetro

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

ASTM: American Standard of Test and Materials

BS-1377 (90): British Standard for test soils performance by the Transport and Road Research Laboratory, United Kingdom.

CBR: California Bearing Ratio

CCCR: Código de Cimentaciones de Costa Rica

GAM: Gran Área Metropolitana de Costa Rica

GPS: Global Position System

MH: limo de alta plasticidad

ML: limo de baja plasticidad

CL: arcilla de baja plasticidad

CH: arcilla de alta plasticidad

e: razón de vacíos

g: gravedad terrestre de 9,81 m/s^2

G_s: gravedad específica

IP: índice plástico

LL: límite líquido

LP: límite plástico

IL: índice de liquidez

%w: contenido de humedad

$\%w_{óptimo}$: humedad óptima

$\%w_{in\ situ}$: contenido de humedad en sitio

Lanamme: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

L: longitud efectiva del hidrómetro

q_{ultm}: capacidad de soporte última

SEM = MEB: Microscopía electrónica de Barrido

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

SPT: Standard Penetration Test

Fall Cone Test: Prueba de límites de consistencia con caída de cono

S: porcentaje de saturación

UCR: Universidad de Costa Rica

USDA: United States Department of Agriculture

UU: ensayo triaxial no consolidado no drenado

t : variable tiempo

$\mathbf{W_s}$: peso seco de la muestra

$\mathbf{W_w}$: peso de agua en la muestra

$\mathbf{V_{aire}}$: volumen de aire

$\mathbf{V_s}$: volumen de sólidos

$\mathbf{V_w}$: volumen de agua

$\mathbf{R^2}$: correlación estadística entre variables

Núñez López, Mauricio
Efecto del contenido de humedad inicial sobre los límites de consistencia de suelos derivados de ceniza volcánica en Costa Rica
Proyecto Final de Graduación – Ingeniería Civil – San José. Costa Rica
M. Núñez L., 2010
xiv, 133, [61]h; ils. Col. – 56 refs

Resumen

Se estudiaron suelos tipo andosol de cinco lugares diferentes, procedentes de la Gran Área Metropolitana (G.A.M.), se analizaron cambios en los límites de consistencia y otras propiedades físicas, con las variaciones en el contenido de humedad inicial al realizar las pruebas de laboratorio. Se estudia la variación en propiedades físicas, con resultados obtenidos a partir de muestras secas y con humedad natural, las variaciones se atribuyen a los suelos derivados de cenizas volcánicas y la presencia de minerales amorfos como la alófana y halloysita, los cuales influyen en el comportamiento de este tipo de materiales.

Se implementa el uso de un aparato alterno para la obtención de límites de consistencia con normativa británica BS-1377, se realiza el análisis y comparación de los resultados obtenidos por el método clásico con cuchara de Casagrande basado en la normativa ASTM D4318. La principal ventaja del nuevo método es la sencillez para realizar la prueba por parte de técnicos de laboratorio o estudiantes con poca experiencia, además el carácter estático de la prueba elimina errores humanos en la aplicación de la prueba.

Se aplica la metodología japonesa para cuantificar el contenido de materia orgánica y de alófana por medio de análisis químicos. Las pruebas consisten en eliminar la materia orgánica con Peróxido de Hidrógeno, la alófana con disolución en HCL 8M y NaOH 0,5M y en ambas pruebas se determina el contenido de materia orgánica y alófana por diferencia de peso.

Se demuestra de manera experimental la presencia de estos minerales en los suelos de la GAM y se cuantifica su contenido, obteniendo resultados que vinculan de manera directa el contenido de estos minerales con sus propiedades físicas y mecánicas. Se complementa la clasificación Por último se recomienda metodologías de sub-clasificación para suelos donde gobierna el comportamiento de la alófana, con el propósito de poder clasificar de mejor manera este tipo de materiales y poder determinar el comportamiento del suelo y su mejor utilización en el diseño geotécnico.

Por último, se generaron recomendaciones sobre los procedimientos a utilizar en la evaluación de las propiedades físicas y la clasificación de estos suelos.

EFECTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL SOBRE LOS LÍMITES DE CONSISTENCIA DE SUELOS DERIVADOS DE CENIZA VOLCÁNICA EN COSTA RICA

Palabras clave: Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil, suelos de cenizas volcánicas, límites de consistencia, variación de humedad, cono de penetración, contenido de alófana, clasificación de suelos.

Ing. William Vargas Monge, Ph.D.
Escuela de Ingeniería Civil

Capítulo 1: Introducción

1.1 El problema y su importancia

Los problemas geotécnicos de los suelos derivados de cenizas volcánicas llamados "andosoles" en la terminología agronómica, han sido investigados en la Universidad de Costa Rica y los resultados revelan como característica más importante una estructura porosa potencialmente colapsable ante la aplicación de cargas y la saturación (Chávez, 1992). Además se ha propuesto y demostrado de manera indirecta en trabajos anteriores que estos suelos tienen contenidos importantes de minerales del tipo alófana y halloysita, los cuales tienen como característica común una estructura "amorfa" o poco cristalina, en la cual las moléculas de agua forman parte integral de las partículas sólidas.

Esas características hacen que los suelos derivados de cenizas volcánicas ante variaciones en la humedad, sean muy susceptibles a cambios en sus propiedades físicas y probablemente también en sus propiedades mecánicas, porque los cambios de humedad potencialmente afectan el agua "interna" o estructural de las partículas de suelo. Es conocido que el secado al horno produce un cambio en los límites de consistencia, al extremo que algunos suelos pierden completamente sus características plásticas cuando son secados al horno a más de 100 ºC de temperatura (Rollings & Rollings, 1996).

La variación de los límites de consistencia con el secado ha conducido a que la American Society of Testing and Materials (ASTM) recientemente en 2005 estableciera un procedimiento específico para la evaluación de los límites de consistencia de suelos con problemas de contenido de halloysita y alófana. Esto se debe a que dependiendo del grado de experiencia de los técnicos del laboratorio y del control cuidadoso de parámetros que estos suelos requieren, se encuentra en la práctica una variabilidad en los resultados obtenidos de un laboratorio a otro en un mismo suelo. Como consecuencia la ASTM debió establecer un procedimiento estándar específico, para que los resultados obtenidos tengan validez comparativa indistintamente del lugar, la temperatura y la humedad que posean las muestras de suelo de los distintos lugares.

Sin embargo, aun no se ha cuantificado con claridad en nuestro país el efecto del contenido de humedad inicial del suelo, sobre los valores de los límites de consistencia. La necesidad de conocer cuál es el efecto del contenido de humedad inicial sobre un material y sus características físicas cuando la humedad cambia por condiciones meteorológicas, es de suma importancia en

los parámetros de diseño para que una estructura cumpla con una vida útil esperada y no ponga en peligro a sus ocupantes.

En la Ingeniería Civil, particularmente en la mecánica de suelos el análisis de pruebas de laboratorio de un determinado tipo de suelo para obtener sus propiedades físicas y mecánicas es de suma importancia en el proceso de diseño de casi cualquier tipo de obra de infraestructura. Por lo anterior surge la importancia de poder interpretar de manera correcta los datos obtenidos en el laboratorio y los límites de consistencia juegan un papel muy importante en la determinación de estas propiedades.

El desarrollo urbano de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica (**GAM**) ha alcanzado zonas donde hay grandes espesores de suelos derivados de cenizas volcánicas, que anteriormente se dedicaron a los cultivos agrícolas fundamentalmente de café y caña de azúcar pero ahora es donde se ubican los principales centros urbanos.

Además de la GAM otras zonas de Costa Rica también tienen suelos derivados de cenizas volcánicas, tal como se muestra en la Figura 1.1 el mapa de andosoles de Costa Rica. En la Figura 1.1 se muestran las regiones: (A1) Guanacaste. **(A2) Valle Central asociados a la** GAM. (A3) Zona Atlántica. (A4) Zona de Talamanca. (A5) Zona Sur.

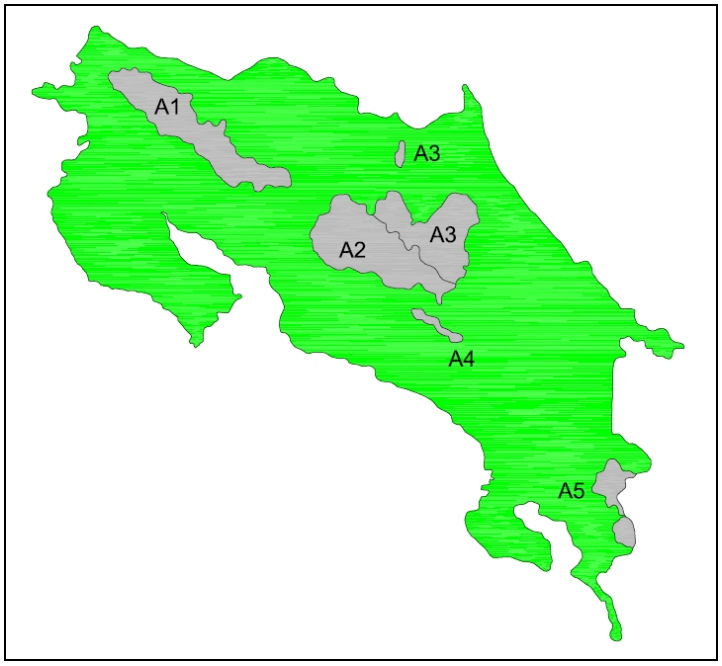


Figura 1.1. Distribución de andosoles en Costa Rica

Fuente: Adaptado de Alvarado (2001)

El ingeniero geotécnico del futuro necesitará del conocimiento más detallado y claro de las propiedades de estos suelos, que por ser poco frecuente en Estados Unidos y Europa no han sido investigados lo suficiente, además que por sus características se diferencian de los suelos más típicos contemplados en los sistemas de clasificación más comunes (SUCS y AASHTO).

Por lo tanto, corresponde a los propios costarricenses realizar investigación que mejore el conocimiento de este tipo de suelos, con el fin de mejorar la práctica de la Ingeniería Civil especialmente en el diseño y construcción de infraestructura adecuada al medio.

Las implicaciones de la variación de los límites de consistencia de un suelo con la humedad inicial pueden ser varias, desde una interpretación equivocada del comportamiento probable del suelo en términos de plasticidad, hasta errores de diseño que conlleven un riesgo de falla estructural. Por ejemplo, si el material es secado al horno a 110 ºC y no presentara ninguna plasticidad, se podría concluir erróneamente que su comportamiento es adecuado para las obras civiles o si se evaluaran las propiedades mecánicas con muestras de suelo que han perdido demasiada humedad por manipulación y exposición al secado.

1.2 Objetivos

Objetivo General

- Evaluar el efecto de la humedad inicial y sus variaciones en los límites de consistencia de (algunos) suelos derivados de cenizas volcánicas, en el valle central de Costa Rica.

Objetivos específicos

- Recopilar información bibliográfica sobre el comportamiento de minerales arcillosos y suelos residuales volcánicos derivados de cenizas dentro de la GAM.
- Seleccionar sitios de interés para la evaluación propuesta y muestrear suelos.
- Ubicar los sitios geográficamente en relación con variables topográficas tales como: elevación, pendiente y variables climáticas tales como temperatura y precipitación.
- Determinar las propiedades básicas de los suelos para su clasificación preliminar tales como la humedad natural, el peso volumétrico unitario, la relación de vacíos, la porosidad, la granulometría y la gravedad específica.
- Implementar pruebas japonesas para determinar el contenido de alófana.
- Revisar la normativa ASTM para la evaluación de los límites de consistencia de suelos halloysíticos.
- Investigar una normativa distinta de ASTM y evaluar la factibilidad de utilizar procedimientos alternos al de Casagrande para la determinación de los límites de consistencia, tal como el realizado con penetración mediante caída de cono (norma británica BS-1377.
- Evaluar la variación de los límites de consistencia de los suelos seleccionados en función del contenido de humedad inicial de las muestras.
- Evaluar el efecto de secado natural y en laboratorio sobre los límites de consistencia de los suelos.
- Realizar una interpretación de los resultados en términos del posible comportamiento de los suelos y sus partículas de minerales arcillosos con la variación de la humedad.
- Recomendar un procedimiento para la evaluación de límites de consistencia de los suelos con partículas de minerales arcillosos que varían con la humedad.
- Recomendar un procedimiento para la evaluación de límites de consistencia de los suelos derivados de cenizas volcánicas de Costa Rica.

- Evaluar las implicaciones prácticas de la variación de los límites de consistencia, como elementos de clasificación geotécnica.
- Proponer y adaptar nuevos elementos de clasificación para este tipo de suelos.

1.3 Alcances y limitaciones

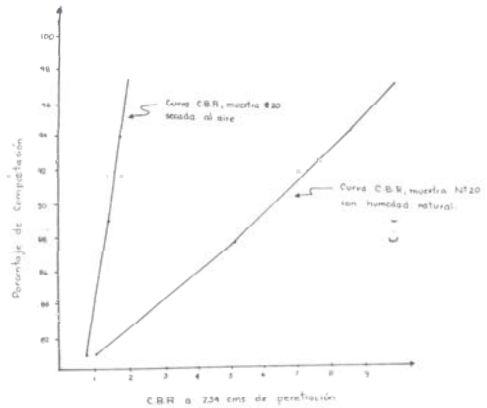
- La investigación será de tipo experimental en laboratorio.
- Se investigarán 5 sitios dentro de la GAM para extraer muestras.
- Se utilizará un método alterno de penetración con caída de cono, para la obtención de los límites de consistencia según la norma británica BS-1377 (91).
- Se investigarán solamente los límites de consistencia y otras propiedades físicas de los suelos como: contenido de humedad (w_n), peso volumétrico unitario (γ_T), gravedad específica (G_s) y su variación con la humedad inicial.
- Se determinarán las propiedades y parámetros de los suelos que se relacionen con el contenido de humedad en lo posible, tales como: porosidad, relación de vacíos y densidad del material.
- Se investigará la importancia del índice de liquidez (IL) para determinar el estado físico en que se encuentra el suelo y caracterizar sus propiedades mecánicas.
- Si se obtuviese financiamiento externo se realizarán ensayos para evaluar la mineralogía de las partículas de suelos por microscopía electrónica.
- Queda fuera del alcance del presente trabajo analizar suelos de formaciones donde se da la mezcla y la heterogeneidad de los suelos. Como el caso de suelos ubicados en depósitos de llanuras de inundación y por transporte fluvial.
- No se analizarán pruebas de sitios fuera de la GAM.
- No se analizarán suelos de tipo arcilloso expansivo.
- No se realizarán ensayos de campo ni de laboratorio para la determinación de propiedades mecánicas, tales como la resistencia y la compresibilidad.
- No se realizarán pruebas de compactación y determinación de humedad óptima.

1.4 Antecedentes (Resumen descriptivo)

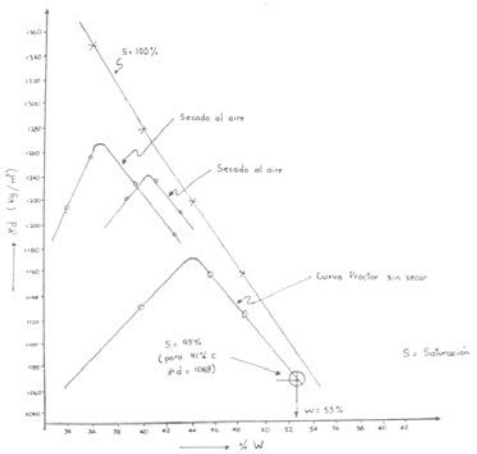
"Caracterización y propiedades de compactación de suelos de origen volcánico aplicado a diseño de carreteras" (Jorge A. Selva 1985)

Se estudiaron suelos de la zona norte de Costa Rica específicamente de los tramos de carretera: Santa Cecilia-Birmania, Birmania-San José de Upala-Colonia Puntarenas, Colonia Puntarenas-San Rafael de Guatuso, Canalete-Colonia Puntarenas, Aguas Claras-San Isidro-Cuatro bocas, Dos Ríos-Brasilia. La precipitación promedio en la zona de Guatuso es de 3000 mm y en Upala de 2200 mm. De la Figura 1.1 el sector A1 se ubica muy cerca del sector estudiado por Selva.

Las muestras se obtuvieron de una obra vial, realizada por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, en conjunto con el consorcio STV/LYON ASSOCIATES, INC y con INMSA-Ingenieros consultores.



#1 Comparación resultados CBR muestra #20 seca al aire y con humedad natural.



#2 Curvas de compactación

Figura 1.2. Observaciones en comportamiento mecánico de suelos secos al aire

Fuente: Selva (1985)

Se relacionaron las siguientes variables: límite líquido-índice plástico, límite líquido-humedad óptima, límite líquido-densidad máxima y entre los límites de Atterberg y el valor de CBR. El enfoque se extiende a relaciones de humedad natural y densidad máxima, humedad natural y CBR así como humedad óptima y densidad máxima. Se analizaron CBR de muestras

secas al aire y otras con humedad natural, encontrando así el autor diferencias entre ambos casos de análisis (ver Figura 1.2).

Se determinaron rangos para los valores de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos del sitio. Sin embargo, se aplicó una regresión lineal para correlacionar los valores obtenidos de LL y LP pero la correlación no es buena, ya que los suelos volcánicos tienen un comportamiento muy variable. Se analizaron muestras con humedad natural y seca al aire con el propósito de observar la influencia del secado en las propiedades físicas y mecánicas.

"Características geotécnicas de los suelos derivados de cenizas volcánicas (andosoles) en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica" (Carlos Novoa Golfín 2007)

En este proyecto final de graduación se resume la mayor parte de experimentos que se han realizada a suelos de la GAM en la Universidad de Costa Rica. Estos proyectos se han llevado a cabo principalmente en Lanamme, en lo referente a pruebas de laboratorio y con apoyo de fuentes de información teórica de distintas regiones del mundo tales como: México, Estados Unidos, España, Colombia, Brasil, Francia, Australia, Inglaterra y Japón entre otros.

Se brinda información acerca de los suelos determinados localmente "limos colapsables," su mineralogía característica de suelo fino, su formación, etc. Toda esta información se recopiló en puntos cercanos a los conos volcánicos del Turrialba, Irazú y el Barva en la GAM. Los Proyectos Finales de Graduación y mapas con zonificaciones geotécnicas, que fueron recopilados por Carlos Novoa son los siguientes:

- Zonificación Preliminar de los suelos del Área Metropolitana (Quirós, 1986).
- Propuesta de Zonificación geotécnica para el Área Metropolitana (Bogantes, 1999).
- Caracterización geotécnica de limos porosos en Santa Cruz de Turrialba (Murillo, 2004).
- Determinación de parámetros de compresibilidad en limos colapsables del sector este de la GAM al ser utilizados como material de relleno (Muñoz, 2003)
- Análisis de comportamiento de limos de baja plasticidad (Rodríguez, 2001).
- Estudio del potencial de colapso de limos de baja plasticidad (Chávez, 1992).
- Estudio sobre la capacidad de carga de limos de baja plasticidad (Cordero, 1995).
- Correlaciones de orden práctico en suelos blandos de la GAM (Quesada, 2006).

“Suelos residuales de origen volcánico en el valle central occidental de Costa Rica”

(Luis Gonzalo Lacayo Elizondo 2004)

En este proyecto se presenta una zonificación de la parte occidental de la GAM, la cual pretende brindar información de los tipos de suelos presentes en los diferentes puntos (Río Grande, Río Ciruelas, Alajuela). Además se brinda información de los perfiles del Río Grande y otro tipo información geotécnica útil. En este se puede encontrar información geológica general de la zona muy útil para iniciar una investigación geotécnica.

“Resumen de información geotécnica nacional”

(Código de Cimentaciones de Costa Rica 2009)

Tabla 1.1. Propiedades geotécnicas típicas de los limos de baja resistencia

Propiedad geotécnica	Valor típico
Límite líquido	60 – 90
Límite plástico	40 – 60
Clasificación **SUCS**	MH
%Pasando la malla N^0 200	80 – 95
Gravedad específica de sólidos	2,68 – 2,73
Razón de vacíos natural	1,50 – 2,30
Humedad natural	70 – 80 %
Resistencia a la penetración normal (**SPT**)	3 – 15
Peso volumétrico seco	869 – 1000 Kgf/m^3
Presión de hinchamiento	Baja
Expansión libre (**AASHTO**)	20 – 30 %
Peso volumétrico seco máximo	900 – 1100 Kgf/m^3
Humedad óptima (Proctor)	50 -60 %
Cohesión (muy variable con la humedad)	3 – 5 Ton/m^2
Índice de compresión	0,55 – 0,70

Fuente: CCCR (2009)

La recopilación de datos procedentes de tesis de la UCR se brinda en el ANEXO III y se toma en consideración lo que aporta el Código de Cimentaciones de Costa Rica.

1.5 Metodología del proyecto

a) Selección de los sitios de muestreo

Para este propósito se deberán tomar en cuenta varias características importantes tales como:

1. Perfiles típicos del suelo que se desea estudiar (transportado/residual de cenizas volcánicas o residual meteorizado).
2. Tomar en cuenta: alturas, pendientes, temperatura y cercanías a los conos volcánicos; como variables importantes para comparar suelos y como criterio para juzgar la presencia de alófana en los suelos de cada sitio.
3. Profundidades similares para representatividad y así validar la comparación entre resultados. Además se sabe que la humedad varía con la profundidad y que esta se vuelve constante después de cierta profundidad, por lo cual la muestra no debe ser tomada a mucha profundidad, porque se quiere analizar la condición más variable, la cual se localiza a profundidades menores a los 3 m. Además al aumentar la profundidad aumenta el grado de preconsolidación y sus respectivas presiones disminuyen los contenidos de humedad.
4. Tomar en cuenta la velocidad del viento, su dirección y la influencia que este pueda tener en el transporte y depósito de las cenizas volcánicas.

Se pretende seleccionar sitios de muestreo con suelos que posean una mineralogía particular, que se ha comprobado que poseen problemas de variabilidad en sus propiedades debido al contenido de humedad. Estos suelos derivados de cenizas volcánicas poseen contenidos de minerales tipo halloysita y alófana y que entre sus principales características presentan una variabilidad considerable en su plasticidad y por lo tanto en sus límites de consistencia.

Se desea analizar también otro tipo de suelos cohesivos residuales, denominados como perfectamente residuales por algunos autores, estos suelos tienen la particularidad que a diferencia de los derivados de cenizas volcánicas, su contenido de minerales alófana/halloysita es mínimo debido a la formación de nuevos minerales como la caolinita y esto se ve reflejado en su comportamiento físico y mecánico característico.

b) Importancia de la información recolectada

Los límites de consistencia de suelos cohesivos (arcillas y limos) son relaciones generales de los cambios de humedad entre sus partículas finas y su estado físico. La capacidad de los limos y/o arcillas de atraer y mantener humedad en sus superficies es característica de algunos tipos de suelos finos que pueden poseer mineralogías particulares (minerales arcillosos). Esta capacidad de atraer y mantener humedad de estos suelos se puede relacionar con los límites de consistencia.

Este tipo de información aportada por los trabajos mencionados es valiosa desde el punto de vista general ya representan muchos valores obtenidos experimentalmente para los distintos lugares que presentan este tipo de suelos de especial interés para el presente trabajo.

Los ensayos realizados a suelos derivados de cenizas volcánicas y de origen residual de varios puntos de nuestro país serán de ayuda para establecer rangos de confianza, donde se puede obtener valores de LL, LP, IP de manera correcta. Esto con el objetivo de obtener una buena clasificación del suelo y su plasticidad.

Toda la información de los autores antes mencionados es de interés, para el caso del análisis de los límites de consistencia de suelos residuales de ceniza volcánica. Debido a la amplia investigación realizada a este tipo de suelos en la GAM, se demuestra que la información planteada tiene un grado de aproximación aceptable y es de utilidad para hacer estimaciones preliminares en el desarrollo de proyectos de ingeniería.

c) Método alterno para obtener límites de consistencia

La utilización del ensayo de penetración con caída de cono (penetrómetro) como método alterno para obtener límites de consistencia, es una herramienta de comparación para medir como varían estos límites según el contenido de humedad inicial mediante otros métodos.

d) Análisis de variación de los límites de consistencia con el contenido de humedad

Se pretende comparar la variabilidad de los límites de consistencia del suelo conforme cambiamos el contenido de humedad inicial y así ver cómo afecta los resultados obtenidos. Se analizarán ambos tipos de suelos cohesivos, volcánicos y residuales.

Se varía la humedad desde un contenido inicial máximo “in situ” obtenido al muestrear en los meses más lluviosos de la temporada (setiembre, octubre y noviembre) y secado hasta los mínimos valores posibles (en el laboratorio) con el objetivo de controlar cuanto varían los

parámetros de clasificación. Además esto incluye una gira de recolección de muestras para los últimos días de febrero (estación seca en pleno) para obtener una humedad menor en sitio (seco "in situ") y comparar con los resultados obtenidos con muestras secas al aire en laboratorio.

e) Humedad máxima en las muestras de suelo

Se obtienen los valores para la condición natural de humedad "in situ", los cuales van a representar la condición crítica en lo referente a su comportamiento mecánico debido a su alto grado de saturación.

f) Normas para realizar las pruebas de laboratorio

Se utilizará la norma ASTM en todas las pruebas realizadas en laboratorio y en el caso del método alterno para obtener límites de consistencia, no se cuenta con norma ASTM por lo cual se deberá utilizar la norma británica BS 1377(90) parte II en lo referente a la obtención de límites de consistencia por este método, este método es originario de Gran Bretaña.

g) Análisis químico para cuantificar el contenido de alófana

Se aplicara el método japonés de identificación y cuantificación de contenido de alófana en suelos volcánicos por medios químicos (disolución en solución ácido-base) y de ser posible se complementará con análisis de microscopía electrónica de barrido y transmisión.

h) Fuentes de información

- Mapas del IGN y la información agronómica recopilada sobre suelos volcánicos.
- Base de datos de zonificación y riesgos naturales de Lanamme.
- Recopilación de información de varios proyectos finales de graduación, relacionados con suelos finos cohesivos del área metropolitana y zonificaciones geotécnicas.
- Resultados de ensayos de laboratorio, para los muestreos realizados.
- Asesoría por parte de MyV en lo referente a la prueba de límites con caída de cono.
- Biblioteca Luis Demetrio Tinoco, Universidad de Costa Rica.
- Material digital obtenido en Internet.
- Artículos de la revista Soils and Foundations y otras publicaciones de la Sociedad Geotécnica Japonesa.

Capítulo 2: Marco Teórico

2.1 Origen de los suelos

La corteza terrestre está sometida a un continuo proceso de cambio, el cual es producto de varios agentes geológicos cuyo estudio es parte de la Geodinámica. Desde el punto de vista de la Geología las rocas siguen un ciclo evolutivo que desemboca en la formación de suelos y que se resume en tres procesos principalmente: meteorización, erosión-transporte-sedimentación, compactación-cimentación (ver Figura 2.1).

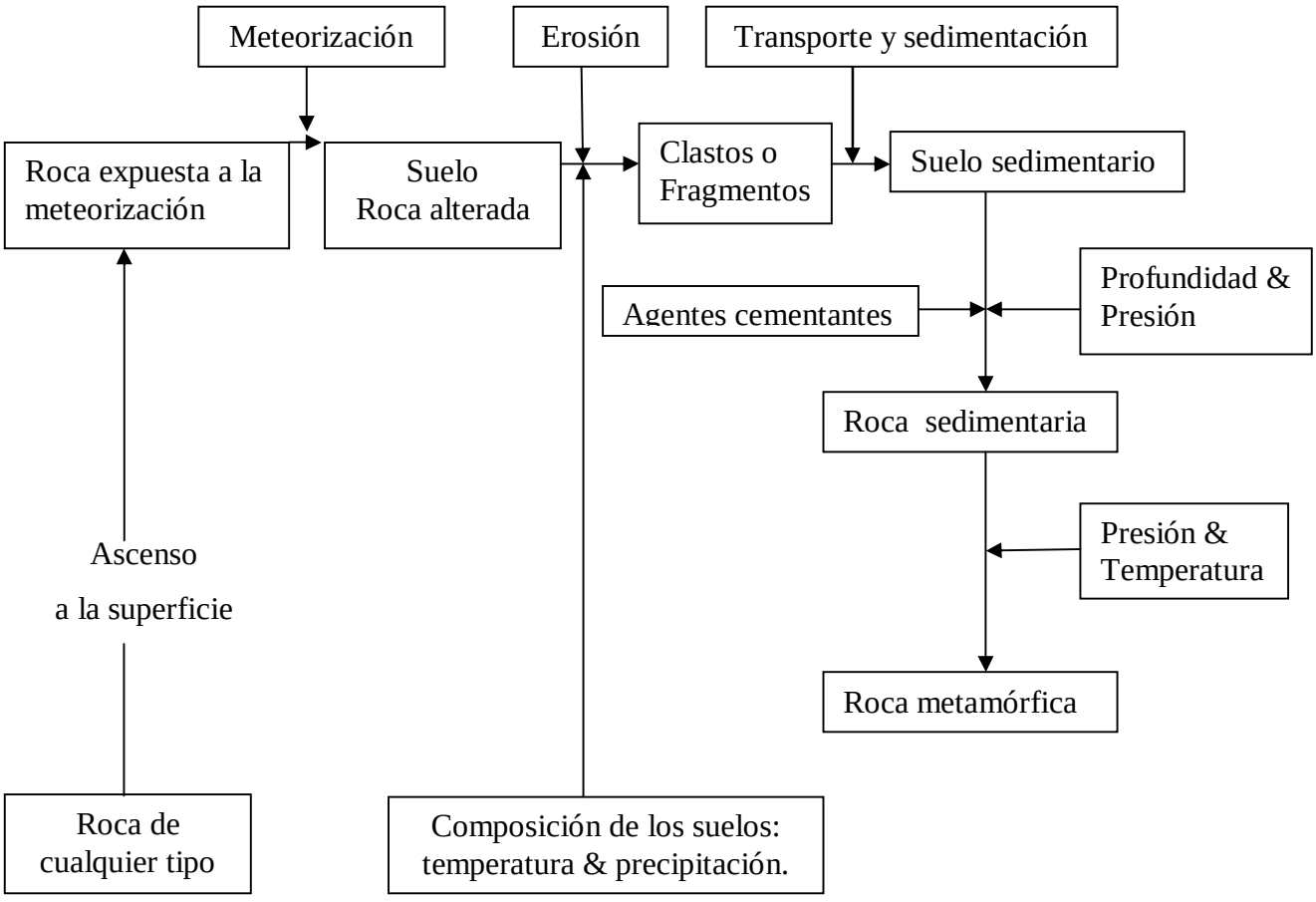


Figura 2.1. Ciclo evolutivo de las rocas

Fuente: Adaptado de Celso Iglesias (1997)

- **Meteorización de las rocas**

Es la destrucción de la roca madre mediante procesos mecánicos, químicos y físicos. En el caso natural la meteorización química predomina más que la física, ya que se da en menor parte del tiempo. Por lo cual cada uno de los procesos consiste principalmente en:

a) **Mecánicos:** la roca es fracturada dando lugar a la grava, arena y limo.
b) **Químicos:** se separan y alteran los minerales de la roca dando lugar a arcillas a partir del feldespato y otros materiales.
c) Físicos: la precipitación, la intensidad de las tormentas y la duración combinado a otros factores de relieve, son características muy importantes, como agentes formadores de suelos.

- **Suelos de alteración o meteorización**

Coinciden con la categoría denominada como suelos residuales en la que los productos de descomposición de las rocas se encuentran aun en el mismo lugar de origen, la causa más importante de esta meteorización es la hidrólisis o descomposición química de una sustancia por medio del agua. En las rocas de tipo granítico se produce esta reacción con la que se convierte en una arena granítica poco resistente, esto se da por la transformación de mica y feldespato en arcilla (caolinización de los feldespatos) produciendo además aumento de volumen.

Los mismos minerales presentes en la roca madre se encuentran en los suelos con origen en estas, pero la permanencia de los constituyentes principales no implica que no haya cambios en las proporciones relativas, produciéndose constantemente reacciones químicas de equilibrio. Es interesante citar tres evoluciones de los minerales producidas a partir de la hidrólisis:

a) **Caolinización de los feldespatos:** esta reacción tiene por efecto disminuir la relación SiO_2/Al_2O_3 o sea estabilidad del Al_2O_3 y disminución de SiO_2
b) **Laterización:** del latín (ladrillo) tiene por efecto disminuir la relación SiO_2/Fe_2O_3 ósea estabilidad del Fe_2O_3 y disminución del SiO_2
c) **Podzolidación:** tiene por efecto el aumento de cualquiera de las dos relaciones anteriores, es decir la de estabilidad del SiO_2 y la disminución del Al_2O_3 o del Fe_2O_3.
d) Hidratación: consiste en la adición de agua a un compuesto químico para formar otro compuesto químico. Entre las reacciones de hidratación más frecuentes en la naturaleza se tienen:

1) Transformación de anhidrita en yeso: a temperatura normal y en presencia de agua la reacción siguiente se verifica de izquierda a derecha.

$$SO_4Ca + 2H_2O \rightleftarrows SO_4 \times 2H_2O$$

2) Transformación de óxidos en hidróxidos: por ejemplo el paso de la hemetita de color rojo a la limonita de color amarillo o pardo. Cuando el oxigeno va disuelto en agua se forma limonita.

$$Fe_2O_3 + nH_2O \rightleftarrows Fe_2O_3 \times nH_2O$$

3) Reacciones de oxidación

4) Disolución: el caso más frecuente en la naturaleza es el de la roca caliza. En agua pura es poco soluble, pero cuando esta contiene CO_2 el carbonato de calcio se disuelve lentamente:

$$CO_3Ca + CO_2 + H_2O \rightleftarrows (CO_3H)_2\,Ca$$

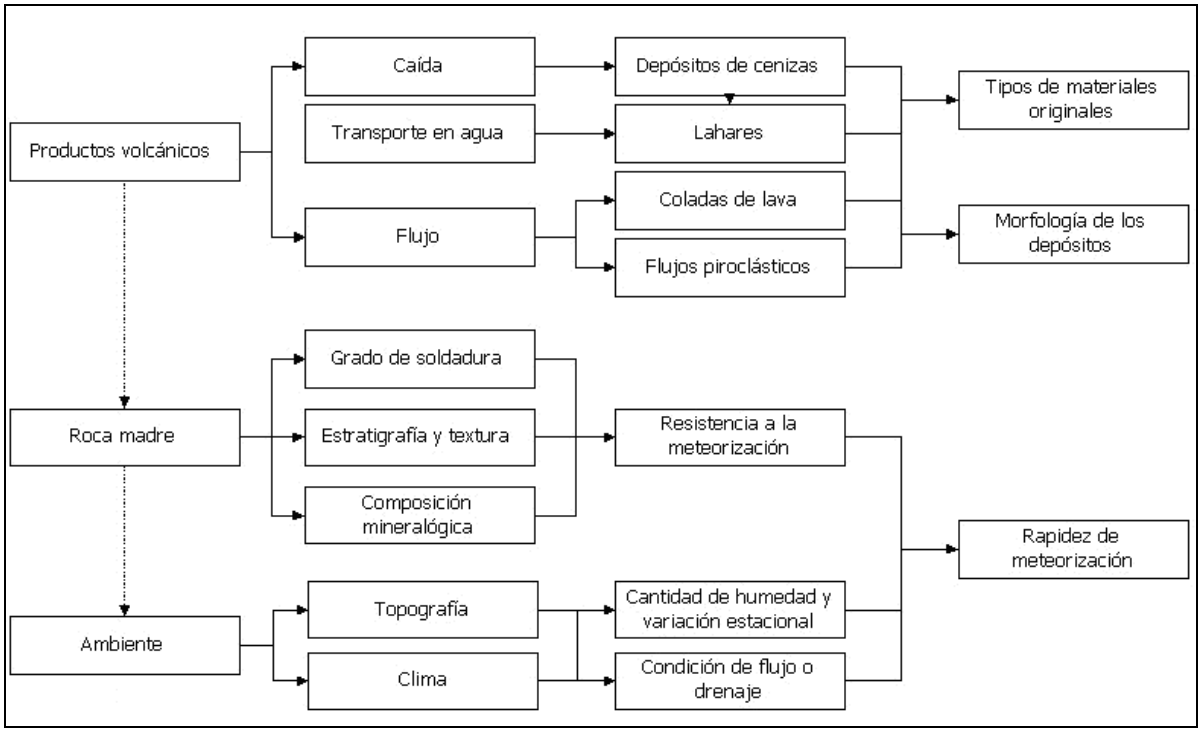


Figura 2.2. Resumen de aspectos teóricos sobre meteorización química de productos volcánicos

Fuente: adaptado de Lacayo (2004)

A partir de un tipo de mineral arcilloso en particular se dan alteraciones por el clima y por otro tipo de variables que sabemos influyen en la formación de diferentes tipos de suelo. Esto da como resultado que a partir de un mineral en particular se de origen a otros nuevos minerales, por lo cual el comportamiento de los suelos y de sus propiedades mecánicas cambien con el tiempo y el espacio donde estos se encuentren.

2.2 Suelos residuales

Los suelos residuales son producto de la meteorización de las rocas “in situ” y su comportamiento depende de las propiedades de la roca original y del grado de descomposición química y de la meteorización mecánica. Las características de los suelos residuales son propias de las condiciones de formación y de la roca madre. También en algunas formaciones de suelos aluviales, estos han sido meteorizados en tal forma, que pueden asimilarse en su comportamiento a los suelos residuales, pero solo obedecen a casos particulares.

El concepto convencional de grano de suelo o tamaño de partícula es inaplicable a muchos suelos residuales, debido a que las partículas de suelo residual con frecuencia consisten en agregados o cristales de mineral meteorizado que se rompen y se vuelven progresivamente finos si el suelo es manipulado. Lo que aparenta en sitio como una grava arenosa, puede convertirse en un limo fino durante las actividades de excavación, mezclado y compactación debido a los cambios de humedad en el suelo.

Adicionalmente a los suelos residuales comúnmente se les encuentra acompañados por coluviones y un gran porcentaje de los deslizamientos de las laderas de los suelos residuales, están relacionados con la inestabilidad de los coluviones (ver Figura 2.3). El resultado es un perfil compuesto por materiales muy heterogéneos, que van desde la roca sana, pasando por rocas meteorizadas o “Saprolitos” hasta el "suelo" o material completamente meteorizado, por lo cual influyen condiciones propias del sitio (Suárez, 1998).

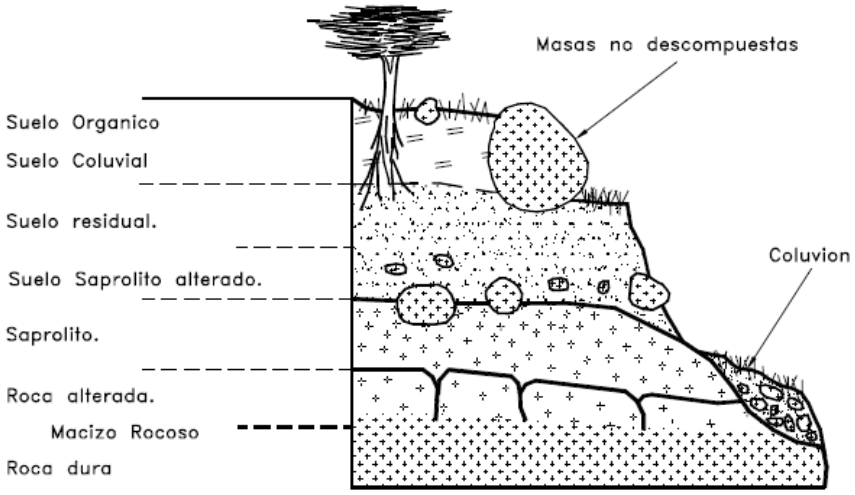


Figura 2.3. Perfil de varios suelos residual y coluvión

Fuente: Suárez (1998)

En ambientes tropicales caracterizados por altas temperaturas variables y por lluvias abundantes y fuertes, la meteorización de los materiales es muy intensa caracterizándose por la descomposición rápida de feldespatos y minerales ferromagnesianos, la concentración de óxidos de hierro y aluminio y la remoción de Sílice y de las bases Na_2O - K_2O- CaO y MgO. Los feldespatos se meteorizan inicialmente a caolinita, óxidos de Hierro y óxidos de Aluminio y los compuestos más resistentes, como las partículas de mica y cuarzo permanecen (Suárez, 1998).

La meteorización de rocas y cenizas volcánicas conducen a la formación de esmectitas, halloysitas, óxidos de Hierro y Aluminio en las etapas iníciales de la meteorización y finalmente se pueden formar caolinitas, esmectitas y gibbsitas (ver Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Tipo general de mineral formado en los suelos residuales

Material de origen	Mineral resultante
Roca cristalina	Caolinita, óxido de Hierro, óxido de Aluminio
Roca volcánica	Esmectita, halloysita, montmorillonita, óxido de Hierro, óxido de Aluminio

Fuente: Suárez (1998)

Algunas rocas que contienen sales como: (NaCl), Cal ($CaSO_4$) y Yeso ($CaSO_4$-$2H_2O$) se disuelven fácilmente en agua, especialmente en presencia de CO_2 que acelerando el proceso de meteorización. A medida que el proceso de meteorización continúa, los contenidos de caolinita disminuyen y se alteran los demás compuestos a Fe_2O_3 y Al_2O_3. Los términos residual y tropical se usan indistintamente, pero en los últimos años se está utilizando con mayor frecuencia el término residual.

2.3 Suelos lateriticos

A través de los años el término ha sufrido muchas modificaciones, en el año 1898 Bauer estableció el carácter químico de la laterita con bajo contenido de Sílice y altos contenidos de óxido de Hierro y Aluminio. En 1903 Holland descubrió que los depósitos de diferentes suelos tropicales, varían de aquellos ricos en Hierro con poco Aluminio, a aquellos ricos en Aluminio con poco Hierro e incluyen muchas combinaciones intermedias.

En 1927 y 1930 Martin y Doyne propusieron la razón de Sílice-Aluminio, SiO_2/Al_2O_3 de la fracción arcillosa como criterio de identificación. Si la razón es menor que 1,33 es una laterita, si la razón es esta entre 1,33 y 2 es un suelo lateritico y si es mayor que 2 es un suelo tropical meteorizado no lateritico. Esto fue ampliado por Joachim y Kandiah en 1941 a la razón de Sílice-sesquioxido que es (SiO_2 / (AL_2O_3 + Fe_2O_3)) con criterios similares a los anteriores.

No se ha aceptado una definición única de laterita, esto en parte porque varias disciplinas utilizan el termino lo cual no ha logrado que se permita adoptar la misma terminología general.

El Instituto Americano de Geología con siglas en ingles (AGI) define laterita, como un suelo rojo o material rico en óxidos secundarios de Hierro, Aluminio o ambos; que casi no poseen bases ni materiales primarios y que con frecuencia contienen grandes cantidades de cuarzo y caolinita; se desarrolla en climas tropicales cálidos o templados y es el residuo o producto final de la meteorización, tiene la capacidad de endurecerse al secarse. El AGI define suelo lateritico como un suelo que contiene laterita o también como cualquier suelo desarrollado por excesiva meteorización.

La laterización es un proceso de meteorización química, debido a la acción de grandes cantidades de agua actuando en un ambiente de temperatura elevada. Bajo condiciones favorables la materia orgánica se mineraliza fácilmente y desaparece con rapidez. Los feldespatos y los minerales ferromagnesianos se hidrolizan, hidratan y oxidan con facilidad. Los

minerales arcillosos que son básicamente silicatos de Aluminio hidratados son destruidos. La fuerte lixiviación arrastra gran parte de la Sílice y queda fácilmente un residuo que consiste casi exclusivamente en óxidos de Aluminio como gibbsita u óxidos de Hierro hidratados como la limonita o la goethita.

Desde el punto de vista ingenieril, estos suelos incluyen parte considerable de los suelos de las regiones tropicales y corresponden a diferentes tipos de suelos y minerales de formaciones superficiales. El uso del término lateritico para materiales muy diferentes, afecta el problema de su identificación y caracterización. Es evidente que la distribución de los suelos en las diferentes áreas tropicales está controlada por las condiciones climáticas y la cantidad de lluvia especificada en cada región. Los suelos lateriticos, son conocidos por su color rojo o amarillento en función de las diferentes formas de presencia del Hierro. Así como en los suelos amarillos la goethita es abundante, también en los suelos rojos la hemetita es la que abunda.

2.4 Suelos transportados y residuales derivados de cenizas volcánicas

En Costa Rica la presencia de suelos derivados de cenizas volcánicas está muy vinculada con la actividad que se da en toda la Cordillera Volcánica Central, esta cordillera atraviesa el país de forma longitudinal desde Guanacaste hasta la Cordillera Central y frontera sur con Panamá.

En el caso de Costa Rica se tienen varios volcanes activos e inactivos, por lo cual la presencia de suelos derivados de cenizas volcánicas es abundante y de gran importancia para fines ingenieriles, ya que estos son suelos con propiedades deficientes y comportamiento anómalo han sido poco estudiados en el resto del mundo. En el caso de Costa Rica la parte más poblada y con desarrollo en infraestructura es la GAM la cual posee en su mayoría suelos volcánicos cohesivos de este tipo.

La principal forma de ubicar este tipo de suelos es por su cercanía a los conos volcánicos y por su agente de transporte que es el viento y que los deposita en lugares fácilmente ubicables. En el Valle Central el principal factor de transporte de este tipo de suelos es el viento, es por esto que dependiendo de la distancia y otros factores de relieve, erosión y transporte fluvial se producen acumulaciones de suelos con cantidad de cenizas en otros lugares al de su formación.

En la Figura 2.4 se muestran la formación de perfiles típicos en las cercanías de los conos volcánicos emisores, su distribución y sus minerales típicos se ubican según la distancia del cono

y tipo de mineral y su peso molecular. Cabe destacar que estos suelos abarcan profundidades y espesores significativos en ciertos sectores.

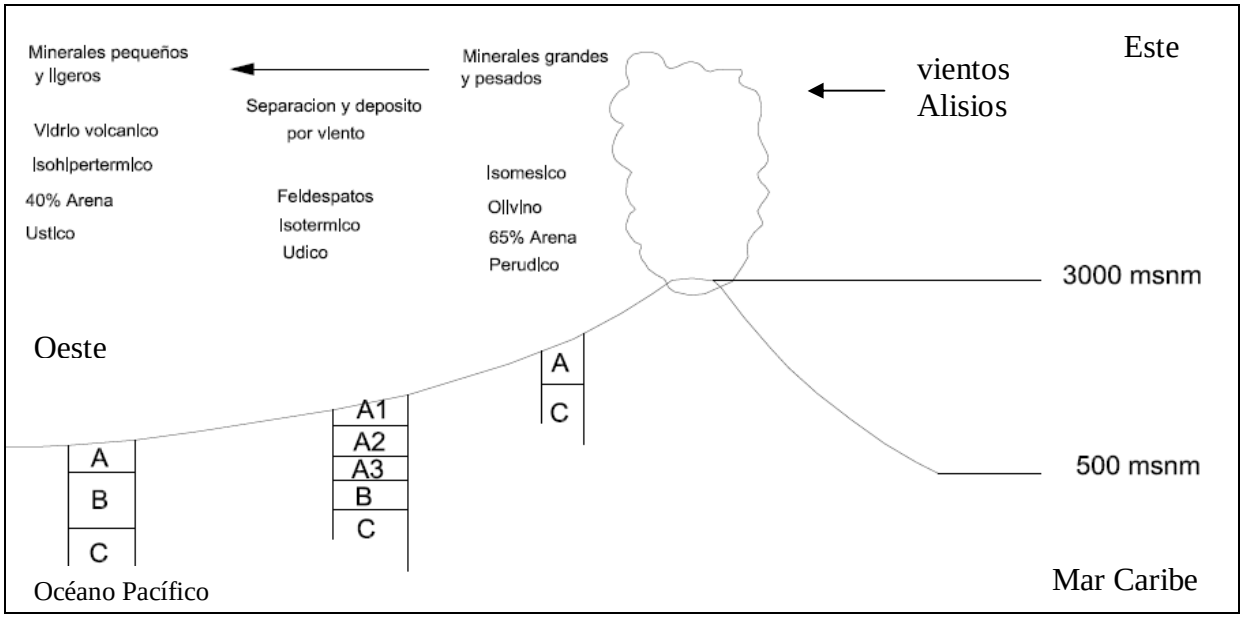


Figura 2.4. Condiciones ambientales para la formación de andosoles en Costa Rica

Fuente: Alvarado (2001)

Estos suelos han sido estudiados principalmente en nuestro país por los Ingenieros Agrónomos, los cuales los han caracterizado los han ubicado y han identificado su mineralogía para sus fines agrícolas. Sin duda alguna mucha de esta información sirve desde el punto de vista geotécnico y significa una guía dentro de los sectores que poseen poca información.

En la Tabla 2.2 se resumen los principales minerales presentes en los suelos situados en las cercanías de los principales volcanes activos del Valle Central, este tipo de suelos se les denominan como andosoles en la terminología agronómica.

Tabla 2.2. Descripción de los minerales según su génesis para el Valle Central de Costa Rica

Volcán	Minerales		
Altura (msnm)	3400 - 3100	1700 - 1200	1100 - 600
Turrialba	alófana	alófana, halloysita, gibbsita	
Irazú	alófana	alófana, halloysita, metahalloysita	alófana, ferrihidrita, goetita, caolinita
Póas		alófana, gibbsita, metahalloysita	alófana, gibbsita, metahalloysita

Fuente: Alvarado (2001)

2.5 Elementos constitutivos del suelo

2.5.1 El esqueleto sólido (forma)

Cuando la partícula de suelo ha sido el resultado de la meteorización de una roca por procedimientos mecánicos, se presentan dimensiones menores a 20 µm y formas redondeadas, suelos de este tipo se clasifican como arenas y no tienen variaciones de volumen con el agua.

Cuando la meteorización sucede por medios químicos, se da una combinación y cristalización de las partículas finas más pequeñas y se presenta cambios en la estructura de la roca madre original, debido a reacciones químicas e isomorfismo. El suelo se clasifica entonces como arcilla y constituye una especie de mineralogía diferente a la roca de procedencia. Tiene granos finísimos y presenta variaciones de volumen y de consistencia debido al cambio de humedad.

2.5.2 El agua en el suelo

El agua en el suelo ocupa el volumen de los vacíos, estos suelen estar ocupados por agua y por aire en las siguientes condiciones: suelos secos (volumen ocupado por aire), suelos saturados (volumen ocupado por agua) y suelos semisaturados que es el caso mixto a los anteriores, esto sucede a menudo con los suelos por encima del nivel freático. El conocimiento de los cuerpos de suelo semisaturados es complejo y existen muy pocos modelos que puedan ser utilizados en la geotecnia, ya que el comportamiento de estos es más complejo que el de los suelos saturados.

Existen varias formas de como el agua se presenta en el suelo:

I. **Agua higroscópica o de constitución:** retenida por las fuerzas de atracción de las partículas del suelo, rodea los granos con una disposición molecular muy cerrada. Es la responsable de que en los suelos cohesivos haya una atracción mutua del tipo superficial o de cohesión.

II. **Agua absorbida:** se mantiene en el suelo en contacto con las partículas mediante fuerzas de tensión superficial. Presenta una cierta viscosidad y no es parte del agua libre.

III. **Agua capilar:** agua que asciende de la capa freática por capilaridad del agua, manteniéndose en suspensión por efecto de tensión superficial ocasionado por la capilaridad.

Agua infiltrada: depende de la permeabilidad del suelo (contenido de partículas finas) y de las condiciones topográficas que la puedan hacer escurrir antes de infiltrar.

Agua freática: agua freática sin presión, agua libre suspendida y agua artesiana, llena los vacios del suelo y cambia según la estación del año en que se ubique.

2.5.3 El aire en el suelo

En el suelo los vacíos no ocupados por agua están ocupados por aire y vapor de agua, en el caso de suelos orgánicos se encuentran gases producto de la descomposición de la materia orgánica. Uno de los principios del diseño es suponer siempre el suelo saturado, lo cual siempre es desfavorable para las propiedades mecánicas pero no siempre es cierto.

En suelos semisaturados el comportamiento mecánico depende del grado de saturación y del comportamiento de la microestructura del suelo y su forma de representarlo mediante un modelo geotécnico es compleja y pocos lo han hecho, por lo cual existen pocos estudios y métodos de diseño que tomen en cuenta el suelo en estado semisaturado.

2.6 Clasificación de los suelos

El suelo que constituye la superficie terrestre es producto de la meteorización de la roca o de la acumulación de sedimentos entre los que se pueden incluir las cenizas volcánicas. En la estructura de un suelo podemos distinguir tres fases: **sólida** (granos de minerales y material orgánico), **líquida** (agua) y **gaseosa** (poro y huecos). Los suelos se clasifican según el tamaño de sus partículas (ver Figura 2.5).

Según la dimensión de los granos del suelo al ponerse en contacto con el agua se produce un tipo de fuerza superficial que aumentan al disminuir el tamaño de las partículas y provocan la adherencia de las mismas, este fenómeno recibe el nombre de “cohesión”. Esta es la característica que distingue a los suelos entre “cohesivos” y “granulares”. Las partículas que mayor cohesión aportan son las arcillas y algunos tipos de limos.

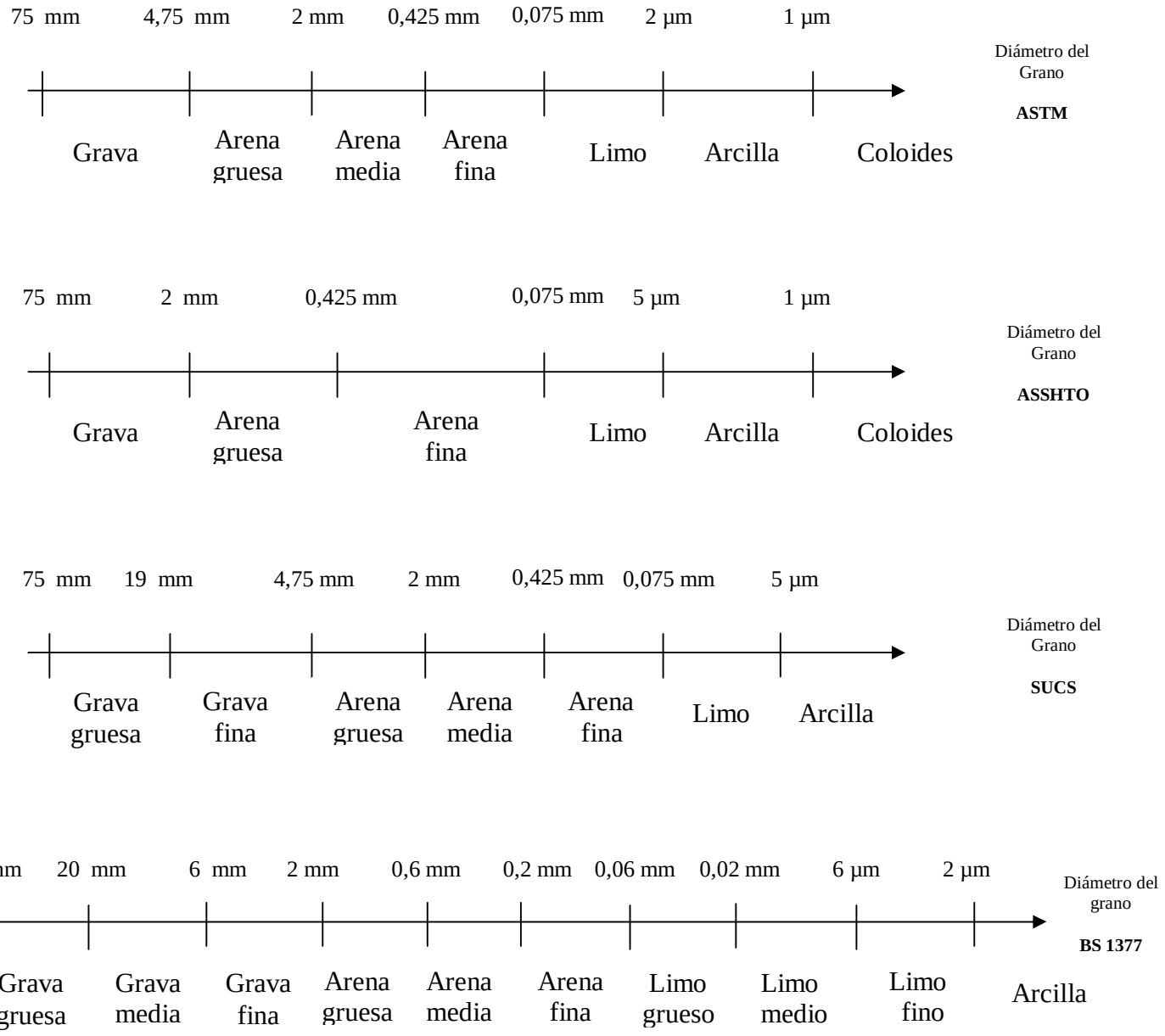


Figura 2.5. Clasificación granulométrica de los suelos

Fuente: Holtz y Kovacs (1981)

2.7 Identificación de suelos

Se realiza mediante análisis de diferentes propiedades entre las que se tiene: el olor, la textura, el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catódico y la estructura.

2.7.1 Color: varía con el contenido de humedad, por lo que este factor debe ser mencionado cuando se describe el color. En un suelo el color puede indicar la existencia de algunos elementos, por los colores café oscuro o negro la presencia de óxidos de Aluminio hidratados, para el color amarillo es causa de la mezcla de óxidos de Hierro y Aluminio. Esta propiedad debe analizarse con cuidado a la hora de identificar suelos para evitar confusiones.

Los óxidos de Hierro contribuyen junto con la materia orgánica a proporcionar colores al suelo. El tipo de óxido determinará el color. La limonita es un óxido multihidratado de Hierro su fórmula es $Fe_2O_3(H_2O)x$. De la hidratación de la limonita se forma la goethita, que es otro producto muy común de la meteorización tropical. Es monohidratado y su fórmula es FeO(OH). También es frecuente la hemetita en los suelos rojizos tropicales, su estructura es Fe_2O_3 y se forma por el calentamiento de cualquier óxido de Hierro a temperaturas elevadas.

Sin embargo, debe de tenerse en cuenta que no todos los suelos presentes en un sitio o zona son rojizos u amarillentos, sino que típicamente se encuentran muchas clases de suelos con diversidad de colores y características.

2.7.2 Textura: se refiere a la distribución de los tamaños de las partículas a su forma y acomodo. Da una idea de la forma de las partículas constituyentes del suelo.

2.7.3 Contenido de material orgánico: la cantidad de materia orgánica afecta las propiedades del perfil de suelo, si la cantidad de materia orgánica aumenta también se incrementa la capacidad de retención de humedad, también se afecta la consistencia del suelo. La meteorización se acelera debido a los ácidos orgánicos que se producen por la presencia de cantidades de materia orgánica.

2.7.4 Propiedades superficiales de una partícula arcillosa

Las partículas de arcilla por lo general presentan carga negativa, aunque podrían ser positivas por ausencia de cationes de red cristalina y abrasión de aniones. La intensidad de la carga está

relacionada con la superficie específica de la partícula, como consecuencia del campo eléctrico que se crea se atraen las moléculas de suelo con las de agua y con los cationes y se forman dos capas en los alrededores de las partículas (ver Figura 2.6).

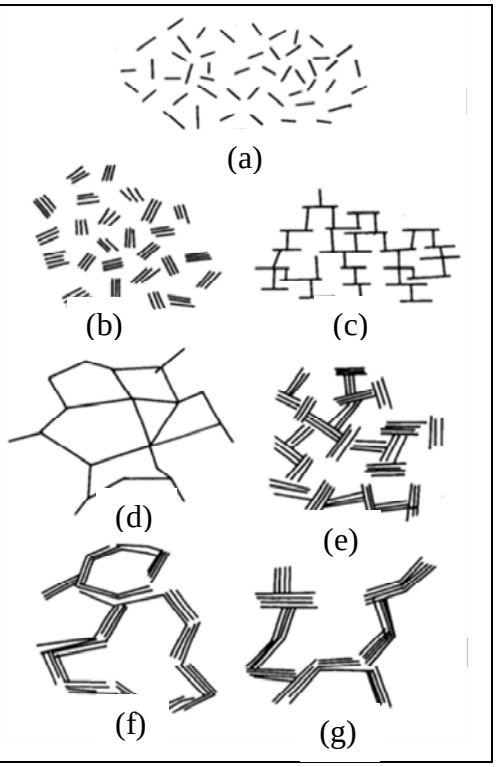
a) Dispersa y defloculada	
b) Agrupada pero defloculada	
c) Borde con cara defloculado pero disperso	
d) Borde con borde floculado pero disperso	
e) Borde con cara floculado y agrupado	
f) Borde con borde floculado y agrupado	
g) Borde con cara y borde con borde floculado y agrupado	

Figura 2.6. Modo de asociación de partículas en suspensión de arcilla

Fuente: Mitchell (2005)

I. **Capa de agua adsorbida**: moléculas de agua unidas a otras de suelo con gran viscosidad y unidas en capas dobles con cargas inducidas por los cationes.

II. **Doble capa iónica**: es llamada así por tener aniones de la superficie de la partícula y cationes presentes en el agua (Na^{+}, K^{+} y Ca^{++}), el espesor de la doble capa es del orden de 400 Å y la densidad de los cationes y el potencial eléctrico disminuye desde la superficie de la partícula. Los cationes son intercambiables al tener una unión débil con la superficie de la partícula y así poder ser fácilmente sustituibles, influyendo en las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Estas propiedades determinan dos tipos de ordenamientos extremo en las partículas de arcilla y en su micro estructura:

Estructura floculada: la fuerza superficial que predomina es de atracción para este tipo de estructura y la forma es llamada “castillo de naipes”. Las partículas están en contacto borde contra cara, bajo la influencia de cargas eléctricas locales. Presenta una relación de vacios alta y constante debido a que se mantienen las cargas y esto depende de la cantidad de electrolitos dentro del agua.

Estructura dispersa: en esta estructura predominan las fuerzas de repulsión, por lo que los bordes y caras tienen cargas eléctricas iguales y se repelen poniéndose paralelas unas a otras. Presentan una razón de vacios un poco menor pero una resistencia al corte menor, debido a que las partículas pueden deslizar unas sobre otras en algunos planos.

2.7.5 Efecto del agua adsorbida en las arcillas

El agua adsorbida por las arcillas presenta una fuerte atracción entre las moléculas cercanas, a donde se forman cadenas con carga debida a los puentes de Hidrógeno (atracción) y las fuerzas capilares e intermoleculares que se producen. Es por esto que al ir consolidando un suelo con estructura dispersa o floculada mejora su cohesión.

La razón de vacíos también juega un papel muy importante, ya que afecta la cohesión. Las combinaciones de la humedad, el contenido de partículas finas y el nivel de esfuerzos a que haya estado sometido el suelo, son factores determinantes del comportamiento del material. Además, el suelo presenta cambios en la estructura al soportar esfuerzos y al ser consolidado.

2.7.6 Capacidad de intercambio catiónico

: los minerales coloidales y arcillosos tienen cargas eléctricas en las superficies las cuales atraen a los aniones y a los cationes, estos iones se pueden intercambiar. La capacidad de intercambio catiónico es el total de la carga negativa en la arcilla mineral y es dependiente de cada mineral específico.

En la Tabla 2.3 se muestra el análisis taxonómico de varios suelos procedentes de la zona norte del país, aunque este tipo de estudio sirve para dar a conocer que el suelo posee minerales amorfos y que es de mucha utilidad en el área de la agronomía, pero no aporta información útil para la clasificación geotécnica de forma directa.

Tabla 2.3. Lateritas arcillificadas de Costa Rica y valor porcentual (análisis taxonómico)

Localización	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	MnO	Otros
Dominical	47,5	24,8	12,2	1,30	0,07	14,13
Miramar	43,8	27,9	12,8	1,06	0,05	14,39
Venecia de San Carlos	26,8	36,0	17,4	1,59	0,17	18,04
Puntarenas	31,6	34,2	16,0	1,44	0,04	16,72
Tilarán	38,9	31,7	12,19	1,20	0,05	15,96

Fuente: Selba (1985)

2.8 Mineralogía de las arcillas

Muchas veces en Ingeniería Geotécnica se hace referencia a un suelo como "arcilloso," cuando en realidad éste es una combinación de limo (partículas intermedias que contienen finos y otras no tan finas) y arcilla (partículas más finas que 2 µm), compuestas de varios tipos de minerales mezclados entre sí.

Cuando el conjunto de partículas minerales que predominan en un suelo y contiene los denomina "minerales arcilloso," le dan a este las propiedades de cohesión y plasticidad típicamente, los suelos arcillosos son la combinación de uno o varios minerales arcillosos u otras partículas orgánicas y coloides.

Los minerales arcillosos son producto de la meteorización química de las rocas, una parte importante del producto final de la meteorización química son los minerales arcillosos, estos están compuestos por partículas muy finas con grandes áreas superficiales por unidad de masa.

Hoy en día las técnicas de cristalografía o mediante rayos X, han permitido llegar a algunas conclusiones interesantes para el ingeniero geotécnico sobre la estructura de las arcillas. Un mineral de arcilla es el conjunto cristalino que responde a la formula de un silicato de Aluminio o de Magnesio hidratado. Se distinguen dos tipos de elementos minerales que constituyen a su vez las dos estructuras básicas a partir de las cuales están compuestas todas las arcillas a saber:

1) Sílice tetraédrico: SiO_2
2) Hidróxido de aluminio octaédrico: $AL(OH)_3$
3) Hidróxido de magnesio octaédrico: $Mg(OH)_2$

Los principales minerales de la arcilla son los formados por compuestos de hidro-alumino-silicatos principalmente. Estas son uniones y estructuras del tipo: alúmina (octaedro) y sílica (tetraedro) hidratados, cristalinos o amorfos. También se pueden formar silicatos hidratados de hierro o magnesio (ver Figura 2.7). Por lo cual se tiene minerales del tipo cristalino y otros del tipo amorfo provenientes de la ceniza volcánica.

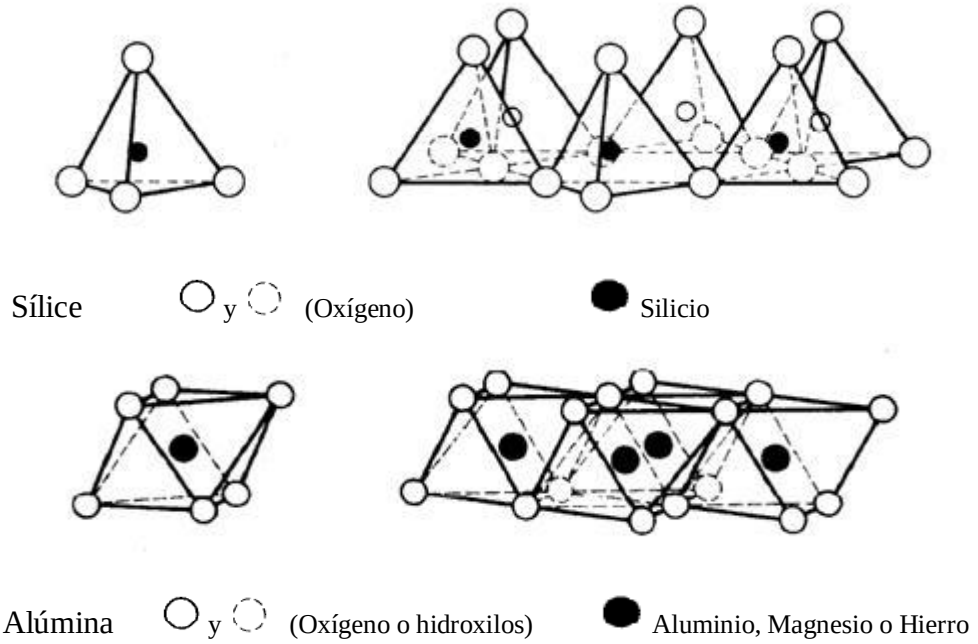


Figura 2.7. Forma de la estructura de los hidro-alumino-silicatos (llamados filosilicatos)
Fuente: adaptado de Holtz & Kovacs, (1981)

Los filosilicatos son una clase específica de silicatos, que incluyen minerales comunes en ambientes muy diversos y que se presentan como rasgo común, una agrupación laminar que es consecuencia de la alineación de capas de infinita dimensión de tetraedros en dos direcciones del espacio. Las partículas que constituyen los minerales arcillosos o filosilicatos son laminares y pueden ser de dos tipos:

Lámina tetraédrica de Sílice (Si): consiste en tetraedros formados por unos átomos centrales de Silicio, unidos a cuatro átomos de Oxígenos en sus vértices. Estos tetraedros se combinan en estructuras de seis de estos tetraedros dando lugar a figuras hexagonales, además la estructura hexagonal se une mediante oxígenos a otras estructuras de este tipo dando lugar a formas indeterminadas hasta formar la estructura mineral presente.

Lámina octaédrica de Alúmina (Al/Mg): este consiste en octaedros de seis oxígenos o hidroxilos unidos a otros átomos de Al, Mg o Fe principalmente, este tipo de estructura es un poco más compleja, ya que puede haber átomos de oxígeno con electrones libres que se superponen a los de la lámina tetraédrica y permiten enlaces de tipo covalente entre ambas láminas. El espesor de estas láminas es de 3 Å y al unirse tetraedros con capas de octaedros en diferentes combinaciones, se forma la unidad cristalina básica de la arcilla.

Los arreglos estructurales que forman la unión de láminas son del tipo: (1:1) caolinita y halloysita, (2:1) montmorillonita, vermiculita, ilitas, micas primarias y talco y (2:1:1) clorita. El Aluminio en suelos esta generalmente en forma de hidróxidos y los Hierros en forma de óxidos, la presencia de ambos genera estructuras cristalinas basadas en hexágonos y cubos. Entre los más importantes están: la gibbsita, hemetita, margarita, goethita, lepidolita, magnetita.

Entre los minerales amorfos, se tiene la alófana, imogolotita y proto-imogolita. La halloysita se comporta de forma semicristalina, y los tubos se forman de manera similar a los de imogolita, siendo simplemente este producto de una unión más fuerte de moléculas, dando origen a una estructura casi cristalina.

- **Imogolita:** Es conocido como uno de los "aluminosilicatos de corto rango" por su estructura poco cristalina, ya que no muestra actividad en los rayos x no pudiéndose así identificar por este medio, su orden estructural de partículas es aleatorio.

  Los minerales arcillosos dentro de esta categoría son: la imogolita, la proto-imogolita y la alófana, todos tienen este mismo comportamiento y son denominados como minerales amorfos. La imogolita es la mejor estructura de las tres mencionadas anteriormente (ver Figura 2.8), esta forma grumos de partículas largas en forma tubular. La sección transversal de la imogolita indica que la lámina externa son octaedros de gibbsita, en la parte interna se tiene básicamente un tetraedro de Sílice con un grupo Hidróxido unido a los Silicios.

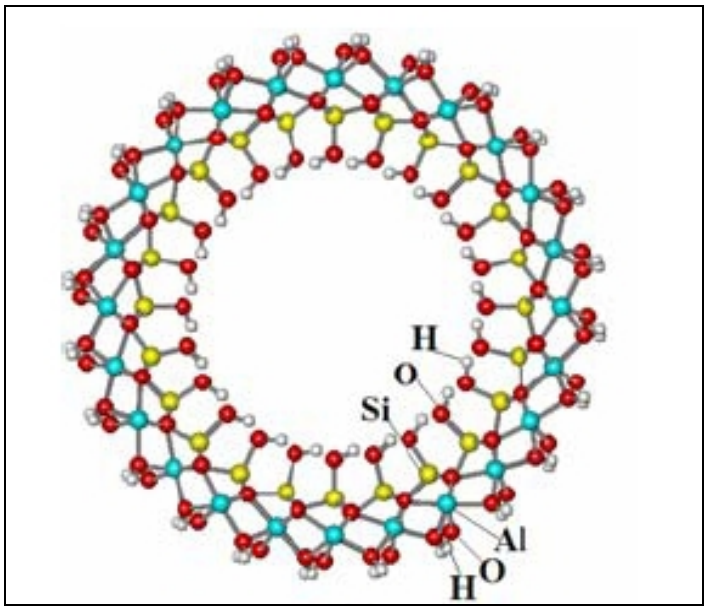


Figura 2.8. Esquema del tubo estructural de la partícula de imogolita

Fuente: L. Guimarães (2009)

El término proto-imogolita se utiliza para referirse a minerales arcillosos que son similares a la imogolita a excepción que su forma tubular es incompleta o poco formada. Este tipo de minerales tienden a formar suelos del tipo "limo colapsable" que son susceptibles a licuación si están saturados y a la contracción y agrietamiento si se secan mucho. Si son secados al horno los suelos con minerales amorfos, tienden a comportarse de forma "arenoso" y a perder cohesión y plasticidad (Guimarães, 2009).

- **Alófana**: La alófana es un mineral amorfo o poco cristalino, es el mayor constituyente de suelos residuales jóvenes derivados de ceniza volcánica. Está compuesto de sílica, alúmina, agua y una pequeña cantidad de Hierro y bases variando su cantidad en un amplio rango al comparar suelos de distintas procedencias.

  Su contenido de agua es parte del "micro agregado" y se forma en tamaños próximos a 50 Å de diámetro. Se da un proceso de transición entre la formación de alófana y halloysita, en el cual no es fácil definir cual estructura es la que se posee realmente (ver Figura 2.9).

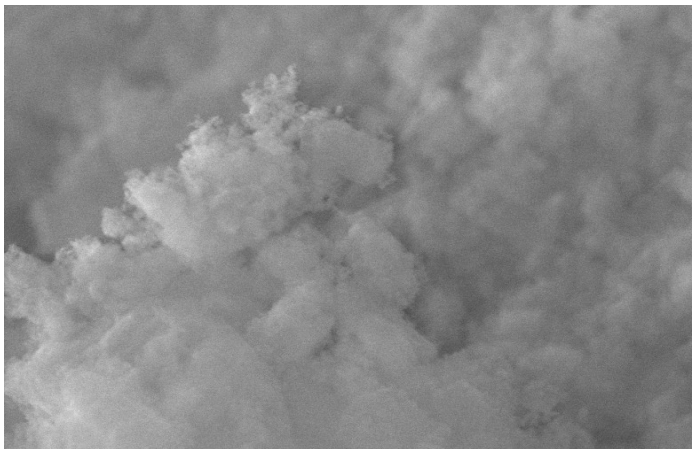


Figura2.9. Alófana en partículas y grumos que van de 0,1 -1 µm (4 µm ancho de foto)
Fuente: Clay Minerals Society (2008)

La alófana se presenta en suelos muy finos con partículas del rango de nanómetros y con áreas especificas por partícula de 50 – 250 m^2/g. Los materiales que poseen alófana son muy compresibles. Es común de estos suelos si se secan a cierta temperatura que pierdan la plasticidad por completo (So, 1998).

La identificación en campo de minerales como alófana se hace por medio de la prueba de NaF (Fieldes & Perrot, 1966). Esta prueba consiste en la adición de fluoruro de sodio a una muestra de suelo colocada sobre un papel impregnado con fenolftaleína que actúa como indicador. La presencia de alófana conduce a una reacción en la cual el fluoruro de sodio libera iones hidroxilos de la alófana, produciendo el incremento del pH por encima de 9 y la coloración roja del papel indicador. Sin embargo este método no brinda información cuantitativa de la alófana y su aplicación en la Geotecnia es muy limitada.

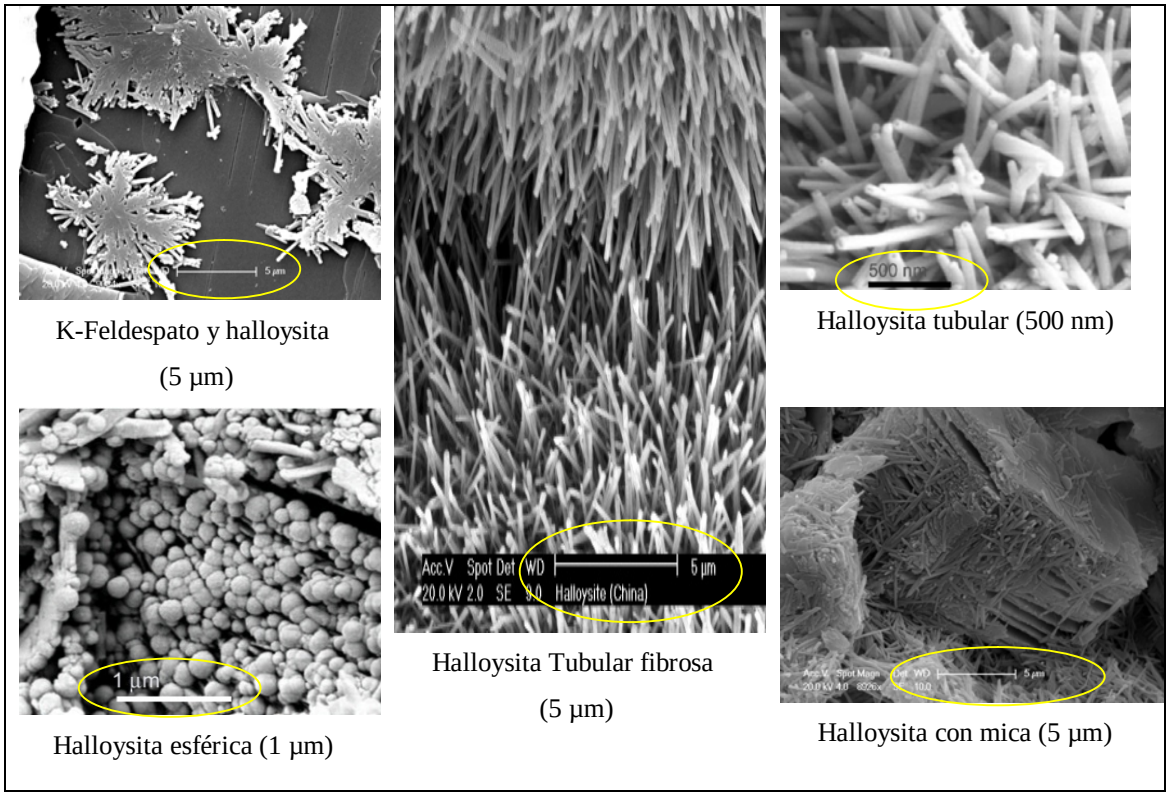
Entre sus propiedades se tiene: La difracción de rayos X en alófana muestra valores débilmente bajos de 3,5 – 2,3 Å sin un valor pico pronunciado. La curva de Análisis Térmico Diferencial (siglas en ingles DTA) muestra un pronunciado lapso endotérmico debajo de los 200 ^{0}C y un pico exotérmico por encima de los 800 ^{0}C sin pico intermedio y absorción infrarroja asociadas con las uniones O-H y Si-O.

Estudios previos realizados en el contenido de humedad de la alófana, han caracterizado que el grupo hidroxilo en la alófana es inestable comparado con el de la caolinita o de otro minerales. Todos los grupos hidroxilos se encuentran en la superficie

de los enlaces de las partículas de alófana y de ahí que se dé gran intercambio de protones entre el agua absorbida y los grupos hidroxilo.

Se requiere de largos periodos de calentamiento a ciertas temperaturas para deshidratar la alófana hasta niveles constantes de humedad y el agua absorbida también sufre el mismo fenómeno entre los procesos de hidratación y deshidratación. El término alófana se refiere a los silicatos y geles inorgánicos meteorizados de silica, alúmina y óxidos de hierro existentes en suelos, los cuales son amorfos (materia inorgánica amorfa) a los rayos X (Kitagawa, 1977).

- **Halloysita:** la halloysita fue descubierta por O. d'Halloy (1707-1789) y es por él que lleva su nombre. Berthier (1826) la clasificó como un mineral con estructura 1:1 referente a la caolinita, su diferencia radica que en el proceso de formación, se produce una hidratación entre láminas y se éstas se pliegan formando pequeños cilindros. Esto provoca que posean un contenido mayor de agua y que la halloysita posea una estructura típica que se puede presentar en varios tamaños (ver Figura 2.10).



K-Feldespato y halloysita (5 µm)

Halloysita tubular (500 nm)

Halloysita Tubular fibrosa (5 µm)

Halloysita esférica (1 µm)

Halloysita con mica (5 µm)

Figura 2.10. Fotografías con microscopio electrónico de varias formas de halloysita

Fuente: Clay Minerals Society & The Mineralogical Society (2008)

Las halloysitas son minerales comunes de encontrar en suelos residuales de material volcánico y derivado de cenizas volcánicas, es parte del subgrupo de minerales arcillosos “caolin”. Una lámina de halloysita hidratada con todo y agua posee un espesor de 1 nm, el agua intermolecular de la estructura de la halloysita es removida por secado al horno o al aire y el proceso se da de manera irreversible (Rollings &Rollings, 1996). Estos son minerales comúnmente encontrados en las cercanías de los conos volcánicos y en los sectores donde se depositan cenizas volcánicas (Novoa, 2007).

- **Caolinitas:** en este grupo la unidad cristalina básica se caracteriza por presentar una capa de tetraedros unida a otra de octaedros, en el octaedro el aluminio ocupa dos de cada tres posibles posiciones. La unión entre las unidades cristalinas se produce cuando el Hidrógeno del octaedro, se une con el Oxígeno del tetraedro de la unidad siguiente.

  La repetición de este proceso por miles de veces forma la partícula de arcilla, esta unión se conoce como la red de oxígeno hidroxílada, esta red produce una fuerte atracción con otras unidades lo que evita que penetren otro tipo de iones en forma interlaminar. Debido a esto la estructura de arcillas 1:1 de la caolinita es compacta y estable (ver Figura 2.11).

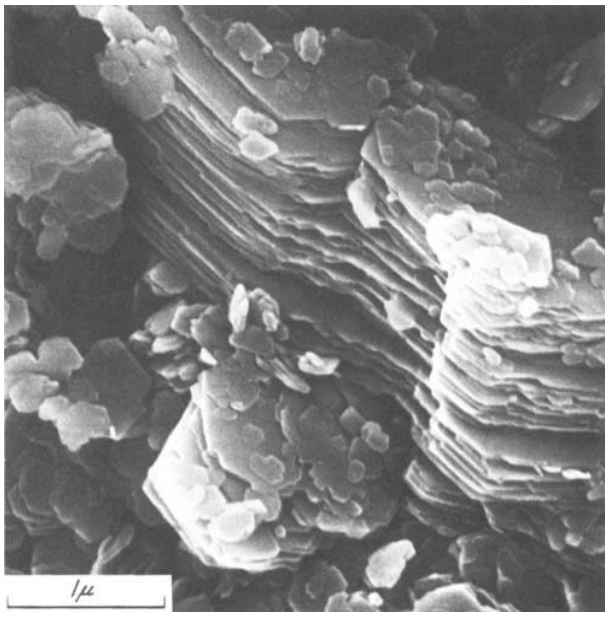


Figura 2.11. Fotografía por microscopio electrónico de una caolinita (1 μm)

Fuente: Terzaghi & Peck, (1996)

Esta partícula es común en suelos sedimentarios y residuales, una hoja de caolinita es de aproximadamente 0,7 nm de espesor, además de poseer una área superficial de partículas de 5 a 10 m^2/g por partícula, en forma de lámina de 100 nm de espesor con cara plana y sección transversal de hexágono.

- **Montmorillonita:** la estructura de este grupo de arcillas está formado por dos capas de tetraedros de sílice, encerrando una capa de octaedros de alúmina. La configuración que se produce es inestable cuando se pone en contacto con el agua; el fenómeno de hidratación de la montmorillonita, es muy complejo y en ocasiones esta es llamada smectita, ya que es uno de los minerales con estructura molecular 2:1 (ver Figura 2.12).

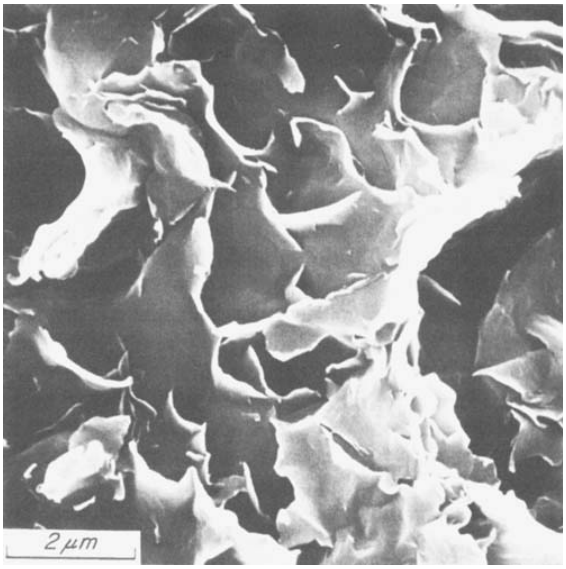


Figura 2.12. Fotografía por microscopio electrónico de una montmorillonita (2 µm)
Fuente: Terzaghi & Peck, (1996)

El espesor de cada lámina 2:1 del mineral es de aproximadamente 0,96 nm y se extienden de manera indefinida en las otras dos direcciones al igual que la caolinita. Además el área superficial específica de las partículas de montmorillonita es de aproximadamente 800 m^2/g, lo cual las hace partículas apropiadas para absorber humedad, debido al agua necesaria requerida para humedecer la superficie de las partículas (Terzagui & Peck, 1996).

Debido a que las fuerzas de enlace de Van der Waals entre la parte superior de la lámina de silica es débil y ahí está una red de carga negativa deficiente en la lámina del octaedro, se propicia un intercambio de iones y agua que propician la separación entre láminas. (Holtz & Kovacs, 1981).

Sobre este aspecto Van Olphen presentó dos alternativas:

1. Los cationes que están situados entre las capas se hidratan y su mayor energía de hidratación sobrepasa las fuerzas de atracción entre capas.
2. El agua no hidrata los cationes situados entre las capas, sino que absorbe agua entre la superficie de oxígeno por la formación de puentes de Hidrógeno. Estos minerales son de tamaños entre los 100 y 200 Å y provienen generalmente de cenizas volcánicas con alteración en sitio. Las montmorillonitas en contacto con el agua poseen gran plasticidad y presentan una notable baja en su resistencia al esfuerzo cortante.

Los cristales de la montmorillonita pueden ser muy finos, pero al mismo tiempo tienen una muy fuerte atracción por las moléculas de agua. Suelos que poseen este mineral son muy susceptibles a los cambios de humedad (incrementa) y a su vez experimentan un aumento en las presiones de levantamiento (hinchamiento o expansión), que pueden dañar estructuras livianas y pavimentos en carreteras.

- **Ilita:** fue descubierta por el profesor R. E. Grim de la Universidad de Illinois, este tipo de mineral es común en arcillas rígidas y materiales en depósitos marinos y lacustres con arcillas suaves y depósitos de limos. (ver Figura 2.13)

Su estructura consiste en una capa de octaedros de alúmina en medio de dos capas de tetraedros de sílice, donde sus vértices apuntan en una misma dirección. Sus partículas son muy pequeñas y solo pueden ser observadas en microscopios electrónicos. A diferencia de las montmorillonitas son minerales arcillosos poco expansivos, la ilita tiene una estructura similar a la familia mineral tipo Mica, pero con menos Potasio y menor isomorfismo, es por esto que son mucho más activas químicamente que otro tipo de Micas.

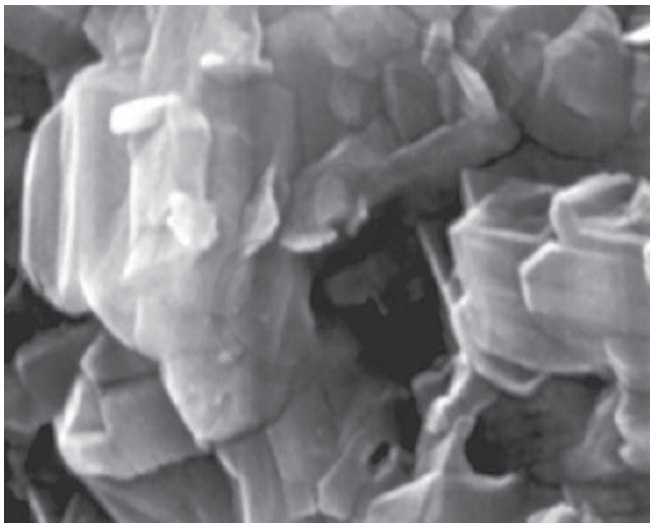


Figura 2.13. Fotografías con microscopio electrónico de una ilita (sin escala)
Fuente: Mitchell (1981)

- **Óxidos hidratados de hierro y aluminio:** estos óxidos son materiales muy comunes en la fracción arcillosa de los suelos tropicales. El óxido de Aluminio hidratado más común es la gibbsita (ver Figura 2.14) y se presenta frecuentemente en suelos tropicales sometidos a procesos intensos de desilicatación. Su origen proviene de la alteración de materiales que contienen Aluminio bajo las condiciones ya mencionadas y su fórmula es $Al(OH)_3$.

Figura 2.14. Fotografía por microscopio electrónico de gibbsita (5 µm)
Fuente: Clay Minerals Society & The Mineralogical Society (2008)

- **Vermiculitas:** son minerales hidratados de tres capas, en los suelos se presentan en forma de partículas finas asociadas con la montmorillonita. Se forman de rocas parentales básicas y han sido identificadas en muchos tipos de suelos principalmente en suelos rojizos y amarillentos aunque en cantidades muy pequeñas.

- **Cloritas:** son minerales de cuatro capas o tetramórficos que pueden ser llamados como minerales con estructura 2:1:1 y pueden sufrir isomorfismo (sustitución de algunos átomos por otros) y pérdida de láminas octaédricas de su estructura original. Son susceptibles a la humedad ya que el agua puede entrar directamente entre sus láminas moleculares; sin embargo, son significativamente menos activas que las montmorillonitas.

  Se caracterizan generalmente por su color verde aunque también se encuentra cloritas de color negro y amarillo. Se forman de suelos derivados de rocas metamórficas y suelos sedimentarios pero no son componentes mayoritarios (ver Figura 2.15).

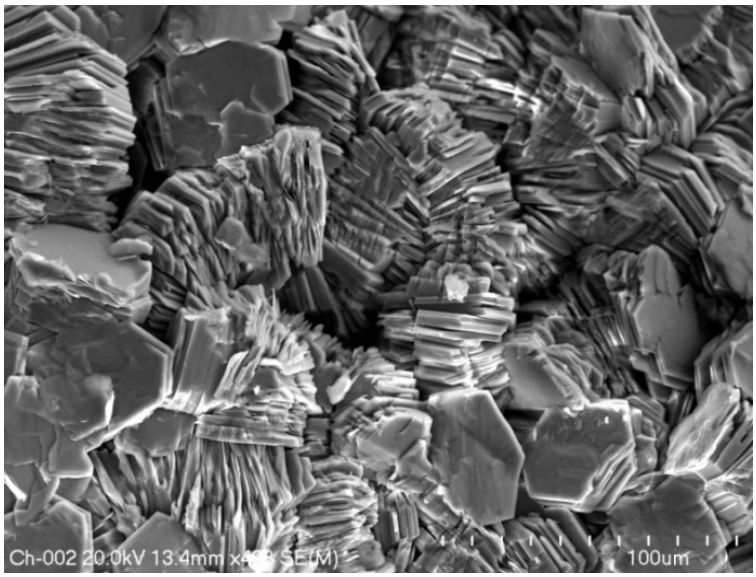


Figura 2.15. Fotografías con microscopio electrónico de cloritas (100 µm)

Fuente: Clay Minerals Society & The Mineralogical Society (2008)

2.9 Química y microestructura de los minerales arcillosos más comunes

Son de especial importancia los minerales arcillosos amorfos como la alófana, debido a sus propiedades y por la naturaleza de sus tipos de unión molecular; estudios realizados demuestran que el grupo de hidroxilo de la alófana es débil comparado con el de la caolinita, ya que todas las bases de unión se encuentran en la superficie y se da un continuo intercambio de protones con el agua absorbida, lo que ocasiona alto contenido de humedad característico de suelos con altos contenidos de este mineral (Kitagawa, 1977).

Entre los minerales más abundantes en suelos residuales esta la caolinita, cabe destacar que este mineral constituye las partículas transición entre las arenas finas y las arcillas, además en la Tabla 2.4 se presentan algunos de los minerales arcillosos más comunes en los suelos del planeta.

Tabla 2.4. Composición química de los diferentes minerales

Tipo de mineral	Formula	Característica
Quartz	SiO_2	Se presenta en arenas y en algunos tipos de limos
Halloysita	$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8*2H_2O$	Abundante en suelos derivados de ceniza volcánica
Alófana	$Si_3Al_4O_{12}*nH_2O$	Abundante en suelos derivados de ceniza volcánica
K feldespato	$KALSi_3O_8$	Abundante en suelos que no ha sido tan meteorizados
Na feldespato	$NaAlSi_3O_8$	Abundante en suelos que no ha sido tan meteorizados
Calcita	$CaCO_3$	Tipo de carbonato más abundante
Clorita	Complejo	Abundante en arcillas por producto de la meteorización
Goetita	FeO(OH)	Óxido de hierro más abundante
Piroxeno	$(Ca,Mg,Fe,Ti,Al)(SiAl)O_3$	Fácil de meteorizar
Olivino	$(Mg,Fe)_2\ SiO_4$	Fácil de meteorizar
Hemetita	Fe_2O_3	Abundante en zonas cálidas
Gibbsita	$CaSO_42H_2O$	Abundante en suelos meteorizados
Caolinita	$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$	Abundante en suelos meteorizados
Ilita	Complejo	Abundante en suelos meteorizados
Montmorillonita	Complejo	Abundante en arcillas por producto de la meteorización Propiedad expansiva e intercambio de cationes en suelos.

Fuente: Day (2006)

La Figura 2.16 brinda un resumen del complejo proceso de formación de los minerales arcillosos y se toma en cuenta su estructura laminar más común.

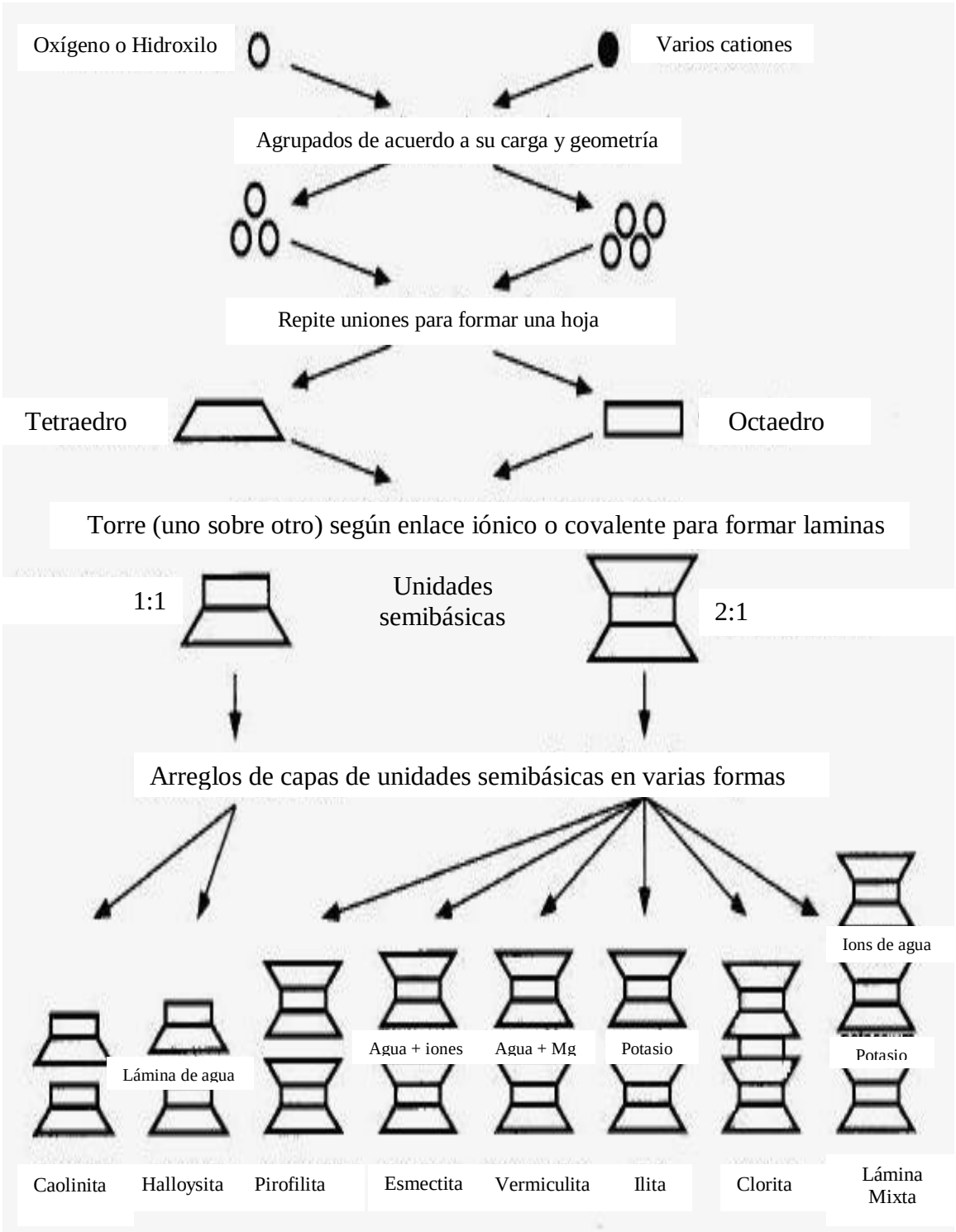


Figura 2.16. Proceso esquemático de formación de minerales a partir de elementos básicos

Fuente: Mitchell, (2005)

Está claro que el proceso de la meteorización es complejo y que la formación de nuevos materiales por reacción química o mecánica es muy amplia y difícil de describir en el tiempo. En la Figura 2.17 se brinda un diagrama de flujo de los posibles materiales formados en la meteorización de materiales volcánicos, se puede apreciar que la cantidad de materiales es abundante y toman papel muchas variables (ver Figura 2.18).

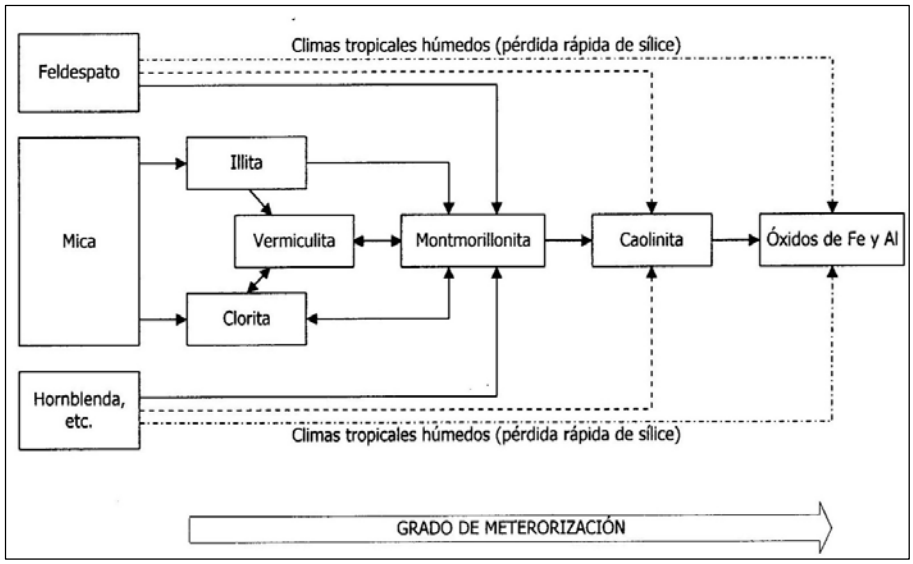


Figura 2.17. Formación de minerales arcillosos según el grado de meteorización

Fuente: adaptado de Selby, (2000)

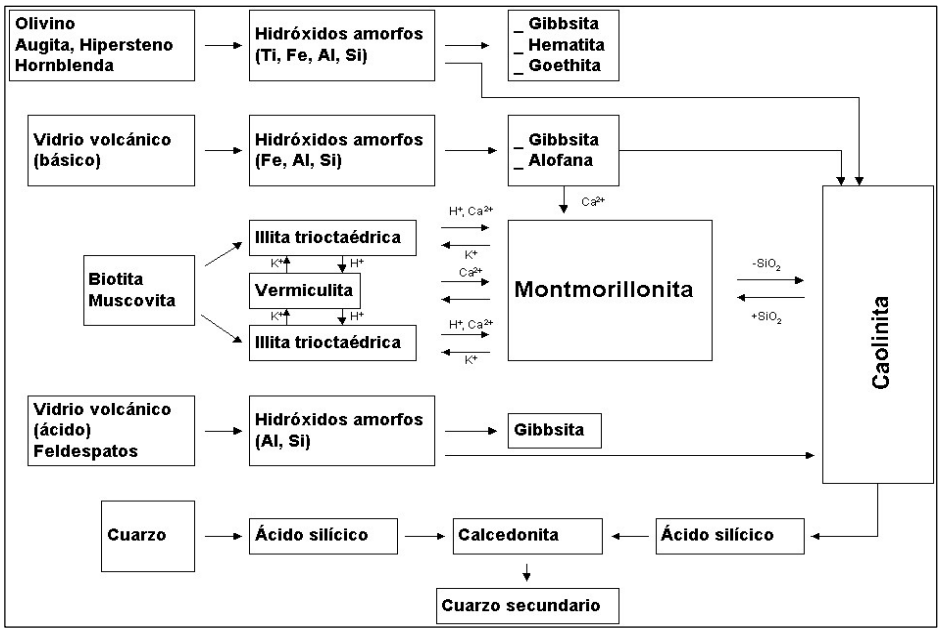


Figura 2.18. Posibles rutas para la formación de minerales arcillosos durante la meteorización

Fuente: adaptado de Selby, (2000)

2.10 Minerales arcillosos y tipos de suelo según sus límites de consistencia

En la Figura 2.19 se ubican algunos de los minerales arcillosos y su relación directa con la carta de plasticidad y a sus límites de consistencia. Este arreglo de la carta de plasticidad fue propuesto por Arthur Casagrande para los minerales más comunes.

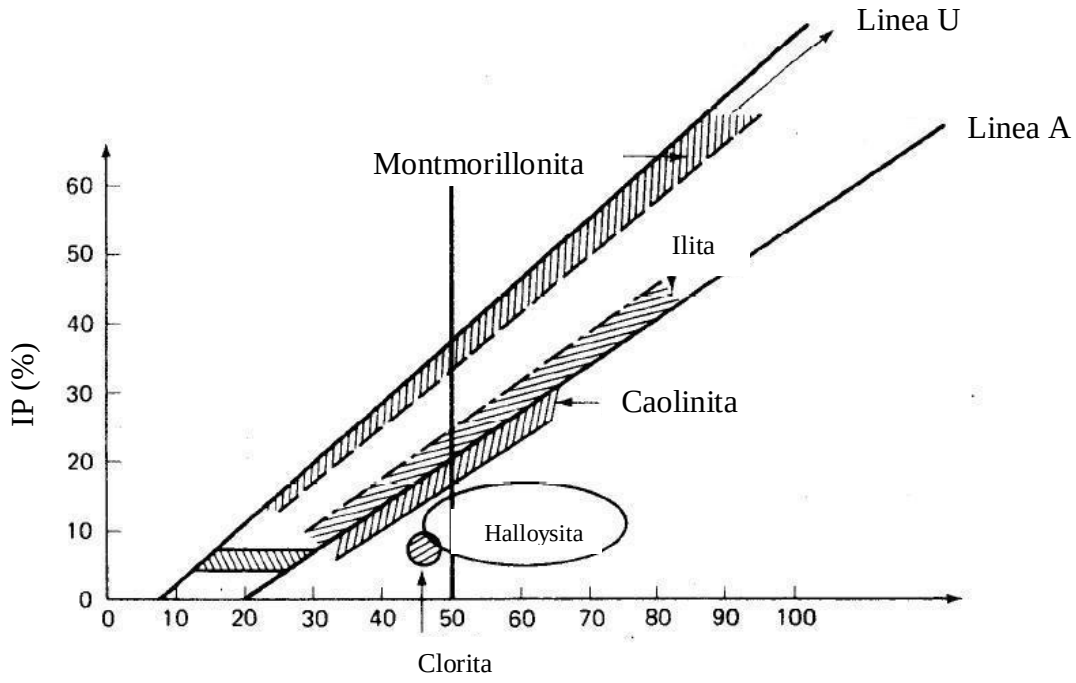


Figura 2.19. Valores de LL e IP y minerales en la carta de plasticidad de Casagrande
Fuente: adaptado de Holtz & Kovacs (1981)

En la actualidad varios autores han tratado el caso de variación de los límites de consistencia de suelos cohesivos, la Tabla 2.5 muestra rangos aproximados de los límites de consistencia en algunos tipos de mineral.

La halloysita es un mineral muy singular debido a su característica estructura en forma tubular compuesta de partículas con formas de tubo, las cuales pueden afectar las propiedades ingenieriles (resistencia y asentamientos) de forma inusual. La clasificación y las pruebas de compactación en muestras secas al aire de suelos con alto contenido de halloysita, difieren de manera significativa a los valores obtenidos en pruebas con humedad natural.

Tabla 2.5. Valores de los límites de consistencia para minerales arcillosos

Mineral	Límite líquido (LL)	Límite Plástico (LP)	IP
Montmorillonita	100-200	50-100	50-100
Nontronita (Grupo de la esmectita)	37-72	19-27	18-45
Ilita	60-120	35-60	25-60
Caolinita	30-110	25-40	5-70
Halloysita hidratada	50-70	47-60	3-10
Halloysita deshidratada	35-55	30-45	5-10
Atapulgita	160-230	100-120	60-110
Clorita	44-47	36-40	8-7
Alófana (sin secar)	200-250	130-140	70-110

Fuente: Suárez (1998)

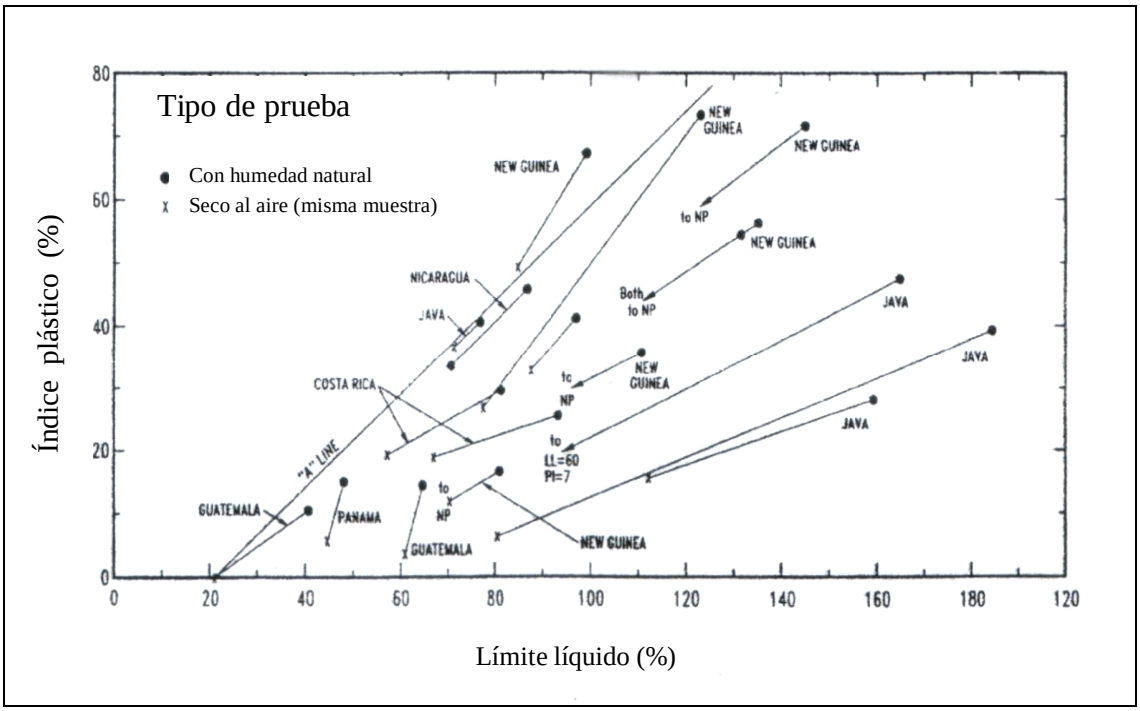


Figura 2.20. Efecto del secado en los límites de consistencia de suelos tropicales

Fuente: Rollings & Rollings (1996)

Las mezclas de minerales de varios tipos y la presencia de material orgánico, hacen que los valores de los límites de consistencia en suelos sean muy variables (ver Figura 2.20), ya que

todos estos elementos tienen valores para sus límites de consistencia diferentes y la mezcla hace que cada suelo tenga sus propios valores para su combinación de minerales y material orgánico particular de su geología.

La halloysita es un mineral muy singular debido a su característica estructura en forma tubular compuesta de partículas con formas de tubo, las cuales pueden afectar las propiedades ingenieriles (resistencia y asentamientos) de forma inusual. La clasificación y las pruebas de compactación en muestras secas al aire de suelos con alto contenido de halloysita, difieren de manera significativa a los valores obtenidos en pruebas con humedad natural.

2.11 Influencia del contenido de alófana en las propiedades ingenieriles de los suelos volcánicos

Durante mucho tiempo los japoneses han estudiado e investigado con mayor detalle los suelos de origen volcánico, ya que este país cuenta con gran cantidad de volcanes y los suelos cohesivos derivados de material volcánico son abundantes en esta región. El desarrollo de la infraestructura y la complejidad de construir en este tipo de medio, ha obligado a los japoneses a investigar y obtener avances en el comportamiento y análisis de estos materiales, según la Mecánica de Suelos. Esto es de mucha importancia para Costa Rica, ya que la similitud de los suelos y los avances logrados por los japoneses pueden servir para analizar el comportamiento anómalo de este tipo de materiales en nuestro país.

Además instituciones como el Departamento de Carreteras de Japón y la Sociedad Geotécnica Japonesa, le han dado apoyo e importancia a este tipo de investigación y los avances logrados han dado buenos resultados en lo referente a clasificación y conocimiento acerca de los principales problemas que presenta este tipo de suelos.

En el caso del ingeniero Ei Kon So del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Kanto en Japón ha estudiado el contenido de alófana en este tipo de suelos, realizando su análisis en más de 100 muestras originarias de Kanto. Entre los principales aportes se tiene la nueva carta de plasticidad, que incluye el índice de liquidez como una variable útil para caracterizar las propiedades mecánicas de los suelos volcánicos. Además se incluye el contenido de humedad natural de los suelos, como un parámetro de caracterización y clasificación a tomar en cuenta. So pública recientemente en 1991 y 1993 artículos acerca del contenido de alófana y

la influencia en suelos de tipo volcánico. Sin embargo el problema es conocido en Japón desde hace más de 30 años por autores como Nobuchika Moroto y Yasuo Kitagawa entre otros.

So (1991) destaca que a las diferentes humedades óptimas y valores de densidad máxima del suelo, que se obtienen según el proceso de preparación de la muestra en laboratorio; pueden no ser representativos de la condición de campo. Eso puede ocasionar problemas con los niveles de humedad mínimos que se presenten "in situ" y los máximos niveles de compactación y humedad que se puedan alcanzar en el lugar al momento de efectuar los trabajos en sitio (ver Figura 2.21).

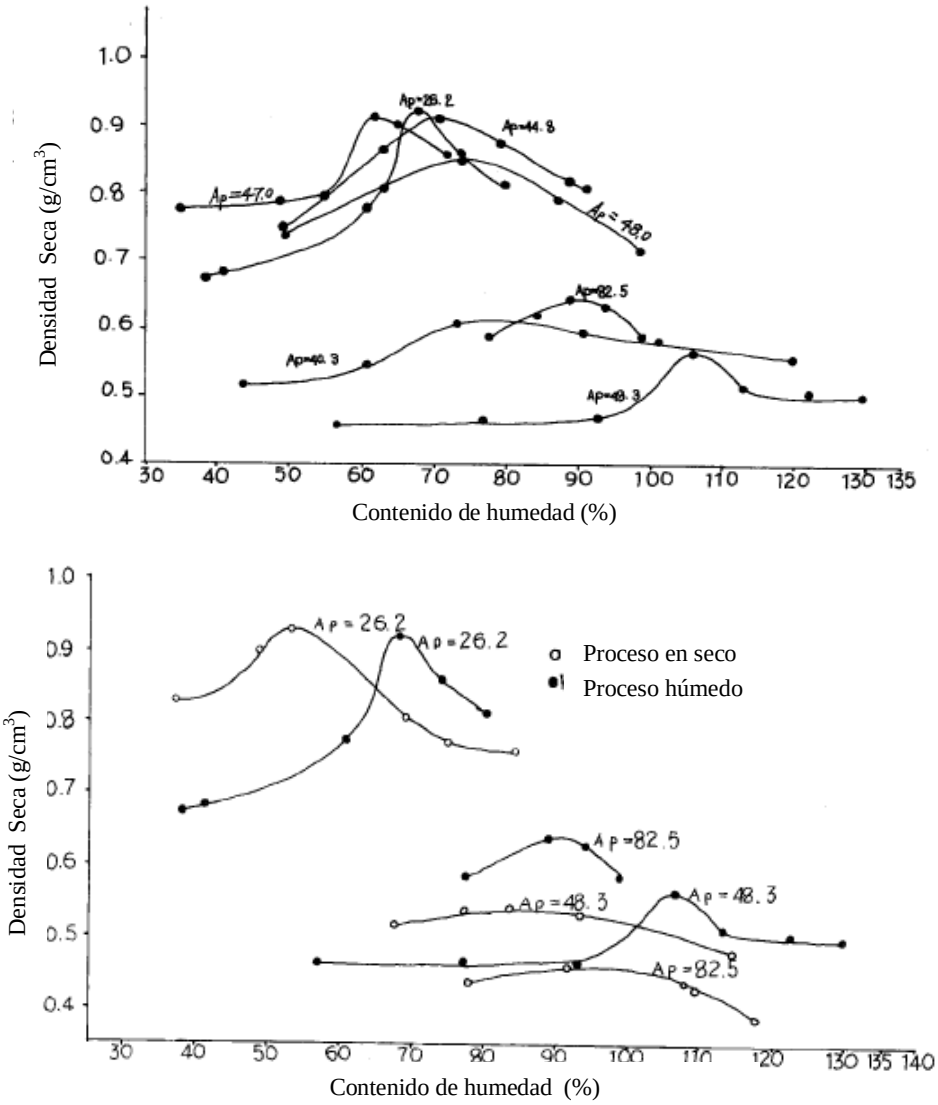


Figura 2.21. Contenido de alófana (A_p) en suelos volcánicos (densidad y humedad óptima) y su influencia sobre la curva de compactación

Fuente: So (1991)

La Tabla 2.6 brinda la simbología para la sub-clasificación de suelos de acuerdo al índice de liquidez y el contenido de humedad natural.

Tabla 2.6. Notación para la clasificación y comparar suelos MH y ML

Máxima humedad natural	Índice de liquidez
(H) : Alto contenido de humedad	**(H)** : Alta liquidez
(H) : Alto contenido de humedad	**(L)** : Baja liquidez
(L) : Bajo contenido de humedad	**(H)** : Alta liquidez
(L) : Bajo contenido de humedad	**(L)** : Baja liquidez

Fuente: So (1998)

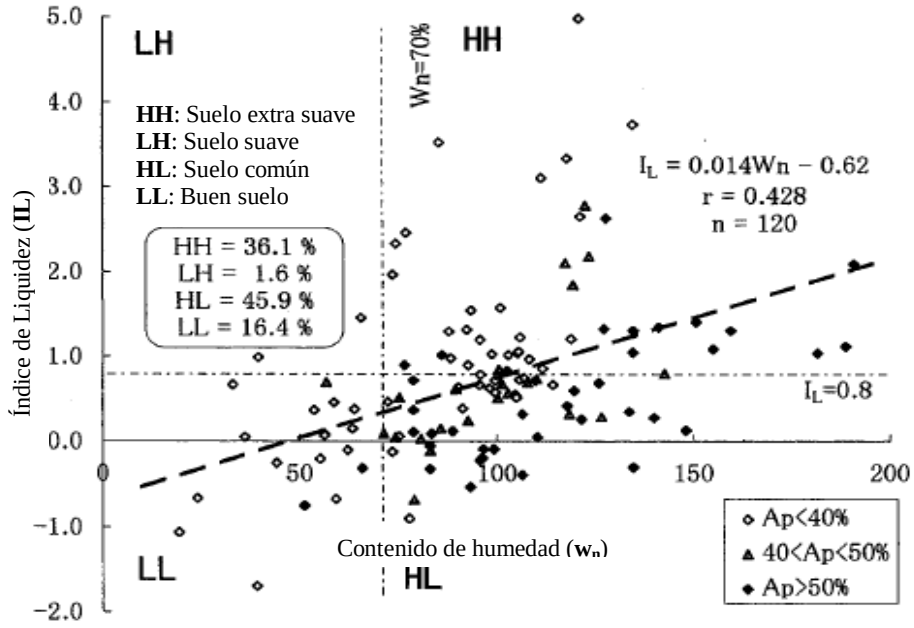


Figura 2.22. Carta de clasificación según contenido de humedad

Fuente: Adaptado de So (1993)

So (1993) propuso una carta de clasificación de suelos volcánicos con alófana basada en el índice de liquidez y contenido de humedad natural (ver Figura 2.22). Con base en estos parámetros se definió una gráfica o clasificación dividida en 4 cuadrantes, cada cuadrante se representa por dos caracteres, donde el primer carácter representa el contenido de humedad (w_n) y el segundo la liquidez (sensibilidad según el IL). Se utilizan las letras L y H (del ingles “low” y

"High"), como en la carta de plasticidad Casagrande, para separar grupos. Por ejemplo: (LL) Bajo contenido de humedad y baja liquidez, (HL) Alto contenido de humedad y baja liquidez.

La elección del valor de IL=0,8 que separa los limos normales de los limos suaves sensitivos, fue propuesto por el Departamento de Carreteras Públicas de Japón. El contenido de humedad representativo de un suelo volcánico es de w_n=70% y sirve de límite entre suelos volcánicos y de otro tipo. Este valor se obtiene de la prueba química de cuantificación del contenido de alófana y materia inorgánica amorfa mínimo de A_p = 10% para un suelo volcánico.

Esto deja en evidencia que los limos HH son suelos suaves y de muy malas propiedades ingenieriles, el LL es un suelo de buenas propiedades ingenieriles, por otro lado el suelo HL es denominado como limo común debido a que es el más abundante en los suelos de Japón. Para el caso del limo LH este casi no se presenta y su proporción es muy baja, ya que posee un contenido de humedad bajo y un alto IL lo cual no es muy común en la práctica.

El valor de Ap=10% se evalúa en la ecuación de la Figura 2.23 para obtener en contenido de humedad respectivo. Este valor de A_p se obtuvo a partir del análisis de 120 muestras de suelo de las cuales se midió el contenido de alófana y su respectivo contenido de humedad.

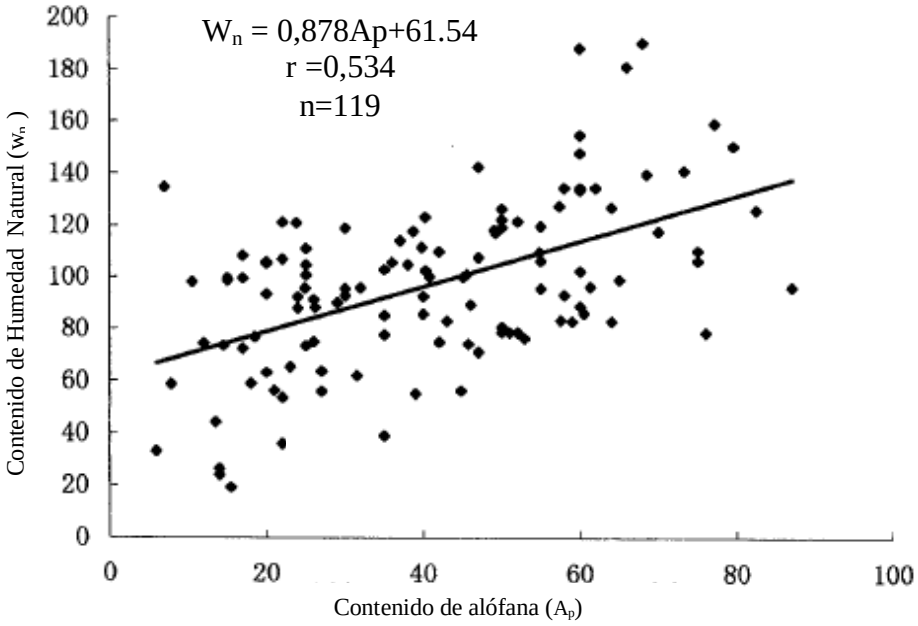


Figura 2.23. Contenido de alófana y humedad en suelos volcánicos

Fuente: Adaptado de So (1993)

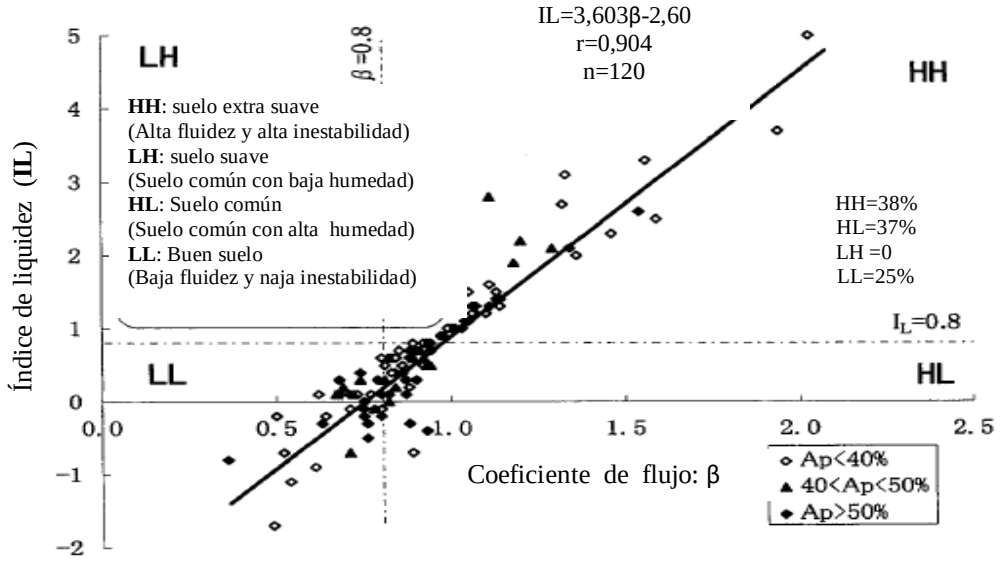


Figura 2.24. Carta de clasificación según coeficiente de flujo

Fuente: Adaptado de So (1993)

En la Figura 2.24 se presenta otra carta de clasificación japonesa basada en la relación entre el índice de liquidez (IL) y el coeficiente de Flujo (β), que es la razón entre el contenido de humedad w_n y su respectivo LL el cual es ($\beta=w_n/LL$). En la figura es evidente que la relación entre estas variables presenta una fuerte linealidad y buena correlación sin importar el número de muestras que sean analizadas.

La Tabla 2.7 por otro lado brinda la simbología de clasificación entre el índice de liquidez y coeficiente de flujo.

Tabla 2.7. Notación para la clasificación (IL vs β)

Fluidez del suelo	Estabilidad para cimentar en el suelo
(H) : Alta fluidez	**(H)** : Alta inestabilidad
(H) : Alta fluidez	**(L)** : Baja inestabilidad
(L) : Baja fluidez	**(H)** : Alta inestabilidad
(L) : Baja fluidez	**(L)** : Baja inestabilidad

Fuente: So (1998)

Los valores utilizados para clasificación fueron propuestos por el Departamento de Carreteras Publicas de Japón y aceptados por la Sociedad Geotécnica Japonesa y sus respectivos

valores son β = 0,8 y IL = 0,8 y el valor del coeficiente "β" fue obtenido de manera que los suelos con este valor límite tuvieran una traficabilidad [(1)] mínima de 3 kgf/cm^2 = 294,3 kPa.

Además en la Figura 2.24 se presenta una fuerte relación de linealidad entre variables, lo cual hace este sistema ideal para clasificar suelos sin necesidad de tablas o gráficos. Al igual que en la clasificación anterior acá la carta se divide en 4 cuadrantes, donde el primer carácter representa la fluidez del suelo (flujo plástico de sólido a líquido) y el segundo la inestabilidad o colapso.

Ambas cartas de clasificación guardan congruencia entre sí manteniéndose la condición con los suelos del tipo LH, los cuales son muy poco comunes y su porcentaje de ocurrencia es muy bajo o casi nulo en ambos sistemas de clasificación. De esta manera tenemos que un suelo HH es de alta fluidez y alta inestabilidad (limo suave) y LH baja fluidez y alta inestabilidad. Para el caso del LH no se da nunca en la clasificación, a diferencia del sistema de clasificación anterior donde se daba aunque su presencia porcentual fuera baja. Los más abundantes son los suelos HH y HL lo cual refleja la presencia de suelos deficientes de origen volcánico.

Es importante destacar que el método utilizado en Japón para obtener límites de consistencia es la cuchara de Casagrande, a partir de los valores obtenidos por este método de laboratorio se obtiene los parámetros necesarios para sub-clasificar suelos en estas nuevas cartas de plasticidad.

2.12 Métodos para obtener mineralogía y la microestructura del suelo

El análisis químico y microscópico de los suelos es una ciencia relativamente joven, ya que es a partir de 1970 cuando se empieza a dar investigación desde este punto de vista para obtener información de la mineralogía de los suelos en varios países del mundo.

Esto ocurre a partir de esta época principalmente, ya que es cuando tecnologías como el microscopio eléctrico, el análisis termodiferencial, las computadoras y los rayos x se empiezan a aplicar en la investigación de la microestructura y análisis mineralógico y su influencia en los materiales que contienen cada mineral.

Hoy en día sabemos que muchas de las propiedades físicas y mecánicas del suelo están relacionadas con la presencia de ciertos minerales, que le dan sus características al suelo. Actualmente, la mineralogía de un suelo se puede obtener por alguno de los siguientes métodos:

Formas de obtener mineralogía en arcillas y limos

- Análisis termogravimétrico
- Barrido con microscopio electrónico
- Microscopía de transmisión
- Difracción de rayos X
- Análisis químico

La forma de las partículas es llamada también microestructura, es un parámetro de mucha importancia en lo referente a caracterización del suelo, además en complemento con la distribución del tamaño de partículas es de mucha importancia para describir el comportamiento del suelo.

Además de obtener microestructura en las partículas de suelo, se pueden comparar las alteraciones ocasionadas por el remoldeo y razones de vacíos en la estructura del suelo debido a la acción de cargas. Esta y muchas otras aplicaciones se le da a las nuevas pruebas de identificación de minerales, principalmente cuando estos minerales son causantes de malas propiedades físicas y mecánicas en suelos y rocas; se debe tener en cuenta el génesis de los materiales, sus condiciones geográficas y meteorológicas y el tipo de investigación que mejor se adapte a las condiciones reales de análisis.

Capitulo 3. Pruebas de laboratorio e información geotécnica recopilada del Valle Central

3.1 Marco metodológico

3.1.1 Metodología

Para el logro de los objetivos se propone realizar investigación bibliográfica y experimental por medio de ensayos de laboratorio, para poder probar y apoyar con evidencias experimentales 2 hipótesis principales del presente proyecto:

1. Los suelos derivados de cenizas volcánicas contienen minerales arcillosos amorfos, específicamente alófana y halloysita.
2. El contenido de alófana y halloysita afecta las propiedades físicas y el comportamiento de los suelos en función de los cambios de humedad.

La literatura geotécnica y los ensayos para determinar contenido de materia orgánica y alófana son las principales formas empleadas para probar la hipótesis 1 con los suelos nacionales de la GAM.

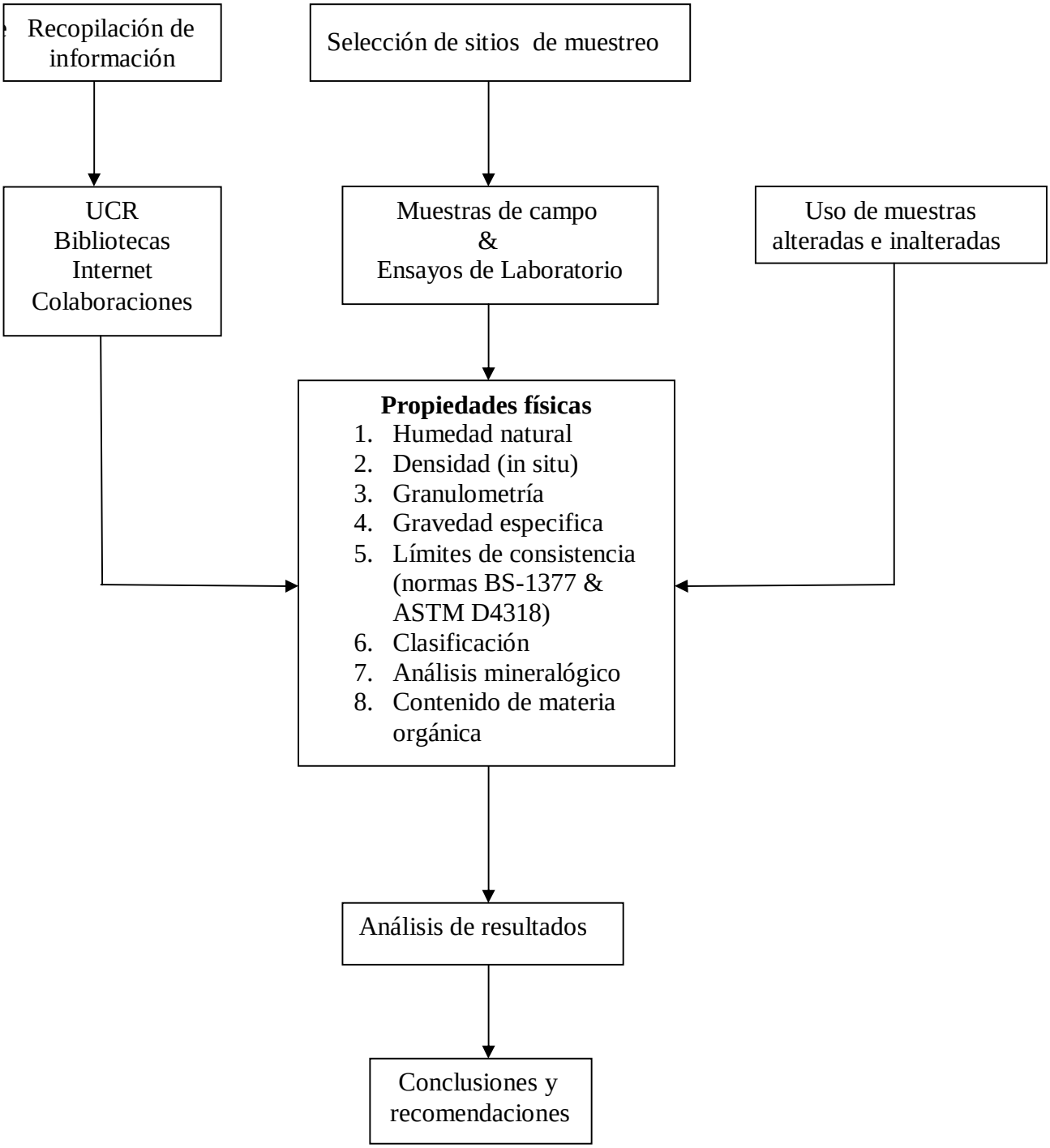
Los ensayos de límites de consistencia realizados con distintos tipos de suelos, distintas condiciones de humedad inicial y dos procedimientos estandarizados distintos son la principal fuente de datos para apoyar la hipótesis 2.

Adicionalmente, se parte del supuesto que los ensayos de laboratorio estandarizados por ASTM para la determinación de las propiedades físicas y consecuentemente, los sistemas de clasificación de los suelos basados en esas propiedades podrían no ser adecuados en el caso de los andosoles.

Al introducir el ensayo de límites de consistencia según la normativa británica BS-1377, basada en la penetración de un cono en caída vertical, se pretende evaluar la facilidad de implementación y ventajas que ofrezca para estos suelos en especial.

Se consulto la literatura de países en donde se presentan suelos volcánicos y en particular Japón, de esta investigación se extrajo un sistema de clasificación aplicable a este tipo de suelos cuyo uso es recomendable para Costa Rica.

3.1.2 Esquema metodológico



3.2 Ensayos de laboratorio/campo (normativa)

3.2.1 Contenido de humedad ASTM D-2216-05

Este parámetro es la relación entre el peso del agua contenida en una muestra y el peso en seco de los sólidos y está definido por la fórmula:

$$\%w = \frac{W_w}{W_s} \qquad (1)$$

Donde:

%w: contenido de humedad en la muestra

$\mathbf{W_w}$: peso del agua

$\mathbf{W_s}$: peso seco de la muestra

Este ensayo es de especial importancia en el caso de los suelos finos cohesivos, en los cuales la resistencia al cortante va a estar determinado según el contenido de humedad. Además, el contenido de humedad es de especial importancia en los suelos colapsables y en los suelos expansivos, los cuales van a tener una diferente reacción según el contenido de humedad presente en el sitio.

3.2.2 Densidad (in situ) BS-1377(90)

El método para obtener la densidad "in situ" mediante muestras inalteradas, se realizó en el laboratorio mediante recipientes graduados para obtener el volumen desplazado de un cuerpo sumergido, que en este caso se trata de suelo cohesivo.

La muestra de suelo debe conservar las propiedades de humedad y relación de vacíos "in situ" por lo cual se envuelve en una pequeña capa de cera, para la cual la densidad es conocida con base en el peso y se calcula el volumen neto desplazado por el suelo.

$$\rho = \frac{\textbf{Masa}}{\textbf{Volumen}} \qquad (2)$$

La Tabla 3.1 brinda valores para los diferentes rangos de la densidad seca de los materiales, se destacan rangos para la densidad seca donde se pueden clasificar suelos con alófana, halloysita y caolinita.

Tabla 3.1. Descripción de los suelos según su densidad seca

Densidad seca (g/cm^3)	Descripción
0,3 – 0,7	Suelos jóvenes en que domina la alófana
0,7 – 0,9	Suelos más desarrollados en los que domina la halloysita
1,1 – 1,4	Suelos recientemente depositados

Fuente: Alvarado (2001)

3.2.3 Análisis granulométrico ASTM D-421 y ASTM D-422 y ASTM D-2487-06 para clasificación de suelos con fines ingenieriles (sistema SUCS)

Este ensayo de laboratorio pretende determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños de las partículas de suelo existente mediante sus masas. La forma de determinar el tamaño de partículas depende del tamaño límite de la malla #200, mediante la cual se brindan dos métodos de determinación de partículas según se tenga suelos con tamaños mayores o menores a 0,075 mm.

Para los suelos con tamaños superiores a 0,075 mm se utiliza el método mecánico (ASTM D-421), este método consiste en colocar una serie de mallas en orden descendente según su abertura, para luego determinar la masa retenida en cada malla y luego se determina el porcentaje retenido en cada malla.

Para los suelos con partículas menores a 0,075 mm se utiliza el método de sedimentación del hidrómetro (ASTM D-422), este método utiliza la relación entre la velocidad de caída de partículas de un suelo, su diámetro de partículas, el peso específico y la viscosidad del fluido dado por la ecuación:

$$D = \left(\frac{30\eta}{g(\gamma_s - \gamma_w)}\right)\left(\frac{L}{t}\right) \qquad (3)$$

Donde:

D: diámetro de las partículas

η **:** viscosidad dinámica o absoluta del fluido

γ_s **:** peso específico de los sólidos

γ_w **:** peso específico del fluido (agua)

L: profundidad de la inmersión efectiva del hidrómetro (cm)

t: tiempo transcurrido en minutos

g: aceleración gravitacional 980 cm/s^2

La importancia de la granulometría es vital en la clasificación de los suelos, una importante parte de los criterios utilizados para determinar los materiales convenientes a utilizar en rellenos o las características de los suelos donde se va a cimentar, está altamente relacionada con la granulometría. El sistema de clasificación que se utilizará en el presente proyecto es el Sistema de Clasificación SUCS según la norma ASTM D2487.

3.2.4 Gravedad específica ASTM D-854-06

La gravedad específica se define como el peso unitario de un determinado material a una cierta temperatura, divido entre el peso de un volumen igual de agua destilada a la misma temperatura. Expresado en su forma teórica como:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \qquad (4)$$

Donde:

G_s: gravedad específica

W_s: peso de la muestra

V_s: volumen de la muestra

γ_w: peso específico de la muestra

La gravedad específica es de gran importancia en la determinación de otros parámetros como la razón de vacíos (e) y el grado de saturación (%S), variables que son de gran importancia a la hora de analizar las características físicas de un determinado suelo. La obtención de la gravedad específica en laboratorio se efectuó mediante la norma norteamericana ASTM D-854-06, la cual propone la siguiente ecuación para obtener su valor en laboratorio:

$$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_1 - W_2} \qquad (5)$$

Donde:

W_s: peso del suelo seco al horno

W_1: peso del picnómetro y el agua hasta el nivel de calibración

W_2: peso del picnómetro, suelo y agua hasta nivel de calibración a su respectiva temperatura

La gravedad específica se relaciona con el tipo de suelo o mineral que lo conforma, a continuación se presentan estas relaciones en la Tabla 3.2 y Tabla 3.3 respectivamente.

Tabla 3.2. Gravedad específica (G_s) según tipo de suelo

Tipo de suelo	G_s
Cenizas volcánicas	2,20 – 2,50
Suelos orgánicos	2,50 – 2,65
Arenas y gravas	2,65 – 2,67
Limos	2,67 – 2,72
Arcillas poco plásticas	2,72 – 2,78
Arcillas plásticas	2,78 – 2,84
Arcillas expansivas	2,84 – 2,88

Fuente: Berry & Reid (1993)

Tabla 3.3. Gravedad específica (G_s) según el mineral que conforma el suelo

Tipo de mineral	Gravedad específica	Comentarios
Cuarzo	2,65	Silicato más común en los minerales del suelo
Halloysita	2,55	Muy plástica cuando está parcialmente seco, relativamente inactivo de otra manera.
K feldespato	2,54 – 2,57	El feldespato es un tipo de silicato
Na feldespato	2,62 – 2,76	El feldespato es un tipo de silicato
Calcita	2,71 – 2,72	Constituyente básico de las rocas carbonatadas
Clorita	2,69 – 2,90	No expansivo y fluye bajo esfuerzos plásticos
Dolomita	2,85	Constituyente básico de las rocas carbonatadas
Muscovita	2,76 – 3,0	Silicato mineral tipo hoja (del grupo de la mica)
Biotita	2,8 – 3,2	Silicato mineral tipo hoja (del grupo de la mica)
Hemetita	5,2 – 5,3	Causa una coloración café en los suelos
Gibbsita	2,35	Puede permitir ataque de sulfatos al concreto
Caolinita	2,61 – 2,66	Mineral arcilloso tipo silicato de baja actividad
Ilita	2,60 – 2,86	Mineral arcilloso tipo silicato de intermedia actividad
Montmorillonita	2,74 – 2,78	Mineral arcilloso tipo silicato de alta actividad

Fuente: Day (2006)

3.2.5 Límites de consistencia en suelos cohesivos (ASTM D4318 & BS-1377)

I. Análisis de los límites de consistencia por el método de la cuchara de Casagrande según la norma ASTM D-4318(05)

Este método fue ideado por Arthur Casagrande, austríaco residente en Estados Unidos, el método ha sido adoptado en laboratorios de todo el mundo, ya que durante mucho tiempo ha sido aceptado y altamente difundido en todo el mundo. El procedimiento consisten en amasar suelo y colocarlo en la copa de Casagrande, para luego contar los golpes necesarios para cerrar la ranura una dimensión determinada tal y como se muestra en la Figura 3.1. Al final se requiere construir la curva de flujo entre el número de golpes y el contenido de humedad.

Figura 3.1. Aparato de Casagrande utilizado para obtener límites de consistencia
Fuente: Day (2006)

Debido a que la prueba es de carácter dinámico, los golpes producen una vibración y el suelo responde con la resistencia al cortante entre partículas. El contenido de humedad necesario para cerrar la ranura en un contacto longitudinal de 13 mm (cerca de media pulgada) a la cantidad de 25 golpes es el límite líquido.

Sin embargo, entre sus limitantes se tiene la necesidad de contar con un técnico de laboratorio con buena experiencia o con alguna persona que esté familiarizado con el procedimiento y el equipo a utilizar, para obtener los límites de consistencia por este método.

Otra complicación que se presentan es que algunos tipos de suelo que se estén ensayando, son difíciles de colocar en la cuchara y de formar la ranura con el acanalador, ya que se adhieren

al acanalador y no dejan formar la ranura de falla de manera efectiva, condición necesaria para la ejecución de la prueba. Además muchos de estos suelos requieren de largos tiempos de mezclado, para desarrollar una plasticidad uniforme lo cual es indispensable en la realización de la prueba de manera correcta.

Otros autores también señalan problemas en este ensayo con suelos de contextura arenosa, como en el caso de los suelos ubicados en las cercanías de las costas o de los conos volcánicos, los cuales poseen porcentajes considerables de materiales finos con poca o nula plasticidad. El problema de estos suelos es que al realizar la prueba, el cierre de la ranura en la copa se produce por licuación de la arena en lugar de darse por plasticidad (cohesión del material).

El límite plástico se define como el contenido de humedad entre el estado plástico y el semisólido, es un parámetro de importancia en la clasificación de suelos. Para determinar el límite plástico es necesario tomar a pequeña muestra de suelo, una vez que se haya obtenido una consistencia cercana a los 35 golpes en la cuchara de Casagrande, luego se amasan y forman pequeños cilindros con diámetro de 3 mm y se repite este procedimiento hasta que la muestra se desmorone y se determina el contenido de humedad como LP según se muestra en la Figura 3.2.

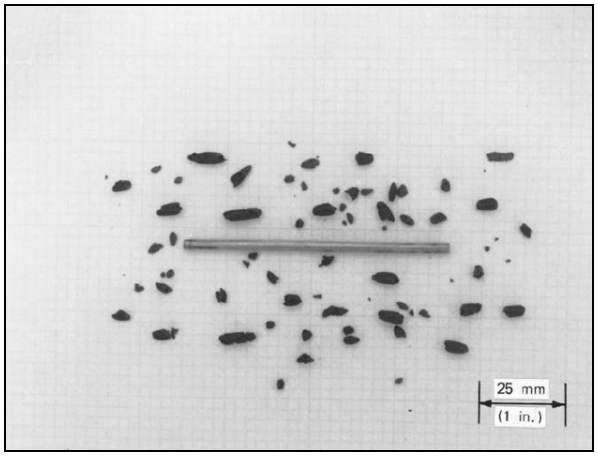


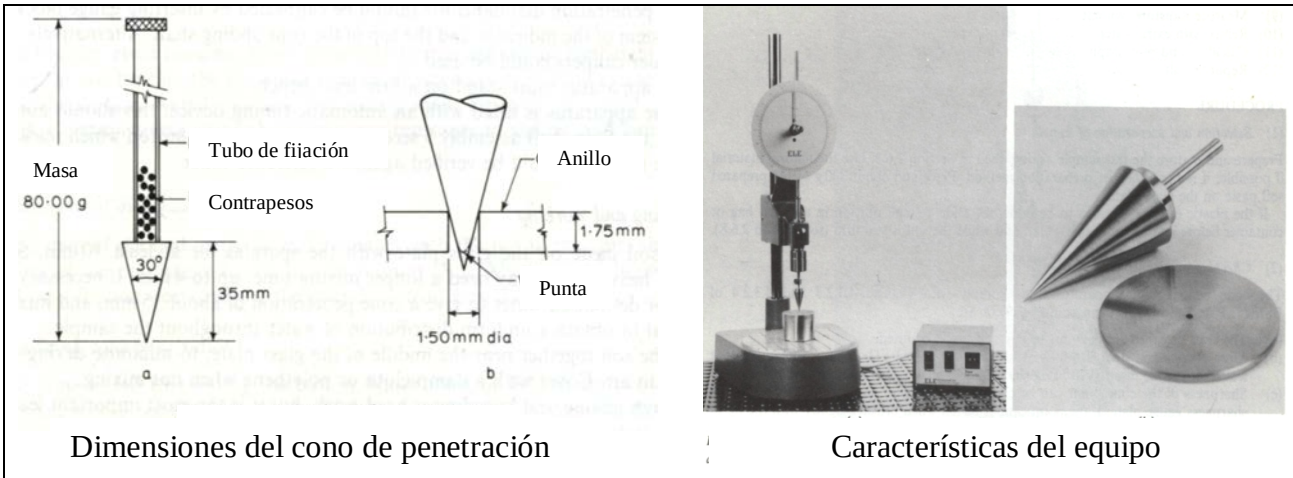
Figura 3.2. Determinación del límite plástico según ASTM

Fuente: ASTM D-4318, (2005)

Es importante señalar que en algunos suelos no es posible determinar el límite plástico, por lo cual su índice plástico no se puede estimar y son clasificados como no plásticos (NP), también ocurre lo mismo cuando el límite plástico es mayor al contenido de humedad natural de la muestra de suelo.

II. Análisis de los límites de consistencia por el método de penetración con caída de cono según la norma británica BS 1377 (90)

Este método ha sido adoptado en laboratorios de varios lugares como Australia, Nueva Zelanda, Italia, Francia, México, Brasil y Gran Bretaña; esto para determinar los límites de consistencia de suelos finos. El cono de penetración británico tiene una masa normada de 80 g y ángulo de 30^0 en la cabeza inferior, esta cabeza debe estar en contacto con la superficie del suelo remoldado al momento de la prueba de penetración (Ver Figura 3.3).



Dimensiones del cono de penetración

Características del equipo

Figura 3.3. Equipo alternativo para obtener los límites de consistencia en suelos

Fuente: adaptado de BS-1377 (1990)

Las mezclas de minerales de varios tipos y la presencia de material orgánico, hacen que los valores de los límites de consistencia en suelos sean muy variables (ver Figura 2.20), ya que todos estos elementos tienen valores para sus límites de consistencia diferentes y la mezcla hace que cada suelo tenga sus propios valores para su combinación de minerales y material orgánico particular de su geología.

Para el caso del límite plástico aun no se fija un valor único, Towner (1973) propone una penetración de 2 mm, Allbrook (1980) sugiere 2,8 mm, Campbell (1976) y Wroth and Wood (1978) y Davidson (1983) han propuesto el mínimo punto del grafico parabólico que se obtiene de graficar el valor de penetración y el contenido de humedad. Sin embargo las diferencias entre los métodos es de menos del 5% lo cual estadísticamente ha sido comprobado y es relativamente bajo y aceptable en Mecánica de Suelos.

El modelo logarítmico log-log utilizado (ver Figura 3.4) para la relación entre el contenido de humedad y la penetración del cono, es el que se realiza para obtener ambos límites de consistencia, se hace uso de un cono británico de penetración normalizado. La curva de flujo de este método se obtiene por regresión lineal, para así obtener los parámetros “m”, “c” y los límites de consistencia (Feng, 2001).

$$LL = c(20)^m \quad (6)$$

$$LP = c(2)^m \quad (7)$$

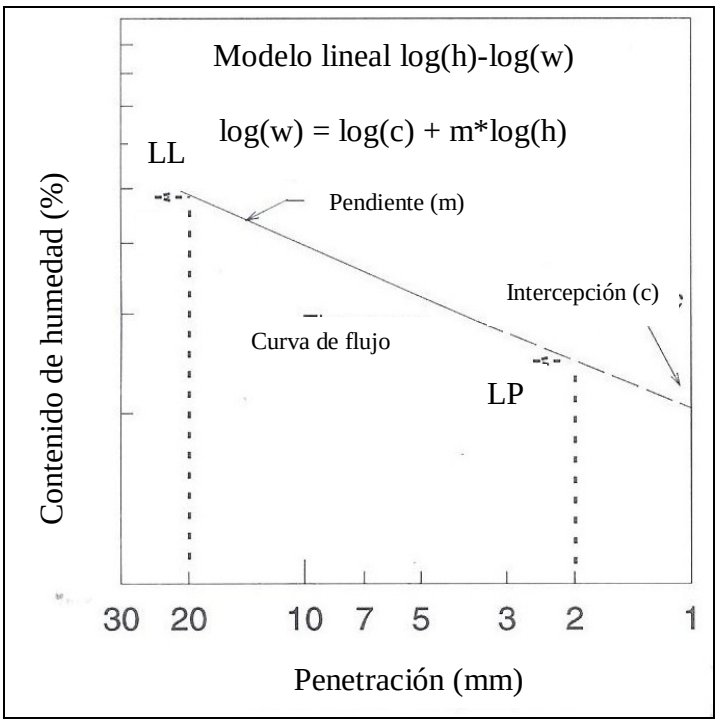


Figura 3.4. Modelo lineal logarítmico para estimar ambos límites de consistencia
Fuente: Revista de la Asociación Canadiense de Geotecnia (2001)

El método ha sido formulado y utilizado durante largo tiempo por los británicos, además más países de Europa y otras partes del mundo han optado por su utilización, es debido a esto que ha sido aplicado a muchos tipos de suelos con diferentes valores de límites de consistencia, para así poder validar su aplicación a la diversa cantidad de suelo existentes (ver Figura 3.5).

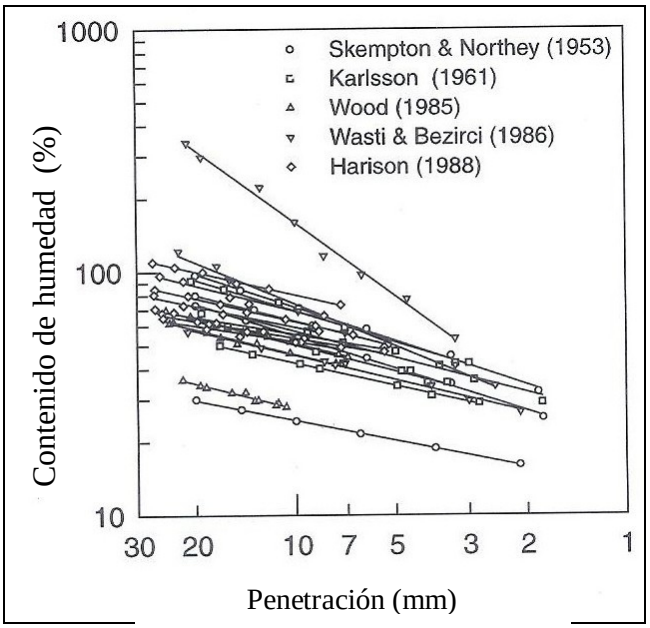


Figura 3.5. Curvas de flujo para varios suelos con límite líquido diferentes

Fuente: Adaptado de Feng (2001)

La Figura 3.6 muestra los resultados obtenidos para la curva de flujo de un mismo tipo de suelo, realizado por 5 operadores diferentes con poca experiencia en laboratorio (estudiantes).

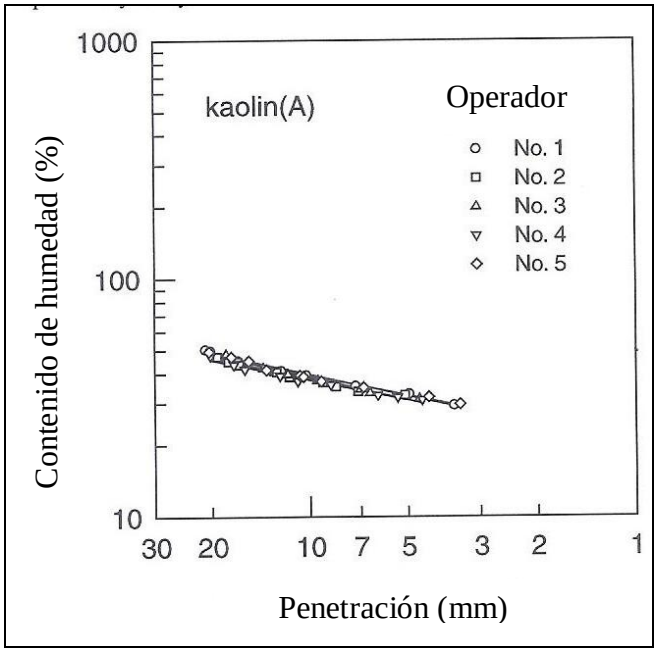


Figura 3.6. Repetitividad de la prueba por varios técnicos de laboratorio

Fuente: Adaptado de Feng (2001)

La prueba de laboratorio toma valores de penetración entre 25 y 3 mm, para poder así obtener ambos límites de consistencia con la misma curva de flujo, cabe resaltar que los resultados obtenidos fueron los mismos para todos los operarios de la prueba de límites con caída de cono.

En la Figura 3.7 muestra la comparación entre resultados de límite líquido por ambos métodos de laboratorio ASTM D4318 y BS-1377, realizado en 66 suelos con humedad natural procedentes de Taiwán y otros puntos de Canadá. La correlación entre ambos métodos de laboratorio es buena siendo ligeramente más altos los valores obtenidos para el método británico de penetración con caída de cono (Feng, 2001).

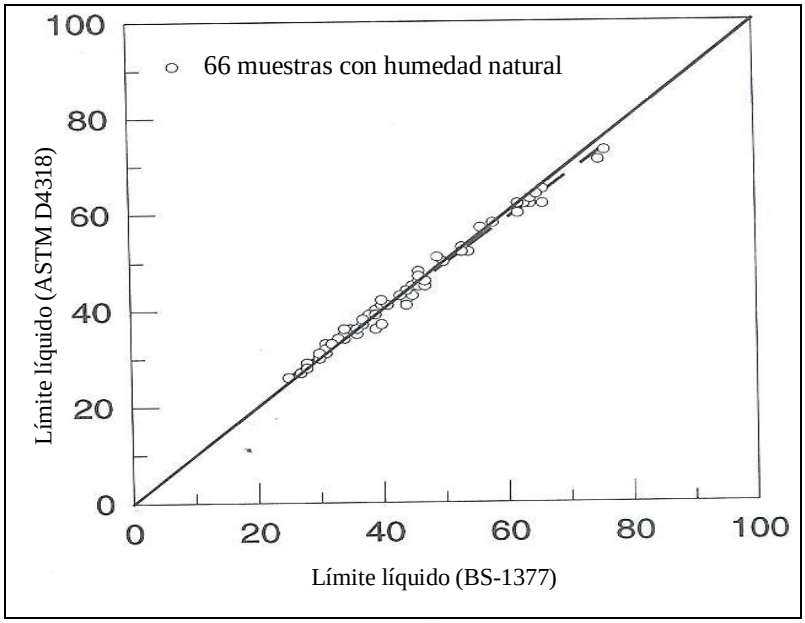


Figura 3.7. Comparación entre métodos de obtener límites de consistencia
Fuente: adaptado de Feng (2001)

Al igual que en el caso anterior, la comparaciones con el límite plástico obtenido por ambos métodos es de especial importancia para la aplicación de la prueba de cono como un ensayo alternativo factible para obtener los límites de consistencia. (ver Figura 3.8).

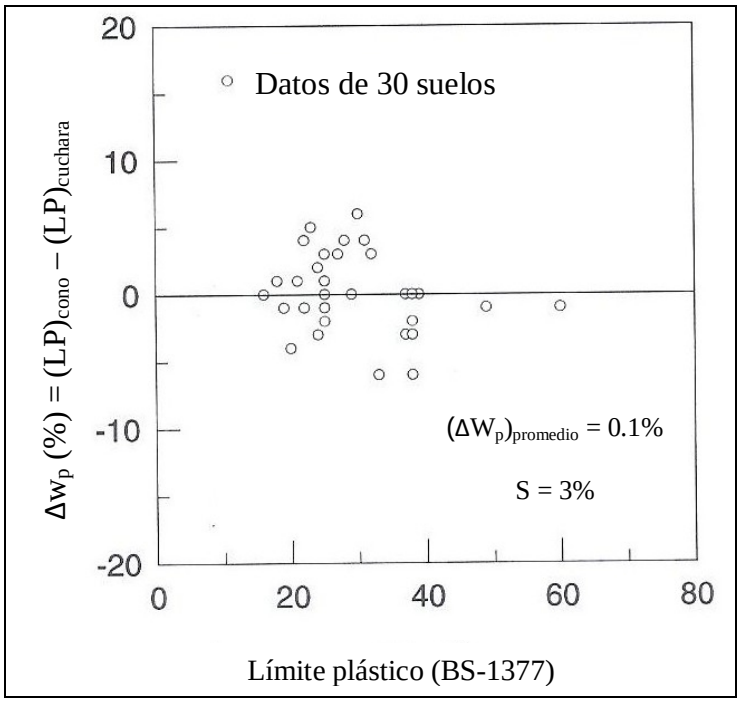


Figura 3.8. Límite plástico según BS-1377 en comparación con ASTM D4318

Fuente: Feng (2001)

Es importante tener presente que la prueba de penetración con caída de cono tiene la posibilidad de obtener ambos límites de consistencia, usando las ecuaciones (1) y (2) mostradas anteriormente, para al menos 4 mediciones de penetración distribuidas entre 3 y 25 mm. Uno de los problemas es que para valores de penetración de 3-5 mm el contenido de humedad es bajo y el mezclado es difícil, pero se puede obtener únicamente el límite líquido por este método con penetraciones entre 15-25 mm, lo cual hace más fácil el mezclado del suelo y el límite plástico se obtiene por el método ASTM D4316 con él amasado de cilindros (ver Figura 3.2 anterior).

La Figura 3.9 muestra la variación del comportamiento esfuerzo-deformación cortante con el contenido de humedad de un suelo y el índice de liquidez. El límite plástico es el valor del contenido de humedad mínimo, que permite un comportamiento plástico del suelo y el valor máximo es el límite líquido. Al estandarizar la prueba los valores de resistencia y deformación quedan también establecidos, por lo que es posible determinarlos con base en los valores de esfuerzo cortante y deformación que definen los límites es posible encontrar equivalencia entre distintos métodos de determinación.

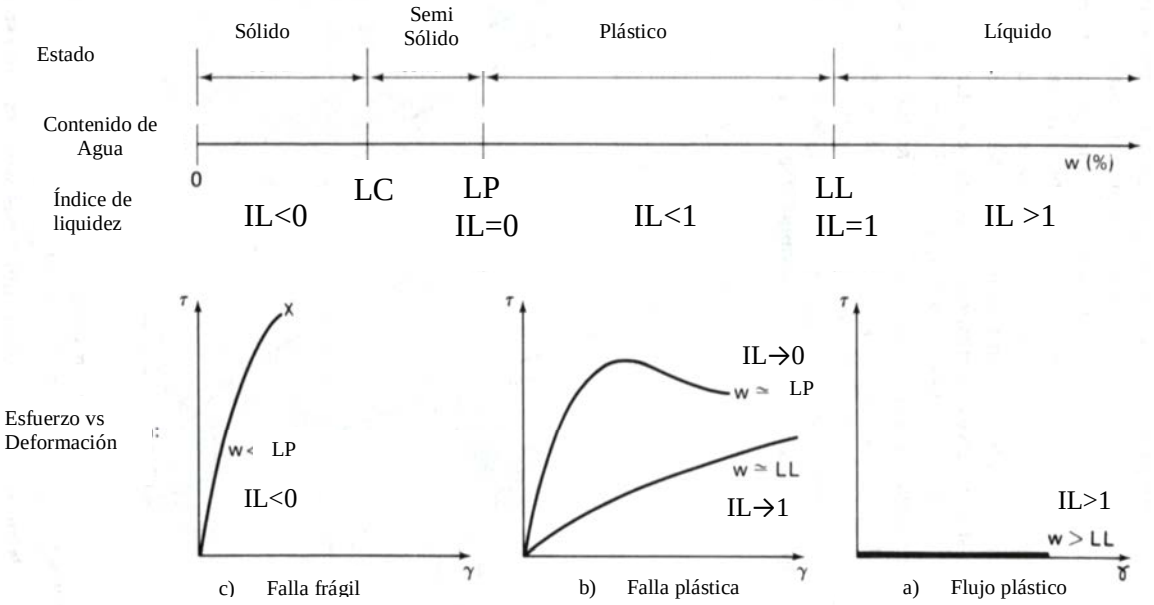


Figura 3.9. Curva esfuerzo deformación según límites de consistencia y contenido de humedad

Fuente: Holtz & Kovacs (1981)

Whyte (1982) propone los siguientes valores:

$$\text{Para LL, } \tau_u = 1{,}6 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Para LP, } \tau_u = 110 \text{ kN/m}^2$$

Otros autores proponen valores en un intervalo:

$$\text{Para LL, } \tau_u = [1{,}3] \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Para LP, } \tau_u = [110\text{-}130] \text{ kN/m}^2$$

- Índice de liquidez

El índice de liquidez es una medida del contenido de humedad en relación con los límites de consistencia según la ecuación:

$$IL = \frac{(w - LP)}{IP} = \frac{(w - LP)}{(LL - LP)} \qquad (8)$$

El índice de liquidez se relaciona de la siguiente manera con el estado del suelo:

IL < 0 (estado semisólido), "Comportamiento fractura frágil si falla por cortante"

0 < IL < 1 (estado plástico), "Comportamiento de un sólido plástico si falla por cortante"

IL > 1 (estado liquido), "Comportamiento de un liquido viscoso si falla por cortante"

Por otro lado la Figura 3.10 muestra que el IL y la resistencia al cortante no drenada C_{uu}, tiene una correlación cuando esta se gráfica en escala semi-logarítmica, esto hace aun más útil la clasificación y caracterización de los suelos con el IL.

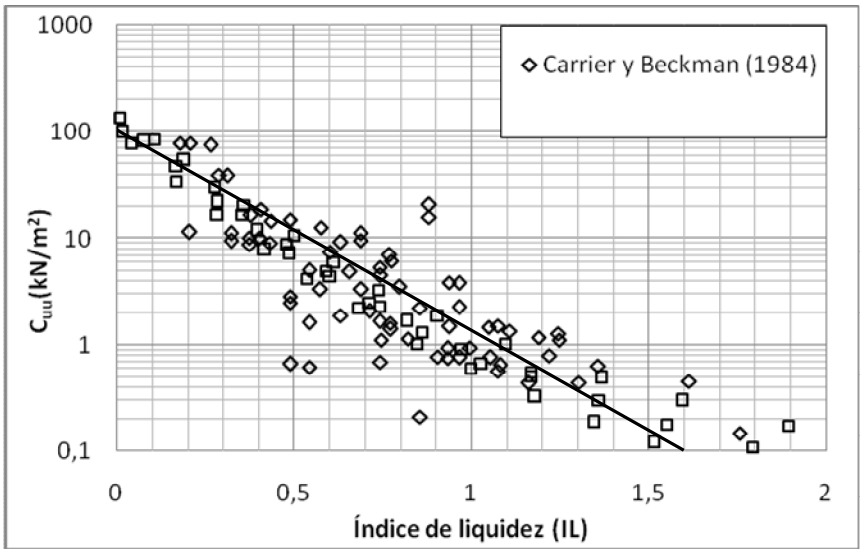


Figura 3.10. Relación al esfuerzo cortante no drenado (C_{uu}) e índice de liquidez (IL)
Fuente: adaptado de Bardet (1997)

En la figura anterior se puede observar que los valores propuestos por Whyte de la resistencia al cortante para el límite plástico y el límite líquido son congruentes con los datos graficados y definen el intervalo de variación de resistencia no drenada de un suelo según el contenido de humedad relativo a sus límites.

Además existen otro tipo de interpretaciones de carácter empírico (Das, 2001) que sugieren una relación entre IL y la razón de pre consolidación de un suelo del tipo interpretaciones del tipo:

IL → 0 Suelo preconsolidado y OCR>1

IL → 1 Suelo normalmente consolidado y OCR=1

- Actividad

Tabla 3.4. Criterio de actividad para varios minerales arcillosos

Mineral	Actividad
Montmorillonita	[1-7]
Montmorillonita-Na	[4-7]
Montmorillonita-Ca	1,5
Ilita	[0,5-1,3]
Caolinita	[0,3-0,5]
Halloysita deshidratada ($2H_2O$)	0,5
Halloysita hidratada ($4H_2O$)	0,1
Atapulgita	[0,5 – 1,2]
Alófana	[0,5 – 1,2]
Calcita	0,2
Quartz	0

Fuente: Holtz & Kovacs (1981)

La relación entre la actividad y el tipo de material arcilloso aun no es precisa, debido a la influencia de los iones en los fluidos intersticiales y la materia orgánica. Pero es un indicador de la capacidad de reaccionar químicamente y se correlaciona con la capacidad de intercambio de cationes. Como se muestra a continuación en la Tabla 3.4.

La actividad es un parámetro útil para evaluar el grado de plasticidad de la fracción de arcilla de un suelo. Se define como la razón entre el IP y la fracción arcillosa. Skempton en 1953 clasifico la actividad según la Tabla 3.5.

$$A = \frac{IP}{Fraccion\ Arcillosa} \qquad (9)$$

Donde:

A: actividad del suelo

IP: índice de plasticidad

Fracción Arcillosa: porcentaje por peso de partículas, menores a 2µm

Tabla 3.5. Criterios de actividad para suelos arcillosos

Descripción	Actividad
Inactiva	< 0,75
Normal	[0,75 – 1,25]
Activa	[1,25 – 2]
Muy Activa	[2- 6]
Extremadamente activa	>6

Fuente: Skempton (1953)

3.2.6 Clasificación según la norma ASTM D2487(06) y el sistema SUCS

De acuerdo con la norma ASTM D-2487(06), D-4318(05) y D-422 los suelos se clasifican según el sistema unificado (SUCS) y la clasificación se basa en las características granulométricas de los suelos de grano grueso (granulares) y los límites de consistencia de los suelos de grano fino (cohesivo). En este caso particular la clasificación se centra en fracciones finas contenidas en suelos granulares o suelos que mayoritariamente están constituidos por grano fino.

Además se destaca la carta de plasticidad de Casagrande en la Figura 3.11, utilizada por el "Sistema Unificado de Clasificación de Suelos" SUCS y la norma ASTM D2487 para la clasificación de suelos. Esta carta de plasticidad sirve para la clasificación de suelos con mayoría porcentual de partículas tipo limo o arcillas, también sirve para clasificar mezclas de suelo donde la clasificación se basa en la combinación de propiedades de granulometría y plasticidad de sus partículas.

La carta de plasticidad y el método ASTM D4318 para obtener límites de consistencia, son la metodología clásica para clasificar suelos, actualmente el sistema se utiliza ampliamente en muchas partes del mundo, aunque se sabe que los suelos de algunos países presentan problemas para clasificarse con este sistema.

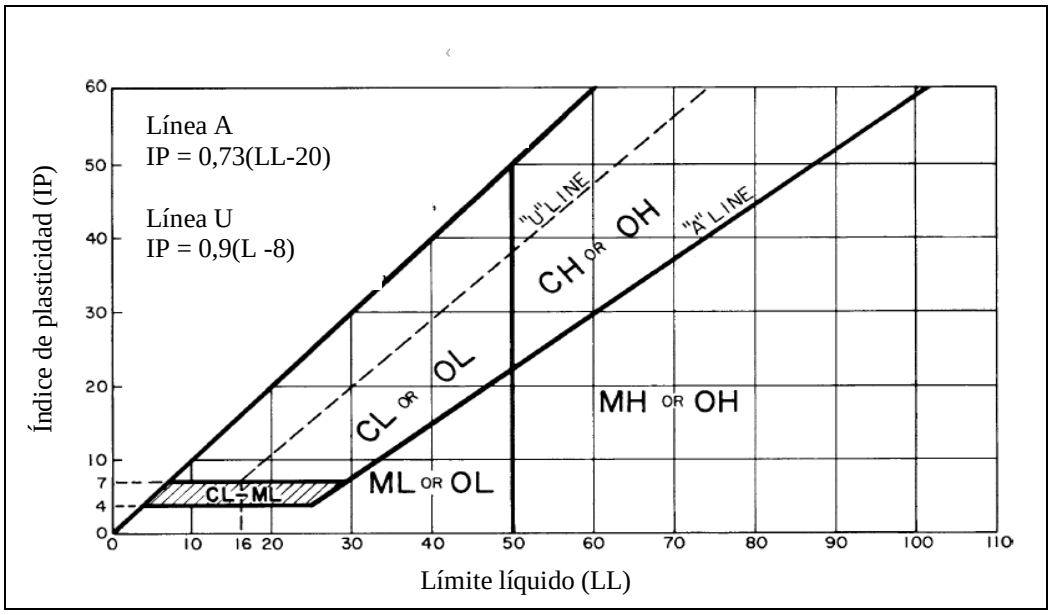


Figura 3.11. Carta de plasticidad para clasificación (SUCS)

Fuente: ASTM D2487 (2006)

ML: limo inorgánico de baja plasticidad

OL: limo/arcilla orgánica de baja plasticidad

CL-ML: limo arcilloso/arcilla limosa de baja plasticidad

MH: limo inorgánico de alta plasticidad

OH: limo/arcilla orgánica de alta plasticidad

CL: arcilla de baja plasticidad

CH: arcilla de alta plasticidad

Se sabe que los minerales son el constituyente principal de los suelos y que los valores de los límites de consistencia con que se clasifican dependen de los minerales arcillosos presentes en el suelo. Por lo cual cuantificar los minerales amorfos y su influencia en la clasificación es de mucha importancia, ya que los suelos volcánicos tienen un comportamiento anómalo y su comportamiento se debe a la presencia de estos minerales no cristalinos.

3.3 Análisis químico para determinar alófana y materia inorgánica amorfa en suelos volcánicos

3.3.1 Resumen de los métodos previos existentes al presente estudio

Actualmente el contenido de alófana de un suelo se puede determinar de manera cuantitativa mediante varios métodos, pero entre los que destacan se tiene:

1. Disolución de minerales en soluciones ácido-base. (HCl y NaOH).
2. Otros métodos de disolución en diferente tipo de ácidos.
3. Por pérdida de peso inicial por calentamiento en hornos y correlaciones con el contenido de alófana.

El método fue utilizado en alófana y en mezclas de alófana y halloysita realizada a varias muestras de 120 lugares con suelos provenientes de ceniza volcánica de Japón e Indonesia, la determinación cuantitativa de la alófana y la materia inorgánica amorfa fue realizada mediante 5 métodos distintos (Kitagawa, 1976).

Fue claro que mediante el método que utiliza la disolución alterna con HCl y NaOH, fue la mejor opción con el propósito de obtener la cuantía del mineral amorfo, ya que la cantidad de alófana y materia inorgánica determinada por este método, fue la más exacta reflejada en la proporción de muestra mezcladas de alófana / (alófana + halloysita). Esto podría ser debido a la coexistencia de iones ácidos y alcalinos en la disolución empleada por este método.

La cuantificación de la cantidad de alófana por el valor obtenido de capacidad de intercambio catódico, refleja muy bien la proporción existente de alófana pero el procedimiento para determinar esas propiedades es complejo y difícil de efectuar.

Las desviaciones estándar de los métodos fueron bastante bajas, siendo las más altas las obtenidas por el método rápido de pérdida inicial de peso por calentamiento. Sin embargo, este valor de capacidad de intercambio catiónico puede verse disminuido por el interlaminado Aluminio del dioctaedro y la proporción de vermiculita coexistente en la fracción arcillosa del suelo arcilloso volcánico.

El método de pérdida de peso por calentamiento no fue utilizado, debido a que este método no es tan apropiado cuando se tienen cantidades bajas de alófana, ya que no cuantifica con exactitud estos valores, además es una aproximación obtenida de las correlaciones con el método exacto de disolución ácido-base recomendado por los autores (Kitagawa, 1977).

3.3.2 Eliminación de la materia orgánica mediante Peróxido de Hidrógeno

La materia orgánica debe ser perfectamente removida de las muestras de suelo que se desean analizar, debido a que la pérdida de peso en las muestras de suelo está directamente relacionada con la presencia de materia orgánica, lo cual dispara valores más altos que los reales y esto se quiere evitar para la realización de las pruebas posteriores de mineralogía.

La materia orgánica se descompone mediante H_2O_2 (Peróxido de Hidrógeno) aplicado en una solución alcalina, para incrementar el poder oxidante del H_2O_2 y no favorecer la adsorción de acido oxálico, el cual es un producto intermedio de la descomposición del H_2O_2 y la descomposición de partículas orgánicas presentes en el suelo. El método elimina el contenido de materia orgánica y este puede ser cuantificado por pérdida de peso. (Kitagawa, 1977)

Sin embargo, la cuantificación de la materia orgánica puede ser difícil, ya que se requiere de una balanza analítica y de todos los cuidados y complicaciones que requiere pesar un suelo seco al horno debido a la ganancia de masa con la humedad ambiente y el efecto térmico en la masa de las cápsulas al pesarse con cierto grado de temperatura distinto al natural.

Este tipo de prueba es de gran importancia para enfrentar el problema específico propuesta en las siguientes hipótesis:

1. Los suelos derivados de cenizas volcánicas contienen minerales amorfos (alófana y halloysita)
2. La presencia de minerales amorfos afecta el comportamiento del suelo al variar el contenido de humedad.

La prueba de cuantificación de materia orgánica permite valorar la influencia en el comportamiento del material y es importante descartar esa influencia para probar las dos hipótesis.

Procedimiento

1. Alrededor de 3 g de muestra de suelo es puesta en un Beaker de 400 mL, después se le coloca y agita con 20 mL de 1N de KCl y luego se mezcla con 50 mL de 10% de H_2O_2
2. Se utiliza un disco eléctrico para calentar la disolución en el Beaker.
3. A la disolución se le van agregando 10 mL de 30% H_2O_2 varias veces y la descomposición desaparece con el burbujeo. La reacción libera energía y calienta la disolución.
4. Después de un rato de haber sido tratado con H_2O_2 el pH de la solución se debe ajustar a 8 – 9 con solución KOH y luego tratar con más H_2O_2. (Utilice un gotero).
5. Si no se cuenta con una máquina centrífuga de altas revoluciones (>8000 rpm) y que cuente con sistema de refrigeración, es conveniente dejar el Beaker con el suelo hasta el siguiente día enfriando para así poderlo separar por centrifugación más fácilmente.
6. Después de que el procedimiento se ha repetido varias veces la suspensión es centrifugada. El precipitado es lavado con solución alcalina 1 N de KCl neutral, 1 N KCl y dos veces con agua destilada, sucesivamente secar al horno y luego pese la muestra.

Equipo necesario

- Maquina de Separación centrifuga (al menos 4000 rpm)
- Envases para centrifugar con capacidad de al menos 300 mL, Cristalería (Beaker, agitador, goteros) y Pipeta de 10 mL
- Se requiere de un sitio con extracción, que evite la contaminación del laboratorio con reactivos volátiles, humos de reacciones o de ácidos en altas concentraciones.

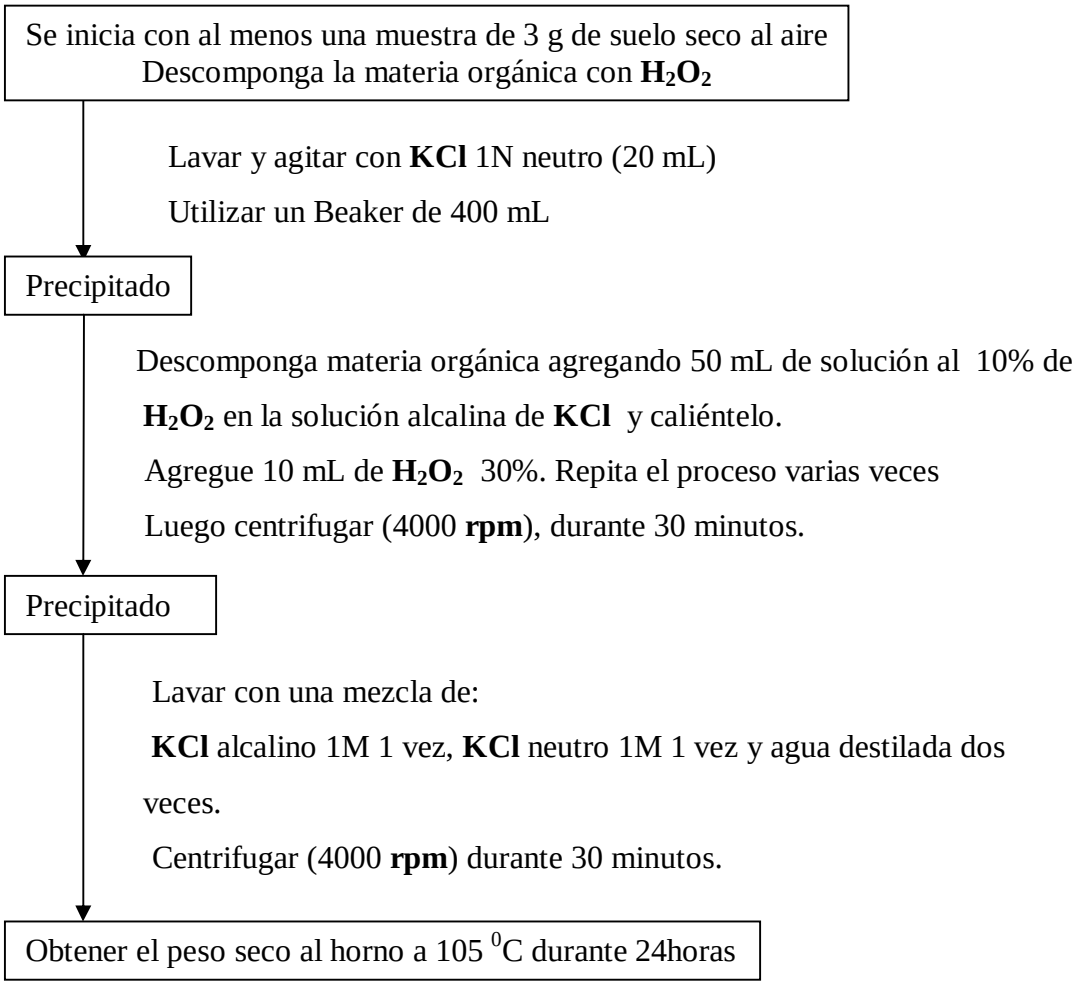


Figura 3.12. Resumen del método para eliminar y cuantificar materia orgánica

Fuente: Adaptado de Kitagawa (1977).

3.3.3 Disolución alterna con HCl y NaOH para cuantificar alófana

Este es el método recomendado para obtener resultados con mayor precisión, la cuantificación por este método está basada en la disolución de la muestra con HCl y NaOH, la prueba de laboratorio fue muy buena para determinar las cantidades de alófana en las mezclas de suelo examinadas. La coexistencia con minerales como la gibbsita no influye significativamente en los resultados obtenidos pero la goethita y la hemetita presente en la fracción arcillosa, se puede comportar como materia inorgánica amorfa en este método. Para precisar la presencia de este tipo de minerales es necesaria la ayuda de rayos X.

El contenido de alófana y materia inorgánica amorfa es obtenida por la pérdida de peso dada por el método anterior, basado en el siguiente fundamento: “En soluciones acidas y alcalinas, la materia inorgánica amorfa se disuelve más rápidamente que los minerales cristalinos”. Consecuentemente cuando un suelo contiene cierta cantidad de alófana y materia inorgánica amorfa, su extracción con solución de HCl y NaOH es efectiva y relativamente fácil de aplicar.

El contenido de alófana y materia inorgánica es obtenido del punto de intersección del eje de las ordenadas con la extensión de la línea de cada curva lineal de la disolución, donde el número de veces y el peso perdido se representan en los ejes de abscisas “x” y las ordenadas “y” respectivamente.

En la Figura 3.13 se muestran las curvas para determinar el contenido de alófana de muestras de alófana y mezclas de alófana con halloysita de varias proporciones. Se observa que el peso perdido en cada repetición del ensayo es aproximadamente constante si el material no contiene alófana o materia orgánica, o curvo al inicio y lineal a partir de la tercera disolución.

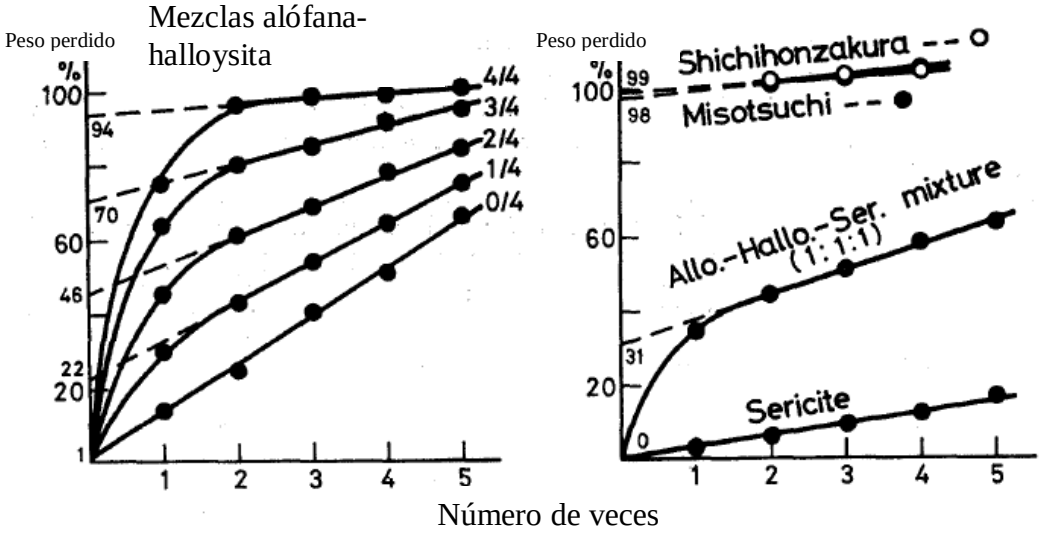


Figura 3.13. Curvas de disolución para muestra en HCl 8M y NaOH 0.5M

Fuente: Kitagawa (1976)

Procedimiento

1) Tomar cerca de 1 g de suelo seco al horno a 105 ^{0}C por 24 horas, el cual previamente se removido la materia orgánica con solución al 10% H_2O_2 y se ha pesado en un tubo de ensayo con peso conocido.

2) Agregar 50 mL de 8N HCl, agitar y detener por 30 minutos.

3) Centrifugar a 4000 rpm durante 30 minutos.

4) Lavar el precipitado con agua destilada, centrifugar a 4000 rpm durante 30 minutos y decantar.

5) Suspender en 50 ml de 0,5N de NaOH, caliente en un recipiente con agua hirviendo durante 5 minutos y centrifugar.

6) Lavar el precipitado con agua destilada y tratar finalmente, centrifugar y secar a 105 ^{0}C durante 24 horas.

7) Este procedimiento, debe ser repetido varias veces. Se recomienda un mínimo de 4 veces y se requiere de al menos 5 días para obtener un conjunto de curvas y determinar el contenido de alófana. El número depende de la centrifuga, la capacidad básicamente.

8) Pesar la muestra y determinar la pérdida de peso, debido.

Equipo necesario

- Maquina de Separación centrifuga (al menos 4000 rpm)
- Envases para centrifugar con capacidad de al menos 300 mL
- Baño María
- Cristalería (Beaker, agitador, goteros)

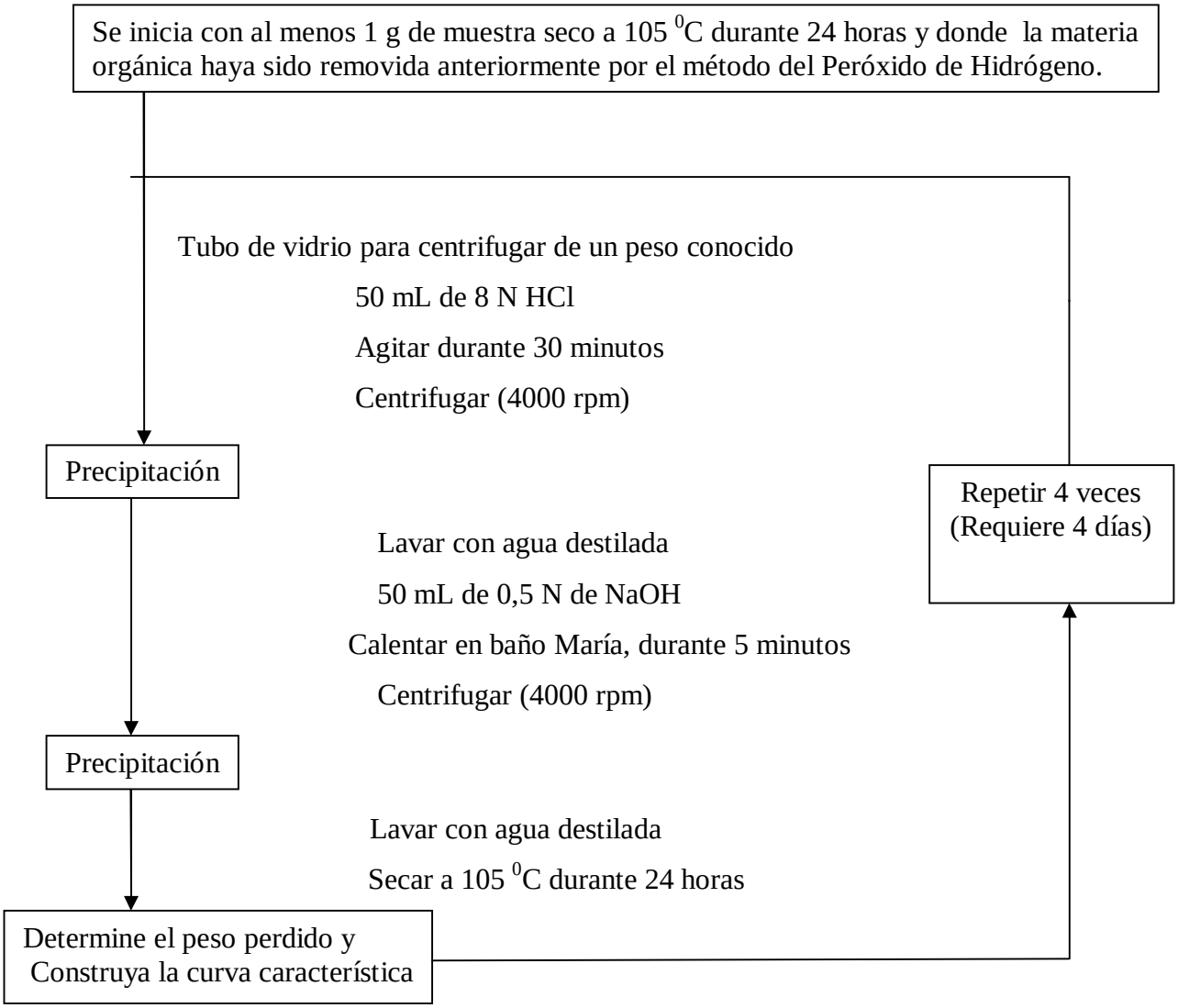


Figura 3.14. Resumen del método para eliminar y cuantificar alófana

Fuente: Adaptado de Kitagawa (1977)

Capítulo 4: Caracterización General de los Materiales

4.1 Ubicación geográfica

La ubicación de los sitios analizados es necesaria para caracterizar de manera correcta los materiales según la geología y otras variables importantes de cada zona. La Tabla 4.1 muestra las coordenadas de los sitios estudiados, obtenidas en las visitas de campo con un localizador de posición global (GPS**)**. Las coordenadas

Tabla 4.1. Coordenadas Lambert de los sitios elegidos

Sitio	Longitud (E)	Latitud (N)	Elevación
Pacayas, Alvarado (Cartago)	556 579	211 000	1 808
Río Grande, Turrúcares (Alajuela)	499 500	217 400	512
Matinilla, Santa Ana (San José)	517 936	207 087	1520
Patio de Agua, Coronado (San José)	533 686	218 607	1 792
Las Nubes, Coronado (San José)	540 649	217 551	1 782

Fuente: el autor (2010)

La Figura 4.1 muestra la ubicación de los sitios de muestreo analizados en un mapa del Valle Central de Costa Rica, junto con la ubicación de los sitios de estudios anteriores según la recopilación de Novoa, 2007.

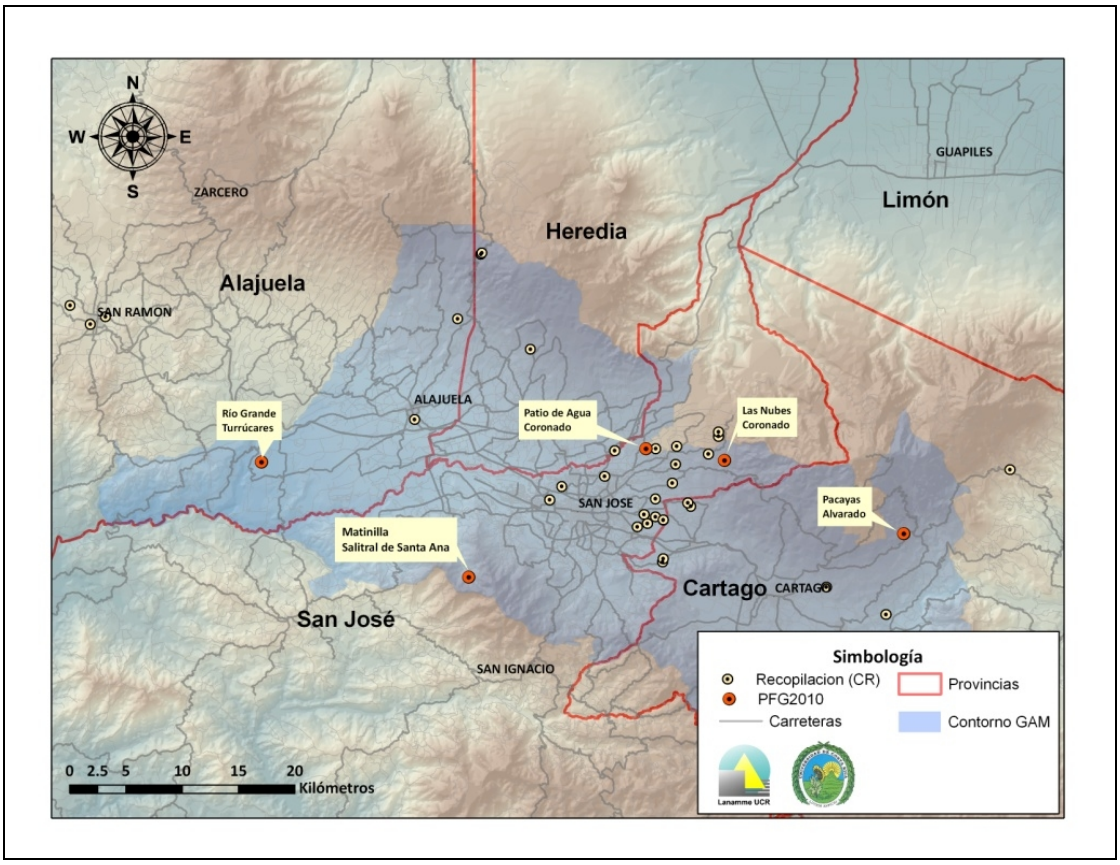


Figura 4.1. Ubicación de los sitios de muestreo del Valle Central

Fuente: Lanamme (2010)

La Tabla 4.2 brinda las distancias entre los sitios estudiados y los volcanes, para esto se hizo uso de la información en hojas cartográficas del IGN en escala 1:50 000 y las distancias corresponden a las mínimas hasta el correspondiente cono volcánico.

Tabla 4.2. Distancias de los sitios de muestreo a los principales volcanes del Valle Central

Sitio	Distancia (km)			
	Volcán Irazú	Volcán Póas	Volcán Turrialba	Volcán Barva
Pacayas	7,7	54,8	11,6	39,7
Río Grande	54,2	25,9	62,8	30,0
Matinilla	37,7	36,3	47,6	29,8
Patio de Agua	10,1	38,7	22,2	23,7
Las Nubes	12,2	37,1	21,6	21,8

Fuente: Hojas Cartográficas 1:50.000 Abra, Barva e Istarú, Instituto Geográfico Nacional.

4.2 Topografía

La Figura 4.2 muestra un mapa de pendientes del terreno del Valle Central con la ubicación de los sitios estudiados previamente (en Novoa, 2007) y los de este proyecto final de graduación (PFG2010), las diferentes esto es de importancia para analizar los diferentes suelos de cada región, ya que la topografía es de mucha importancia en la distribución de los diferentes tipos materiales constituyentes de suelos.

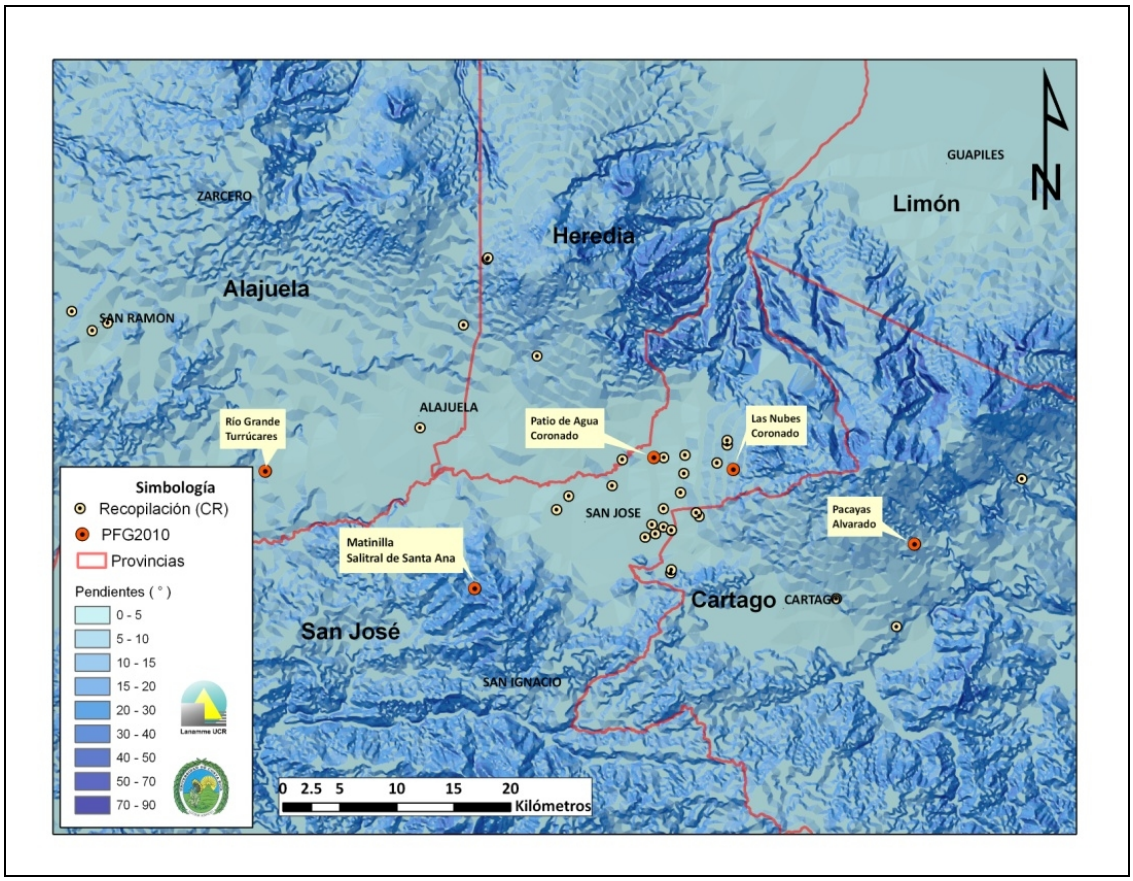


Figura 4.2. Mapa de pendientes del Valle Central
Fuente: Lanamme (2010)

La Tabla 4.3 resume varias características importantes de los suelos encontrados en los distintos sitios estudiados, la información aquí brindada sirve de complemento con los mapas de zonificación.

Tabla 4.3. Características de los sitios estudiados

Sitio	Tipo de topografía	Unidad geológica (*)	Tipo de suelo (**)	Zona Climática (***)
Pacayas	Ladera	Qv3	V3w	Caribe Alta
Río Grande	Planicie	Qv5	Lat	Valle Central
Matinilla	Ladera	Ts3	Lat	Valle Central
Patio de Agua	Planicie	Qv1	V2	Valle Central
Las Nubes	Ladera	Qv1	V2	Volcánica Central Pacífico

Fuentes: (*) Denyer, 1994. (**)Bogantes & otros, 2002 (***) Orozco, 2007. Preparó el autor.

4.3 Ubicación geológica

Condiciones geológicas principales del Valle Central

El Valle Central de Costa Rica es un área geológica muy compleja, en la cual se encuentran suelos residuales de rocas ígneas extrusivas y de productos volcánicos hacia el norte (Cordillera Volcánica Central), así como de rocas sedimentarias e ígneas intrusivas hacia el sur (cerros de Turrubares, Candelaria y Cordillera de Talamanca).

Debido a la presión de la placa Cocos sobre la placa Caribe se generan altas fuerzas de compresión que provocaron la ruptura de la corteza oceánica y levantamiento de lo que hoy es Costa Rica. La actividad volcánica acompañada de erosión debido a la alta precipitación en las montañas altas ha dado origen al entorno geológico de Costa Rica y propiamente del Valle Central.

Principalmente, al norte se ubican volcanes con un perfil estratigráfico típico de intercalación de flujos de lava, flujos piroclásticos y cenizas y al sur del valle la formación de cuencas con rocas y suelos sedimentarios. La Figura 4.3 muestra el mapa geológico del Valle Central de Costa Rica de Denyer y otros (1994), con la ubicación de los sitios estudiados. La nomenclatura de la simbología utilizada en el mapa se muestra en la Tabla 4.4 para los sitios estudiados. La descripción detallada de las otras unidades geológicas se presenta en el Anexo VI.

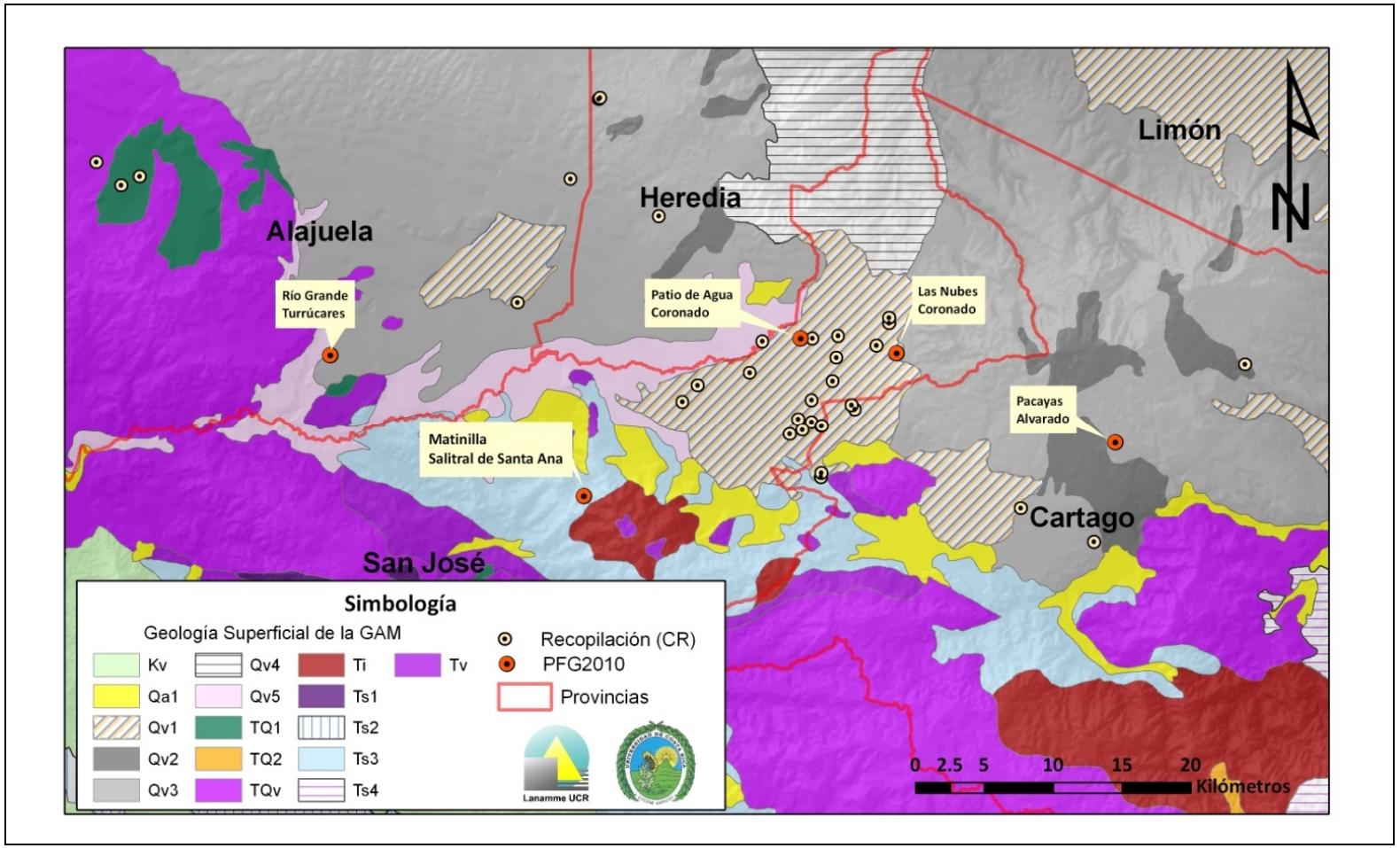


Figura 4.3. Mapa geológico para el Área Metropolitana de Costa Rica

Fuente: adaptado de Denyer (1994)

Tabla 4.4. Litología de las unidades geológicas del área en estudio

Símbolo	Litología	Unidades geológicas
Ts3	Areniscas, lutitas, brechas y calizas de la cuenca Candelaria	Formación Pacacua
Qv1	Lahares y cenizas	Lahares y cenizas
Qv3	Coladas de lava y depósitos de piroclastos de la Cordillera Central	Formaciones Barva y Andesitas Poás
Qv5	Ignimbritas	Formación Depósitos de Avalancha Ardiente

Fuente: Denyer (1994), recopilado por Novoa (2007).

Formación Pacacua

Está constituida por brechas, areniscas, tobas y lutitas de colores rojo y morado, depositadas en ambiente marino somero durante el Mioceno Inferior, con influencia volcánica evidente. Los depósitos se presentan en forma tabular con espesores de capa que varían entre pocos centímetros hasta alrededor de un metro. El espesor total de la formación es de 1200 m a 2000 m.

Coladas de Lava

Están constituidas por lavas desde andesíticas hasta basálticas con espesores entre 1 m y 80 m, con intercalaciones de flujos piroclásticos, lahares y cenizas. Las coladas más recientes no salieron de los cráteres principales sino de las faldas de los volcanes.

Lahares y cenizas

Debido a la elevación de los conos volcánicos de la Cordillera central se formaron depresiones donde se acumularon materiales procedentes de los volcanes como lahares, avalanchas de lodo y cenizas. Los lahares pueden alcanzar unos 60 m de espesor son muy heterogéneos y con fragmentos volcánicos, sobre estos existen capas de cenizas que tienen espesores entre los 15 y 20 m.

Depósitos de Avalancha ardiente

Es una capa de piedra pómez caída de 3 m de espesor y seguida por flujos piroclásticos que cubren un área de 500 km^2 y tienen un espesor de 45 m en promedio, el cual aumenta conforme se desplaza al oeste, lo cual indica que puede provenir de los volcanes de la Cordillera Central.

4.4 Ubicación geotécnica

Condiciones geotécnicas del Valle Central

En el Valle Central de Costa Rica se combinan condiciones geológicas y climáticas muy diversas, en la cual se encuentran suelos residuales de rocas ígneas, productos volcánicos y rocas sedimentarias expuestos a diferentes regímenes de variación de humedad (precipitación) y temperatura. También se encuentran zonas de depósitos de materiales erosionados de las montañas y transportados por el agua hasta las depresiones topográficas del Valle. Debido a la acción constante del clima sobre las rocas, los espesores de suelos residuales pueden ser superiores a los 50 m en algunas zonas, especialmente donde se encuentran suelos derivados de cenizas volcánicas.

Bogantes y otros (2000) realizaron una zonificación geotécnica de suelos superficiales, basada en una zonificación agronómica previa, complementada con criterios geológicos, climáticos e información geotécnica. La Figura 4.4 presenta un mapa con la ubicación de los sitios estudiados en este proyecto final de graduación (PFG2010) y los sitios reportados por Novoa (2007). En la Tabla 4.3, se presentan los tipos de suelos correspondientes a los sitios estudiados, los cuales incluyen suelos volcánicos tipo “V2”, “V3w” y suelos residuales de rocas antiguas, tipo “Lat”, cuya explicación se detalla a continuación.

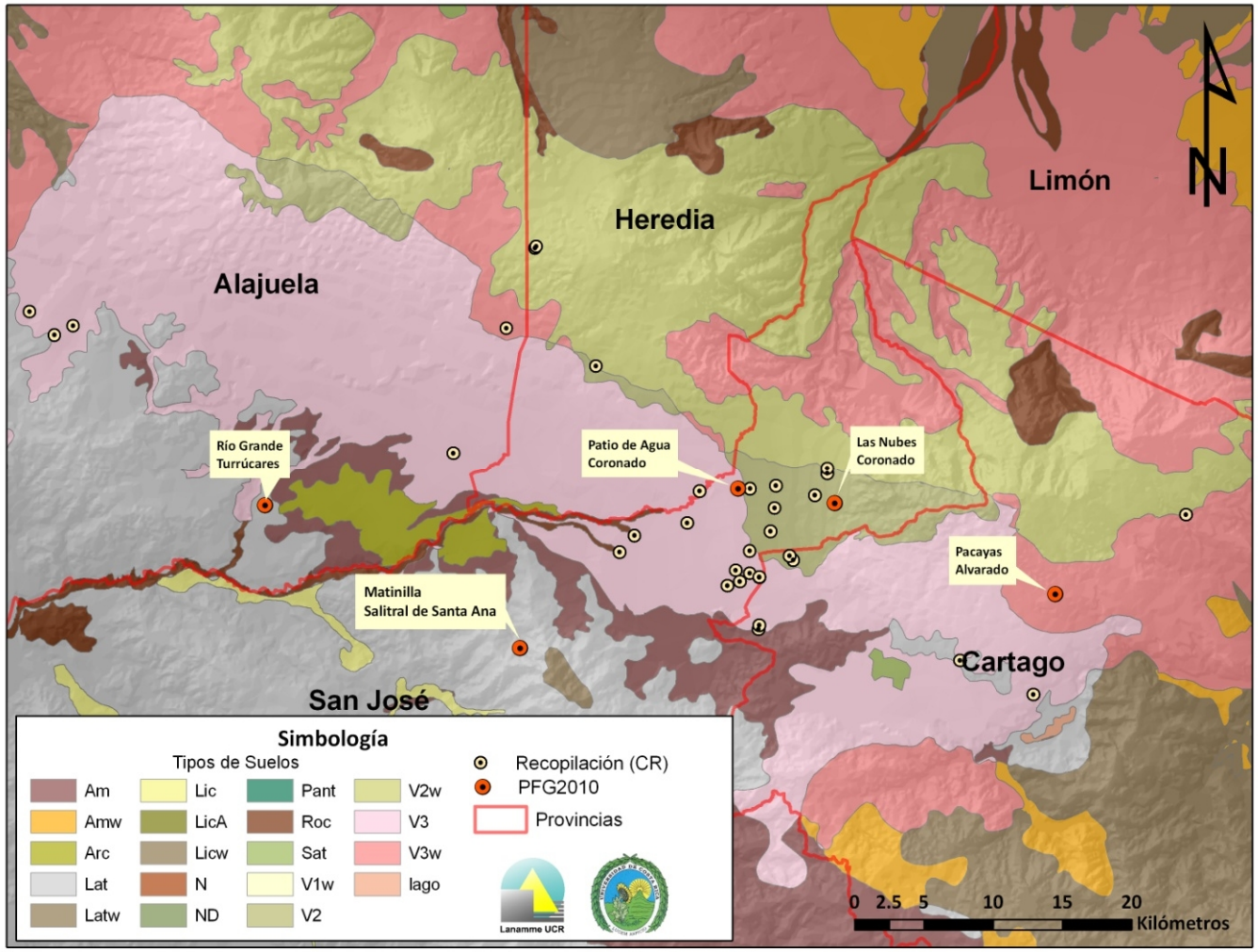


Figura 4.4. Tipos de suelos de la G.A.M

Fuente: Bogantes y otros (2000)

Tipo V2:

Son suelos volcánicos con gran contenido de materiales amorfos (alófana, halloysita). Se ubican en los alrededores de los volcanes, a una distancia intermedia. Tienen un contenido de arena superior al 30%, estructura muy porosa y cambian drásticamente sus propiedades de plasticidad al secarse, por su alto contenido de alófana y otros minerales amorfos. Estos suelos son profundos, blandos y con estructura colapsable ante una eventual saturación del terreno.

Tipo V3:

Son suelos residuales de origen volcánico que se ubican inmediatamente después de los tipo V2, alejándose del foco de emisión de cenizas (cráter). Su contenido de arena es de alrededor de un 20%. Son suelos en general blandos, de buena permeabilidad, con minerales arcillosos como la halloysita, alófana y caolinita. En algunos sitios, estos suelos pueden presentar comportamiento colapsable, aunque en menor grado que los suelos del tipo V2.

Tipo V3w:

Son suelos que presentan las mismas características de los suelos mencionados anteriormente, sin embargo presentan humedades naturales sumamente altas, con frecuencia superiores al 100%, esto genera una estructura más porosa, que suelos del mismo tipo ubicados en regiones más secas, lo cual los hace en general más blandos. Los tipos de suelo anteriores se muestran en la Figura 4.4.

Tipo Lat:

Son suelos residuales profundos o de gran desarrollo (mínimo 2m de espesor de materiales completamente alterados) de color rojizo con un alto contenido de hierro, que se encuentran extendidos a lo largo y ancho del país, y pueden desarrollarse prácticamente a partir de cualquier roca madre y en cualquier clima y erróneamente son llamados “lateritas” en el contexto local. Son arcillas limosas de alta plasticidad, con límites líquidos altos y usualmente contienen más del 65% de arcilla caolinítica, con la presencia ocasional de halloysita.

4.5 Ubicación climática

El tipo de roca (geología), la topografía y condiciones de humedad del sitio son factores determinantes que influyen en el desarrollo y comportamiento de los suelos de una región. Para la ubicación climática de los sitios se hace uso del proyecto de graduación de Erick Orozco (2007). La Tabla 4.4 incluye la clasificación climática de los sitios estudiados, según las zonificación de Orozco. Otras características se detallan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Características climáticas de las zonas del estudio, según Orozco (2007)

Zona	**Precipitación anual (mm)**	**Días de lluvia en el año**	**Temperatura Máxima promedio anual (ºC)**	**Temperatura Mínima Promedio anual (ºC)**	**Temperatura promedio anual (ºC)**
Caribe Alta	2300	190	25	14	20
Valle Central	2000	129	27	17	21
Cordillera Volcánica Central, sector Pacífico	2820	147	21	10	15

Caribe Alta:

La zona Caribe Alta incluye el sitio de Pacayas. Se caracteriza por precipitaciones orográficas durante todo el año, el mayor régimen de humedad del país, la mayor cantidad de días de lluvia, presencia de neblina casi perenne para elevaciones entre los 600 y 1500 m.s.n.m., topografía irregular, alta propensión a deslizamientos.

Valle Central:

La zona del Valle Central de Costa Rica abarca los sitios de Río Grande, Matinilla y Patio de Agua. El Valle está definido por Orozco como una zona de condiciones climáticas muy regulares, período seco prolongado, vientos fríos y de importante velocidad en el inicio de la época seca climática. Otras características importantes se presentan en la Tabla 4.5.

Cordillera Volcánica Central sector Pacífico:

La zona Cordillera Volcánica Pacífico incluye las laderas de la vertiente Pacífica donde se ubica el sitio de Las Nubes. Esta zona tiene condiciones climáticas muy regulares, disminución

importante de la temperatura conforme se asciende sobre la Cordillera, presencia importante de neblina en las zonas más altas, principalmente las que están cerca de los pasos de montaña.

4.6 Resultados de ensayos de campo

La prueba de campo requerida para el estudio fue la extracción de muestras inalteradas de suelo para los sitios seleccionados, lo cual se realizo mediante la extracción de bloques inalterados en trincheras cavadas de forma manual para Pacayas, Río Grande y Matinilla, la profundidad de la extracción es cercana a 1,5 m (ver Figura 4.5). Para el caso de Patio de Agua y Las Nubes los bloques inalterados son extraídos de un talud de aproximadamente 5 m de alto respectivamente al lado del camino, las imágenes de estos sitios se detallan en el Anexo I.

Figura 4.5. Extracción de muestras inalteradas en el sitio de Pacayas
Fuente: el autor (2008)

Fue necesario confinar los bloques con bolsa plástica y cinta adhesiva para protegerlo durante el transporte hacia el laboratorio, donde se almacenan los bloques en la cámara húmeda para conservar su humedad natural. Pacayas y Patio de Agua presentan presencia de raíces, en los demás no fue posible identificar la materia orgánica a simple vista.

En ninguno de los sitios se localizo el nivel freático, la extracción fue realizada en los meses de setiembre, octubre y noviembre en plena estación lluviosa, por lo que la saturación obtenida es alta en todos los sitios.

4.7 Resultados de ensayos de laboratorio

4.7.1 Contenido de humedad (ASTM D2216)

En la Figura 4.6 se muestran los contenidos de humedad máximos obtenidos "in situ" a partir del muestreo realizado en la estación lluviosa en pleno apogeo, para los meses de setiembre, octubre y noviembre. Esto es de suma importancia, ya que muestras analizadas con contenido de humedad muy bajos dan como resultado una mala clasificación del suelo, estos contenidos de humedad bajos son obtenidos en la estación seca.

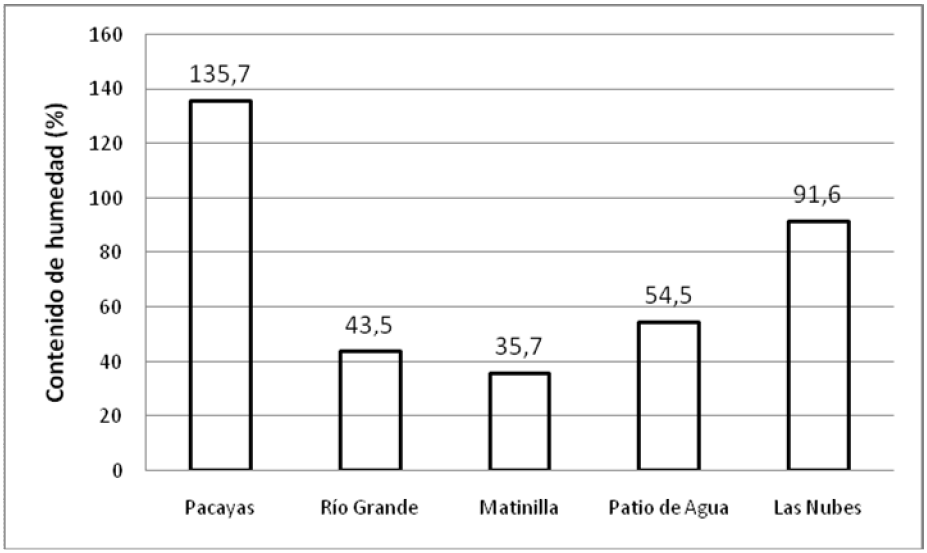


Figura 4.6. Contenido de humedad Natural

Fuente: el autor (2010)

La Figura 4.7 muestra los contenidos de humedad mínimos alcanzados de secar las muestras en el laboratorio. Esto deja en evidencia que los suelos nunca alcanzan un valor de humedad cero, ya que sus partículas se aferran a moléculas de agua internas de la estructura del suelo. Es por lo anterior que al secar el suelo mediante el uso de un horno, se remueve esta humedad mínima característica del suelo lo cual afecta la plasticidad del suelo.

Esta humedad mínima se le denomina humedad higroscópica y requiere de al menos un mes de secado, en una cámara de temperatura controlada donde la humedad del ambiente no afecte los contenidos de humedad de la muestra almacenada.

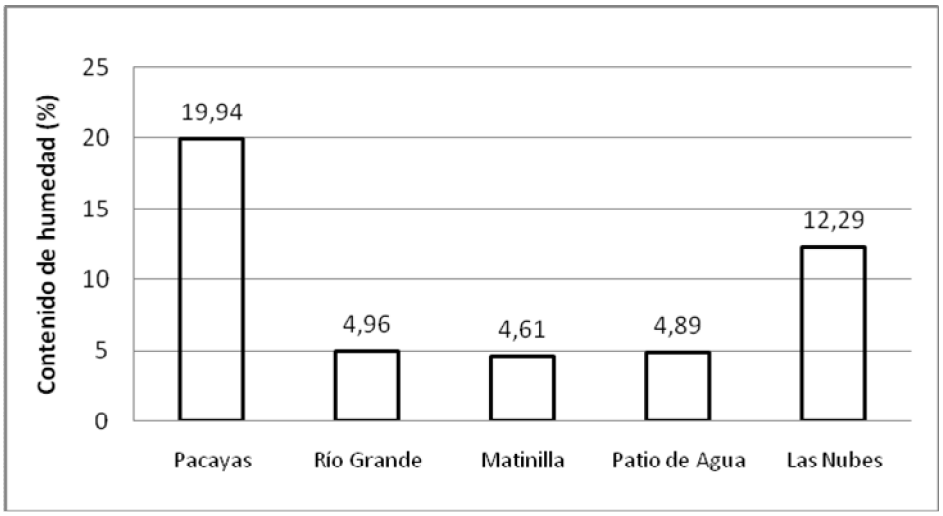


Figura 4.7. Contenido de humedad de material seco al aire (humedad higroscópica)
Fuente: el autor (2010)

Por último en lo referente a las distintas humedades, también se analizo un contenido de humedad más bajo, obtenido de muestras alteradas extraídas en la temporada de verano para el mes de febrero (ver Figura 4.8). Esto se realizo únicamente para los sitios que presentaron diferencias en sus límites de consistencia para el análisis seco y húmedo de la prueba de laboratorio, quedando excluidos del análisis Río Grande y Matinilla. Además la Tabla 4.6 mostrada en la siguiente página brinda un resumen de los principales resultados.

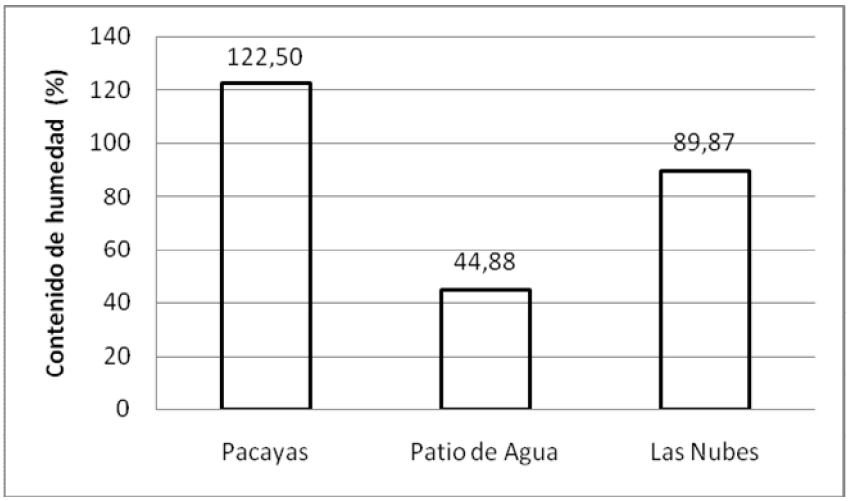


Figura 4.8. Contenido de humedad de los suelos "in situ" en la estación seca

Fuente: el autor (2010)

Tabla 4.6. Humedad natural, higroscópica y humedad para saturación total

	$\%w_{natural}$	%S	$\%w_{seco\ al\ aire}$	%S	Contenido de humedad de saturación total w_{sat}(%)
Pacayas	143	84,4	21,21	12,53	169,0
Río Grande	44	93,6	4,96	14,35	47,3
Matinilla	36	85,5	4,3	10,21	42,1
Patio de agua	55	73,0	8,81	11,82	74,5
Las Nubes	91	92,4	12,36	12,50	98,9

Fuente: el autor (2010)

4.7.2 Curvas de variabilidad de la humedad en suelos

A partir del máximo contenido de humedad "in situ" se procede a secar al aire todas las muestras de los sitios elegidos, hasta alcanzar el mínimo valor de humedad denominado como humedad higroscópica. Para el secado al aire se utilizo la cámara de temperatura controlada, para poder evitar las variaciones de temperatura y humedad relativa que puedan afectar los datos de humedad del suelo.

Se guardaron muestras de 4-6 kg de masa en un recipiente hondo, con el propósito de obtener un tiempo de secado más representativo. Sin embargo se sabe que el primer metro de profundidad de un estrato de suelo, se puede parecer a esta condición de secado al aire en

laboratorio, pero a mayor profundidad cambian las condiciones y la humedad se vuelve más constante. Muestras de menor masa y distribuidas en áreas mayores pierden humedad con mayor rapidez que muestras grandes en recipientes más cerrados.

Se construyen curvas de cambio de humedad contra el tiempo, con el propósito de ver la tendencia del suelo a secar con el tiempo. Además esto sirve de parámetro para estimar la facilidad con que el suelo pierde humedad "in situ" y así poder estimar con mayor precisión los mínimos niveles de humedad que se pueden alcanzar en sitio.

La Figura 4.9 y Figura 4.10 muestran la masa inicialmente puesta a secar y el total de masa perdida acumulado en el tiempo respectivamente. Cabe destacar que la prueba de secado de muestras (Figura 4.9) no inicia con la misma masa para todas las muestras, debido a que sus densidades y humedades son diferentes y entonces en la Figura 4.10 las muestras que mayor humedad perdieron no son necesariamente las que más humedad contienen.

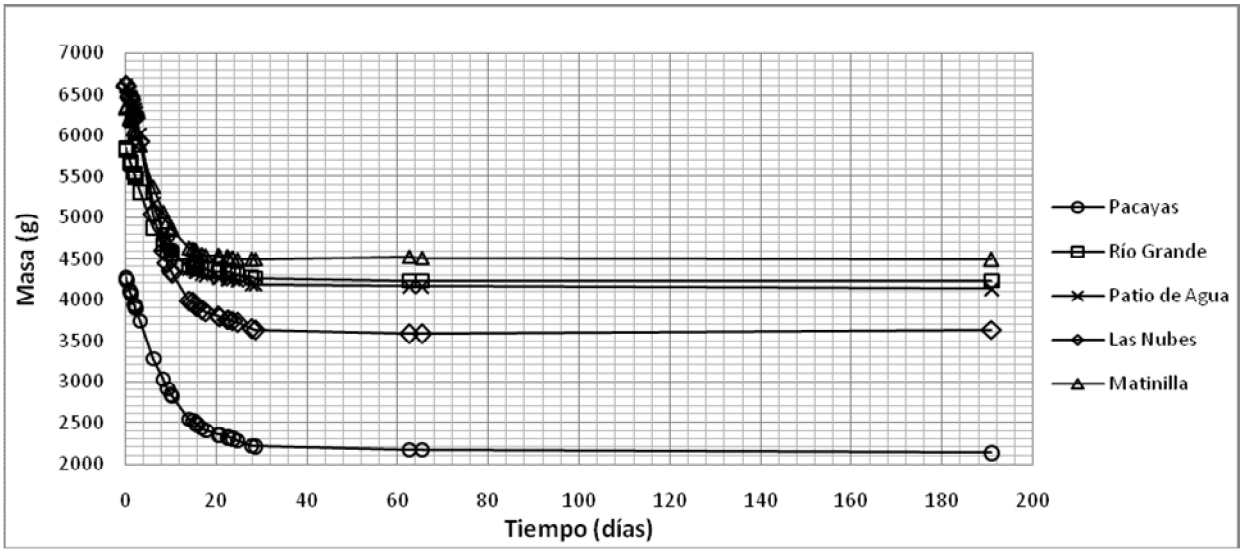


Figura 4.9. Pérdida de humedad en las muestras almacenadas

Fuente: el autor, (2010)

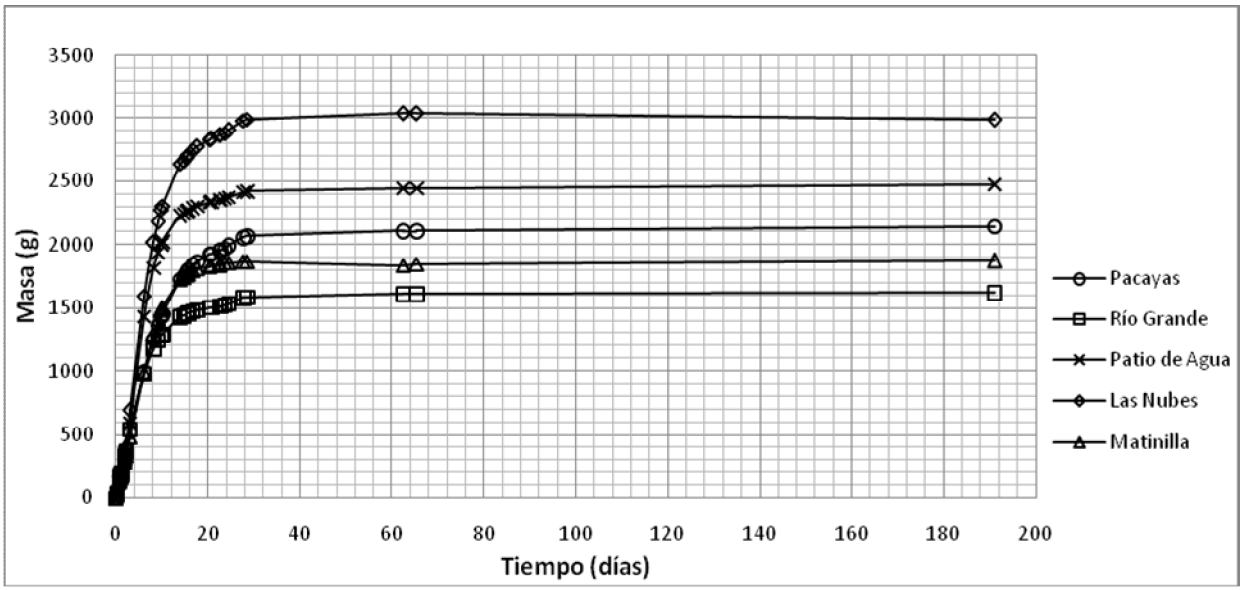


Figura 4.10. Curva de masa acumulada por humedad pérdida total

Fuente: el autor (2010)

La Figura 4.11 muestra las curvas de pérdida del contenido de humedad con el tiempo, la muestra que posee el mayor contenido de humedad natural es Pacayas y fue la que mayor humedad higroscópica registró con w=19%, seguido por Las Nubes con w=12%, Patio de Agua con w=4,8% y las muestras que poseen menor humedad natural también poseen menor humedad higroscópica y son Río Grande con w=4,75% y Matinilla con w=4,6%.

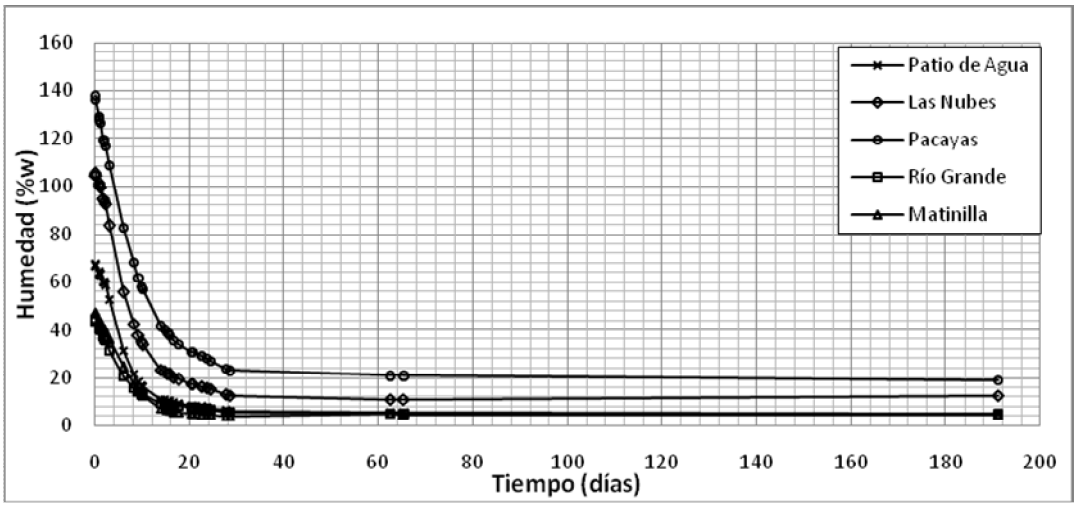


Figura 4.11. Perdida de contenido de humedad con el tiempo de secado

Fuente: el autor (2010)

La saturación obtenida es alta para todas las muestras de suelo, así como su poca variación y similitud entre todos los datos (ver Figura 4.1**2**). Se puede notar que se necesita al menos un mes de secado para que las propiedades de las muestras se vuelvan constantes y se demuestra que el contenido de humedad nunca llega a ser cero en los suelos estudiados y como mínimo alcanza un valor de 4%.

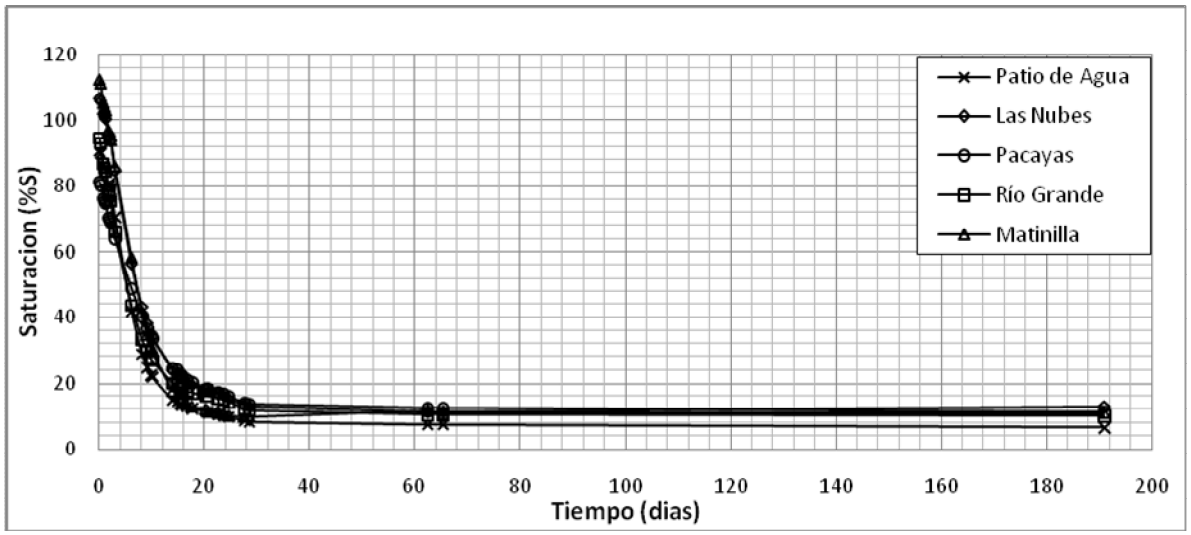


Figura 4.12. Pérdida de saturación con el tiempo de secado

Fuente: el autor (2010)

4.7.3 Densidad del suelo en muestras inalteradas (BS-1377)

En la Tabla 4.7 se muestran los resultados de la densidad del suelo obtenido por el método del volumen desplazado para todos los sitios estudiados, se utilizan recomendaciones de la norma británica BS-1377(90). La limitante de la obtención de estos resultados por el método de volumen desplazado, es que no se cuenta con un recipiente con suficiente volumen para poder ensayar muestras con masas de 1 Kg para mayor representatividad.

Tabla 4.7. Densidad de materiales con humedad natural "in situ"

	$\%w_{natural}$	γ_T "In situ" (g/cm^3)	γ_{seca} (g/cm^3)	e	n
Pacayas	143	1,164	0,479	4,30	81,1
Río Grande	44	1,649	1,168	1,235	55,3
Matinilla	36	1,717	1,265	1,141	53,3
Patio de agua	55	1,386	0,897	2,02	66,9
Las Nubes	91	1,397	0,731	2,58	72,1

Fuente: el autor (2010)

4.7.4 Gravedad específica (ASTM D854)

La Tabla 4.8 muestra los resultados para la gravedad específica obtenida de muestras analizadas con humedad natural y seca al aire hasta su contenido higroscópico. La prueba se realizo bajo el procedimiento brindado por la norma ASTM.

Tabla 4.8. Resumen de resultados de gravedad específica

Sitio	G_s (natural)
Pacayas	2,54
Río Grande. Turrúcares	2,60
Matinilla. Salitral de Santa Ana	2,71
Coronado (Patio de Agua)	2,71
Coronado (Las Nubes)	2,61

Fuente: el autor (2010)

Este parámetro se obtuvo en laboratorio según la norma ASTM D854 que recomienda realizar esta prueba con muestras secas o húmedas. La norma propone una masa determinada mínima de suelo seco para realizar el ensayo de laboratorio y es por esto que se debe hacer corrección de masa por humedad si se emplea el método de análisis con muestra húmeda, para así cumplir con una masa mínima establecida.

En la práctica es muy común que las muestras se sequen al horno para poder realizar el ensayo de forma seca, lo cual lo hace de más fácil realización. La norma ASTM D854 no indica cómo podría afectar esto los valores obtenidos para los diferentes tipos de suelos.

La Figura 4.13 está construida con los datos de la Tabla 5.8, las pruebas se realizaron con la máxima humedad natural obtenida en sitio y con la mínima humedad higroscópica que se pudo obtener secando al aire las muestras.

Se obtuvieron diferencias entre los valores de las pruebas realizadas con muestras secas y las húmedas con corrección. Las diferencias radican en problemas con los volúmenes desplazados y los pesos totales del picnómetro y la muestra. Se sospecha que el volumen desplazado con suelo seco no es el mismo que con suelo húmedo, siendo este último mayor debido al volumen de agua corregido considerado como si fuera de suelo seco.

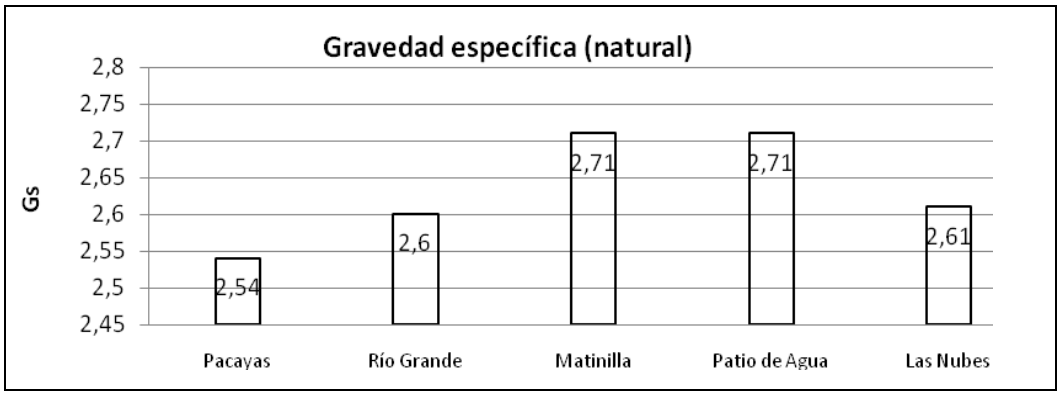


Figura 4.13. Gravedad específica según el contenido de humedad natural

Fuente: el autor (2010)

4.7.5 Límites de consistencia (ASTM D4318)

- **Límite líquido y preparación de muestras con humedad natural**

Este es la forma de análisis recomendada, además la más laborioso por lo cuidadoso de la preparación de la muestra, esto debido a que las partículas retenidos en la malla #40 no son fáciles de detectar y extraerlas es difícil y lento, además la homogenización de la muestra y su plasticidad son más difíciles de obtener por su mayor tiempo de mezclado requerido.

Tabla 4.9. Partículas con tamaño mayor a malla #40 (0,425 mm)

Sitio	% Retenido Acumulado
Pacayas	2 %
Río Grande	5,7 %
Matinilla	7,2 %
Coronado	0,5 %
Coronado	1,1 %

Fuente: el autor con base en la curva granulométrica (2010)

La norma ASTM D4318 sugiere extraer de manera visual las partículas y mezclar cuidadosamente la muestra para el caso de material con bajo contenido retenido en la malla #40. En caso de poseer un alto porcentaje de partículas retenido en la malla #40, se recomienda un método de lavado y filtrado de partículas en esta malla, pero el método es poco práctico y cambia mucho el contenido real de humedad en la muestra. En el caso de los sitios estudiados se tiene en la Tabla 4.9 que el contenido de partículas retenido en la malla #40 es bajo y la preparación de las muestras es posible por este método.

- **Límite líquido y preparación de muestras secas**

La norma ASTM D4318 también propone un método de análisis de muestras secas, simplemente el suelo se muele y pasa por la malla #40 y se elimina lo retenido. El mezclado es más sencillo y fácil de realizar, sin embargo los valores de límites obtenidos son menores que con muestras que poseen humedad natural.

- **Límite plástico**

Se utilizo el método tradicional sugerido por la norma ASTM D4318 para obtener el límite plástico en suelos cohesivos, esta prueba se realizo para todas las muestras analizadas por el método ASTM.

Tabla 4.10. Análisis de límites para la humedad natural

	$\%w_{natural}$	LL	LP	IP
Pacayas	143	135	106	29
Río Grande	44	55	32	23
Matinilla	36	54	35	19
Patio de agua	55	38	31	7
Las Nubes	91	88	62	26

Fuente: el autor (2010)

Tabla 4.11. Análisis de límites para la humedad seca al aire

	$\%w_{seco\ al\ aire}$	LL	LP	IP
Pacayas	19,57	83,9	63,6	20,3
Río Grande	6,79	53	31	22
Matinilla	4,30	53	32	21
Patio de agua	4,49	42	36	7
Las Nubes	12,36	72	60	12

Fuente: el autor (2010)

Tabla 4.12. Análisis de límites para muestreo (seco in situ)

	$\%w_{seco\ in\ situ}$	LL	LP	IP
Pacayas	124,03	119,7	93,5	26,2
Patio de agua	44,88	(*)	(*)	(*)
Las Nubes	89,87	(*)	(*)	(*)

Fuente: el autor (2010) (*) Valores que no fueron posibles de obtener.

Nota: para el caso de Patio de Agua y Las Nubes mostrado en la Tabla 4.12, no se pudo determinar los límites de consistencia para el análisis "seco in situ" esto debido a que las bolsas que contenían las muestras de suelo se rompieron y se perdió el contenido de humedad con el cual se deseaban analizar las muestras.

Cabe destacar que este es un método dinámico donde hay muchas variables que toman parte en el proceso: la condición de la cuchara, las dimensiones normales del aparato, el técnico de laboratorio y los tipos de suelo. Es de importancia analizar los diferentes tipos de suelos y sus principales referencias al realizar este tipo de prueba, ya que algunos suelos arenosos sufren una disminución de su esfuerzo cortante debido a las vibraciones de la cuchara durante la prueba, además otros suelos con altos contenidos de humedad y con comportamiento plástico podrían verse afectados por la vibración de la cuchara.

En la Figura 4.14 se muestran los resultados de límites de consistencia obtenidos, en este gráfico se puede notar como la tendencia de los límites de consistencia es proporcional al contenido de humedad.

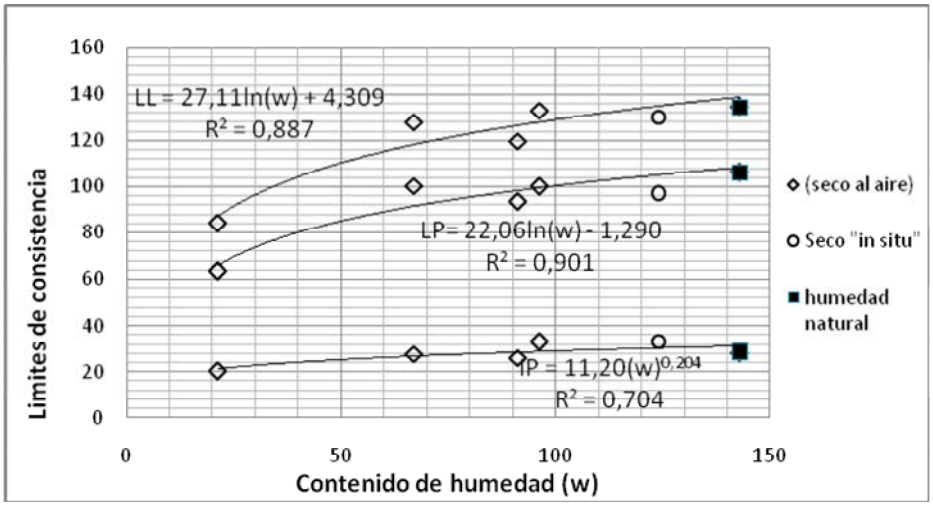


Figura 4.14. Variación de los límites de consistencia ASTM (**Pacayas**)

Fuente: el autor, (2010)

Para el caso de Patio de Agua la Figura 4.15 muestra los resultados obtenidos con la cuchara de Casagrande. Se puede observar que la tendencia no es clara y los valores del LL oscilan entre los valores de 39 y 48%, cabe destacar que el suelo tiene un contenido de partículas arenosas considerable y su comportamiento podría influir en esta prueba.

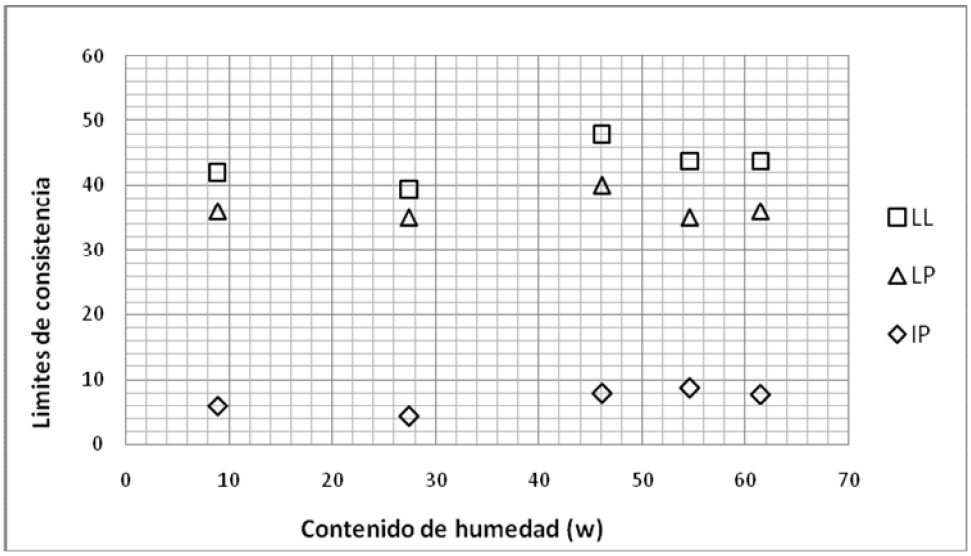


Figura 4.15. Variación de los límites de consisitencia por el método ASTM (**Patio de Agua**)

Fuente: el autor (2010)

La Figura 4.16 muestra la relación entre los límites de consistencia y el contenido de humedad para la muestra de Las Nubes, la tendencia obtenida es similar a la muestra de Pacayas por este método y en ambas muestras por el método de penetración con caída de cono.

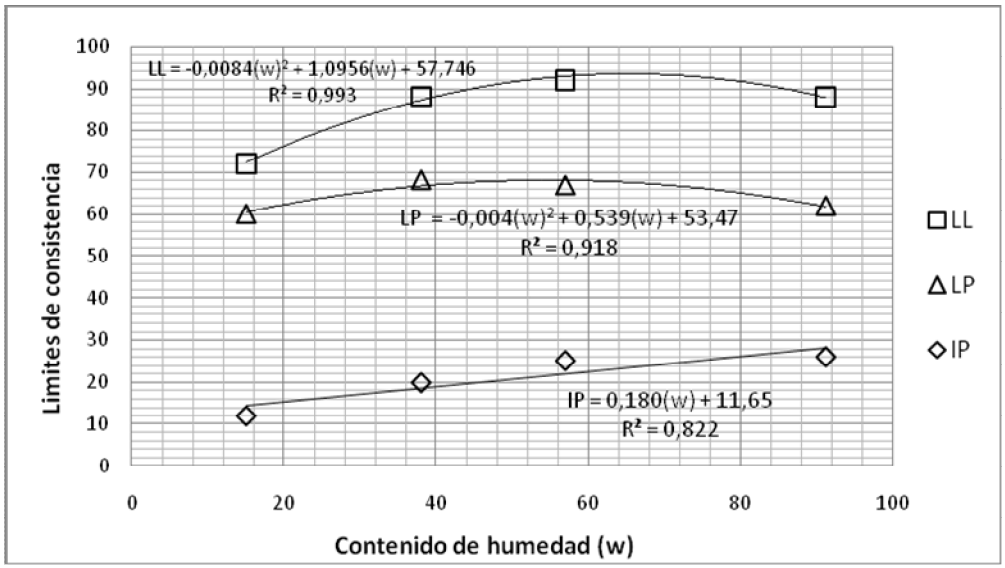


Figura 4.16. Análisis de los límites de consisitencia por el método ASTM (**Las Nubes**)

Fuente: el autor (2010)

Para el caso del análisis de suelos procedentes de Matinilla y Río Grande (ver Figura 4.17 y Figura 4.18 respectivamente), se muestran los resultados de los límites de consistencia. Es importante destacar que este tipo de suelos que son de tipo residual, no presentan diferencias en los límites de consistencia indiferentemente del contenido de humedad que posea la muestra.

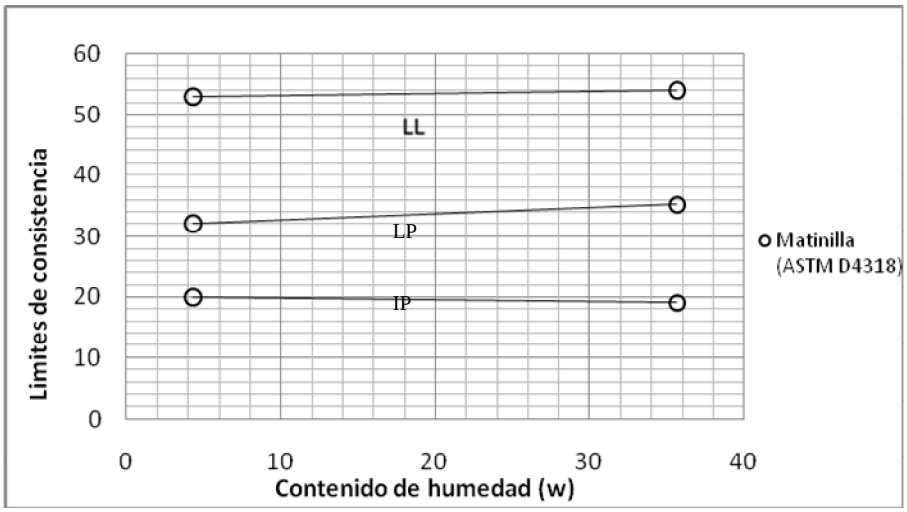


Figura 4.17. Análisis de límites de consistencia por la ASTM (**Matinilla**)

Fuente: el autor (2010)

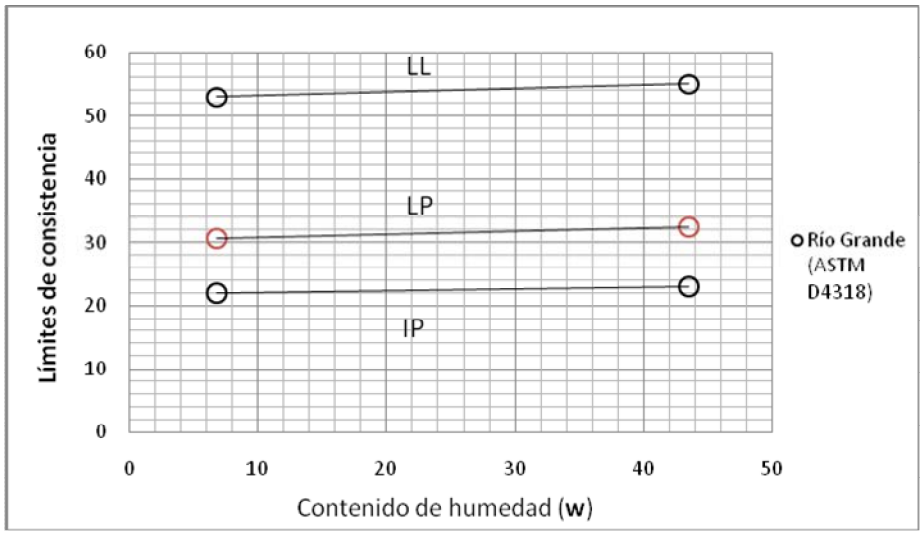


Figura 4.18. Análisis de límites de consistencia por la ASTM (**Río Grande**)

Fuente: el autor (2010)

4.7.6 Límites de consistencia por el método británico (BS-1377)

Para realizar este método se hizo uso de las recomendaciones hechas en publicaciones de la Revista Canadiense de Geotecnia y en la norma británica BS 1377(91). Esta prueba se caracteriza por obtener ambos valores de límites de consistencia con una misma correlación, simplemente la lectura para el LP se da a una penetración de 2 mm y para el LL a una penetración de 20 mm en la ecuación de la curva de flujo lineal; ambas variables w(%) y h(mm) son graficadas en papel logarítmico (Feng, 2001).

Tabla 4.13. Análisis de límites por caída de cono, para la humedad natural

Lugar	$\%w_{natural}$	LL	LP	IP
Pacayas	139,8	150,9	118,5	32,5
Río Grande	5,6	62,93	31,2	31,8
Matinilla	4,6	64,2	33,2	31,0
Patio de agua	61,6	53,5	41,6	11,97
Las Nubes	108,7	104,7	75,9	28,9

Fuente: el autor (2010)

Tabla 4.14. Análisis de límites por caída de cono, muestra seca al aire

Lugar	$\%w_{seco\ al\ aire}$	LL	LP	IP
Pacayas	94,1	151,2	120,7	30,5
Patio de agua	40,6	50,35	38,6	11,71
Las Nubes	67,5	105,0	79,3	25,7

Fuente: el autor (2010)

Tabla 4.15. Análisis de límites por caída de cono, muestra seca al aire

Lugar	$\%w_{seco\ al\ aire}$	LL	LP	IP
Pacayas	19,00	74,9	52,8	22,1
Patio de agua	4,95	40,17	33,1	7,07
Las Nubes	12,80	68,7	51,4	17,30

Fuente: el autor (2010)

En la Figura 4.19 se brinda el análisis para el caso del método BS-1377 para obtener límites de consistencia por penetración con caída de cono para la muestra procedente de Pacayas. Se destaca el carácter estático de la prueba y su fácil realización y repetitividad, aun para técnicos con poca experiencia en laboratorio de mecánica de suelos.

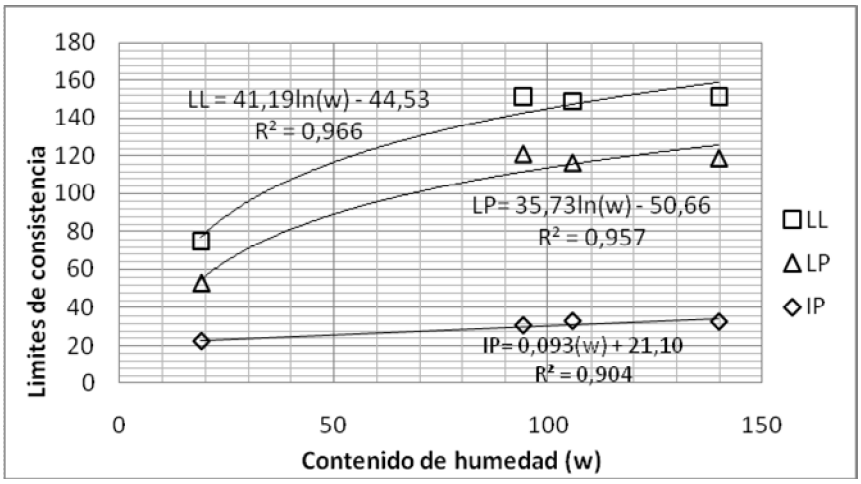


Figura 4.19. Variación de los límites de consistencia BS-1377 (**Pacayas**)

Fuente: el autor (2010)

La Figura 4.20 muestra los resultados obtenidos para el caso de Patio de Agua, la tendencia se mantiene similar en ambos casos para las curvas, esto demuestra la regularidad del método.

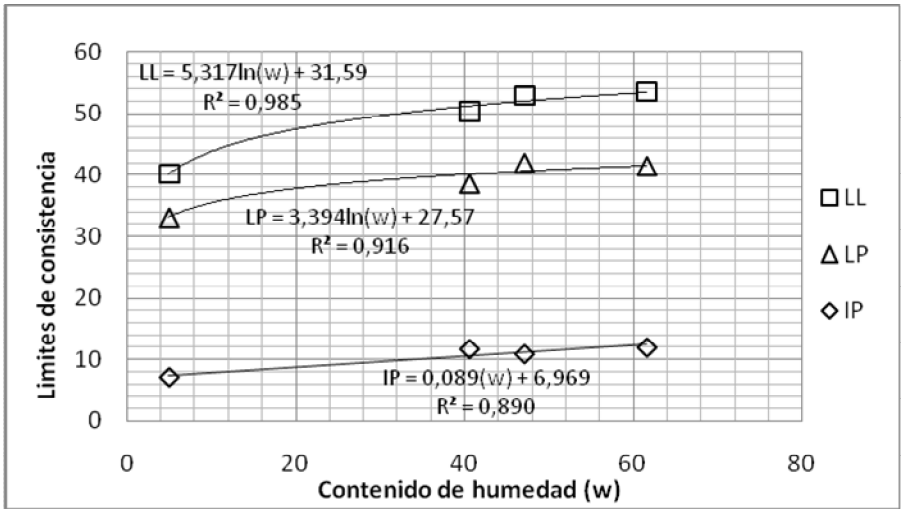


Figura 4.20. Variación de límites de consistencia por el método BS-1377 (**Patio de Agua**)

Fuente: el autor (2010)

La Figura 4.21 muestra los resultados obtenidos para el caso de la muestra procedente de Las Nubes, se nota como las tres curvas obtenidas para los sitios estudiados presentan la misma tendencia en la forma de la curva descrita por los límites de consistencia.

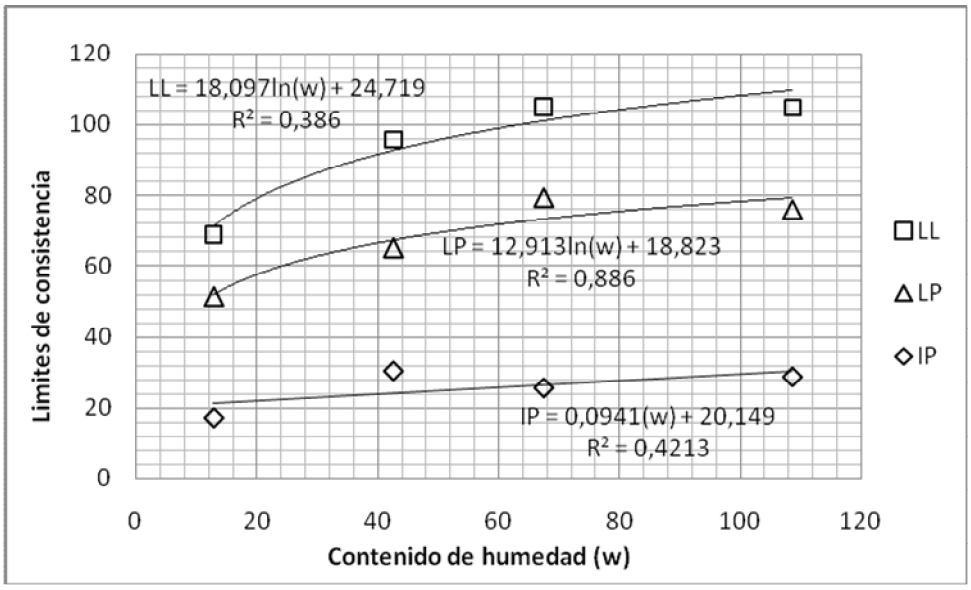


Figura 4.21. Variación de límites de consistencia por el método BS-1377 (**Las Nubes**)

Fuente: el autor (2010)

Es importante considerar que para obtener ambos límites de consistencia por este método se deben tomar valores de penetración distribuidos entre 3 y 25 mm por ejemplo (5 -13- 19 y 23 mm y sus respectivos valores de humedad). Es importante tomar en cuenta que el primer mezclado con una humedad baja es difícil de realizar y muy laborioso, para poder alcanzar una homogenización adecuada requerida durante la prueba.

Por otro lado puede pasar que el contenido de humedad natural del suelo sea tan alto, que la primera lectura de penetración sea mayor a 10 mm, por lo que en este caso se recomienda obtener únicamente el límite líquido con el método de penetración con caída de cono, ya que así solo es necesario obtener penetraciones entre 15 y 25 mm según la norma británica BS-1377 y así la mezcla del suelo se puede hacer con un contenido de humedad más alto, lo cual es más fácil de realizar, además el límite plástico se puede obtener por el método clásico igual al brindado por la norma ASTM D4318.

4.7.7 Clasificación SUCS y otros parámetros ASTM

Esta prueba es de mucha importancia para la clasificación y el análisis de materiales en ingeniería geotécnica, debido a que brinda la distribución de partículas por tamaño, la proporción mayoritaria para sus tamaños y las repercusiones que esta proporción tiene en el comportamiento físico y mecánico de los suelos cohesivos (Tabla 4.16).

Tabla 4.16. Porcentaje pasando la malla #200

Sitio	%Pasando la malla #200	%Arcilla (< 2 µm)	Actividad (natural)
Pacayas.	52,3%	3,0%	9,67
Río Grande.	86,4%	49,0%	0,469
Matinilla	82,1%	30,0%	0,633
Patio de Agua	50,4%	5,0%	1,4
Las Nubes	72,8	9,0%	2,89

Fuente: el autor (2010)

Para obtener la granulometría de partículas menores a la malla #200, se emplea el método del hidrómetro para el cual es necesario obtener previamente el valor de la gravedad específica, valor que se demostró es mayor para el análisis de muestras secas que con humedad natural (ver Figura 4.13).

Para esta prueba se realizo el análisis de la curva granulométrica con el G_s obtenido de muestras húmedas y se toma en cuenta que estas diferencias en los valores de la gravedad específica, pueden causar variaciones en los porcentajes del tamaño de partículas acumulados que se obtienen por este método.

En el análisis del tamaño de partículas se obtuvo la curva granulométrica para los cinco sitios muestreados (ver Figura 4.22), para estos se obtuvo la distribución de partículas gruesas mayores a la malla #200 por medio del tamizado ASTM D421 y de las partículas finas por parte de la prueba del hidrómetro ASTM D422.

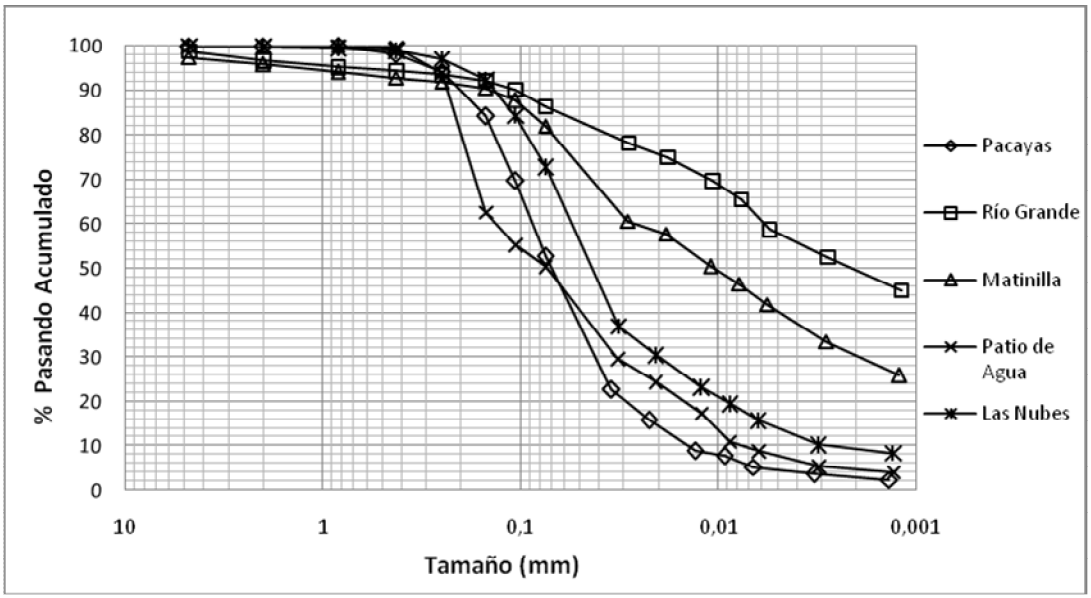


Figura 4.22. Granulometría (Resumen comparativo de curvas)

Fuente: el autor (2010)

Tabla 4.17. Clasificación de suelos por distintos sistemas internacionales

Sitio	AASHTO	SUCS	Japonés basado en (%w)	Japonés basado en (β)
Pacayas	A-7-5 [20]	MH	HH	HH
Río Grande	A-7-5 [23]	MH	LL	HL
Matinilla	A-7-5 [19]	MH	LL	LL
Patio de Agua	A-4 [2]	ML	LH	HH
Las Nubes	A-7-5 [26]	MH	HH	HH

Fuente: el autor (2010)

La Tabla 4.17 muestra la clasificación realizada según la SUCS, también se brinda la sub-clasificación japonesa basada en el índice de liquidez y su relación con el contenido de humedad y el coeficiente de flujo (β). Adicionalmente se considera también el sistema de clasificación AASHTO, se pretende comparar los resultados obtenidos por ambos sistemas y poder elegir el más apropiado.

Se puede apreciar como existe congruencia entre el sistema SUCS y el AASHTO, ya que todos los suelos MH se clasifican como un mismo grupo A-7-5, el cual incluye suelos con IP moderadamente bajo en comparación con el LL. Por otro lado los suelos ML se clasifican en el

grupo A-4, que incluye suelos limosos no plásticos o de baja plasticidad, por lo general son suelos con altos contenidos de arena o partículas de limo. En el caso de la utilización de los índices de grupo, se calculan a partir de las propiedades de LL, IP y el porcentaje de partículas pasando la malla #200, además este índice permite únicamente comparar suelos pertenecientes a un mismo grupo.

Por último, aunque se nota similitud entre la clasificación obtenida por la SUCS y la AASHTO, el problema que suelos del tipo residual y de origen volcánico se clasifican en un mismo grupo sigue ocurriendo, lo cual sabemos no es conveniente en la clasificación, ya son suelos que poseen características muy diferentes, por lo cual sigue siendo conveniente utilizar el sistema de sub-clasificación japonés para poder identificarlos de manera correcta.

4.7.8 Contenido de materia orgánica

Este método es muy efectivo para eliminar materia orgánica y es fácil de aplicar, únicamente se requiere obtener la diferencia de masa en la prueba por eliminación de contenido orgánico con Peróxido de Hidrogeno (H_2O_2). En algunas ocasiones puede ser que el contenido orgánico sea muy bajo y la diferencia de masa sea tan pequeña, que es necesario obtenerla con la ayuda de una balanza analítica y con mucho cuidado de no ganar peso por humedad el aire.

Para realizar esta prueba se analizaron muestras de 3g de suelo pasando la malla #40, donde se poseen muchas partículas de tamaños menores a esta malla, a partir de ahí el material orgánico es removido mediante el tratamiento con H_2O_2 y solución alcalina de KCl. El procedimiento con H_2O_2 se repite varias veces, así al final de la prueba se puede obtener una diferencia de peso y su respectivo porcentaje de contenido orgánico (ver Figura 3.12)

Se debe tener cuidado de lavar al menos 2 veces la muestra con agua destilada al final del proceso, esto para eliminar cualquier residuo de reactivo KCl que afecte la masa de la muestra. La cuantificación es opcional y se puede solo eliminar la materia orgánica para así obtener una muestra limpia para cuantificar el contenido de alófana.

En esta prueba es necesario contar con una máquina de separación centrífuga que opere mínimo a 4000 rpm, ya que muchas partículas pequeñas son difíciles de precipitar por su pequeño tamaño y esto aumenta los tiempos de operación de la máquina y de realización de la prueba y el análisis posterior. Otro problema es que al final del proceso de limpieza con H_2O_2 la

disolución está caliente, lo cual perjudica aun más el proceso de precipitación de pequeñas partículas de suelo.

Para obtener la masa seca de suelo al final de la prueba, se debe secar la muestra al horno a 110 ^{0}C y tanto el porcentaje obtenido en este procedimiento, así como en la prueba de contenido de alófana por disolución con HCl-NaOH deben ser corregidos, ya que son muestras obtenidas al pasar la malla #40, lo cual hace que no se consideren partículas mayores presentes en el suelo. Por lo general, las partículas de suelo con tamaños mayores a la malla #40 no son orgánicas y no se analizan por este procedimiento por su bajo contenido y poca representatividad en suelos finos cohesivos.

Tabla 4.18. Determinación de materia orgánica por disolución en Peróxido de Hidrógeno

Lugar	Contenido de materia orgánica % partículas < 0,425mm	Contenido (%) total
Pacayas	12 %	11,76 %
Río Grande	1 %	0,943 %
Matinilla	2 %	1,86 %
Patio de Agua	5 %	4,98 %
Las Nubes	(*)	(*)
La Trinidad	(*)	(*)

Fuente: el autor (2010) (*) Valores que no fueron posibles de obtener.

Nota: cabe destacar que en la **Tabla 4.18** no se pudo determinar el porcentaje orgánico de las muestras provenientes de La Trinidad y Las Nubes. Esto se debe principalmente a que el contenido de materia orgánica en estos sitios puede ser muy bajo, por lo cual al enfriar la muestra un tiempo muy prolongado se da ganancia de peso por humedad en la muestra, por lo cual se desfavorece la cuantificación de materia orgánica en este tipo de muestras.

4.7.9 Contenido de alófana

Cuantificación de alófana y materia inorgánica amorfa mediante disolución en HCl 8 N y en NaOH 0,5 N según el proceso de disolución expuesto en el procedimiento (ver Figura 3.14) y luego se seca a 110 ^{0}C en horno y se determina la diferencia de masa perdida, este

procedimiento debe ser ejecutado al menos 3 veces. Entre los minerales amorfos están la alófana y la imogolita.

En la Figura 4.23 se muestran los contenidos de alófana y materia inorgánica amorfa en la muestra analizada proveniente de Pacayas, los demás resultados para las demás muestras se brindan en el Anexo II, Figura A6 a Figura A11.

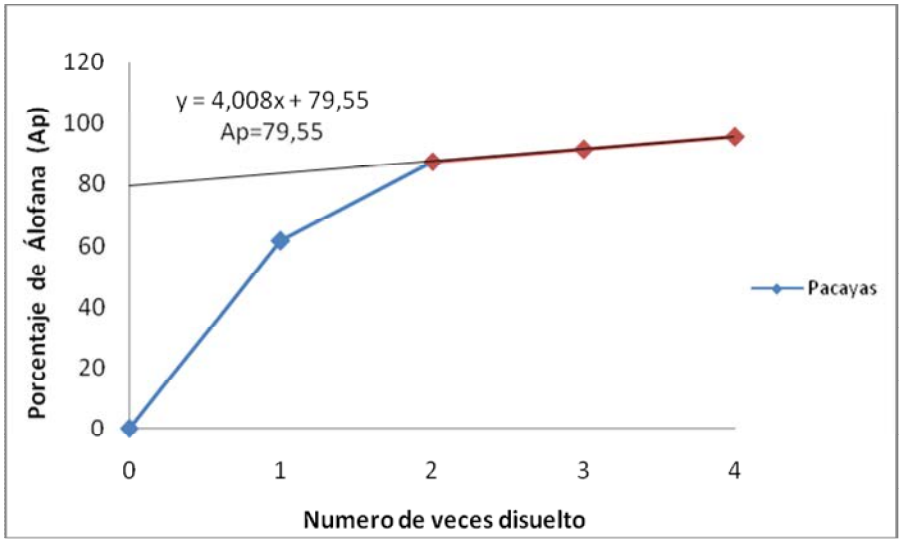


Figura 4.23. Determinación del contenido de alófana (Pacayas)

Fuente: el autor (2010)

Tabla 4.19. Determinación de alófana por el método exacto en disolución de HCl y NaOH

Lugar	Granulometría % Partículas < 0,425mm	Contenido de alófana Total
Pacayas	80 %	78,4 %
Río Grande	5 %	4,71 %
Matinilla	3 %	2,78 %
Patio de Agua	23 %	22,9 %
Las Nubes	21 %	20,8 %
La Trinidad	27 %	26,3 %

Fuente: El autor (2010)

Cabe señalar que la primera disolución es la que más mineral amorfo elimina, luego sucede de manera gradual para así volverse lineal en los últimos tramos. La prolongación del tramo lineal hasta la intersección con el eje del contenido de alófana, determina la cantidad de este mineral presente en la muestra analizada (ver Tabla 4.19 y Figura 4.23). Para el presente experimento se parte de la siguiente hipótesis “En solución ácida y alcalina los minerales amorfos se disuelven más rápidamente que los minerales cristalinos”.

El método se desarrolla muy bien para suelos con alto contenido de alófana y mezclas con halloysita, gibbsita y otros minerales. Particularmente para el caso de la coexistencia con minerales como la goethita y la hemetita, no es posible obtener buenos resultados, ya que en el experimento estos minerales se comportan como si fuera materia inorgánica amorfa y su cuantificación no es posible, por lo que se debe complementar con análisis de rayos X, microscopia electrónica u otro método.

Esto es de gran importancia, ya que si conocemos la cuantía de mineral amorfo se sabe como esté influye en el comportamiento de los suelos y de sus propiedades mecánicas. Por otro lado se sabe que entre más mineral cristalino posea un suelo, mejores propiedades va a tener, por lo cual el método sirve indirectamente para comprobar la calidad ingenieril del suelo y de sus principales minerales constituyente.

Capítulo 5: Análisis de resultados

5.1 Análisis y efecto del contenido de humedad inicial sobre los límites de consistencia obtenidos por dos métodos de laboratorio distintos

5.1.1 Pacayas

La Figura 5.1 muestra la comparación entre límites de consistencia obtenidos por ambos métodos de laboratorio, se aprecia que los resultados obtenidos con el método ASTM son menores al método británico BS-1377, esto ocurre conforme aumenta el contenido de humedad inicial en las muestras analizadas.

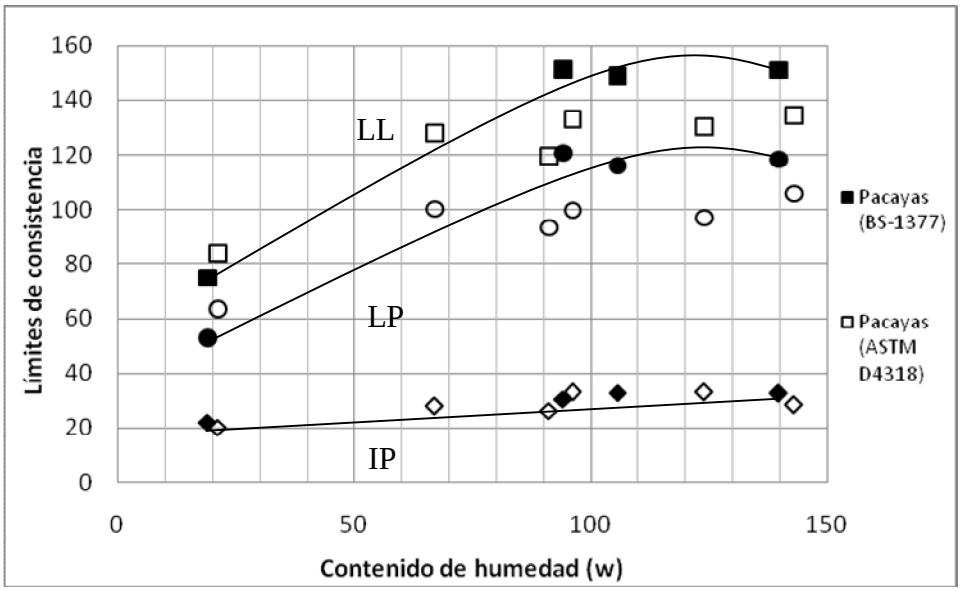


Figura 5.1. Comparacion entre métodos de laboratorio para obtener límites de consistencia
Fuente: el autor (2010)

Pacayas presenta el mayor contenido de alófana e influencia de este mineral en las propiedades del suelo, ya que posee un alto contenido de humedad y altos límites de consistencia característicos del suelo volcánico con presencia de alófana.

En la Figura 5.2 se muestran los resultados obtenidos para el caso del índice plástico por ambos ensayos de laboratorio, cabe destacar que ambos métodos obtienen el límite líquido y límite plástico de formas diferentes y por lo tanto el índice plástico también. El método de penetración con caída de cono es más sensible a medir cambios en el límite plástico y en el índice plástico por cambios en la humedad inicial, además este método es menos afectado por el error humano en la realización del procedimiento.

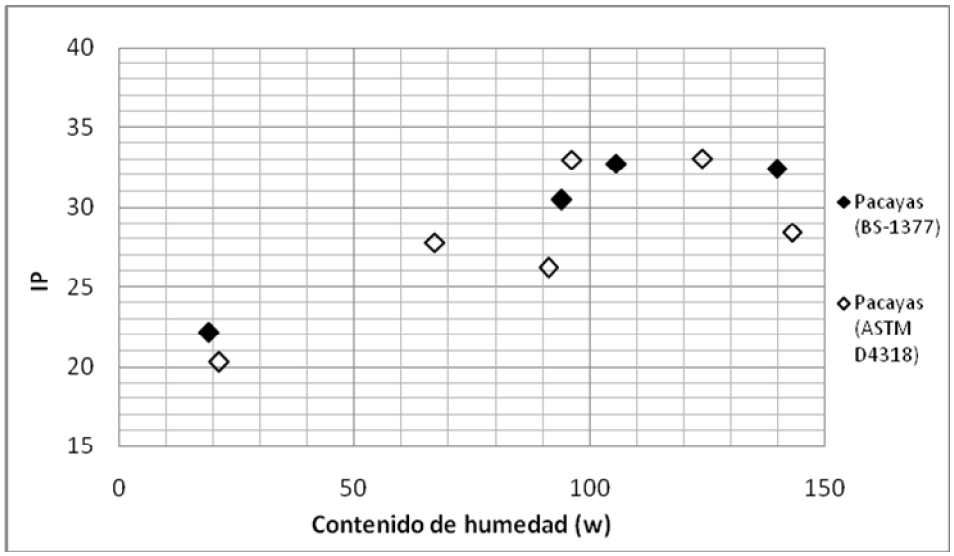


Figura 5.2. Comparación del índice de plasticidad entre ambos métodos de laboratorio

Fuente: el autor (2010)

5.1.2 Patio de Agua

La Figura 5.3 muestra la comparación entre resultados obtenidos para los límites de consistencia, se observa como la prueba ASTM sigue presentando valores menores a los de cono (británico) igual que el caso de Pacayas, pero su tendencia al aumentar el contenido de humedad no es clara y en este caso aun más variable.

Además el alto contenido de arena y partículas de limo en este tipo de suelos, hace que el carácter dinámico de la prueba ASTM pueda afectar sus resultados. Mientras que la prueba de penetración con caída de cono, no se ve afectada por la presencia de estas partículas "arenosas" al ser una prueba de carácter estático y no producir ninguna vibración durante la práctica.

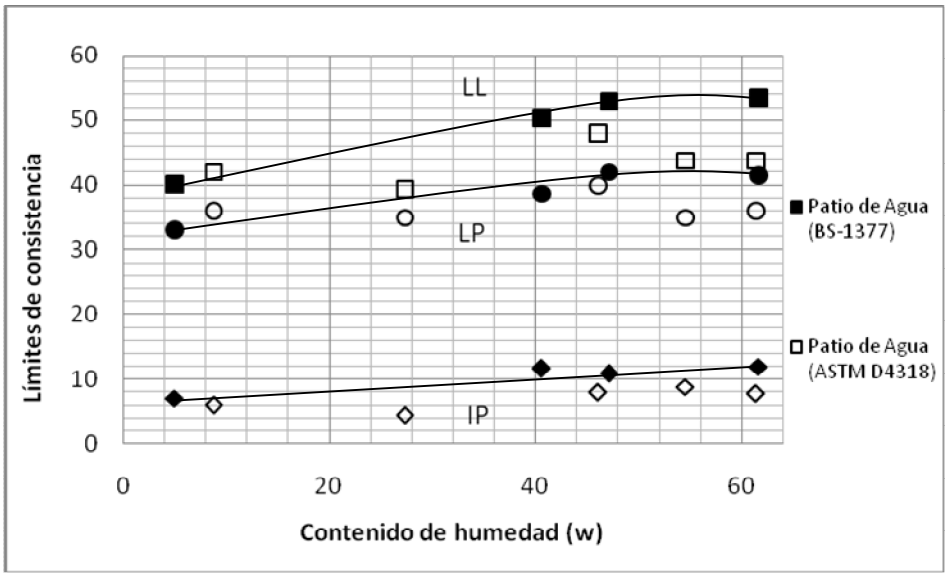


Figura 5.3. Comparacion entre métodos de laboratorio para obtener límites de consistencia

Fuente: el autor (2010)

La Figura 5.4 muestra las diferencias entre el índice plástico, se nota como los valores para el método ASTM son mas variables y bajos que los obtenidos por el método británico. A diferencia del caso anterior de Pacayas, esta muestra presenta mayor variabilidad y diferencia entre sus resultados obtenidos.

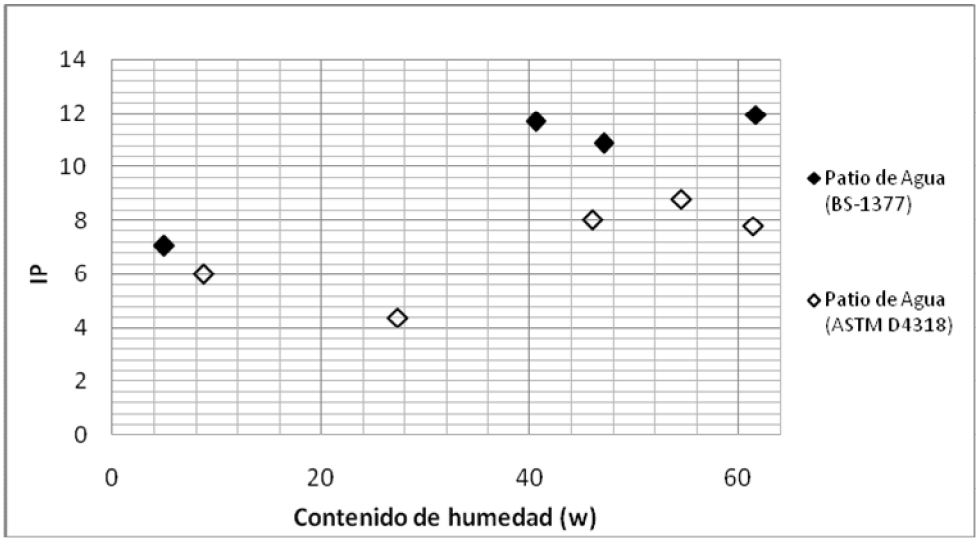


Figura 5.4. Comparación del índice de plasticidad obtenido por ambos métodos de laboratorio

Fuente: el autor (2010)

5.1.3 Las Nubes

Para el caso de Las Nubes, la Figura 5.5 muestras los resultados obtenidos para límites de consistencia por ambos análisis y al igual que en los casos anteriores, se obtienen valores menores para el método ASTM con el aumento del contenido de humedad. Esto es probable al flujo plástico del suelo por los altos contenidos de humedad y por el carácter vibratorio de la prueba que afecta según el tipo de suelo que se esté analizando.

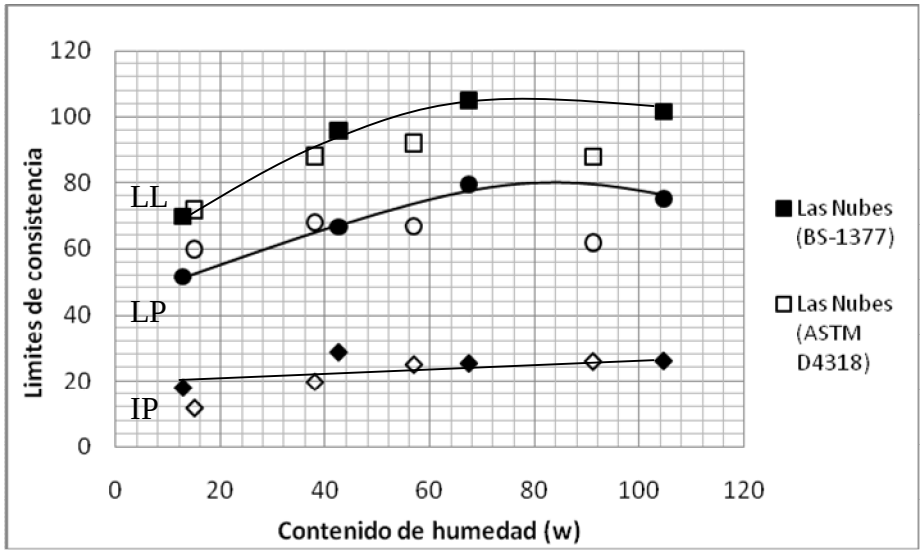


Figura 5.5. Comparacion entre métodos de laboratorio para obtener límites de consistencia

Fuente: el autor (2010)

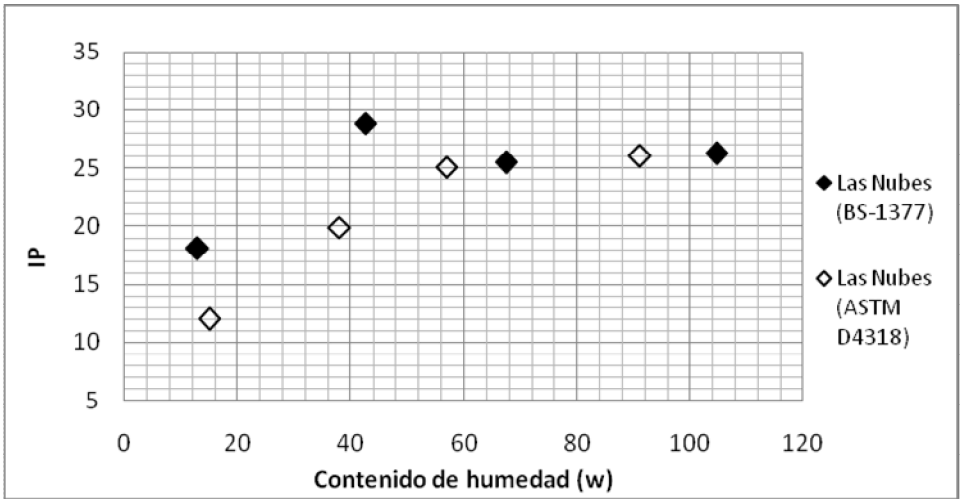


Figura 5.6. Comparación del índice de plasticidad entre ambos métodos de laboratorio

Fuente: el autor (2010)

La Figura 5.6 muestra los resultados para el índice de plasticidad y compara lo ocurrido en ambos métodos de laboratorio. En el caso de los tres sitios analizados anteriormente, no se encontró correlación entre resultados y las dispersiones entre valores obtenidos es variable, la mayor diferencia se presenta en suelo limosos con partículas arenosas, donde se recomienda utilizar un método alterno como el británico es preferible.

5.1.4 Río Grande

La Figura 5.7 muestra los resultados de Río Grande referentes a límites de consistencia obtenidos por ambos métodos. Estos sitios no presentaron diferencias significativas en sus valores de límites de consistencia obtenidos con muestras secas o húmedas, además estas muestras tienen una fracción arcillosa alta de más del 80% de partículas pasando la malla #200.

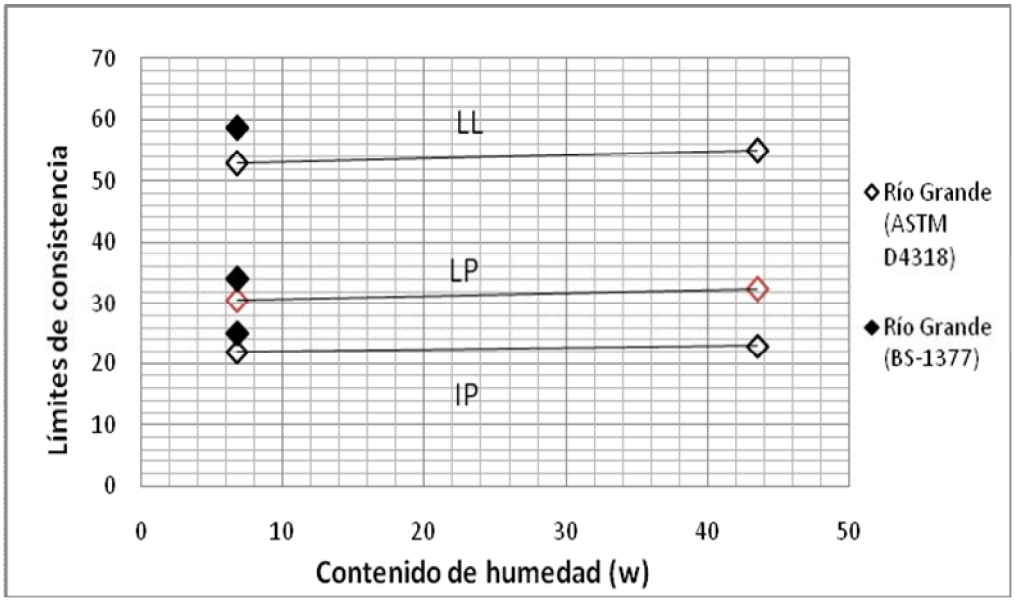


Figura 5.7. Comparacion entre métodos de laboratorio para obtener límites de consistencia
Fuente: el autor (2010)

Río Grande y Matinilla presentan característica similares como lejanía a los conos volcánicos activos y poca influencia por la caída de ceniza debido a su ubicación y distancia a los volcanes. Además estos suelos presentan bajos contenidos de humedad y poca variabilidad en sus límites de consistencia con los cambios de humedad, por lo cual solo se analizo el caso de Río Grande por ser ambos suelos similares.

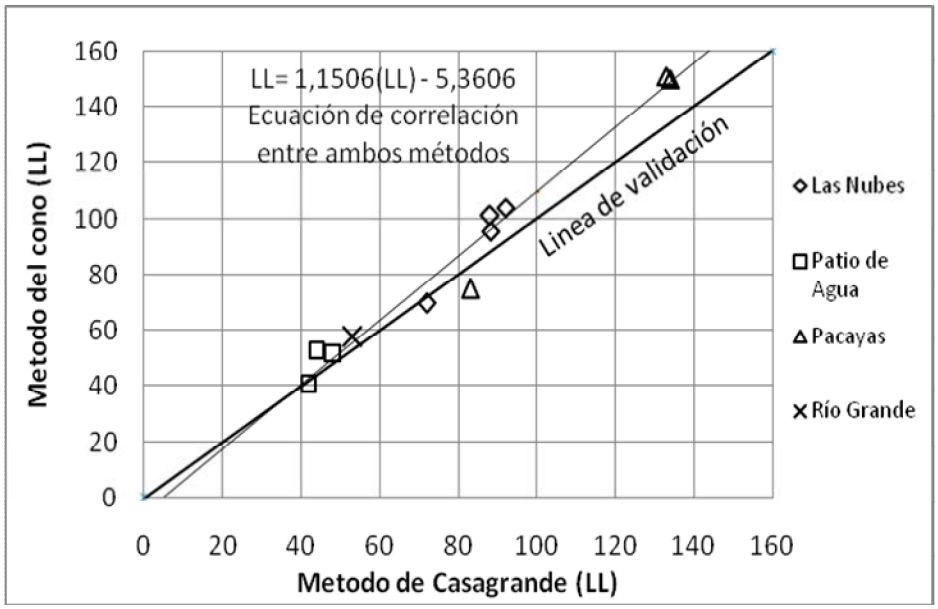


Figura 5.8. Correlación del límite líquido por ambos metodos

Fuente: el autor (2010)

La Figura 5.8 muestra la relación entre los valores del límite líquido obtenidos por el método ASTM D4318 y por el BS-1377, ambos métodos de laboratorio se relacionan entre sí por un mismo contenido de humedad inicial al realizar la prueba, además este contenido de humedad varía para cada una de las muestras procedente de cada sitio. Se destaca que los valores obtenidos son ligeramente más altos para el método de caída con cono, pero la correlación es buena y se da la tendencia esperada en la teoría (ver Figura 3.7).

Para suelos con LL<60 los resultados obtenidos por ambos métodos son aproximadamente iguales, pero para LL>60 se presentan mayores diferencias, pero siempre tienden a ser mayores los valores obtenidos por el método del cono.

5.2 Relación del contenido de alófana y los sitios estudiados

La ubicación de los sitios estudiados se realizo de modo que algunos de los suelos tuvieran alto contenido de alófana y otros no, ya que se desea conocer el efecto de este mineral en el comportamiento físico y mecánico de los materiales que los contienen.

Además se desea conocer la influencia de otras variables en el depósito y acumulación de materiales con esta clase de mineral constituyente. Se sabe que la alófana es un mineral abundante en suelos volcánicos, su distribución esta bajo influencia de la caída de ceniza y las principales zonas de depósito.

La Figura 5.9 muestra la relación entre la distancia mínima al cono volcánico y el contenido de alófana, es claro la tendencia a tener un alto contenido de alófana entre menor distancia a los conos volcánicos. Sin embargo esta cercanía es relativa, ya que la ceniza por ser material fino es transportado por el aire y depositado en las cercanías de los conos volcánicos, donde las condiciones de viento, topografía y clima toman un papel protagónico en la acumulación de materiales de este tipo en algunas zonas conocidas. Por otro lado los materiales expulsados por el volcán se van depositando de acuerdo al tamaño de sus partículas, por lo que el caso de las cenizas por ser materiales livianos pueden viajar largas distancias y acumularse en varias zonas de manera compleja de predecir. La Figura 2.4 (Capitulo 2) muestra como se depositan los distintos materiales expulsados por los conos volcánicos.

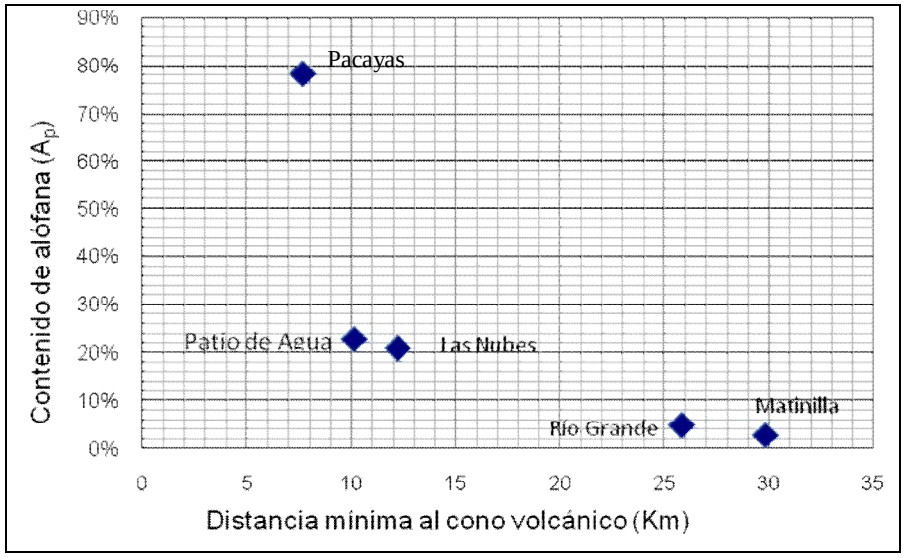


Figura 5.9. Relación entre la distancia mínima al cono volcánico y el contenido de alófana

Fuente: el autor (2010)

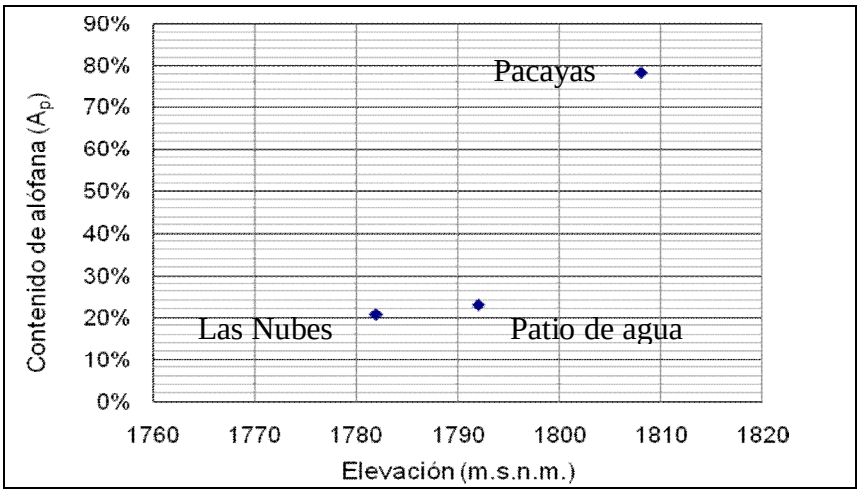


Figura 5.10. Relación entre elevación y el contenido de alófana

Fuente: el autor (2010)

La Figura 5.10 muestra la relación entre la altura en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) y el contenido de alófana para los sitios en estudio, la tendencia es que al aumentar la altura aumente el contenido de alófana y al mismo tiempo disminuye la distancia al cono emisor. Para el caso de Río Grande y Matinilla se da la excepción, ya que estos lugares presentan mayor alejamiento a los conos volcánicos y menor contenido de alófana, sin embargo Matinilla presenta una altura similar a Patio de Agua y Las Nubes, pero su ubicación es en otro tipo de formación diferente a la producida por la actividad volcánica de la Cordillera Central.

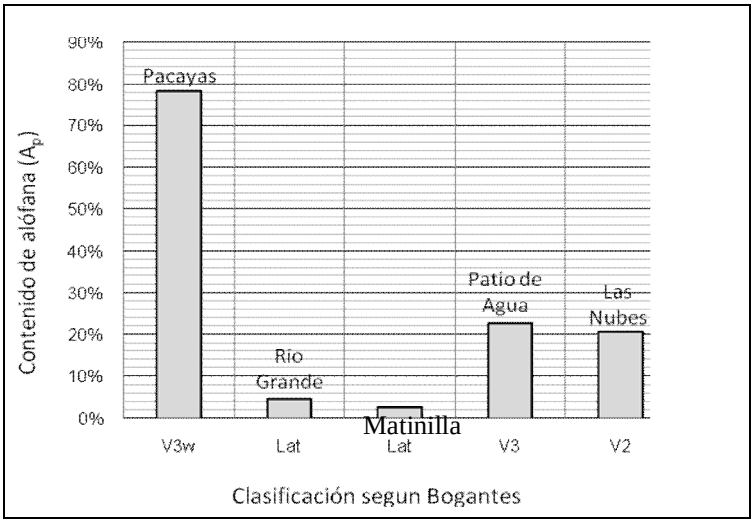


Figura 5.11. Relación clasificación según Bogantes y el contenido de alófana

Fuente: el autor (2010)

Por último la Figura 5.11 muestra la relación del contenido de alófana y el tipo de suelo, según la clasificación de Bogantes (Figura 4.4) esta relación es muy importante ya que se puede relacionar el tipo de suelo y las características geográficas del lugar estudiado, además funciona como zonificación auxiliar para ubicar los tipos de suelo que pueden contener alófana.

5.3 Análisis de las propiedades índice del suelo con la presencia del contenido de alófana

La Figura 5.12 es de mucha importancia como criterio de análisis para clasificación de suelos volcánicos por su contenido de humedad, ya que la diferencia entre estos suelos y los de otro tipo depende de un contenido de humedad característico del suelo volcánico con alófana. De esta manera los datos obtenidos por So (1998) indican que el valor de humedad natural para un suelo volcánico, corresponde a un suelo que contiene como mínimo un 10% de alófana.

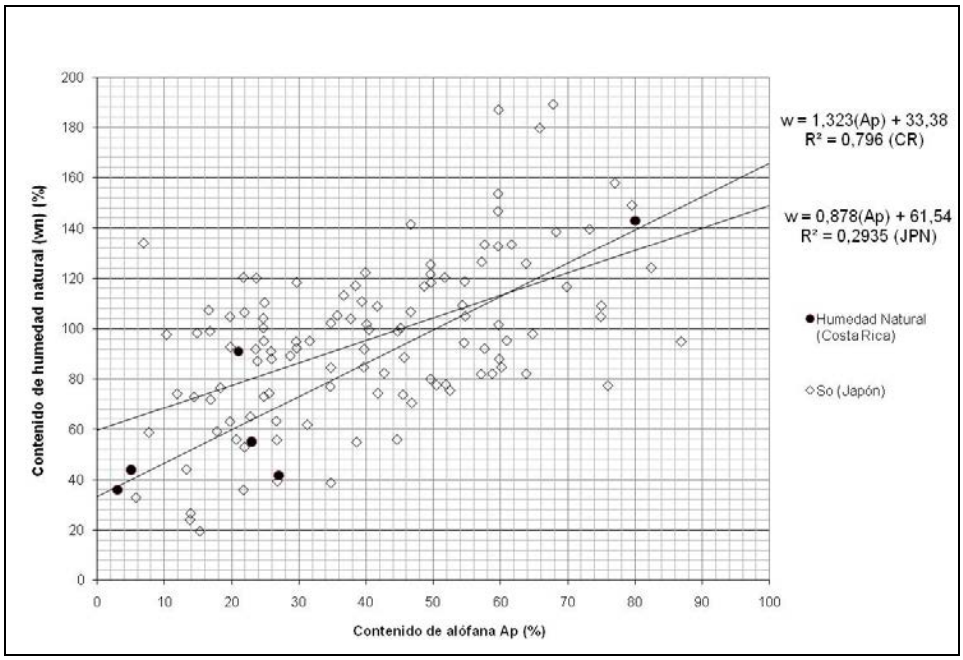


Figura 5.12. Contenido de alófana (Ap) vs máximo contenido de humedad natural
Fuente: adaptado de So (2010)

En este caso se muestran los valores de 120 muestras de Japón (So, 1998) y 6 de Costa Rica obtenidas y analizadas en el presente proyecto, ambas líneas de ajuste se muestran por separado. Los resultados para el caso de Costa Rica es de w_n = 50% y para Japón de w_n = 70%

respectivamente y se obtienen de evaluar A_p=10% en las ecuaciones mostradas en la figura anterior.

Se recomienda asumir el intervalo de humedad obtenido entre ambos países como intermedio y prestar atención en las propiedades de estos materiales. Esto debido al pequeño tamaño de la muestra de Costa Rica, no se puede descartar que al aumentar la cantidad de pruebas realizadas de Costa Rica con las de Japón, la tendencia entre ambas rectas sea muy similar.

La Figura 5.13 y la Figura 5.14 muestran la relación entre el contenido de alófana (A_p) y los límites de consistencia, en ambas figuras es claro que al aumentar el contenido de alófana aumentan los contenidos de humedad y para valores altos de humedad el valor del LL y el LP es alto también, tanto para los datos de Japón como para los de Costa Rica.

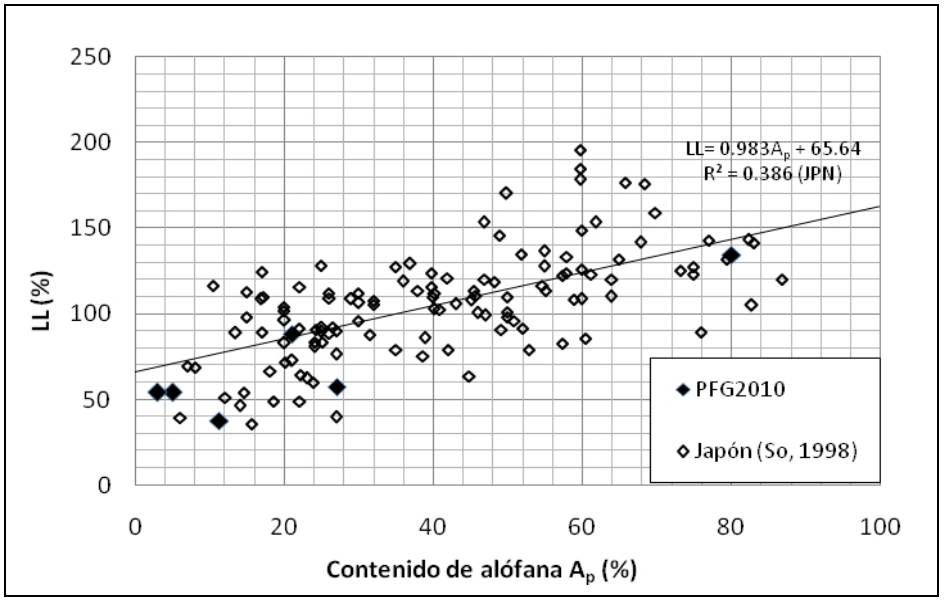


Figura 5.13. Comparación entre Japón y Costa Rica (A_p vs LL)

Fuente: el autor (2010)

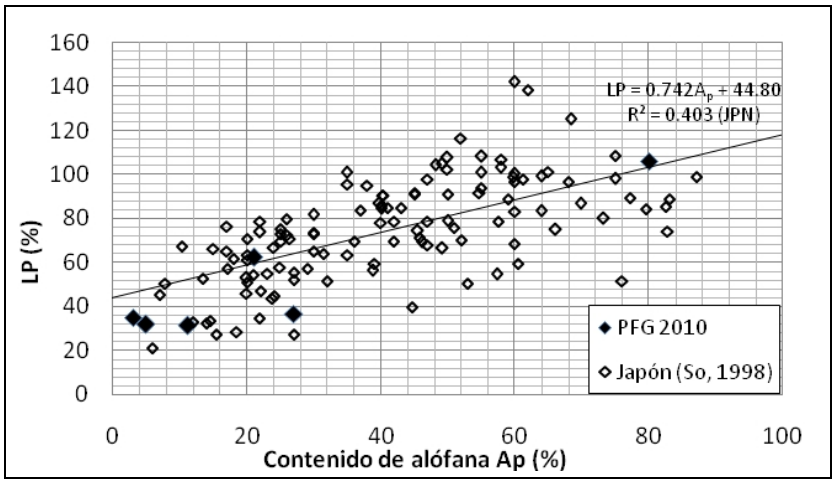


Figura 5.14. Comparación entre Japón y Costa Rica (Ap vs LP)

Fuente: el autor (2010)

Se concluye que en los suelos de ambos países predomina la influencia del contenido de alófana en su comportamiento físico, además dado que los límites de consistencia son contenidos de humedad, es deseable que la prueba se realice con la máxima humedad posible, para poder obtener una mejor clasificación del suelo.

La Figura 5.15 muestra la relación entre el contenido de alófana y el índice de plasticidad, la dispersión es mayor en esta relación entre variables y se sabe que el IP presenta poca correlación con otras variables y su estudio ha sido difícil.

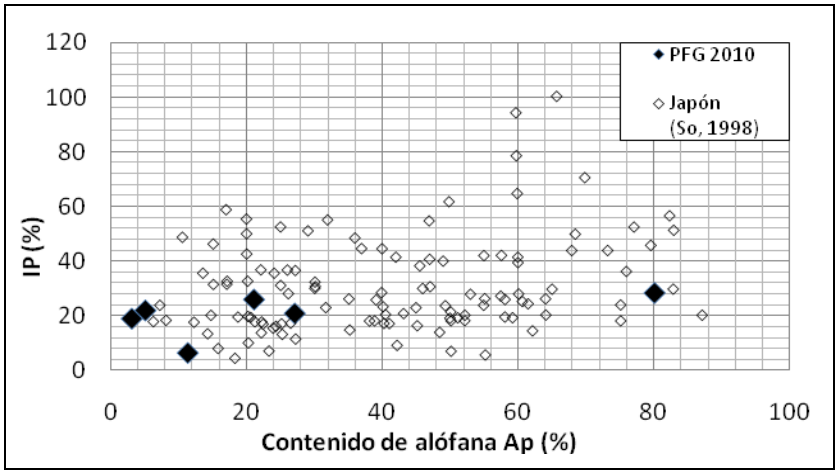


Figura 5.15. Comparación entre Japón y Costa Rica (A_p vs IP)

Fuente: el autor (2010)

Como se puede apreciar en la figura, no se tiene una correlación clara entre el contenido de alófana y el índice de plasticidad, principalmente porque el IP se ve influenciado por la mezclas de diferentes tipos de minerales presentes en el suelo y porque cada mineral presentan diferencias significativas en su comportamiento físicos.

La Figura 5.16 muestra la relación establecida entre el contenido de alófana y el índice de liquidez, esta figura muestra una mala correlación al igual que ocurre con el índice de plasticidad de la figura anterior. La mezcla de minerales y las condiciones propias de cada lugar, brindan características particulares a los diferentes suelos de cada región.

Aunque la relación entre contenido de alófana e índice de liquidez presentan mucha dispersión entre sí, estas variables significan de gran ayuda a la hora de clasificar y caracterizar las propiedades mecánicas de un suelo por lo cual son muy importantes en estudios preliminares de proyectos de ingeniería.

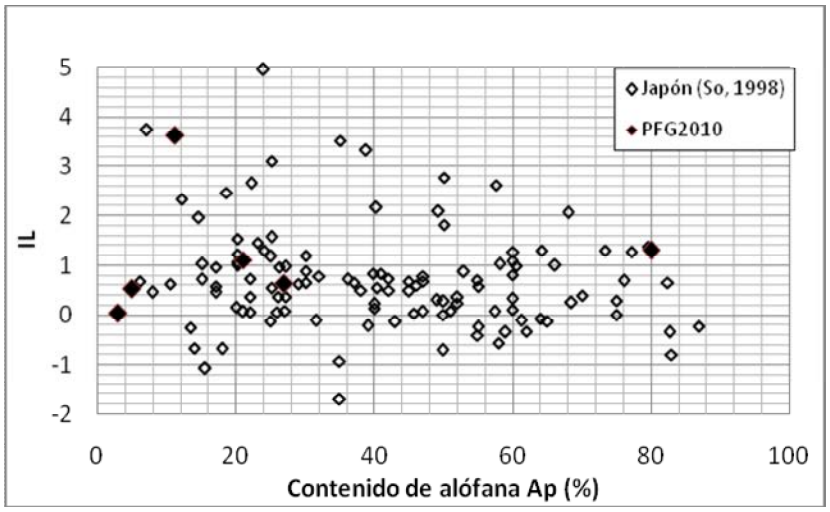


Figura 5.16. Comparación entre Japón y Costa Rica (A_p vs IL)

Fuente: el autor (2010)

5.4 Relación de los límites de consistencia con las propiedades índice

La base de datos utilizada en esta sección, proviene de la recopilación realizada por Novoa en 2007, con la variante de adicionar algunos puntos de otros autores no incluidos por este último, también se incluyen los datos nuevos del presente Proyecto Final de Graduación (PFG2010). Para el caso de la Figura 5.17 se muestra la relación entre el contenido de humedad y el límite líquido, se puede notar como al aumentar el contenido de humedad natural del suelo, mayor es el valor del límite líquido y la alófana tiene mucha influencia en este tipo de comportamiento.

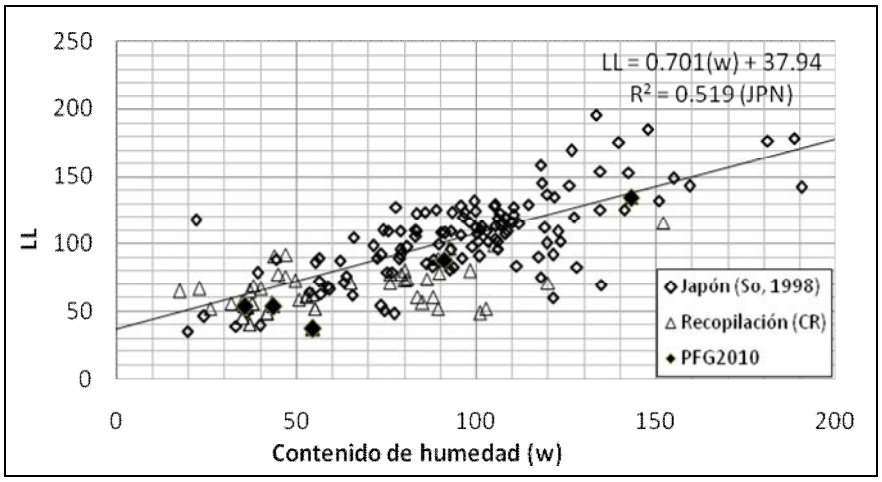


Figura 5.17. Comparación entre Japón y Costa Rica (w vs LL)

Fuente: el autor (2010)

La Figura 5.18 relaciona el límite plástico con el contenido de humedad, la tendencia de aumentar conforme aumenta el contenido de humedad se mantiene al igual que el caso anterior. De estas relaciones entre el contenido de humedad y los límites de consistencia se puede concluir que los valores son dependientes del contenido de humedad y en el caso particular de los suelos volcánicos, la influencia está relacionada con la presencia de alófana.

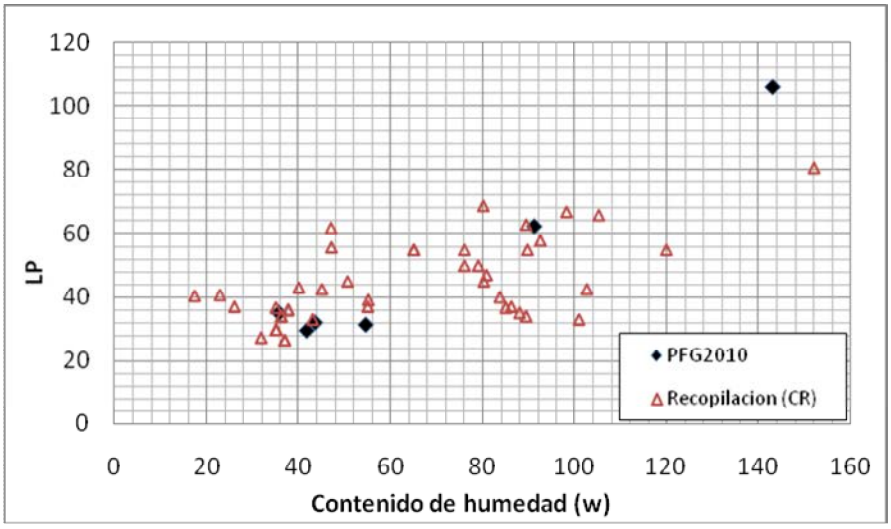


Figura 5.18. Análisis de LP vs w_n de 51 muestras nacionales

Fuente: el autor (2010)

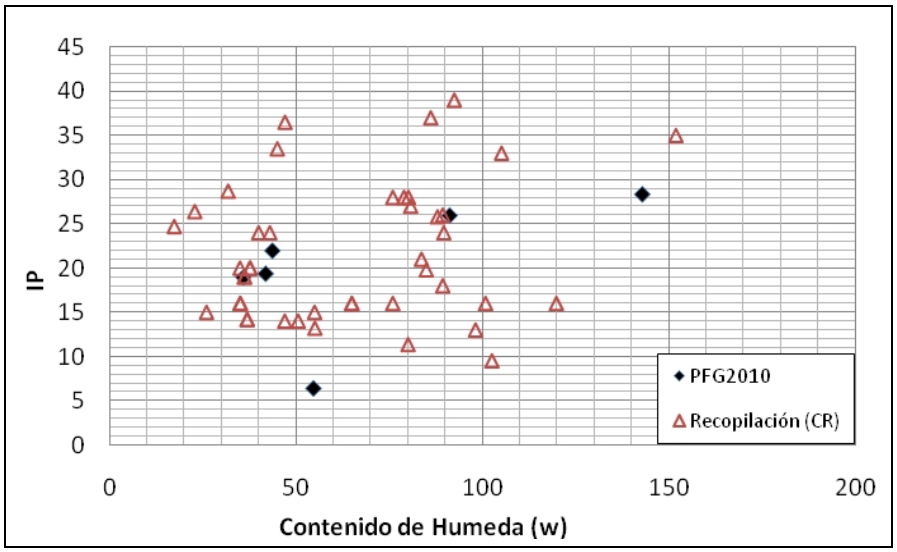


Figura 5.19. Análisis 51 muestras nacionales (LP vs IP)

Fuente: el autor (2010)

En el caso anterior de la Figura 5.19 se muestra la relación entre el contenido de humedad y el índice plástico, se puede observar que no existe una correlación o tendencia entre estas variables. En su lugar el comportamiento del índice plástico es complejo y depende de muchas variables, lo cual hace que exista mucha dispersión entre sus correlaciones.

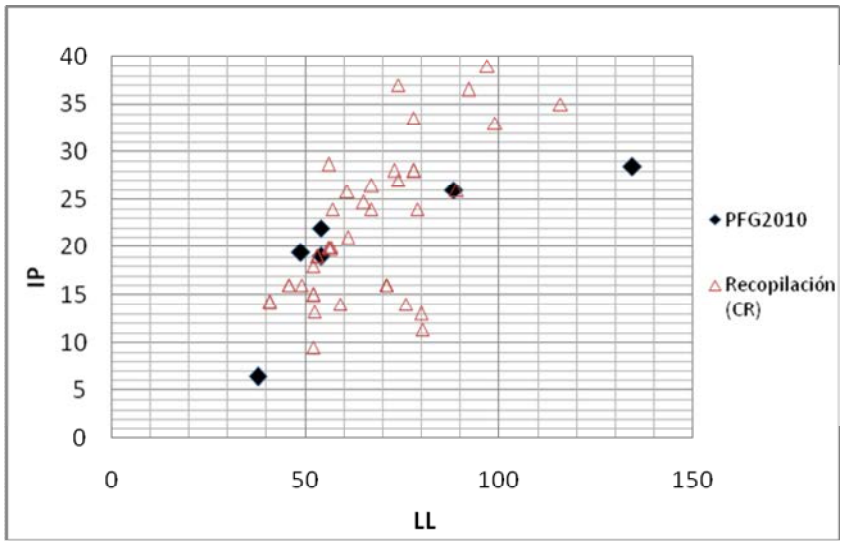


Figura 5.20. Análisis de 51 muestras nacionales (LL vs IP)

Fuente: el autor (2010)

En el caso de la Figura 5.20 se muestra la relación entre el contenido de humedad y el índice plástico, se puede observar que no existe una correlación o tendencia entre estas variables. En su lugar el comportamiento del índice plástico es complejo y depende de muchas variables, lo cual hace que exista mucha dispersión entre sus correlaciones.

En la Figura 5.21 se muestra la relación entre el límite plástico y el índice plástico manteniéndose la alta variabilidad entre cualquier relación que se quiera establecer con el índice plástico, tanto para suelos de otros países como para los nacionales.

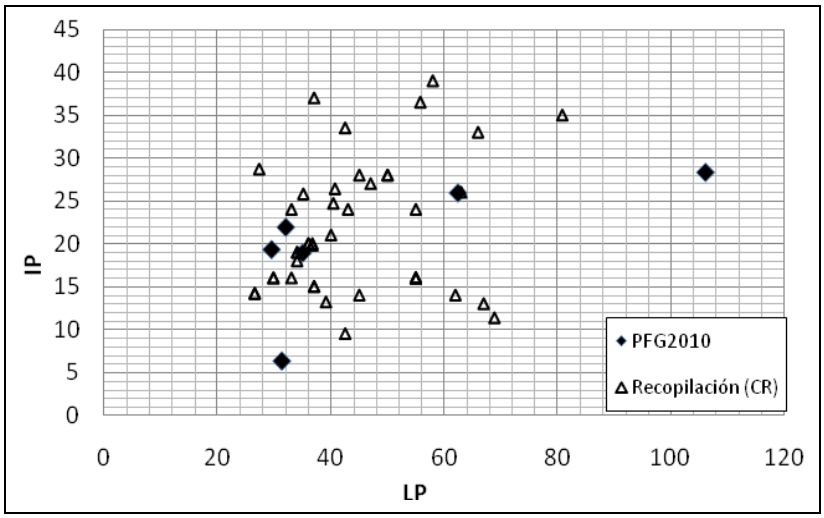


Figura 5.21. Análisis 51 muestras nacionales (LP vs IP)

Fuente: el autor (2010)

Por otro lado la Figura 5.22 muestra como existe una relación lineal entre el límite plástico y el límite líquido, la tendencia es aumentar de manera proporcional de modo que alguno de ellos aumente, además debe mantenerse la condición necesaria que (LL > LP).

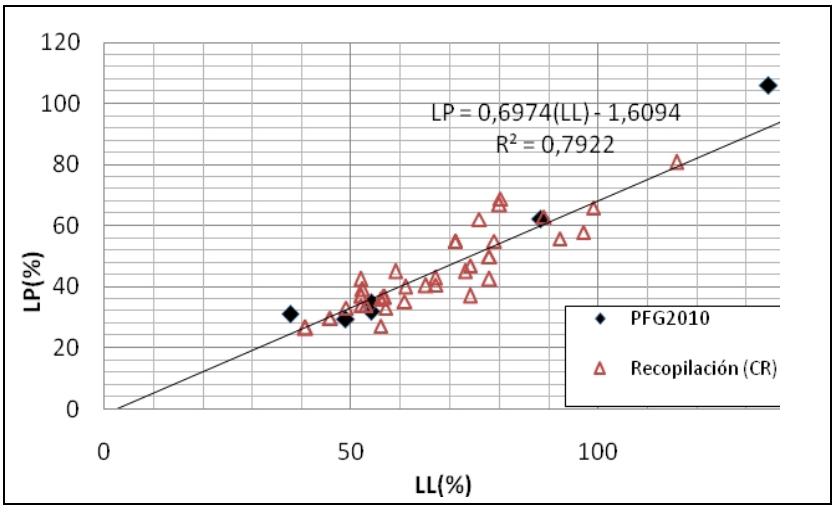


Figura 5.22. Análisis de 51 muestras nacionales (LL vs LP)

Fuente: el autor (2010)

Cabe destacar que el IP depende de la fracción arcillosa y su mineral arcilloso constituyente mayoritariamente, este parámetro sirve para clasificar los suelos con el sistema SUCS. Cabe destacar que los minerales tienen influencia en los valores del índice de plasticidad y límites de consistencia, sin embargo factores como la mezcla entre diferentes minerales y las diferentes fracciones pasando la malla#200, son variables que hacen complejo conocer el comportamiento del IP. Además las pruebas para analizar los minerales constituyentes del suelo son costosas y complejas y no proporcionan información para el diseño geotécnico.

5.5 Carta de plasticidad para suelos del Valle Central y análisis comparativo con los suelos de Japón

La Figura 5.23 presenta la carta de plasticidad (SUCS) que muestra los suelos analizados de Costa Rica en el presente proyecto, los datos recopilados de proyectos de graduación de la UCR y los datos de Japón (So, 1998). La serie "Recopilación (CR)" incluye la recopilación de Novoa y algunos datos nuevos presentes en otros trabajos.

Cabe destacar que uno de los principales problemas del sistema de clasificación SUCS es que mayoritariamente los suelos se clasifican en la categoría MH, aunque exista mucha diferencia en el comportamiento de cada uno de estos suelos, en la figura mostrada se puede notar como el mayor porcentaje de los suelos se clasifica como MH.

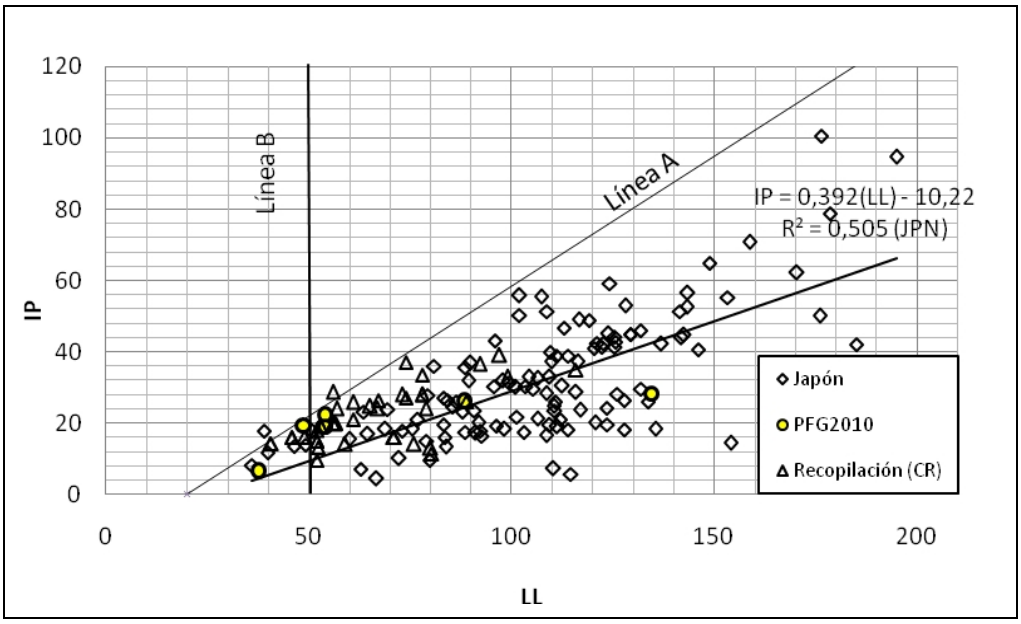


Figura 5.23. Limos de la GAM en la carta de plasticidad (SUCS)

Fuente: el autor (2010)

El problema de sub-clasificar suelos MH o ML por medio del método japonés, brinda una solución basada en cartas de plasticidad que se dividen en cuatro categorías y sirve para realizar sub-clasificar los limos de origen volcánico.

La Figura 5.24 muestra la clasificación del Departamento de Carreteras Publicas de Japón según el contenido de humedad. Cabe recordar que esta clasificación identifica los limos por dos letras (bajo"L" y alto "H"), la primera asociada con la humedad y la segunda con la índice de liquidez.

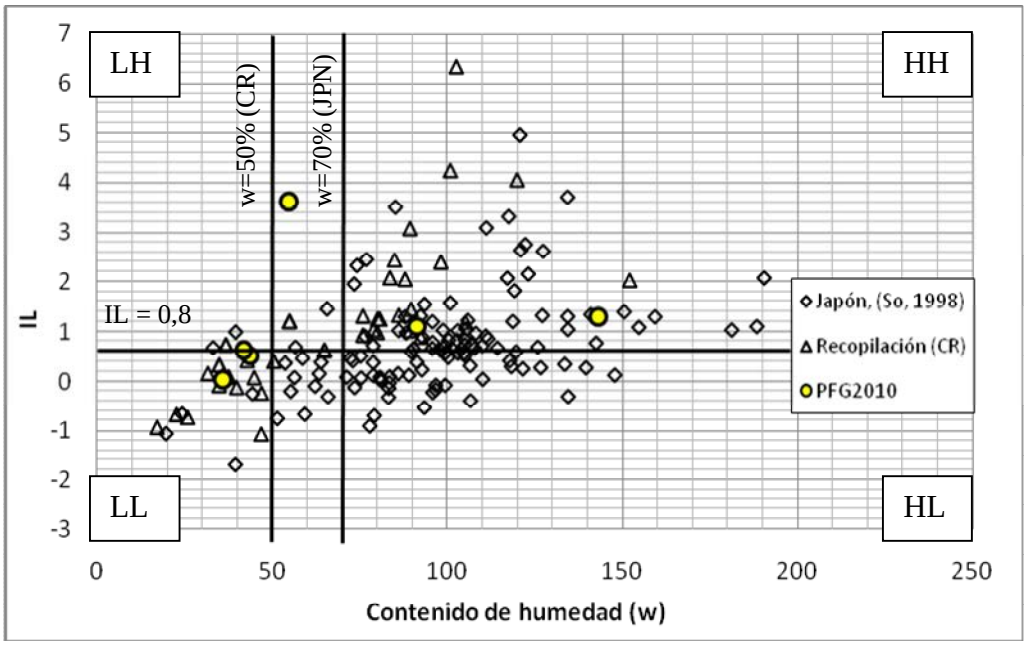


Figura 5.24. Comparación entre datos Japón- Costa Rica (51 muestras CR y 120 JPN)
Fuente: el autor (2010)

La Figura 5.25 muestra la clasificación según el índice de liquidez y el coeficiente de flujo, en esta se muestran datos recopilados de Japón, proyectos de graduación y sitios realizados en el presente estudio. La correlación entre los suelos de ambos países es alta, debido a esto la aplicación de estas cartas de plasticidad a suelos de Costa Rica representa una solución válida.

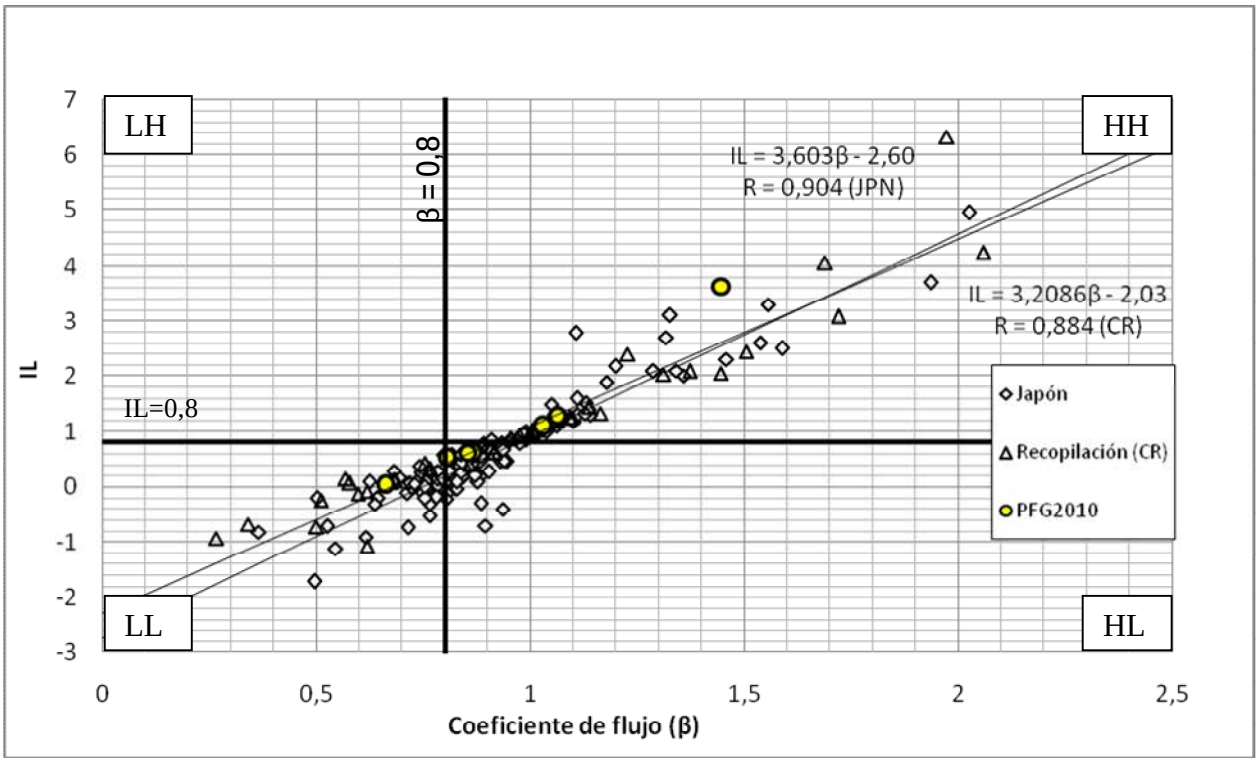


Figura 5.25. Comparación entre datos de Japón y Costa Rica (51 CR y 120 JPN)
Fuente: el autor (2010)

El valor de IL=0,8 es un valor límite entre alta y baja liquidez, lo cual indica alto contenido de humedad y una condición crítica donde el contenido de humedad es muy cercano al límite líquido, siendo ambos iguales cuando el IL=1. En el caso de suelos orgánicos del tipo OL y OH al igual que los MH y ML puede ser del tipo HH, HL, LL y LH, son identificables con la prueba de contenido de materia orgánica y sus límites, además es conocido que los suelos con alófana presentan altos contenidos de materia orgánica, por lo que la clasificación en términos de la alófana contempla este tipo de suelos.

Ambas clasificaciones no difieren mucho entre sí, pero esta última posee una mejor correlación y un rango de variabilidad mucho menor que el presentado con la humedad, lo cual lo hace ideal para clasificar suelos sin necesidad de tablas o figuras.

5.6 Consecuencias por secado de muestras de suelo en los sistemas de clasificación con fines ingenieriles

La Figura 5.26 muestra las diferencias obtenidas en la clasificación SUCS por el secado de las muestras analizadas, se puede notar que los lugares que sufren mayor cambio son Patio de Agua, Las Nubes y Pacayas lo cual se debe principalmente a los contenidos de alófana y halloysita en este tipo suelos volcánicas.

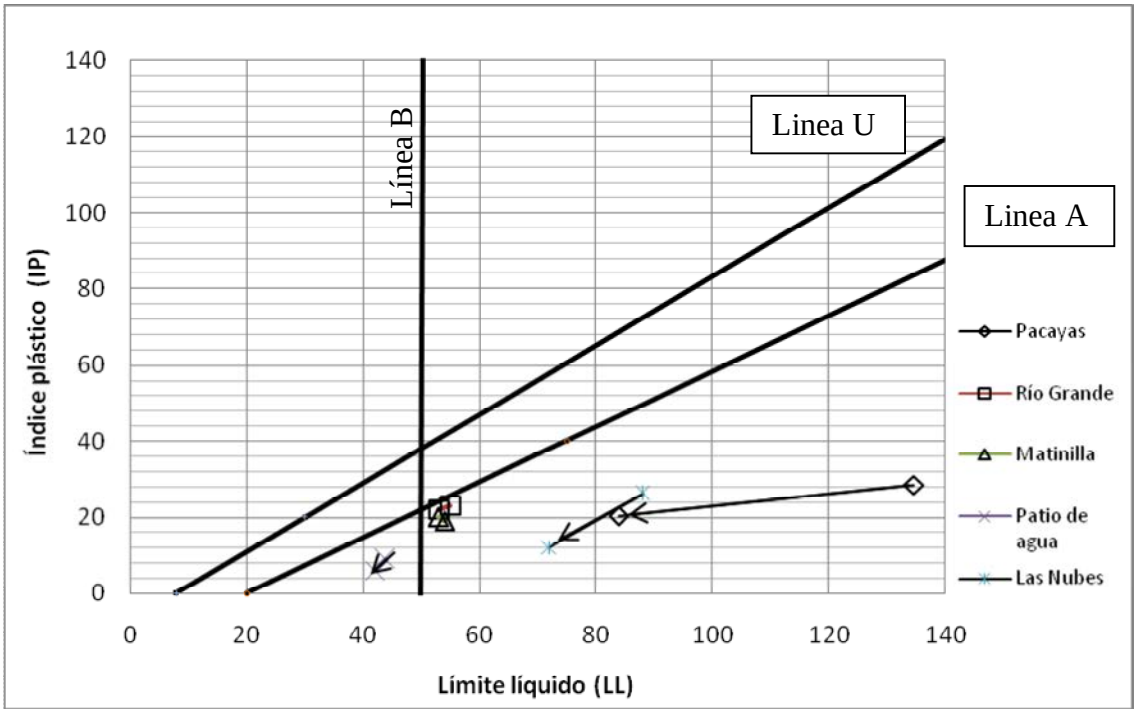


Figura 5.26. Efecto del secado en los límites de consistencia (carta de la SUCS)

Fuente: el autor (2010)

Por otro lado los suelos de Matinilla y Río Grande son los denominados suelos residuales de rocas sedimentarias o coladas de lava y sus minerales constituyentes son tipo caolinita, ilita o clorita. Sus límites de consistencia no se ven afectados por los niveles de humedad presentes en la muestra y su comportamiento mecánico es adecuado para cimentación de infraestructura liviana. La identificación de estos minerales arcillosos requiere de microscopía y otras técnicas de laboratorio de alto costo.

La Figura 5.27 muestra como varía la clasificación del suelo con el contenido de humedad en el sistema de clasificación japonés; Pacayas y Las Nubes son los que presentan mayor variación en su clasificación. Dependiendo del nivel de secado presentan cambios de clasificación en este orden HH, HL y LL según su contenido de humedad inicial, por otro lado Patio de Agua cambia de LH a LL.

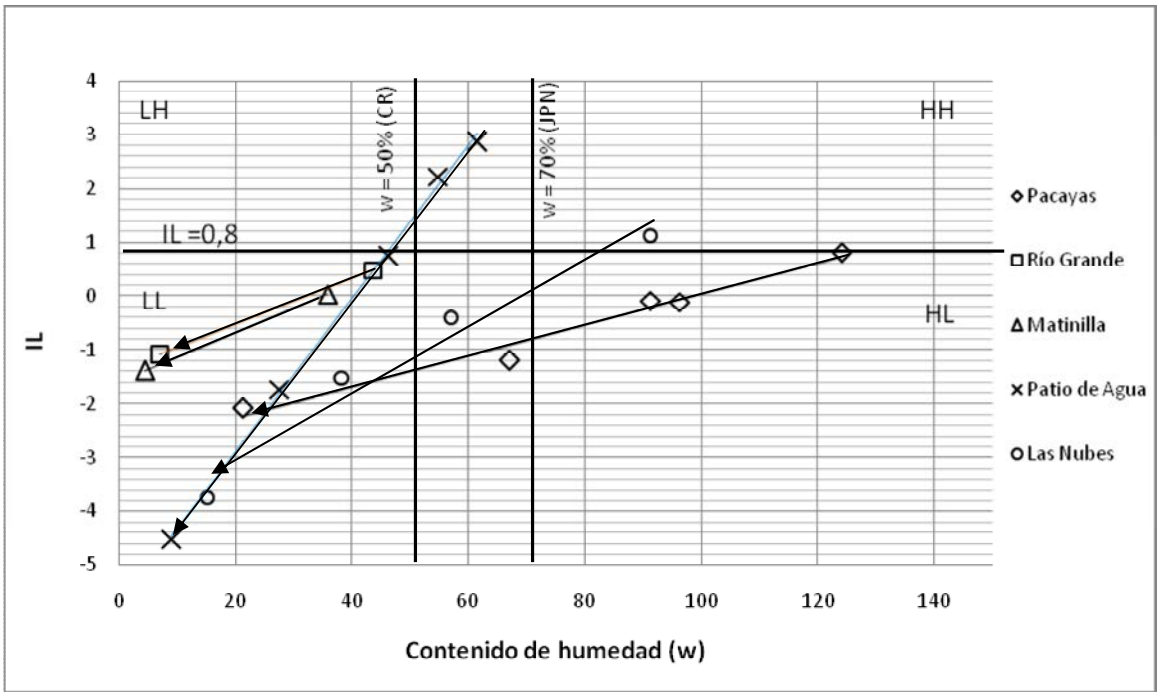


Figura 5.27. Variación de la clasificación japonesa con la humedad inicial ASTM
Fuente: el autor (2010)

El intervalo del contenido de humedad entre 50 – 70 % se cataloga como intermedio, se obtiene a partir de la humedad en términos de contenido de alófana para A_p=10% realizado en Japón con 120 muestras y en Costa Rica con 6 muestras.

La Figura 5.28 muestra un análisis similar al caso anterior, con la diferencia que en lugar de humedad se toma en cuenta como parámetro de análisis el coeficiente de flujo (β). Es importante señalar que los sitios de Pacayas, Las Nubes y Patio de Agua son los que presentan mayor variación al igual que en el caso anterior. Para Pacayas, Las Nubes y Patio de Agua la clasificación cambia según β a razón de HH, HL y LL y cabe resaltar que ambos sufren los mismos cambios.

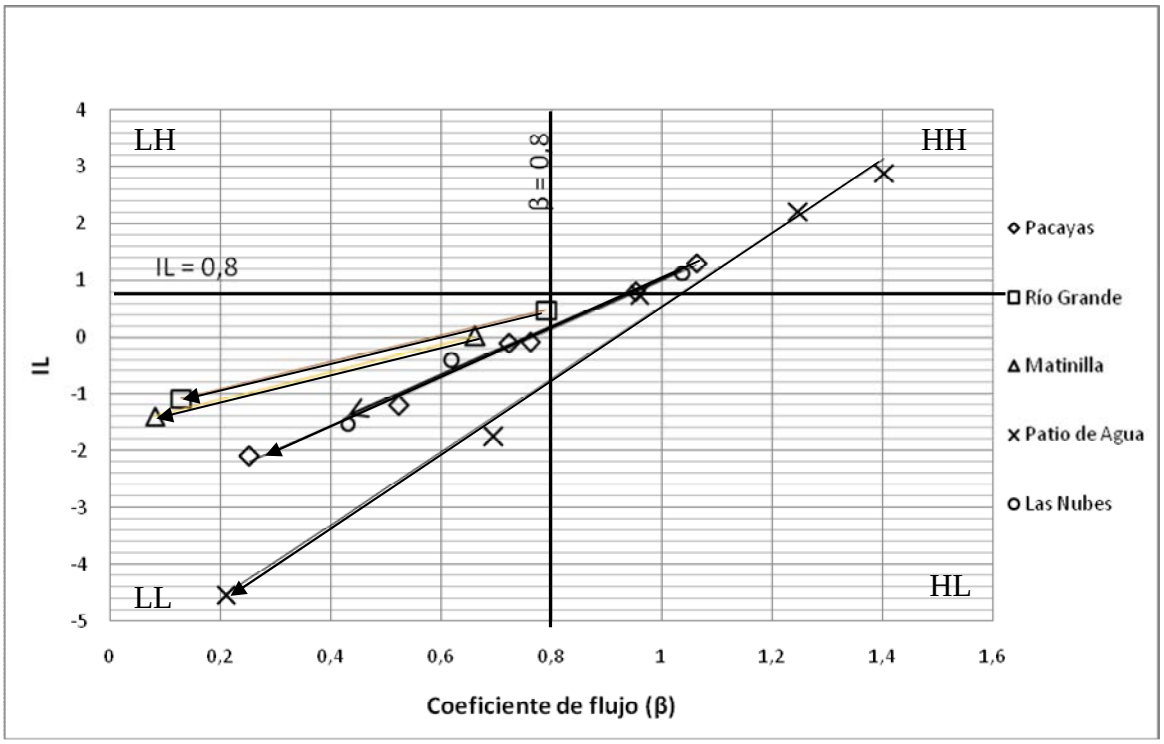


Figura 5.28. Análisis de variación del coeficiente de flujo (ASTM D4318)

Fuente: el autor (2010)

Para el caso de Matinilla y Río Grande estos se clasifican como LL y no sufren ningún cambio significativo en su clasificación, por contenido de humedad para ninguno de los dos sistemas. Esto ocurre principalmente porque sus minerales constituyentes son mayoritariamente cristalinos, los cuales poseen menos humedad y mayores densidades que otros minerales del tipo amorfo o semicristalino.

Es muy importante resaltar el error en que se incurriría en ambos sistemas de clasificación, si se analiza la prueba con un nivel de humedad bajo, ya que un suelo que es del tipo HH pasa a ser HL y sí se seca aun más sería LL al igual que los suelos de Matinilla y Río Grande, lo cual es completamente erróneo y al asumir un comportamiento estable podría ocasionar serios problemas en la construcción de rellenos, carreteras o cortes en taludes.

Los sistemas de clasificación japonesa brindan una solución al análisis y sub-clasificación de limos ML y MH, valiéndose únicamente de análisis de laboratorio referente a límites de consistencia y contenido de humedad (ver Figura 5.29 y Figura 5.30).

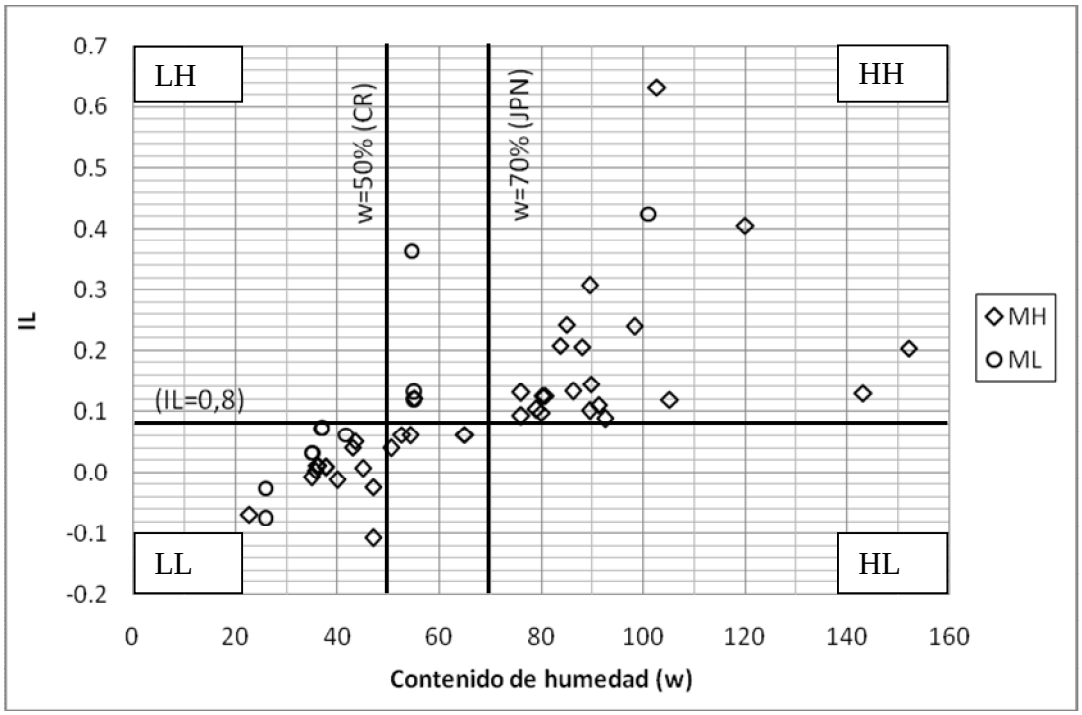


Figura 5.29. Clasificación por humedad para suelos de la GAM (51 muestras)

Fuente: el autor (2010)

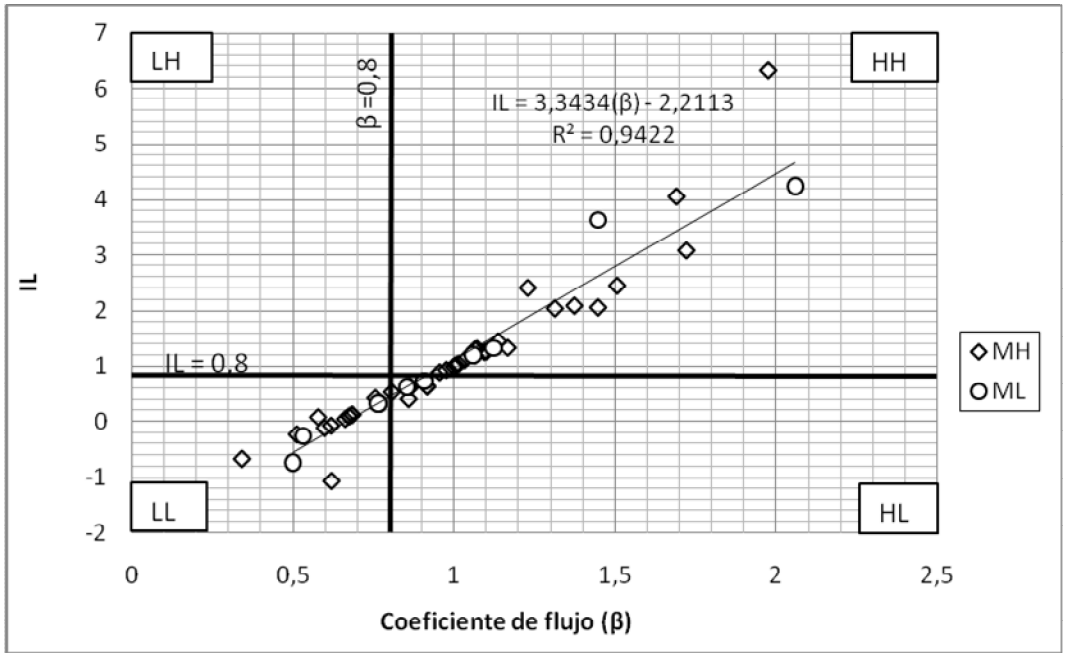


Figura 5.30. Carta de clasificación para suelos de la GAM (51 muestras)

Fuente: el autor (2010)

5.7 Implicaciones

- La mayor parte de teorías de la Mecánica de Suelos han sido realizadas en países que poseen suelos sedimentarios principalmente y es por esto que la aplicación de estas teorías, podrían obtenerse diferencias significativas en el análisis de suelos volcánicos, presentes en el Valle Central de Costa Rica.
- Algunos de estos suelos volcánicos existentes pueden ser muy sensitivos y cambiar sus propiedades mecánicas debido a los cambios de humedad y en el proceso de extracción o amasado en laboratorio, fenómeno conocido como tixotropía.
- Suelos con el mismo contenido de partículas finas (<0,075 mm) tienen un comportamiento mecánico diferente, además presentan diferencias en sus límites de consistencia con diferentes contenidos de humedad.
- Los suelos que contienen alófana y halloysita son materiales con propiedades mecánicas deficientes y comportamiento colapsable ante la aplicación de cargas y saturación.
- En suelos volcánicos las pruebas de compactación y humedad óptima realizadas en muestras secas al aire, pueden presentar diferencias de manera considerable en comparación con resultados de muestras con humedad natural.
- La interpretación del índice de liquidez negativo debe ser analizado con sumo cuidado, cuando se trata de clasificar suelos preconsolidados o resecos, ya que muestras secas poseen valores negativos, también los suelos que han sido preconsolidados por cargas en el pasado tienen IL negativo, debido a la reducción de los vacíos y la expulsión de agua.
- Muestras con bajos contenidos de humedad, se pueden obtener en verano principalmente en el primer metro de profundidad de la capa de terreno o en cortes de taludes expuestos al sol.
- El desecamiento de los suelos volcánicos produce que estos se agrieten, por lo cual cuando entra la época lluviosa el agua se infiltra en estas grietas y erosiona internamente el suelo, favoreciendo la inestabilidad del terreno y los deslizamientos especialmente en taludes durante la estación lluviosa.

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

- Desde 1985 se observó que las propiedades físicas y mecánicas de algunos suelos varían con el secado y en el presente estudio se demuestra de manera científica que el fenómeno ocurre en suelos volcánicos y el comportamiento se debe a los minerales amorfos, alófana y halloysita presentes en el Valle Central de Costa Rica.
- La aplicabilidad de las teorías y criterios clásicos de la Mecánica de Suelos pueden no ser completamente válidos en el caso de suelos volcánicos de Costa Rica, debido a diferencias importantes que existen en la constitución y estructura de los suelos modelo que sirvieron para el desarrollo de la teoría tradicional en otros países.
- La determinación de límites de consistencia de suelos volcánicos según ASTM (método Casagrande) presenta mayores dificultades de índole práctica y requiere de más experiencia.
- Los suelos volcánicos pueden requerir hasta 45 minutos de mezclado para alcanzar homogenización requerida en las pruebas de límites de consistencia.
- Se logro implementar el procedimiento de la norma británica BS-1377 (penetración de cono) para determinación de límites de consistencia por primera vez en las investigaciones realizadas en la UCR.
- El método de penetración con caída de cono es una prueba más adecuada para determinar límites de consistencia de suelos volcánicos porque no produce impactos que afecten el comportamiento, es fácil de realizar por técnicos con poca experiencia, produce resultados con mayor repetitividad y proporciona el LL y LP simultáneamente.
- Se obtuvo una buena correlación entre límites de consistencia determinados según los métodos ASTM D4318 (cuchara) y BS-1377 (cono).
- Se logro implementar el procedimiento japonés recomendado por Kitagawa para determinación de contenido de materia orgánica y contenido de alófana, necesarios para investigar las propiedades de los suelos derivados de cenizas volcánicas y clasificarlos correctamente
- Los suelos que contienen alófana y otros minerales volcánicos amorfos, presentan variabilidad en sus límites de consistencia, según el estado en que se ensayen estas muestras (secas o húmedas).

- Se logro cuantificar el contenido de alófana de 5 suelos del Valle Central de Costa Rica según el procedimiento japonés y demostrar su presencia en los suelos derivados de cenizas volcánicas.
- La cuantificación de alófana es de fundamental para identificar suelos con comportamiento inconveniente o anómalo en obras de ingeniería.
- Se verifico la variación de propiedades físicas importantes para clasificación con el contenido de humedad de los suelos derivados de cenizas volcánicas estudiados.
- Los suelos que contienen alófana presentan variabilidad en sus límites de consistencia, según el contenido de humedad inicial.
- El límite plástico de suelos volcánicos varía con el contenido de humedad, lo que perjudica la estimación de la humedad óptima y los niveles mínimos de humedad presentes en el sitio de análisis.
- Pacayas es el sitio con suelos de mayor contenido de alófana y de materia orgánica.
- Los suelos con mayor variabilidad de límites de consistencia según el contenido de humedad son los de Pacayas y Las Nubes.
- Los suelos no derivados de cenizas volcánicas de Río Grande y Matinilla no contienen porcentajes significativos de alófana y no presentan variación de sus propiedades con la humedad inicial.
- La sub-clasificación japonesa es adecuada para identificar suelos volcánicos alofánicos con el peor comportamiento (HH).
- Es importante que se evalúen esas propiedades físicas, en la condición de máximo grado de saturación debido a la sensibilidad con respecto a la humedad inicial.

6.2 Recomendaciones

- Usar el cono de penetración para obtener ambos límites de consistencia y minimizar errores dependiendo del experimentador, especialmente en suelos derivados de ceniza volcánica.
- Realizar la recolección de muestras en campo con el máximo grado de saturación posible en sitio, para una evaluación adecuada de las propiedades físicas y la sub-clasificación correcta de los suelos derivados de cenizas volcánicas.

- Se recomienda complementar la clasificación de suelos, según la carta de plasticidad de Casagrande utilizada por la **SUCS** y la **ASTM** con las cartas de clasificación japonesa para su correcta sub-clasificación.
- Los límites de consistencia varían para los suelos volcánicos, debido a los contenidos de alófana y halloysita y según su contenido de humedad inicial, por lo cual los ensayos tales como el proctor y CBR deben ser más cuidadosos, ya que varían según el contenido de humedad presente en el suelo.
- Usar los sistemas de sub-clasificación japoneses para diagnosticarlos suelos derivados de ceniza volcánica con el comportamiento potencialmente más peligroso (HH).
- Determinar el contenido de materia orgánica por calentamiento al horno, el cual es un método menos complejo y comparar resultados con el método utilizado por Kitagawa para eliminación de materia orgánica por Peróxido de Hidrogeno.
- Realizar investigación acerca de la variación en otras propiedades de los suelos, ocasionados con los cambios el contenido de humedad.
- Realizar un programa de estudio de investigación sobre el contenido de alófana (A_p) para validar el valor de humedad natural correspondiente a A_p=10%.
- Evaluar el cambio de humedad a lo largo del año en sitio y la variación de esta con la profundidad para identificar correctamente la problemática potencial del suelo.

6.3 Bibliografía y referencias

1. Aguilar Vega, Luis Alonso (1995). “Propiedades de ingeniería de suelos del área metropolitana a partir de pruebas de carga”. Proyecto Final de Graduación Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. 1995.
2. Alvarado, A & Meléndez, G (2001). “Suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de Costa Rica”. Asociación de Suelos de Costa Rica, CIDA, San José, Costa Rica. 2001.
3. American Society for Testing and Materials. Norma ASTM D-1140 (00). “Standard Test Methods for Amount of Material in Soils Finer Than the No. 200 (75 µm) Sieve”. 2000.
4. American Society for Testing and Materials. Norma ASTM D-2216(05). “Laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass”. 2005.
5. American Society for Testing and Materials. Norma ASTM D-2487(00). “Classification of soils for engineering purpose (Unified Soil Classification System)”. 2000.
6. American Society for Testing and Materials. Norma ASTM D-3418(05). “Liquid limit, Plastic limit and Plasticity Index of Soils”. 2005.
7. American Society for Testing and Materials. Norma ASTM D-422(63). “Test Method of Particle-size Analysis of Soils”. 1963 Reapproved 2007.
8. American Society for Testing and Materials. Norma ASTM D-854(06). “Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer”. 2006.
9. Asociación Costarricense de Geotecnia (1994). “Código de Cimentaciones de Costa Rica (CCCR)”. Editorial Tecnológica Costa Rica. San José, Costa Rica 1994.
10. Bardet, Jean Pierre (1997). “Experimental Soil Mechanics”. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, United States of America 1997.vid (1993). “Mecánica de Suelos”. McGraw Hill interamericana, Santa Fe, Bogota, Colombia, 1993.
11. Berry, Peter L. & Teid, Da
12. Bell, Frederick Gladstone (1981). “Engineering Properties of Soils and Rocks”. Butterworth & Co. (Publishers), England 1981.
13. Bergoeing, Jean Pierre (2007). “Geomorfología de Costa Rica”. Primera edición, Instituto Geográfico Nacional & Segunda edición Librería Francesa, San José, Costa Rica, 2007.
14. Bogantes González, Roy (1999). “Propuesta de zonificación geotécnica para el área metropolitana”. Proyecto Final de Graduación Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. 1999.

15. Brenes Guzmán, Hugo (2003). “Influencia de la compactación y la plasticidad en la permeabilidad de los suelos”. Proyecto Final de Graduación Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. 2003.
16. British Standard. BS-1377 (1990). Part 1(General requirements and sample preparation) & Part 2 (Classification tests). “Methods of test for soils for Civil engineering purposes”. Road Engineering Standards Policy Committee, 1990.
17. Chávez Rivera, Javier Enrique (1992). “Estudio del potencial de colapso de limos de baja plasticidad”. Proyecto de Graduación Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica 1992.
18. Cordero Meléndez, Marco Vinicio (1995). “Estudio sobre la capacidad de carga de limos de baja plasticidad”. Proyecto de Graduación Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica, 1995.
19. Cordero Sandí, Marcia (2004). “Guía de laboratorio, Mecánica de suelos I”. Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, Costa Rica. 2004.
20. Das, Braja (2001). “Principios de Ingeniería de Cimentaciones”. Internacional Thomson Editores, S.A. 2001.
21. Day, Robert W. (2006). “Foundation engineering handbook: design and construction with the 2006 international building code”. The McGraw-Hill Companies, Inc. 2006.
22. Hazell, Edmund (2005). “Rate effects in the fall-cone test”. Department of engineering Science, University of Oxford, 2005.
23. Holtz, R.D. & Kovacs, W.D. (1981) “An Introduction to Geotechnical Engineering”. Prentice-Hall, Inc. 1981.
24. Iglesias Pérez, Celso (1997). “Mecánica del Suelo”. EDITORIAL SÍNTESIS S.A. Valle Hermoso, Madrid, España, 1997.
25. Juárez Badillo Eulalio & Rico Rodríguez Alonso (1996). “Mecánica de Suelos tomo 1”. Editorial Limusa México. Tercera edición 1996.
26. Lacayo Elizondo, Luís Gonzalo (2004). “Suelos residuales de origen volcánico en el valle occidental de Costa Rica”. Proyecto de Graduación Escuela de ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. 2004.
27. Marc Pansu, Jacques Gautheyrou (2006). “Handbook of soil analysis, mineralogical organic and inorganic mehods”. Springer editorial, France 2006.

28. Mata Monge, Rodrigo (2005). “Análisis de asentamientos de losas de fundación sobre rellenos de suelo colapsable mediante la aplicación de un modelo físico”. Proyecto de Graduación Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. 2005.
29. Mitchell, K. James & Kenichi, Soga (2005). “Fundamentals of soil Behavior”. John Wiley & Sons, Inc. Third Edition. 2005.
30. Murillo Alfaro, Rolando (2003). “Caracterización geotécnica de los limos porosos de Santa Cruz, Turrialba”. Proyecto de Graduación Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. 2003.
31. Novoa Golfin, Carlos Roberto (2007). “Características geotécnicas de los suelos derivados de cenizas volcánicas (Andosoles) en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica”. Proyecto Final de Graduación Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica 2007.
32. Orozco Orozco, Erick Gerardo (2007). “Zonificación climática de Costa Rica para la gestión de obras viales”. Proyecto Final de Graduación Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica 2007.
33. Quesada Alpízar Leandra (2006). “Correlaciones de orden práctico entre el penetrómetro dinámico, el CBR y la capacidad soportante del suelo blandos en el Área Metropolitana”. Proyecto de Graduación Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. 2006.
34. Rollings, Marian P. & Rollings, Raydmond S. (1996). “Geotechnical materials in construction”. MacGraw Hill, United States. 1996.
35. Schofield Andrew & Wroth Peter (1968). “Critical State Soil Mechanics”. Lecturers in Engineering at Cambridge University, MacGraw Hill 1968.
36. Selva Salazar, Jorge (1985). “Características y propiedades de compactación de suelos de origen volcánico aplicado a diseño de carreteras”. Proyecto de Graduación Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, 1985.
37. Sprechmann, Peter (1984). “Manual de Geología de Costa Rica”. Editorial de la Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San José, Costa Rica nov. 1984.
38. Suárez Díaz, Jaime (1998). “Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales”. Universidad Industrial de Santander, Colombia. 1998.

39. Terzaghi, Karl & Peck, Ralph B. & Ghollamreza, Mesri (1996). “Soil mechanics in engineering practice”. First edition 1948, Second edition 1967, Third edition, John Wiley & Sons, Inc. 1996.
40. Valerio Salas, Oscar (2003). “Evaluación del método de aislamiento de humedad para estructuras livianas y caracterización geotécnica de las arcillas expansivas”. Proyecto Final de Graduación Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. 2003.
41. Zamora Murillo, Edgar (2000). “Evaluación geotécnica de los limos de la ciudad de San Ramón”. Proyecto Final de Graduación, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. 2000.

Revistas

1. Lizcano, A. Herrera M.C. y Santamarina J.C. (2001). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. A. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 6(2)179
2. Chen Fu, Hua (2000). “Soil engineering: testing, design, and remediation”. Edited by M.D. Morris CRC press, Boca Raton London New York Washington, D.C. 2000.
3. Fieldes, M. & Perrot, K.W. (1966). “The nature of allophane in soils”. New Zealand Journal of Science, Vol. 9, pp. 623-629
4. Kitagawa, Yasuo (1976). “Determination of Allophane and amorphous inorganic matter in clay fraction of soils (1) Allophane and Allophane-Halloysite mixture”. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Japanese Society of soil science and plant nutrition 1976.
5. Kitagawa, Yasuo (1977). “Determination of Allophane and amorphous inorganic matter in soils”. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Soils and Foundation 1977.
6. Da Silveira, Luis Carlos S. (2001). “Ensayo de Cono de Penetración como Método Alternativo para Determinar la Plasticidad en Suelos”. Cobenge, ABMS 2001.
7. Moroto, Nobuchika (1993). “Basic properties of Loam soils in Aomori Prefecture, Japan”. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 33, No.2, 35-46, Soils and Foundation, june 1993.

8. Serge, Leroueil & Le Bihan, Jean Pierre (1996). "Liquid limits and fall cone". Canadian Geotechnical Journal, NRC Canada 1996.
9. So, Ei-Kon (1991). "Influence of Allophane content engineering properties of volcanic soils". Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, The Sociecity of Materials Science, Japan, Feb. 1991.
10. So, Ei-Kon (1998). "Statistical correlation between Allophane content and index properties for volcanic cohesive soil". Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 38, No. 4, 85-93, Soils and Foundation, December 1998.
11. Tao, Wei Feng (2001). "A linear log(d) – log(w) model for the determination of consistency limits of soils". Canadian Geotechnical Journal, NRC Canada 2001.

Referencias electrónicas (Páginas Web)

1. Hillier, Steve. Environmental Science Group, Macaulay Institute, Craigiebuckler, Aberdeen, AB15 8QH. Scotland. The Clay Minerals Society, United States of America (1963) and The Mineralogical Society, United Kingdom. http://www.minersoc.org/pages/gallery/claypix/index.html consultado el 8/12/2009.
2. García Romero, Emilia. Estructura de los filosilicatos. Universidad Complutense de Madrid (2009), (España). http://www.ucm.es/info/crismine/Marisa/Estructura.htm consultado el 22/02/09.
3. NIII Scholarly and Academic Information Navigator "CiNii" (2009). National Institute of Informatics (Japan). http://ci.nii.ac.jp/en consultado el 14/07/2009.
4. Guimarães, L. & Seifert, G. Aluminosilicate Nanotubes, Imogolite and Halloysite. International Conference on Advanced in Materials. Rio de Janeiro, Brazil. http://www.icam2009.com/submission/autor/arquivos/BB583.pdf consultado el 05/01/2010.

ANEXO I

Caracterización de los sitios estudiados

1. Pacayas, cantón (Alvarado), provincia (Cartago)

Figura A1.Extracción de muestras para el sitio de Pacayas

Fuente: el autor (2008)

2. Río Grande, cantón (Turrúcares), provincia (Alajuela)

Figura A2. Extracción de muestras para el sitio de Río Grande

Fuente: el autor (2008)

3. Matinilla de Salitral, cantón (Santa Ana), provincia (San José)

Figura A3. Perfil estratigráfico para el sitio de Matinilla

Fuente: el autor (2008)

4. Patio de Agua, cantón (Coronado), provincia (San José)

Figura A4. Perfil estratigráfico para el sitio de Patio de Agua, Coronado

Fuente: el autor (2008)

5. Las Nubes, cantón (Coronado), provincia (San José)

Figura A5. Perfil estratigráfico para el sitio de Las Nubes, Coronado

Fuente: el autor (2008)

ANEXO II

Pruebas de laboratorio

Humedad higroscópica

Tabla A1. Prueba de contenido de humedad higroscópica a muestras secas durante más de 100 días.

Inicia: 30/09/2009 Termina: 2/10/2009

seco en cámara al vacio en laboratorio de asfaltos 1/10/2009								
Lugar	Capsula	$W_{(capsula)}$	$W_{(suelo\ húmedo)}$	$W_{(suelo\ húmedo + capsula)}$	$W_{(suelo\ seco + capsula)}$	$W_{(agua)}$	$W_{(suelo\ seco)}$	%w
Pacayas	8	24,8157	23,4901	48,3058	44,3518	3,95	19,54	19,94
Río Grande	12	25,5805	20,9648	46,5453	45,5537	0,99	19,97	4,96
Matinilla	14	24,4758	20,6256	45,1014	44,1933	0,91	19,72	4,61
Patio de agua	(5-4)	21,5339	45,4818	67,0157	64,8968	2,12	43,36	4,89
Las Nubes	100	24,9243	30,4853	55,4096	52,0729	3,34	27,15	12,29
Moravia	PG	26,3004	39,6637	65,9641	64,1151	1,849	37,81	4,89

Contenido de materia orgánica con Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2)

Tabla A2. Contenido de materia orgánica en porcentaje de pérdida de peso Eliminación por medio de peróxido de Hidrógeno

Fecha inicio: 30/10/2009 Fecha conclusión: 2/10/2009

Lugar	Beaker	W_{beaker} (g)	$W_{beaker+muestra\ húmeda}$ (g)	$W_{suelo\ húmedo}$ (g)	$W_{beaker+suelo\ seco}$ (g)	$W_{suelo\ seco\ tratado}$ (g)	%Materia orgánica
Pacayas	A	109,7755	112,6912	2,9157	111,8855	2,1100	13
Río Grande	B	106,7014	109,2664	2,565	109,0804	2,3790	3
Matinilla	C	111,6916	114,2403	2,5487	114,1462	2,4546	1
Patio de Agua	D	110,3601	113,3788	3,0187	113,0589	2,6988	6
Las Nubes	E	108,0734	111,0385	2,9651	*	*	*
La Trinidad	F	104,7325	107,247	2,5145	*	*	*

(*) Datos que no fueron posibles de obtener en el laboratorio.

Contenido de alófana

Tabla A3. Peso inicial de la muestra y la capsula que la contiene

Lugar	Beaker	W_{beaker} (g)	$W_{beaker+muestra\ inicial}$ (g)	$W_{suelo\ seco}$ (g)
Pacayas	1	141,8554	142,75	0,8946
Río Grande	2	147,0992	148,8	1,7008
Matinilla	3	108,5725	109,99	1,4175
Patio de Agua	4	107,3820	108,97	1,588
Las Nubes	5	110,2840	111,69	1,406
La Trinidad	6	108,1162	109,62	1,5038

Fecha inicio: 9/10/2009 Fecha conclusión:6/12/2009

Tabla A4. Resultados de laboratorio para la prueba de contenido de alófana y materia inorgánica amorfa

Lugar	Beaker	$W_{beaker+suelo\ seco\ 1}$ (g)	$W_{suelo\ seco\ 1}$ (g)	$W_{beaker+suelo\ seco\ 2}$ (g)	$W_{suelo\ seco\ 2}$ (g)	$W_{beaker+suelo\ seco\ 3}$ (g)	$W_{suelo\ seco\ 3}$ (g)	$W_{beaker+suelo\ seco\ 4}$ (g)	$W_{suelo\ seco\ 4}$ (g)
Pacayas	1	142,20	0,3446	142,11	0,2546	142,1	0,2446	142,09	0,2346
Río Grande	2	148,58	1,4808	148,47	1,3708	148,35	1,2508	148,25	1,1508
Matinilla	3	109,80	1,2275	109,64	1,0675	109,52	0,9475	109,43	0,8575
Patio de Agua	4	108,64	1,2580	108,52	1,1380	108,48	1,0980	108,44	1,0580
Las Nubes	5	111,38	1,0960	111,26	0,9760	111,21	0,9260	111,15	0,8660
La Trinidad	6	109,18	1,0638	109,01	0,8938	108,94	0,8238	108,86	0,7438

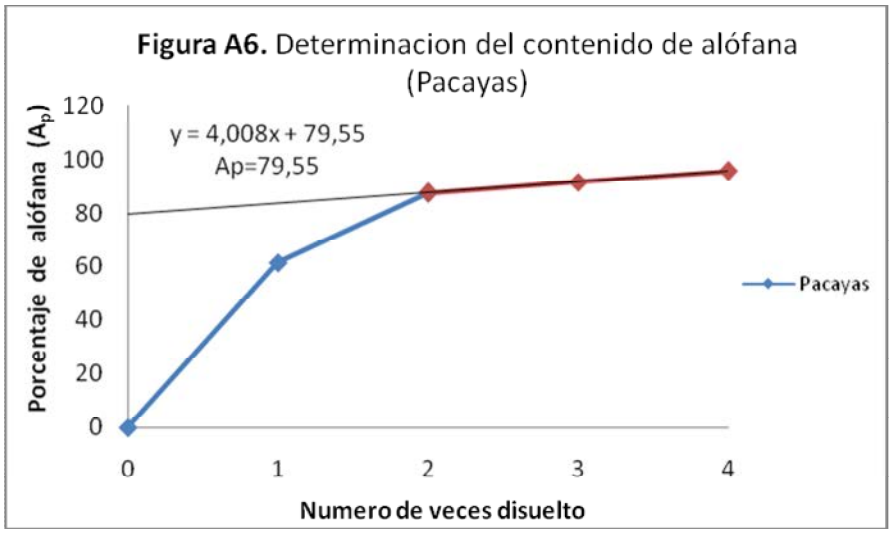


Figura A6. Determinacion del contenido de alófana (Pacayas)
y = 4,008x + 79,55
Ap=79,55
Porcentaje de alófana (Ap)
120
100
80
60
40
20
0
0
1
2
3
4
Numero de veces disuelto
Pacayas

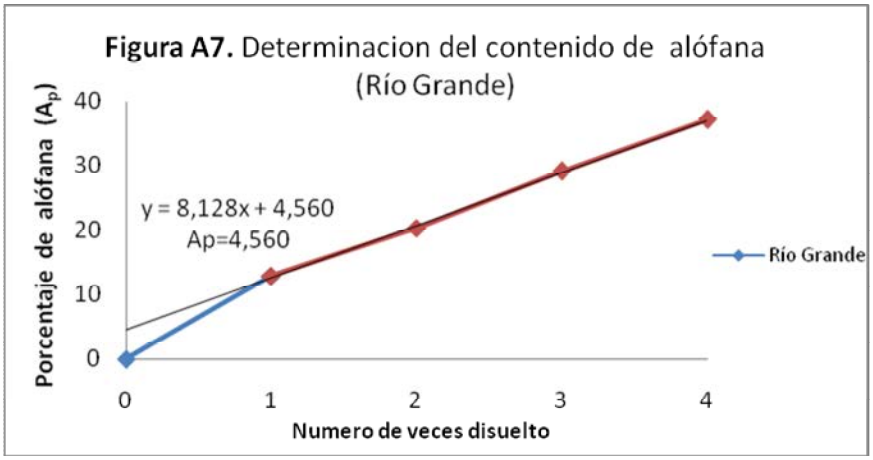


Figura A7. Determinacion del contenido de alófana (Río Grande)
y = 8,128x + 4,560
Ap=4,560
Porcentaje de alófana (Ap)
40
30
20
10
0
0
1
2
3
4
Numero de veces disuelto
Río Grande

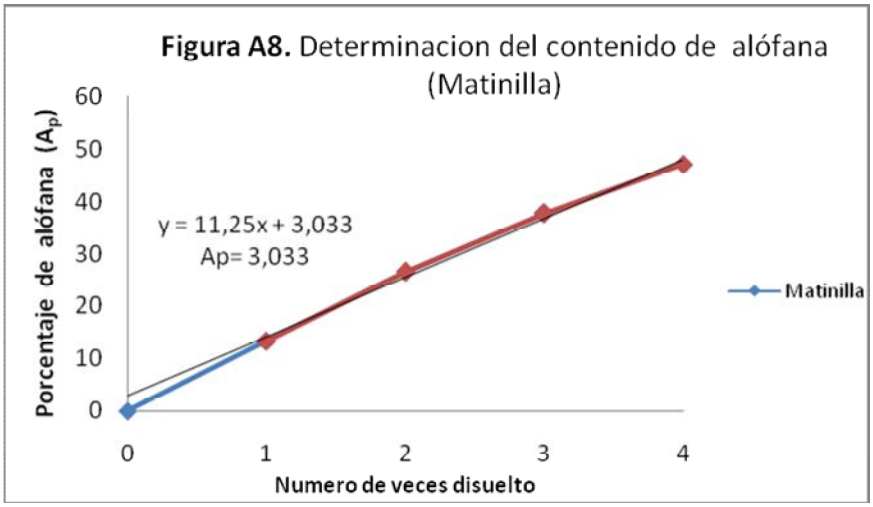


Figura A8. Determinacion del contenido de alófana (Matinilla)
y = 11,25x + 3,033
Ap= 3,033
Porcentaje de alófana (Ap)
60
50
40
30
20
10
0
0
1
2
3
4
Numero de veces disuelto
Matinilla

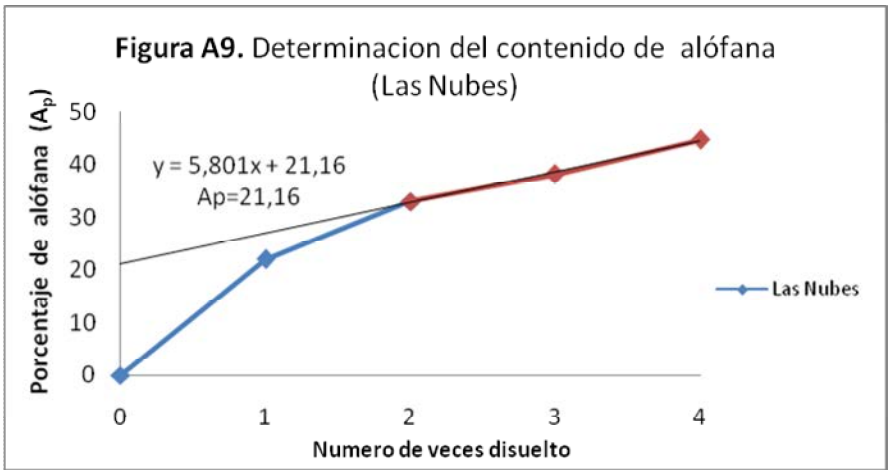


Figura A9. Determinacion del contenido de alófana
(Las Nubes)
Porcentaje de alófana (Ap)
y = 5,801x + 21,16
Ap=21,16
Las Nubes
Numero de veces disuelto

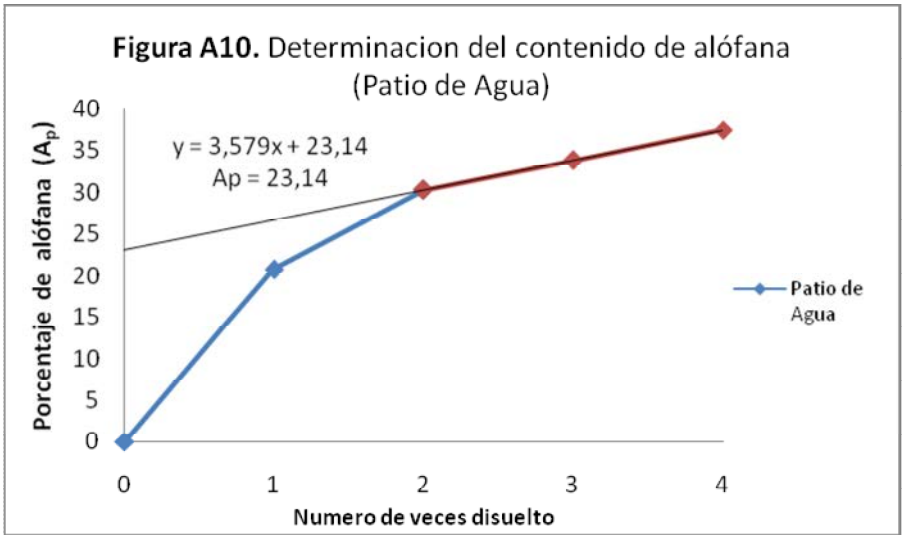


Figura A10. Determinacion del contenido de alófana
(Patio de Agua)
Porcentaje de alófana (Ap)
y = 3,579x + 23,14
Ap = 23,14
Patio de Agua
Numero de veces disuelto

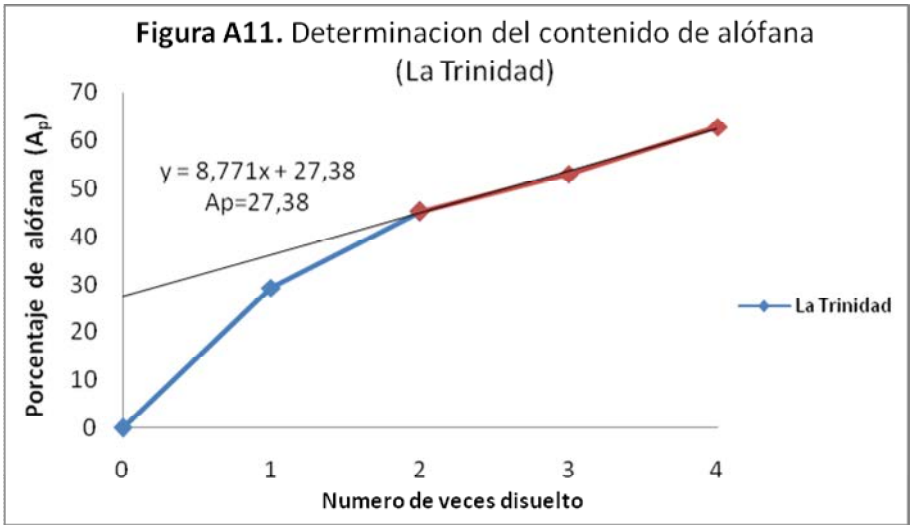


Figura A11. Determinacion del contenido de alófana
(La Trinidad)
Porcentaje de alófana (Ap)
y = 8,771x + 27,38
Ap=27,38
La Trinidad
Numero de veces disuelto

Pruebas de contenido de humedad natural

Tabla A5. Contenido de humedad (in situ)

Prueba para determinar contenido de humedad (ASTM D2216)					
Lugares	Pacayas Prof. (2m)	Río Grande Prof. (2m)	Matinilla Prof. (2m)	Patio de Agua Prof. (5m)	Las Nubes Prof. (5m)
Capsula	A-8	B-29	B-12	B-12	B-13
Fecha de la prueba	31/10/2008	14/11/2008	24/11/2008	3/12/2008	3/12/2008
$W_{capsula}$ (g)	75,69	54,39	54,24	54,28	51,6
$W_{(capsula + suelo húmedo)}$ (g)	261,05	316,01	221,26	262,39	266,42
$W_{(capsula + suelo seco)}$ (g)	154,33	236,69	177,33	188,94	163,97
$W_{(suelo seco)}$ (g)	78,64	182,3	123,09	134,66	112,37
W_{agua} (g)	106,72	79,32	43,93	73,45	102,45
humedad natural (%w)	135,71	43,51	35,69	54,54	91,17

1. Pacayas (Cartago)

Tabla A6. Gravedad específica

Prueba: Gravedad específica			Fecha: 13/11/08		
Localización: Pacayas			Profundidad: 1.6m		
Muestra #1: Tesis Mauricio Núñez López			Orificio:		
Descripción del material: material café claro, con pequeñas raices (muestras inalterada)					
DETERMINACIÓN	1	2	3	4	
Picnometro #	23	23	19	19	
Peso del picnómetro con tapon (g)	110,59	110,58	108,64	108,64	
W_1 = peso del picnómetro + agua (g)	359,668	359,668	357,72	357,72	
W_2 = peso del picnómetro + agua + suelo (g)	379,35	381,94	380,23	378,42	
Capsula#	C5-#198	P-22	P-43	B34	
Peso de la capsula (g)	66,3	104,54	123,24	53,32	
Peso de la capsula + suelo seco (g)	98,71	140,59	159,56	86,73	
Ws = peso del suelo seco (g)	32,41	36,05	36,32	33,41	
T = temperatura (^{0}C)	23	23	23	23	
Factor de corrección K	0,99933	0,99933	0,99933	0,99933	
G_s = gravedad específica del suelo	2,54	2,61	2,63	2,63	
Método de Prueba	w = 143%	w = 19%			

Humedad natural $(\%w = 1.43)$

$$w_{suelo\ corregido} = \left(1 + \frac{w}{100}\right) * w_{seco} = \left(1 + \frac{143}{100}\right) * 35g$$

$$w_{suelo\ corregido} = 85.1g$$

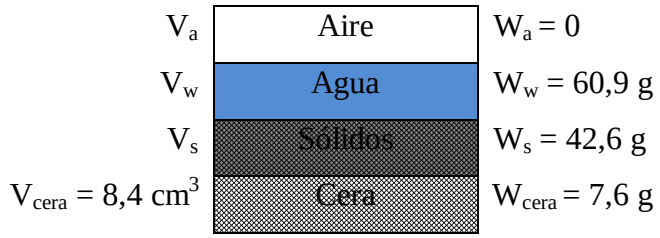
$$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_1 - W_2}$$

La prueba se realiza a una temperatura única de 23 ^{0}C, por lo cual es necesario que equilibre la temperatura del contenido del picnómetro, para poder tomar la lectura de medición. Esta medición es muy sensible al error, por lo cual debe ser realizada con cuidado.

Tabla A7. Densidad (in situ)

Localización: Pacayas, Cartago. (Fecha: 12/11/2008)			
Descripción del suelo: suelo color café, presencia de raíces (Profundidad: 1.6m)			
Pesos específicos-densidad por volumen de agua desplazado			
Método de prueba: BS 1377: Parte 2: 1990: sección 7.4			
Densidad del Agua:	γ_{agua} = 1 g/cm^3	Densidad de la cera:	γ_{cera} = 0,9008 g/cm^3
Espécimen de referencia: Queso Inalterado		Volumen total (cm^3)	98,0
Masa de suelo masiva (g)	103,45	$V_{parafina\ desplazado}$ (cm^3)	8,4
Masa del suelo masiva + Parafina (g)	111,05	$V_{desplazado\ por\ el\ suelo}$ (cm^3)	89,6
Masa de la Parafina (g)	7,6	ρ_T (Ton/cm^3)	1,155
Masa del vaso (g)	411,17	ρ_d (Ton/cm^3)	0,475
Masa vaso + agua al nivel de lectura (g)	636,87	Contenido de humedad	Queso inalterado
Masa de agua al nivel de lectura (g)	225,7	Capsula #	B-29
Masa de suelo masiva + vaso + agua al mismo nivel de lectura (g)	649,92	$W_{capsula}$ (g)	54,43
Masa del suelo masiva + agua (g) al mismo nivel de lectura	238,75	$W_{suelo\ húmedo + capsula}$ (g)	198,99
Masa sumergida de suelo (g) Masa del suelo masiva + cera	13,05	$W_{suelo\ seco + capsula}$ (g)	113,86
%Saturación	84,4	%w	143,24

Diagrama de fases (datos que se obtienen en el laboratorio o en campo con equipo especial



Calculo de masas:

$$W = W_s + W_w + W_{cera} = 111,05\ g \Rightarrow W_T = W_s + W_w = 103,45\ g$$

$$W_s = \left(\frac{W_T}{1 + \%w}\right) = \left(\frac{103,45\ g}{1 + 1,43}\right) \quad \Rightarrow W_s = 42,6\ g$$

$$W_w = W_T - W_s = 103,45\ g - 42,6\ g \Rightarrow W_w = 60,9\ g$$

Calculo de volúmenes:

$$V_s = \frac{W_s}{(G_s)(\gamma_w)} = \frac{42,6\ g}{(2,54)\left(1\frac{g}{cm^3}\right)} = 16,77\ cm^3$$

$$V = V_s + V_w + V_a + V_{cera}$$

$$V_v = V_w + V_a \quad \Rightarrow V = V_s + V_v + V_{cera}$$

$$V = \frac{(W - W_{sumergido})}{\gamma_w} = \frac{(111,05\ g - 13,75\ g)}{\frac{1\ g}{cm^3}} \quad \Rightarrow\ V = 97,3\ cm^3$$

$$V_T = V - V_{cera} = 97,3\ cm^3 - 8,4\ cm^3 \quad \Rightarrow\ V_T = 88,9\ cm^3$$

$$V_a = V_T - V_s - V_w = 88,9\ cm^3 - 16,77\ cm^3 - 60,9\ cm^3 \quad \Rightarrow\ V_a = 11,23\ cm^3$$

Calculo de densidades, saturación y razón de vacios:

$$\gamma_T = \frac{W_T}{V_T} = \frac{103,45\ g}{88,9\ cm^3} = 1,164\frac{g}{cm^3}$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_T} = \frac{42,6\ g}{88,9\ cm^3} = 0,479\frac{g}{cm^3}$$

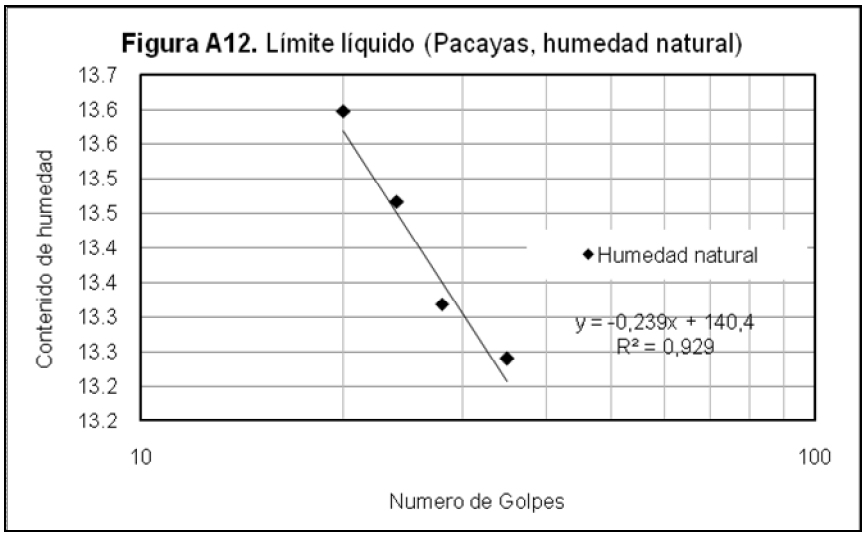
$$S = \left(\frac{V_W}{V_V}\right) * 100 = \left(\frac{60,9\ cm^3}{72,13\ cm^3}\right) * 100 \Rightarrow S = 84,4\%$$

$$e = \frac{\%w * G_s}{\%S} = \frac{1,43 * 2,54}{0,844} \Rightarrow e = 4,30$$

- Análisis de los límites de consistencia (Pacayas)

Tabla A8. Límites de consistencia por el método ASTM D4318 (humedad natural)

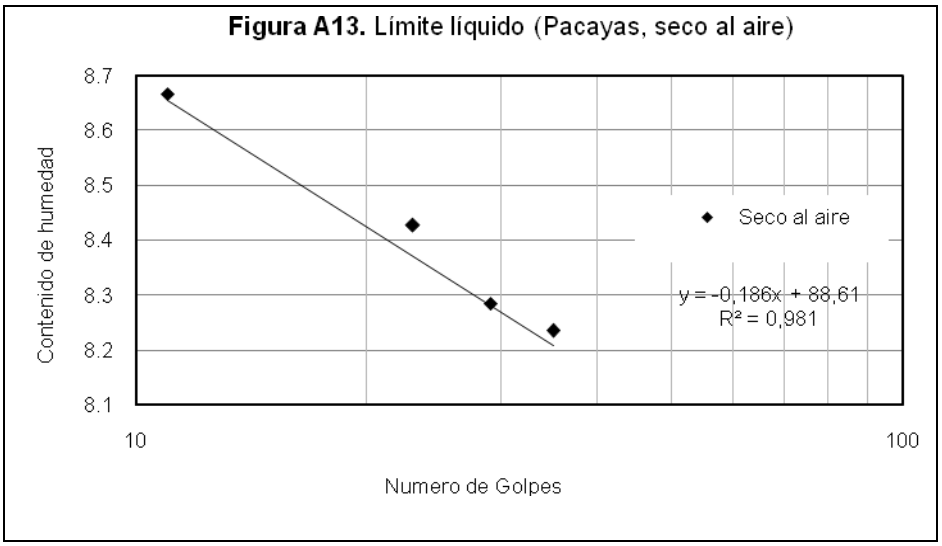
LÍMITE LÍQUIDO						LÍMITE PLÁSTICO		
DETERMINACIÓN No.	L06	L07	L08	L09		DETERMINACIÓN No.	1	2
No. DE GOLPES	35	28	24	20		RECIPIENTE No.	L10	L11
Wc + Ww (g)	27,22	25,95	25,63	25,14		Wc + Ww (g)	16,29	16,97
Wc + Ws (g)	17,74	17,08	17,20	16,94		Wc + Ws (g)	13,47	13,87
Ww	9,48	8,87	8,43	8,20		Ww	2,82	3,10
Wc	10,58	10,42	10,94	10,91		Wc	10,81	10,95
Ws	7,16	6,66	6,26	6,03		Ws	2,66	2,92
% W	132,4	133,2	134,7	136,0		% W	106,02	106,16
						PROMEDIO		106,1



w = 143 % & IL=1,30 &LL=134,5% & LP=106,1% & IP=28,4%

Tabla A9. Límites de consistencia por el método ASTM D4318 (seco al aire)

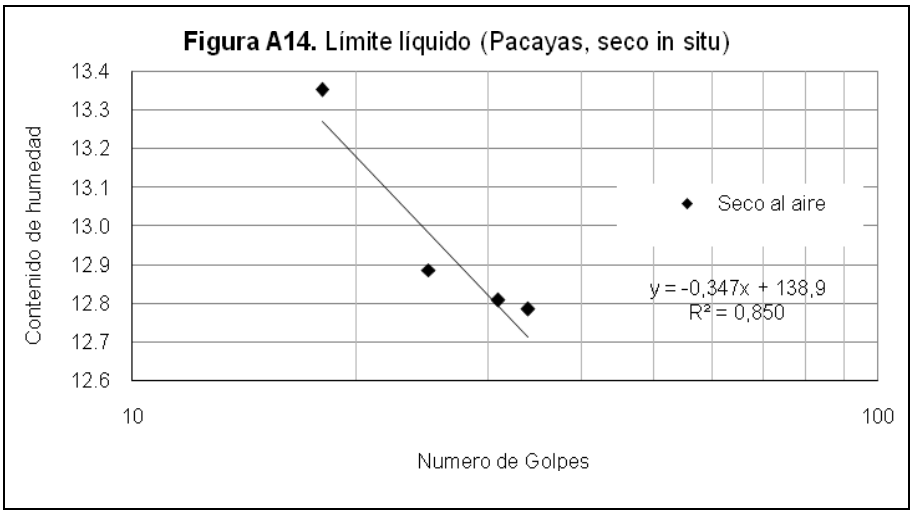
LÍMITE LÍQUIDO						LÍMITE PLÁSTICO		
DETERMINACIÓN No.	L16	L17	L18	L19		DETERMINACIÓN No.	1	2
No. DE GOLPES	35	29	23	11		RECIPIENTE No.	L13	L14
Wc + Ww (g)	25,31	23,94	25,19	24,24		Wc + Ww (g)	16,46	17,30
Wc + Ws (g)	18,87	17,95	18,60	18,00		Wc + Ws (g)	14,26	14,96
Ww	6,44	5,99	6,59	6,24		Ww	2,20	2,34
Wc	11,05	10,72	10,78	10,80		Wc	10,82	11,26
Ws	7,82	7,23	7,82	7,20		Ws	3,44	3,70
% W	82,4	82,8	84,3	86,7		% W	63,95	63,24
						PROMEDIO		63,6



%w = 21,21 & IL = -2,08 & LL=83,94 & LP=63,6 & IP=20,3

Tabla A10. Límites de consistencia por el método ASTM D4318 (seco "in situ")

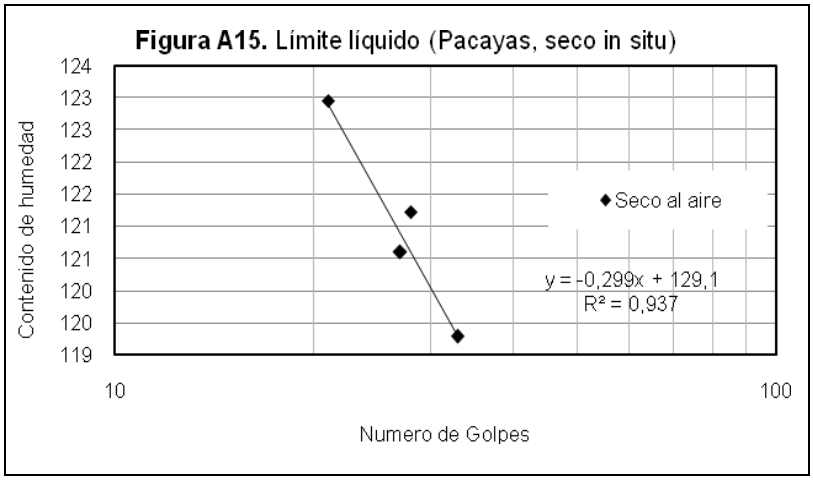
LÍMITE LÍQUIDO						LÍMITE PLÁSTICO		
DETERMINACIÓN No.	L31	L32	L33	L34		DETERMINACIÓN No.	1	2
No. DE GOLPES	34	31	25	18		RECIPIENTE No.	L21	L22
Wc + Ww (g)	18,09	17,06	17,88	19,56		Wc + Ww (g)	14,92	15,57
Wc + Ws (g)	14,05	13,41	13,95	14,54		Wc + Ws (g)	12,97	13,38
Ww	4,04	3,65	3,93	5,02		Ww	1,95	2,19
Wc	10,89	10,56	10,90	10,78		Wc	10,96	11,13
Ws	3,16	2,85	3,05	3,76		Ws	2,01	2,25
% W	127,8	128,1	128,9	133,5		% W	97,01	97,33
						PROMEDIO		97,2



%w = 124,03 & IL = 0,77 (seco in situ) & LL=130,27 & LP=97,2 & IP=33,1

Tabla A11. Límites de consistencia por el método ASTM D4318 (seco al aire)

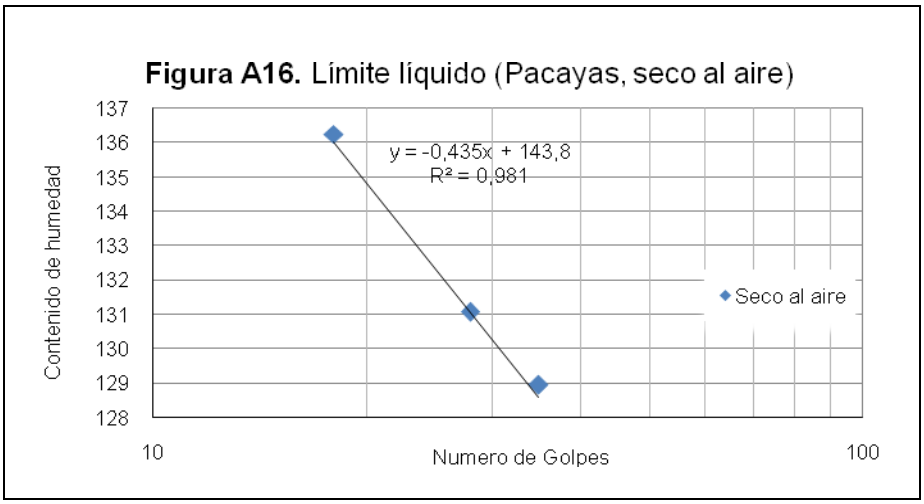
LÍMITE LÍQUIDO						LÍMITE PLÁSTICO		
DETERMINACIÓN No.	L02	L03	L04	L05		DETERMINACIÓN No.	1	2
No. DE GOLPES	33	28	27	21		RECIPIENTE No.	L08	L09
Wc + Ww (g)	23,10	21,07	20,20	21,42		Wc + Ww (g)	15,93	16,60
Wc + Ws (g)	16,42	15,53	14,93	15,42		Wc + Ws (g)	13,51	13,85
Ww	6,68	5,54	5,27	6,00		Ww	2,42	2,75
Wc	10,82	10,96	10,56	10,54		Wc	10,92	10,91
Ws	5,60	4,57	4,37	4,88		Ws	2,59	2,94
% W	119,3	121,2	120,6	123,0		% W	93,44	93,54
						PROMEDIO		93,5



%w = 91,2 & IL = -0,09 (seco al aire) & LL=119,7 & LP=93,5 & IP=26,2

Tabla A12. Límites de consistencia por el método ASTM D4318 (seco al aire)

LÍMITE LÍQUIDO					LÍMITE PLÁSTICO		
DETERMINACIÓN No.	L33	L37	L38		DETERMINACIÓN No.	1	2
No. DE GOLPES	35	28	18		RECIPIENTE No.	L39	L14
Wc + Ww (g)	23,63	23,65	23,16		Wc + Ww (g)	17,45	17,85
Wc + Ws (g)	16,46	16,48	16,02		Wc + Ws (g)	14,32	14,57
Ww	7,17	7,17	7,14		Ww	3,13	3,28
Wc	10,90	11,01	10,78		Wc	11,18	11,27
Ws	5,56	5,47	5,24		Ws	3,14	3,30
% W	129,0	131,1	136,3		% W	99,68	99,39
					PROMEDIO		99,5



%w=96,25 & IL= -0,10 (seco al aire) & LL=133,0 & LP=100 & IP=33

Tabla A13. Análisis de límites de consistencia mediante caída de cono (humedad natural)

Límite líquido para Pacayas				
Determinación	1	2	3	4
Penetración promedio	5,05	14,9	19,10	25,00
Capsula	L18	L19	L21	L22
$W_{capsula}$	10,83	10,81	10,96	11,12
$W_{suelo\ húmedo + capsula}$	24,13	24,84	31,24	26,55
$W_{suelo\ seco + capsula}$	16,56	16,56	19,02	17,08
W_{agua}	7,57	8,28	12,22	9,47
$W_{suelo\ seco}$	5,73	5,75	8,06	5,96
%w	132,1	144,0	151,6	158,9

W =139,8% & LL = 150,93% & LP = 118,5% & IP = 32,43%

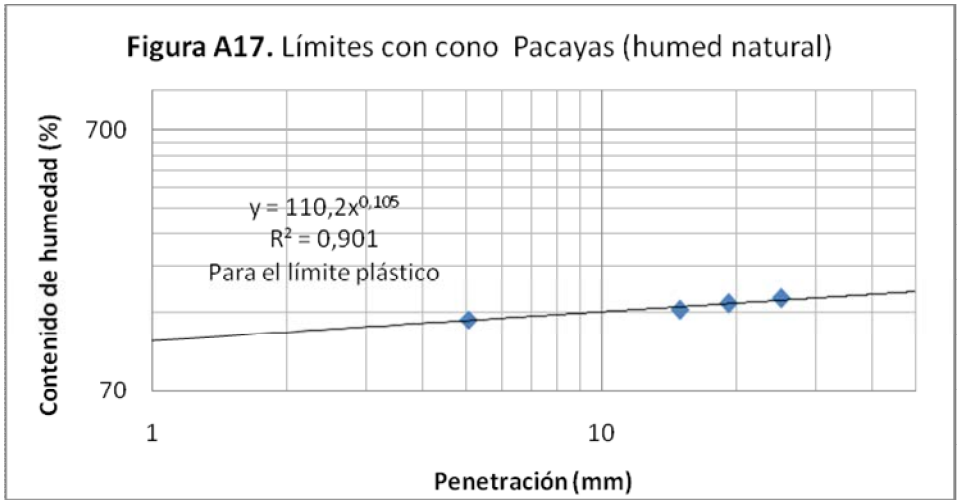


Tabla A14. Análisis de límites de consistencia mediante caída de cono (seco al aire)

Límite líquido para Pacayas				
Determinación	1	2	3	4
Penetración promedio	5,02	16,50	21,80	27,50
Capsula	L18	L19	L20	L21
$W_{capsula}$	10,83	10,81	10,95	10,96
$W_{suelo\ húmedo\ +\ capsula}$	27,36	24,84	31,05	28,13
$W_{suelo\ seco\ +\ capsula}$	21,15	18,81	22,35	20,67
W_{agua}	6,21	6,03	8,7	7,46
$W_{suelo\ seco}$	10,32	8,01	11,4	9,71
%w	60,2	75,4	76,3	76,8

W =19% & LL = 75,62% & LP = 52,17% & IP = 22,13%

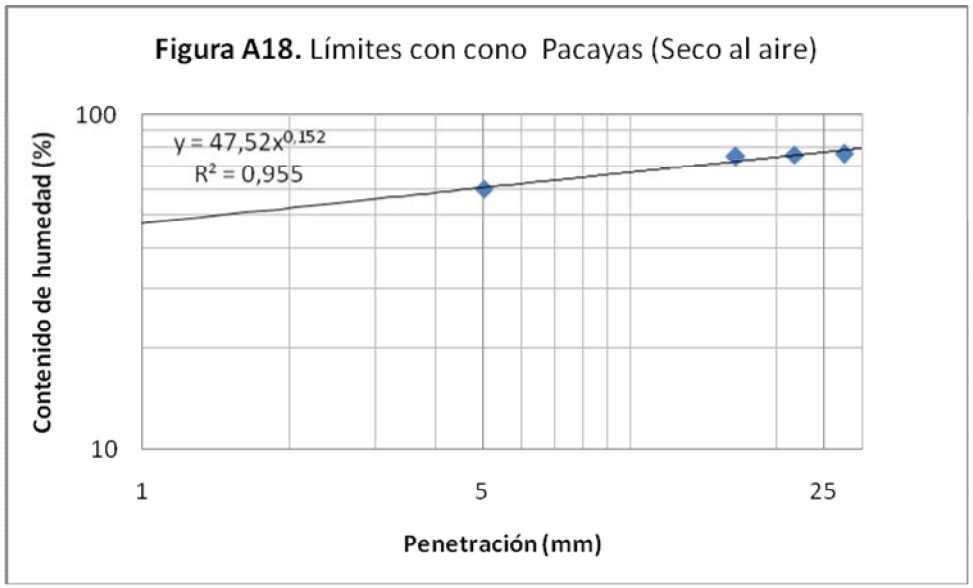


Tabla A15. Análisis de límites de consistencia mediante caída de cono (seco al aire)

Límite líquido sitio: Pacayas				
Determinación	1	2	3	4
Penetración promedio	7,03	13,48	16,10	19,90
Capsula	L18	L19	L21	L22
$W_{capsula}$	10,83	10,81	10,96	11,12
$W_{suelo\ húmedo\ +\ capsula}$	22,41	22,84	21,79	22,77
$W_{suelo\ seco\ +\ capsula}$	15,82	15,82	15,41	15,83
W_{agua}	6,59	7,02	6,38	6,94
$W_{suelo\ seco}$	4,99	5,01	4,45	4,71
%w	132,1	140,1	143,4	147,3

W =105,7% & LL = 148,84% & LP = 116,1% & IP = 32,77%

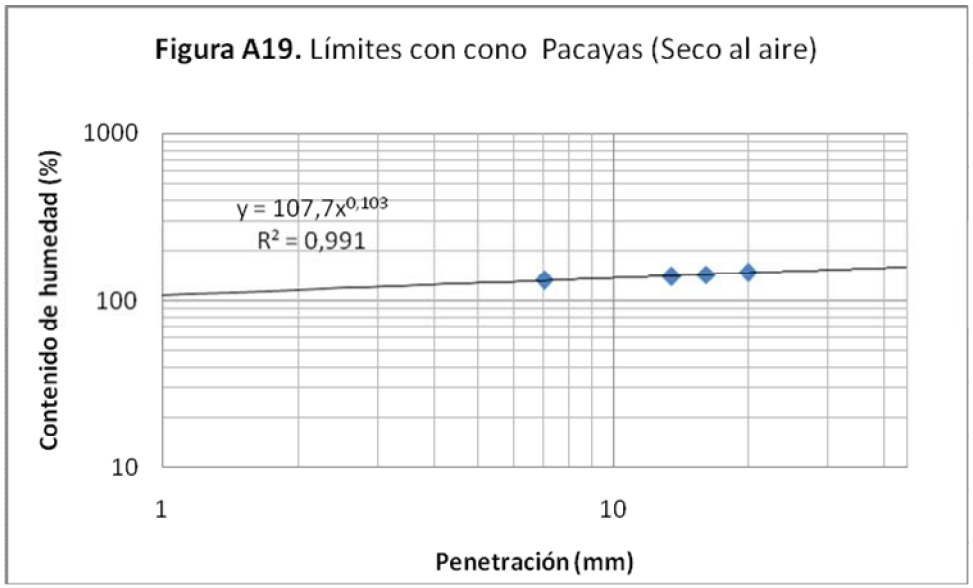
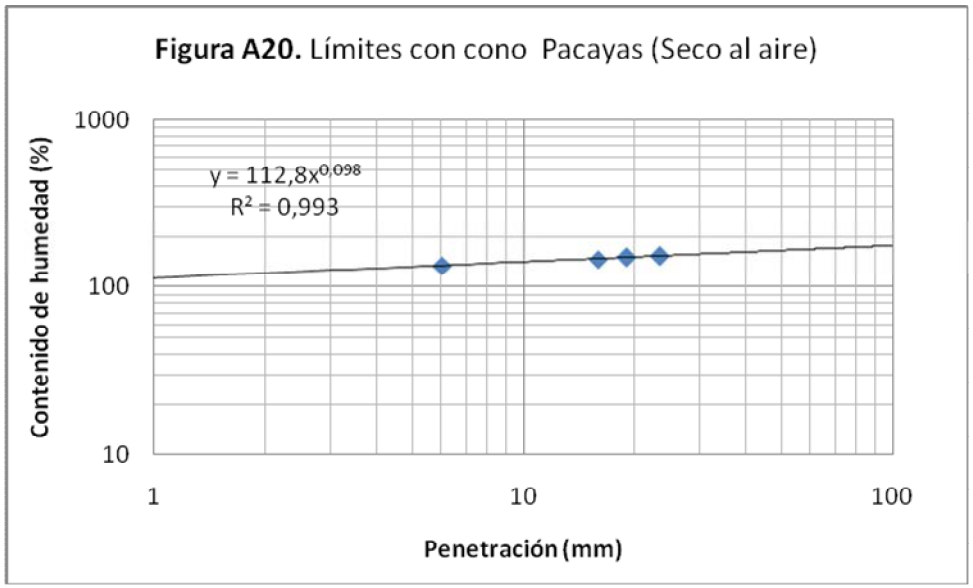


Tabla A16. Análisis de límites de consistencia mediante caída de cono (seco al aire)

Límite líquido sitio: Pacayas				
Determinación	1	2	3	4
Penetración promedio	6,02	15,92	19,07	23,50
Capsula	L23	L24	L25	L26
$W_{capsula}$	10,65	10,89	10,71	10,43
$W_{suelo\ húmedo + capsula}$	22,13	22,04	23,69	25,39
$W_{suelo\ seco + capsula}$	15,54	15,4	15,87	16,32
W_{agua}	6,59	6,64	7,82	9,07
$W_{suelo\ seco}$	4,89	4,51	5,16	5,89
%w	134,8	147,2	151,6	154,0

W =94,1% & LL = 151,2% & LP = 120,73% & IP = 30,47%



- Análisis Granulométrico Pacayas

Análisis de la parte gruesa, retenida y lavada en la malla #200

Fecha inicial: 26/01/2009 Fecha final: 29/01/2009

Localización: Pacayas

Prueba: Granulometría de gruesos

Método: Lavado en la malla #200 y secado al horno para tamizar.

Peso inicial (g): 198.76 Peso final (g): 99.59

Tabla A17. Granulometría de partículas gruesas

Malla	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	%Retenido	%Ret. Acum.	%Pas. Acum.
#4	4,75	0	0,0	0,0	100,0
#10	2	0,09	0,1	0,1	99,9
#20	0,84	0,41	0,4	0,5	99,5
#40	0,425	3,28	3,3	3,8	96,2
#60	0,25	8,19	8,3	12,2	87,8
#100	0,15	19,46	19,8	32,0	68,0
#140	0,106	28,68	29,2	61,2	38,8
#200	0,075	33,79	34,4	95,6	4,4
charola		4,34	4,4	100,0	
Total		98,24			
Perdidas		1,35			

Tabla A18. Análisis de las partículas finas que pasan la malla #200 mediante el hidrómetro (27/01/2009)

Tiempo transcurrido (min.)	Temp. (^{0}C)	Lectura del hidrómetro	Corrección por Temp.	Lectura corregida	R	% más fino	L(cm)	L/t	K	D(mm)
0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	26,5	12	1,825	9,83	13,00	23,9	14,2	7,10	0,013045	0,0348
5	26,5	9	1,825	6,83	10,00	16,6	14,7	2,94	0,013045	0,0224
15	26,4	6	1,79	3,79	7,00	9,2	15,2	1,013	0,01306	0,01315
30	26,4	5,5	1,79	3,29	6,50	8,0	15,25	0,508	0,01306	0,00931
60	26,3	4,5	1,755	2,26	5,50	5,5	15,4	0,257	0,013075	0,00662
250	25,8	4	1,58	1,58	5,00	3,8	15,5	0,0620	0,01315	0,00327
1440	25,6	3,5	1,51	1,01	4,50	2,5	15,55	0,0108	0,01318	0,001370

Peso inicial (g): 42,0 (50g corregido) Peso final (g): 19,85

Porcentaje de Finos: 44,6

Malla	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	%Retenido	%Ret. Acum.	%Pas. Acum.
#4	4,75	0	0,0	0,0	100,0
#10	2	0	0,0	0,0	100,0
#20	0,84	0,54	1,3	1,3	98,7
#40	0,425	1,76	4,2	5,5	94,5
#60	0,25	2,86	6,8	12,3	87,7
#100	0,15	4,29	10,2	22,5	77,5
#140	0,106	4,44	10,6	33,1	66,9
#200	0,075	4,84	11,5	44,6	55,4
charola		1,12		Perdidas	0
Total		19,85		Finos	55,4

2. Río Grande (Alajuela)

Tabla A19. Gravedad específica

Prueba: Gravedad especifica			Fecha: 19/11/08		
Localización: Río Grande			Profundidad: 1.6m		
Muestra #2: Tesis Mauricio Núñez López			Orífício:		
Descripción del material: Material rojizo oscuro, compacto y con muy pocas raices.					
DETERMINACION	1	2	3	4	
Picnómetro #	23	19	23	23	
Peso del picnómetro con tapon (g)	110,59	110,59	110,58	110,58	
W_1 = peso del picnómetro + agua (g)	359,668	357,72	359,668	359,668	
W_2 = peso del picnómetro + agua + suelo (g)	383,25	382,1	384,53	383,34	
Capsula#	B-27	B-28	B-29	B-30	
Peso de la capsula (g)	54,4	62,19	61,85	96,15	
Peso de la capsula + suelo seco (g)	92,66	100,63	101,19	133,52	
Ws = peso del suelo seco (g)	38,26	38,44	39,34	37,37	
T = temperatura (^{0}C)	23	23	23	23	
Factor de corrección K	0,99933	0,99933	0,99933	0,99933	
G_s = gravedad específica del suelo	2,60	2,73	2,72	2,73	
Método de Prueba	Humedad natural	Seco al aire			

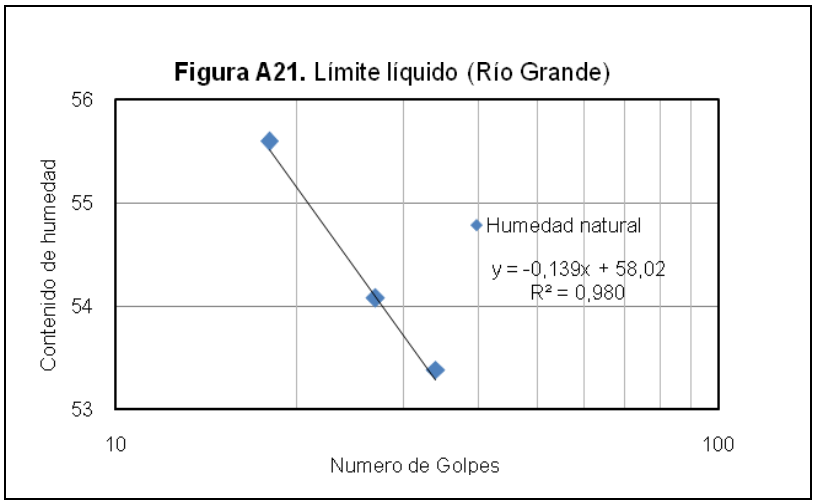
Tabla A20. Densidad (in situ)

Pesos específicos-densidad por volumen de agua desplazado. Fecha: 19/11/2008			
Localización: Río Grande. Profundidad: 1,6m			
Descripción del suelo: suelo color café. presencia de raíces			
Método de prueba: BS 1377: Parte 2: 1990: sección 7.4			
Densidad del Agua:	γ_{agua} = 1 g/cm^3	Densidad de la cera:	γ_{cera} = 0,9008 g/cm^3
Espécimen de referencia: Queso Inalterado		Volumen total (cm^3)	109,1
Masa de suelo masiva (g)	151,99	$V_{parafina\ desplazado}$ (cm^3)	17,0
Masa del suelo masiva + Parafina (g)	167,28	$V_{desplazado\ por\ el\ suelo}$ (cm^3)	92,2
Masa de la Parafina (g)	15,29	ρ_T (Ton/cm^3)	1,649
Masa del vaso (g)	411,15	ρ_d (Ton/cm^3)	1,149
Masa vaso + agua al nivel de lectura (g)	639,35	Contenido de humedad	Queso inalterado
Masa de agua al nivel de lectura (g)	228,2	Capsula #	B-29
Masa de suelo masiva + vaso + agua al mismo nivel de lectura (g)	697,5	$W_{capsula}$ (g)	54,39
Masa del suelo masiva + agua (g) al mismo nivel de lectura	286,35	$W_{suelo\ húmedo\ +\ capsula}$ (g)	316,01
Masa sumergida de suelo (g) Masa del suelo masiva + cera	58,15	$W_{suelo\ seco\ +\ capsula}$ (g)	236,69
%Saturación	93,6	%w	43,51

- Límites de consistencia

Tabla A21. Límites de consistencia por el método ASTM D4318 (humedad natural)

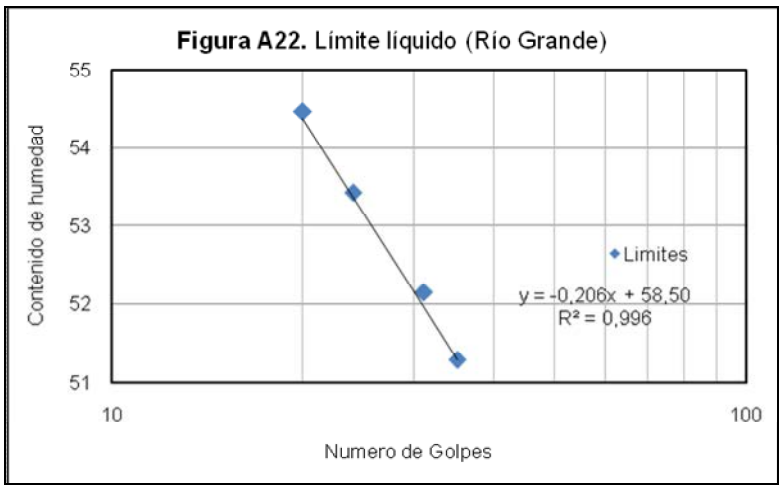
LÍMITE LÍQUIDO					LÍMITE PLÁSTICO		
DETERMINACIÓN No.	L06	L07	L08		DETERMINACIÓN No.	1	2
No. DE GOLPES	34	27	18		RECIPIENTE No.	L04	L05
Wc + Ww (g)	30,08	28,94	32,19		Wc + Ww (g)	17,02	16,73
Wc + Ws (g)	23,46	22,58	24,59		Wc + Ws (g)	15,44	15,21
Ww	6,62	6,36	7,60		Ww	1,58	1,52
Wc	11,06	10,82	10,92		Wc	10,56	10,54
Ws	12,40	11,76	13,67		Ws	4,88	4,67
% W	53,4	54,1	55,6		% W	32,38	32,55
					PROMEDIO		32,5



%w=43,5% & IL=0,49 & LL=55% & LP=32,5% & IP=23%

Tabla A22. Límites de consistencia por el método ASTM D4318 (seco al aire)

LÍMITE LÍQUIDO						LÍMITE PLÁSTICO		
DETERMINACIÓN No.	L34	L35	L36	L37		DETERMINACIÓN No.	1	2
No. DE GOLPES	35	31	24	20		RECIPIENTE No.	L01	L02
Wc + Ww (g)	22,49	23,55	23,84	24,16		Wc + Ww (g)	14,26	15,52
Wc + Ws (g)	18,52	19,29	19,32	19,52		Wc + Ws (g)	13,51	14,42
Ww	3,97	4,26	4,52	4,64		Ww	0,75	1,10
Wc	10,78	11,12	10,86	11		Wc	11,07	10,82
Ws	7,74	8,17	8,46	8,52		Ws	2,44	3,60
% W	51,3	52,1	53,4	54,5		% W	30,74	30,56
						PROMEDIO		30,6

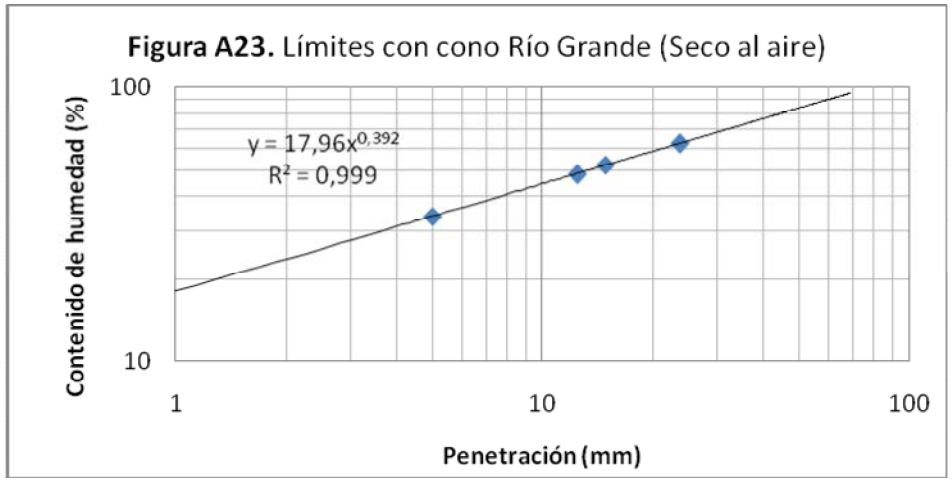


%w=6,80% & IL= -1,08 & LL=53% & LP=31% & IP=22%

Tabla A23. Análisis de límites de consistencia mediante caída de cono (seco al aire)

Límite líquido sitio: Río Grande				
Determinación	1	2	3	4
Penetración promedio	5,00	12,42	14,80	23,61
Capsula	L-41	L-42	L-43	L-44
$W_{capsula}$	11,32	11,09	11,22	11,00
$W_{suelo\ húmedo\ +\ capsula}$	22,96	29,13	26,9	29,46
$W_{suelo\ seco\ +\ capsula}$	20,02	23,27	21,54	22,39
W_{agua}	2,94	5,86	5,36	7,07
$W_{suelo\ seco}$	8,7	12,18	10,32	11,39
%w	33,8	48,1	51,9	62,1

W =5,6% & LL = 58,11% & LP = 23,56% & IP = 34,55%



- Análisis Granulométrico

Análisis de la parte gruesa, retenida y lavada en la malla #200

Fecha inicial: 26/01/2009 Fecha final: 29/01/2009

Localización: Río Grande

Prueba: Granulometría de gruesos

Método: Lavado en la malla #200 y secado al horno para tamizar.

Peso inicial (g): 510,42 Peso final (g): 73,94

Tabla A.24. Análisis granulométrico de partículas gruesas

Malla	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	%Retenido	%Ret. Acum.	%Pas. Acum.
#4	4,75	6,39	1,3	1,3	98,7
#10	2	10,78	2,1	3,4	96,6
#20	0,84	7,61	1,5	4,9	95,1
#40	0,425	4,26	0,8	5,7	94,3
#60	0,25	4,62	0,9	6,6	93,4
#100	0,15	6,68	1,3	7,9	92,1
#140	0,106	9,99	2,0	9,9	90,1
#200	0,075	18,9	3,7	13,6	86,4
charola		4,71	6,4	19,9	
Total		73,94			
Perdidas		0			

Tabla A25. Análisis de las partículas finas que pasan la malla #200, mediante el hidrómetro, Río Grande (16/06/2009)

Tiempo transcurrido (min.)	Temp. (^{0}C)	Lectura del hidrómetro	Corrección por Temp.	Lectura corregida	R	% más fino	L(cm)	L/t	K	D(mm)
2	25,5	40,5	1,475	36,98	41,50	78,2	9,5	4,75	0,012985	0,0283
5	25,5	39	1,475	35,48	40,00	75,1	9,7	1,94	0,012985	0,0181
15	25,5	36,5	1,475	32,98	37,50	69,8	10,15	0,677	0,012985	0,01068
30	25,5	34,5	1,475	30,98	35,50	65,5	10,5	0,350	0,012985	0,00768
60	26,3	31	1,755	27,76	32,00	58,7	11,1	0,185	0,012868	0,00553
250	25,1	28,5	1,31	24,81	29,50	52,5	11,45	0,0458	0,01306	0,00279
1440	24,9	25	1,29	21,29	26,00	45,0	12	0,0083	0,01306	0,001192

Peso inicial (g): 47,7 (50g corregido) Peso final (g): 4,76

Porcentaje de Finos: 9,6

Malla	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	%Retenido	%Ret. Acum.	%Pas. Acum.
#4	4,75	0	0,0	0,0	100,0
#10	2	0	0,0	0,0	100,0
#20	0,84	1,08	2,3	2,3	97,6
#40	0,425	0,71	1,5	3,8	96,2
#60	0,25	0,78	1,6	5,4	94,6
#100	0,15	0,72	1,5	6,9	93,1
#140	0,106	0,57	1,2	8,1	91,9
#200	0,075	0,56	1,2	9,3	90,0
charola		0,17			
Total		4,59			
Perdidas		0,17			
Finos		90,7			

3. Matinilla, Salitral de Santa Ana

Tabla A26. Gravedad específica

Prueba: Gravedad específica			Fecha: 02/12/08		
Localización: Matinilla, Salitral-Santa Ana, San josé			Profundidad: 1.6m		
Muestra #2: Tesis Mauricio Núñez López			Orífício:		
Descripción del material: Material rojizo claro, compacto y con muy pocas raices.					
DETERMINACIÓN	1	2	3	4	5
Picnómetro #	19	21	23	19	
Peso del picnómetro con tapon (g)	108,65	115,29	110,59	108,65	
W_1 = peso del picnómetro + agua (g)	357,72	364,032	359,668	357,72	
W_2 = peso del picnómetro + agua + suelo (g)	381,64	387,99	382,92	380,61	
Capsula#	B-25	B-12	B-18	P-33	
Peso de la capsula (g)	53,6	54,24	53,25	106,25	
Peso de la capsula + suelo seco (g)	91,47	91,74	90,62	142,26	
Ws = peso del suelo seco (g)	37,87	37,5	37,37	36,01	
T = temperatura (^{0}C)	23	23	23	23	
Factor de correccón K	0,99933	0,99933	0,99933	0,99933	
G_s = gravedad específica del suelo	2,71	2,77	2,65	2,74	
	%w =35,7			%w =4,6%	

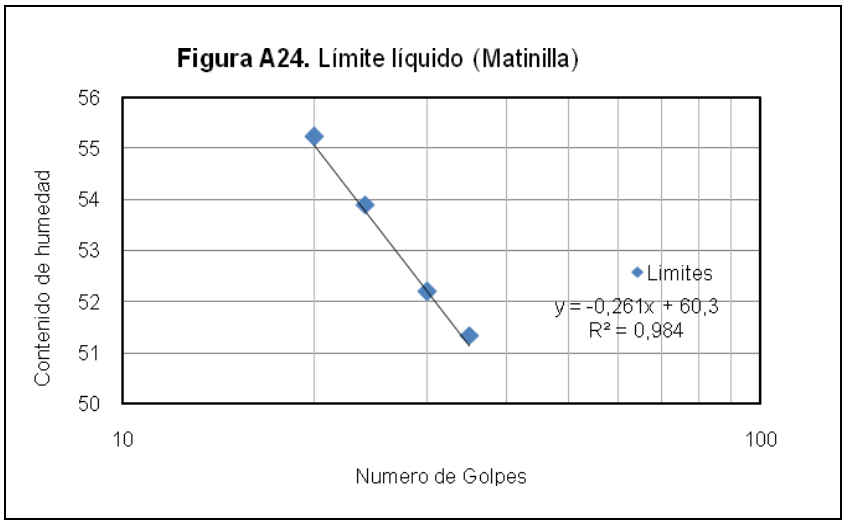
Tabla A27. Densidad (in situ)

Pesos específicos-densidad por volumen de agua desplazado. Fecha: 01/12/2008			
Localización: Matinilla. Profundidad 1,6 m			
Descripción del suelo: suelo color café. Pocas raíces.			
Método de prueba: BS 1377: Parte 2: 1990: sección 7.4			
Densidad del Agua:	γ_{agua} = 1 g/cm^3	Densidad de la cera:	γ_{cera} = 0,9008 g/cm^3
Espécimen de referencia: Queso Inalterado		Volumen total (cm^3)	103,7
Masa de suelo masiva (g)	153,19	$V_{parafina\ desplazado}$ (cm^3)	14,7
Masa del suelo masiva + Parafina (g)	166,46	$V_{desplazado\ por\ el\ suelo}$ (cm^3)	89,0
Masa de la Parafina (g)	13,27	ρ_T (Ton/cm^3)	1,721
Masa del vaso (g)	411,16	ρ_d (Ton/cm^3)	1,269
Masa vaso + agua al nivel de lectura (g)	659,93	Contenido de humedad	Queso inalterado
Masa de agua al nivel de lectura (g)	248,77	Capsula #	B-12
Masa de suelo masiva + vaso + agua al mismo nivel de lectura (g)	722,66	$W_{capsula}$ (g)	54,24
Masa del suelo masiva + agua (g) al mismo nivel de lectura	311,5	$W_{suelo\ húmedo\ +\ capsula}$ (g)	221,26
Masa sumergida de suelo (g) Masa del suelo masiva + cera	62,73	$W_{suelo\ seco\ +\ capsula}$ (g)	177,33
%Saturación	85,5	%w	35,7

- Límites de consistencia

Tabla A28. Límites de consistencia por el método ASTM D4318 (humedad natural)

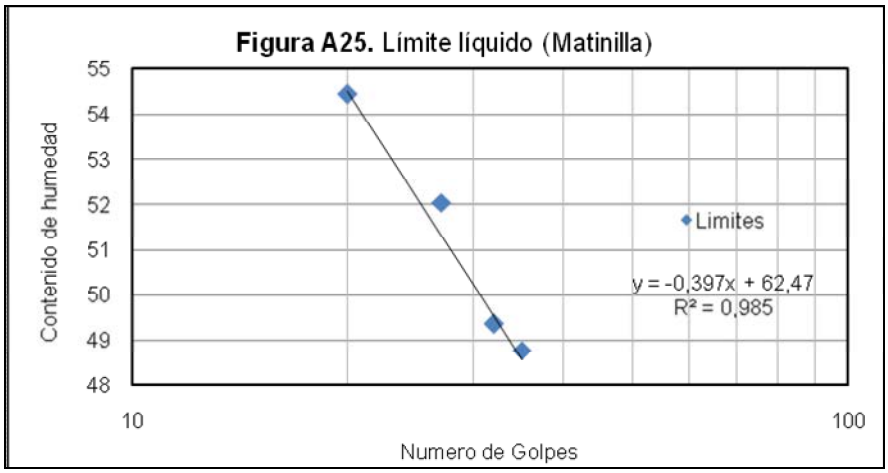
LÍMITE LÍQUIDO						**LÍMITE PLÁSTICO**		
DETERMINACIÓN No.	L34	L35	L36	L37		DETERMINACIÓN No.	1	2
No. DE GOLPES	35	30	24	20		RECIPIENTE No.	L01	L02
Wc + Ww (g)	23,75	22,55	22,48	23,90		Wc + Ww (g)	13,57	13,81
Wc + Ws (g)	19,35	18,63	18,41	19,31		Wc + Ws (g)	12,93	13,03
Ww	4,40	3,92	4,07	4,59		Ww	0,64	0,78
Wc	10,78	11,12	10,86	11,00		Wc	11,07	10,82
Ws	8,57	7,51	7,55	8,31		Ws	1,86	2,21
% W	51,3	52,2	53,9	55,2		% W	34,41	35,29
						PROMEDIO		35,2



%w=35,69% & IL=0,03 & LL=54% & LP=35% & IP=19%

Tabla A29. Límites de consistencia por el método ASTM D4318 (seco al aire)

LÍMITE LÍQUIDO						LÍMITE PLÁSTICO		
DETERMINACIÓN No.	L09	L10	L11	L12		DETERMINACIÓN No.	L13	L14
No. DE GOLPES	35	32	27	20		RECIPIENTE No.	14,32	14,19
Wc + Ww (g)	28,34	28,03	27,34	25,92		Wc + Ww (g)	13,45	13,49
Wc + Ws (g)	22,63	22,34	21,73	20,60		Wc + Ws (g)	0,87	0,70
Ww	5,71	5,69	5,61	5,32		Ww	10,82	11,26
Wc	10,92	10,81	10,95	10,83		Wc	2,63	2,23
Ws	11,71	11,53	10,78	9,77		Ws	33,08	31,39
% W	48,8	49,3	52,0	54,5		% W	L13	L14
						PROMEDIO		35,2



%w=4,3% & IL= -1,37 & LL=52,50% & LP=32% & IP=20%

- Análisis Granulométrico

Análisis de la parte gruesa, retenida y lavada en la malla #200

Fecha inicial: 26/01/2009 Fecha final: 29/01/2009

Localización: Matinilla

Prueba: Granulometría de gruesos

Método: Lavado en la malla #200 y secado al horno para tamizar.

Peso inicial (g): 442,84 Peso final (g): 84,39

Tabla A30. Granulometría de grano grueso

Malla	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	%Retenido	%Ret. Acum.	%Pas. Acum.
#4	4,75	11,77	2,7	2,7	97,3
#10	2	6,71	1,5	4,2	95,8
#20	0,84	8,13	1,8	6,0	94,0
#40	0,425	5,44	1,2	7,2	92,8
#60	0,25	4,05	0,9	8,2	91,8
#100	0,15	6,05	1,4	9,5	90,5
#140	0,106	12,61	2,8	12,4	87,6
#200	0,075	24,54	5,5	17,9	82,1
charola		4,7			
Total		84,0			
Perdidas		0,39			

Tabla A31. Análisis de las partículas finas que pasan la malla #200, mediante el hidrómetro, Matinilla, 29/01/2009

Tiempo transcurrido (min.)	Temp. (^{0}C)	Lectura del hidrómetro	Corrección por Temp.	Lectura corregida	R	% más fino	L(cm)	L/t	K	D(mm)
2	25,2	35,5	1,370	32,37	36,50	67,0	10,3	5,15	0,012955	0,0294
5	25,2	34	1,370	30,87	35,00	63,9	10,6	2,12	0,012955	0,0189
15	25,3	30	1,405	26,91	31,00	55,7	11,2	0,747	0,01294	0,01118
30	25,2	28	1,370	24,87	29,00	51,5	11,5	0,383	0,01294	0,00801
60	25,2	25,5	1,370	22,37	26,50	46,3	11,95	0,199	0,012955	0,00578
250	25,2	21	1,370	17,87	22,00	37,0	12,7	0,0508	0,01294	0,00292
1440	25	17	1,300	13,80	18,00	28,6	13,3	0,0092	0,012955	0,001245

Peso inicial (g): 47,8 (50g corregido) Peso final (g): 4,76

Porcentaje de Finos: 9,6

Malla	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	%Retenido	%Ret. Acum.	%Pas. Acum.
#4	4,75	0	0,0	0,0	100,0
#10	2	0	0,0	0,0	100,0
#20	0,84	1,08	2,3	2,3	97,7
#40	0,425	0,71	1,5	3,7	96,3
#60	0,25	0,78	1,6	5,4	94,6
#100	0,15	0,72	1,5	6,9	93,1
#140	0,106	0,57	1,2	8,1	91,9
#200	0,075	0,56	1,2	9,2	90,8
charola		0,17			
Total		4,59			
Perdidas		0,17			
Finos		90,8			

4. Patio de Agua, Coronado (San José)

Tabla A32. Gravedad específica

Prueba: Gravedad específica			Fecha:		
Localización: Patio de Agua, Coronado, San José			Profundidad: 3m		
Muestra #2: Tesis Mauricio Núñez López			Orificio:		
Descripción del material:					
DETERMINACIÓN	1	2	3	4	5
Picnómetro #	19	19	21	23	19
Peso del picnómetro con tapon (g)	108,64	108,65	115,29	110,58	108,65
W_1 = peso del picnómetro + agua (g)	357,72	357,72	364,032	359,668	357,72
W_2 = peso del picnómetro + agua + suelo (g)	381,03	381,05	387,94	383,15	380,98
Capsula#	B-29	B-29	B-34	charola	C-4
Peso de la capsula (g)	54,15	54,16	53,3	98,57	66,05
Peso de la capsula + suelo seco (g)	91,16	91,11	91,19	135,66	102,44
Ws = peso del suelo seco (g)	37,01	36,95	37,89	37,09	36,39
T = temperatura (^{0}C)	23	23	23	23	23
Factor de corrección K	0,99933	0,99933	0,99933	0,99933	0,99933
G_s = gravedad específica del suelo	2,70	2,71	2,71	2,72	2,77
	%w =54,5%				%w =4,56%

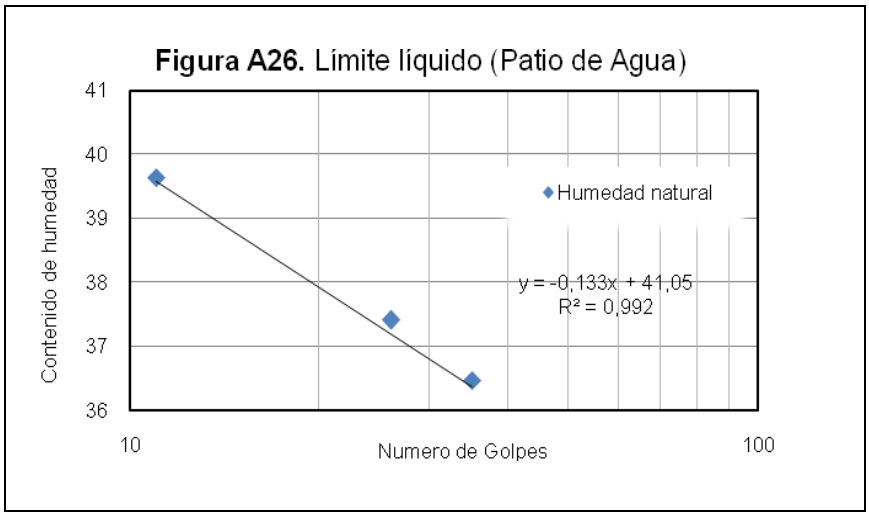
Tabla A33. Densidad (in situ)

Pesos específicos-densidad por volumen de agua desplazado. Fecha: 07/01/2009			
Localización: Patio de Agua, profundidad: 3 m			
Descripción del suelo: suelo color gris, pocas raíces.			
Método de prueba: BS 1377: Parte 2: 1990: sección 7.4			
Densidad del Agua:	γ_{agua} = 1 g/cm^3	Densidad de la cera:	γ_{cera} = 0,9008 g/cm^3
Espécimen de referencia: Queso Inalterado		Volumen total (cm^3)	82,5
Masa de suelo masiva (g)	96,82	$V_{parafina\ desplazado}$ (cm^3)	12,6
Masa del suelo masiva + Parafina (g)	108,17	$V_{desplazado\ por\ el\ suelo}$ (cm^3)	69,9
Masa de la Parafina (g)	11,35	ρ_T (Ton/cm^3)	1,386
Masa del vaso (g)	411,15	ρ_d (Ton/cm^3)	0,897
Masa vaso + agua al nivel de lectura (g)	635,36	Contenido de humedad	Queso inalterado
Masa de agua al nivel de lectura (g)	224,21	Capsula #	B-12
Masa de suelo masiva + vaso + agua al mismo nivel de lectura (g)	661,07	$W_{capsula}$ (g)	54,28
Masa del suelo masiva + agua (g) al mismo nivel de lectura	249,92	$W_{suelo\ húmedo\ +\ capsula}$ (g)	262,39
Masa sumergida de suelo (g) Masa del suelo masiva + cera	25,71	$W_{suelo\ seco\ +\ capsula}$ (g)	188,94
%Saturación	85,5	%w	54,54

- Límites de consistencia

Tabla A34. Límites de consistencia por el método ASTM D4318 (humedad natural)

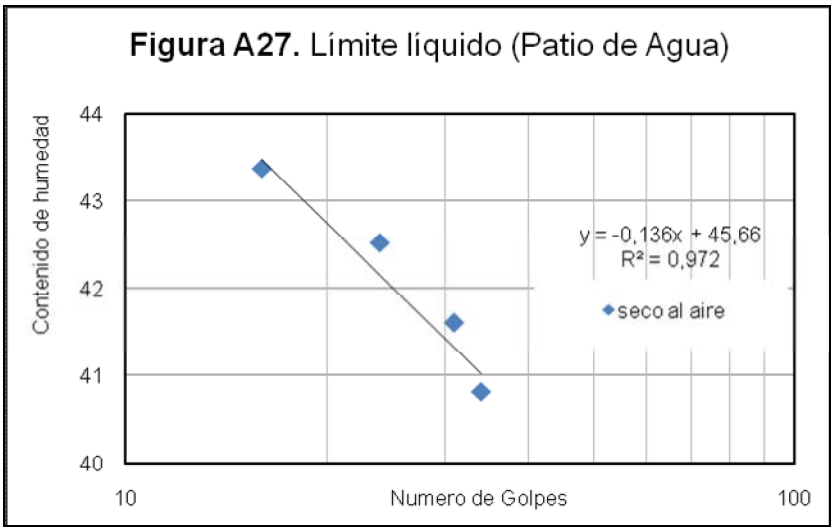
LÍMITE LÍQUIDO						**LÍMITE PLÁSTICO**		
DETERMINACIÓN No.	L34	L35	L36	L34		DETERMINACIÓN No.	1	2
No. DE GOLPES	35	26	11	35		RECIPIENTE No.	L01	L02
Wc + Ww (g)	25,86	27,17	30,41	25,86		Wc + Ww (g)	17,93	16,59
Wc + Ws (g)	21,83	22,80	24,86	21,83		Wc + Ws (g)	16,29	15,23
Ww	4,03	4,37	5,55	4,03		Ww	1,64	1,36
Wc	10,78	11,12	10,86	10,78		Wc	11,07	10,82
Ws	11,05	11,68	14,00	11,05		Ws	5,22	4,41
% W	36,5	37,4	39,6	36,5		% W	31,42	30,84
						PROMEDIO		31,3



%w=54,54% & IL= -2,64 & LL=37,70% & LP=31% & IP=6%

Tabla A35. Límites de consistencia por el método ASTM D4318 (seco al aire)

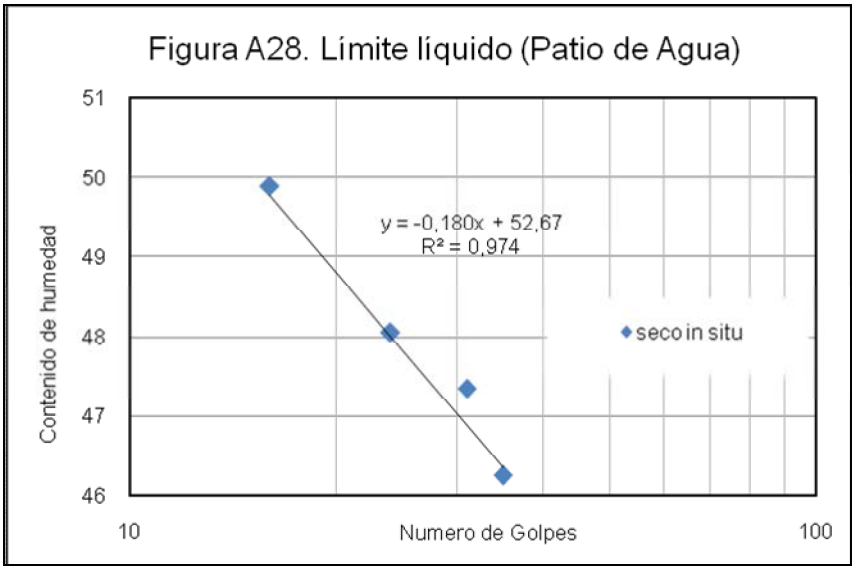
LÍMITE LÍQUIDO						LÍMITE PLÁSTICO		
DETERMINACIÓN No.	L35	L36	L37	L38		DETERMINACIÓN No.	1	2
No. DE GOLPES	34	31	24	16		RECIPIENTE No.	L23	L24
Wc + Ww (g)	30,06	24,27	25,79	23,77		Wc + Ww (g)	17,94	18,88
Wc + Ws (g)	24,57	20,33	21,38	19,84		Wc + Ws (g)	16,01	16,79
Ww	5,49	3,94	4,41	3,93		Ww	1,93	2,09
Wc	11,12	10,86	11,01	10,78		Wc	10,65	10,89
Ws	13,45	9,47	10,37	9,06		Ws	5,36	5,90
% W	40,8	41,6	42,5	43,4		% W	36,01	35,42
						PROMEDIO		35,7



%w=8,81% & IL= -4,12 & LL=42,30% & LP=36% & IP=7%

Tabla A36. Límites de consistencia por el método ASTM D4318 (seco al aire)

LÍMITE LÍQUIDO						LÍMITE PLÁSTICO		
DETERMINACIÓN No.	L16	L17	L18	L19		DETERMINACIÓN No.	1	2
No. DE GOLPES	35	31	24	16		RECIPIENTE No.	L08	L09
Wc + Ww (g)	32,10	27,08	24,84	24,00		Wc + Ww (g)	19,47	19,68
Wc + Ws (g)	25,44	21,82	20,28	19,61		Wc + Ws (g)	17,04	17,18
Ww	6,66	5,26	4,56	4,39		Ww	2,43	2,50
Wc	11,04	10,71	10,79	10,81		Wc	10,92	10,91
Ws	14,40	11,11	9,49	8,80		Ws	6,12	6,27
% W	46,3	47,3	48,1	49,9		% W	39,71	39,87
						PROMEDIO		39,8

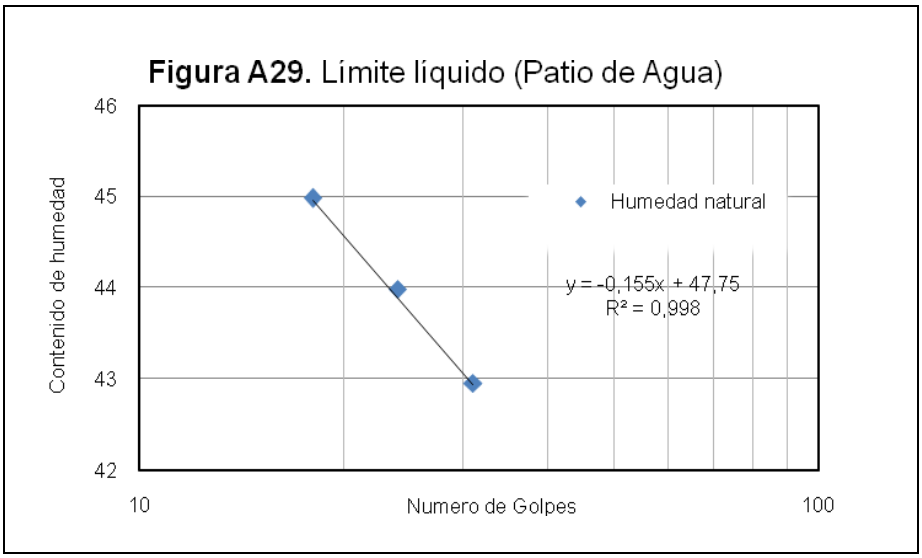


%w=46,05% & IL= 0,76 & LL=48,0% & LP=40% & IP=8%

Tabla A37. Límites de consistencia por el método ASTM D4318 (humedad)

LÍMITE LÍQUIDO						LÍMITE PLÁSTICO		
DETERMINACIÓN No.	L40	L41	L42	L40		DETERMINACIÓN No.	1	2
No. DE GOLPES	31	24	18	31		RECIPIENTE No.	L43	L44
Wc + Ww (g)	25,32	28,09	29,14	25,32		Wc + Ww (g)	19,14	17,84
Wc + Ws (g)	20,90	22,97	23,54	20,90		Wc + Ws (g)	17,04	16,03
Ww	4,42	5,12	5,60	4,42		Ww	2,10	1,81
Wc	10,61	11,33	11,09	10,61		Wc	11,22	10,99
Ws	10,29	11,64	12,45	10,29		Ws	5,82	5,04
% W	43,0	44,0	45,0	43,0		% W	36,08	35,91
						PROMEDIO		36,0

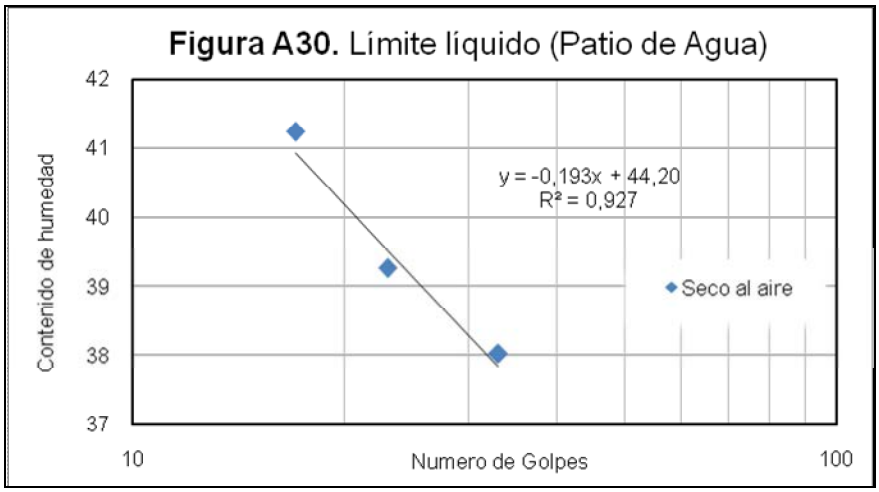
Nota: gana humedad al romperse bolsa y estar guardado en la cámara húmeda



%w=61,05% & IL= 3,22 & LL=43,88% & LP=36% & IP=8%

Tabla A38. Límites de consistencia por el método ASTM D4318 (seco al aire)

LÍMITE LÍQUIDO					LÍMITE PLÁSTICO		
DETERMINACIÓN No.	L06	L07	L08		DETERMINACIÓN No.	1	2
No. DE GOLPES	33	23	17		RECIPIENTE No.	L11	L15
Wc + Ww (g)	28,84	30,53	27,43		Wc + Ww (g)	20,64	21,60
Wc + Ws (g)	23,81	24,86	22,61		Wc + Ws (g)	18,12	18,79
Ww	5,03	5,67	4,82		Ww	2,52	2,81
Wc	10,58	10,42	10,92		Wc	10,96	10,73
Ws	13,23	14,44	11,69		Ws	7,16	8,06
% W	38,0	39,3	41,2		% W	35,20	34,86
					PROMEDIO		35,0



%w=27,5% & IL= -1,77 & LL=39,4% & LP=35% & IP=4%

Tabla A39. Análisis mediante caída de cono

Límite líquido sitio: Patio de Agua				
Determinación	1	2	3	4
Penetración promedio	4,98	15,80	21,90	25,50
Capsula	L23	L24	L25	L26
$W_{capsula}$	10,65	10,9	10,71	10,43
$W_{suelo\ húmedo + capsula}$	22,88	26,35	27,83	26,77
$W_{suelo\ seco + capsula}$	19,03	21,05	21,81	20,98
W_{agua}	3,85	5,3	6,02	5,79
$W_{suelo\ seco}$	8,38	10,15	11,1	10,55
%w	45,9	52,2	54,2	54,9

W =61,6% & LL =53,52 % & LP =41,55 % & IP =11,97 %

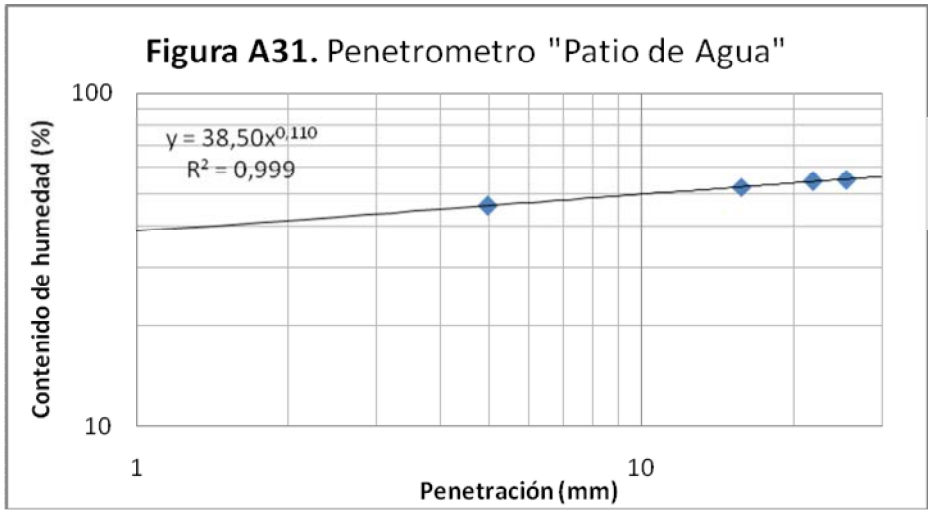


Tabla A40. Análisis mediante caída de cono

Límite líquido sitio: Patio de Agua				
Determinación	1	2	3	4
Penetración promedio	7,75	12,20	19,50	24,00
Capsula	L23	L24	L25	L26
$W_{capsula}$	10,65	10,9	10,71	10,43
$W_{suelo\ húmedo\ +\ capsula}$	25,68	26,07	28,17	28,62
$W_{suelo\ seco\ +\ capsula}$	21,6	21,85	23,18	23,32
W_{agua}	4,08	4,22	4,99	5,3
$W_{suelo\ seco}$	10,95	10,95	12,47	12,89
%w	37,3	38,5	40,0	41,1

w =5,0% & LL =40,17 % & LP =33,1 % & IP =7,06 %

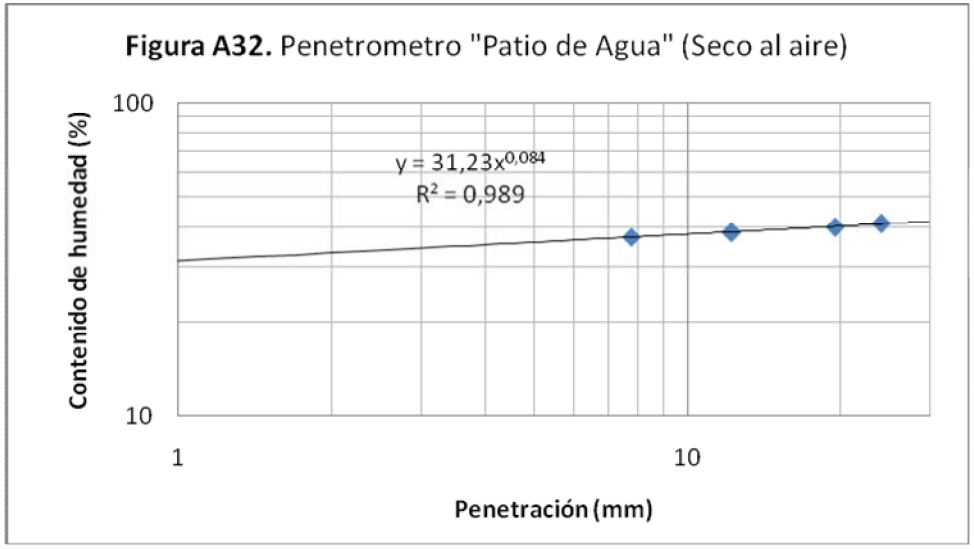


Tabla A41. Análisis mediante caída de cono

Límite líquido sitio: Patio de Agua				
Determinación	1	2	3	4
Penetración promedio	5,01	15,21	16,71	21,96
Capsula	L23	L24	L25	L26
$W_{capsula}$	10,65	10,9	10,71	10,43
$W_{suelo\ húmedo\ +\ capsula}$	23,15	25,08	26,43	27,24
$W_{suelo\ seco\ +\ capsula}$	19,2	20,27	21,06	21,36
W_{agua}	3,95	4,81	5,37	5,88
$W_{suelo\ seco}$	8,55	9,37	10,35	10,93
%w	46,2	51,3	51,9	53,8

W =47,1% & LL =52,95 % & LP =42,06 % & IP =10,89 %

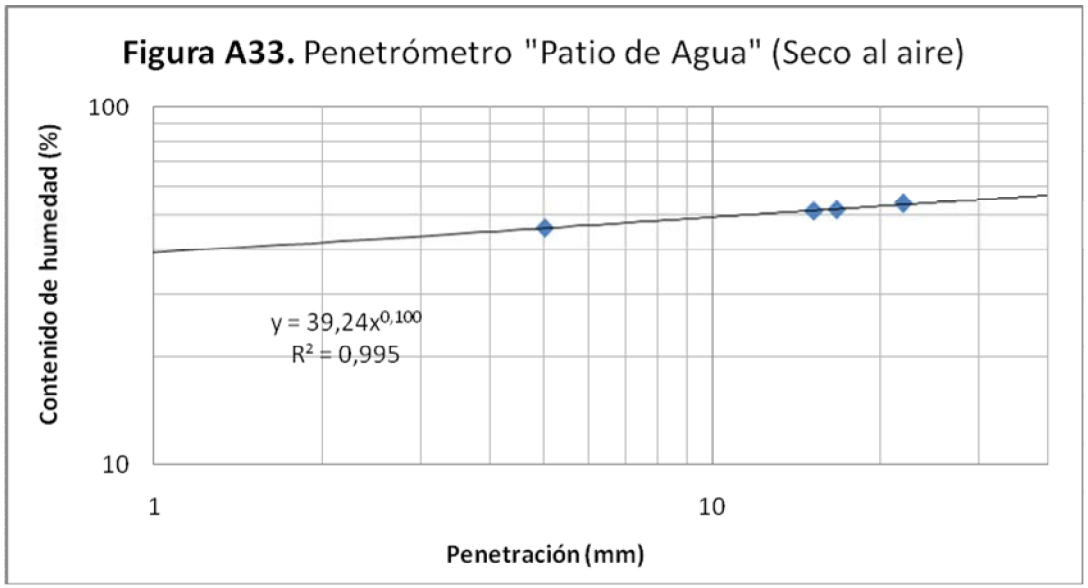
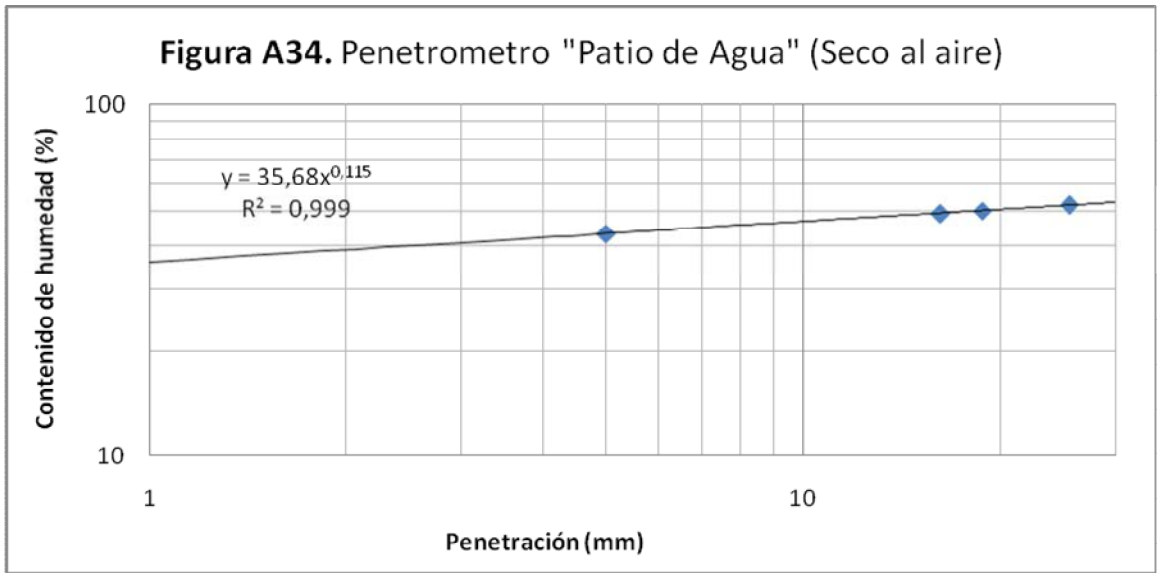


Tabla A42. Análisis mediante caída de cono

Límite líquido sitio: Patio de Agua				
Determinación	1	2	3	4
Penetración promedio	4,99	16,20	18,76	25,48
Capsula	L27	L28	L29	L30
$W_{capsula}$	10,61	10,7	10,53	10,49
$W_{suelo\ húmedo + capsula}$	24,11	29,38	25,47	30,74
$W_{suelo\ seco + capsula}$	20,05	23,23	20,49	23,81
W_{agua}	4,06	6,15	4,98	6,93
$W_{suelo\ seco}$	9,44	12,53	9,96	13,32
%w	43,0	49,1	50,0	52,0

w =40,6% & LL =50,35 % & LP =38,64 % & IP =11,71 %



- Análisis Granulométrico

Análisis de la parte gruesa, retenida y lavada en la malla #200

Fecha inicial: 26/01/2009 Fecha final: 29/01/2009

Localización: Patio de Agua

Prueba: Granulometría de gruesos

Método: Lavado en la malla #200 y secado al horno para tamizar.

Peso inicial (g): 432,26 Peso final (g): 217,56

Tabla A43. Granulometría de partículas gruesas

Malla	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	%Retenido	%Ret. Acum.	%Pas. Acum.
#4	4,75	0	0,0	0,0	100,0
#10	2	0,15	0,0	0,0	100,0
#20	0,84	0,51	0,1	0,2	99,8
#40	0,425	1,64	0,4	0,5	99,5
#60	0,25	23,96	5,6	6,1	93,9
#100	0,15	134,7	31,2	37,3	62,7
#140	0,106	31,8	7,4	44,7	55,3
#200	0,075	21,15	4,9	49,6	50,4
charola		3,65			
Total		217,56			
Perdidas		0			

Tabla A44. Análisis de las partículas finas que pasan la malla #200, mediante el hidrómetro. Patio de Agua, 8/06/2009

Tiempo transcurrido (min.)	Temp. (^{0}C)	Lectura del hidrómetro	Corrección por Temp.	Lectura corregida	R	% más fino	L(cm)	L/t	K	D(mm)
2	26,4	17	1,790	14,29	18,00	29,7	13,3	6,65	0,012474	0,0322
5	26,3	14,5	1,755	11,76	15,50	24,4	13,75	2,75	0,012488	0,0207
15	26,5	11	1,825	8,33	12,00	17,3	14,3	0,953	0,01246	0,01217
30	26,5	8	1,825	5,33	9,00	11,1	14,8	0,493	0,01246	0,00875
60	26,3	7	1,755	4,26	8,00	8,8	15	0,250	0,012488	0,00624
250	25,8	5,5	1,580	2,58	6,50	5,4	15,25	0,0610	0,012558	0,00310
1440	25,4	5	1,440	1,94	6,00	4,0	15,3	0,0106	0,012614	0,001300

Peso inicial (g): 47,7 (50g corregido) Peso final (g): 4,76

Porcentaje de Finos: 9,6

Malla	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	%Retenido	%Ret. Acum.	%Pas. Acum.
#4	4,75	0	0,0	0,0	100,0
#10	2	0	0,0	0,0	100,0
#20	0,84	1,08	2,3	2,3	97,7
#40	0,425	0,71	1,5	3,8	96,2
#60	0,25	0,78	1,6	5,4	94,6
#100	0,15	0,72	1,5	6,9	93,1
#140	0,106	0,57	1,2	8,1	91,9
#200	0,075	0,56	1,2	9,3	90,7
charola		0,17			
Total		4,59			
Perdidas		0,17			
Finos		90,7			

5. Las Nubes, Coronado (San José)

Tabla A45. Gravedad específica

Prueba: Gravedad específica			Fecha:		
Localización: Las Nubes, Coronado, San José			Profundidad: 4 m		
Muestra #2: Tesis Mauricio Núñez López			Orificio:		
Descripción del material:					
DETERMINACIÓN	1	2	3	4	
Picnómetro #	19	23	21	21	23
Peso del picnómetro con tapon (g)	108,65	110,59	115,29	115,3	110,58
W_1 = peso del picnómetro + agua (g)	357,72	359,668	364,032	364,032	359,668
W_2 = peso del picnómetro + agua + suelo (g)	380,16	382,13	386,67	386,51	381,77
Capsula#	B-5	B-4	B-2	B-34	C-3
Peso de la capsula (g)	54,22	53,64	53,71	53,32	61,5
Peso de la capsula + suelo seco (g)	90,6	90,01	90,48	89,82	96,65
Ws = peso del suelo seco (g)	36,38	36,37	36,77	36,5	35,15
T = temperatura (^{0}C)	23	23	23	23	23
Factor de corrección K	0,99933	0,99933	0,99933	0,99933	0,99933
G_s = gravedad específica del suelo	2,61	2,61	2,60	2,60	2,69
	%w =91,2%				%w =12,6%

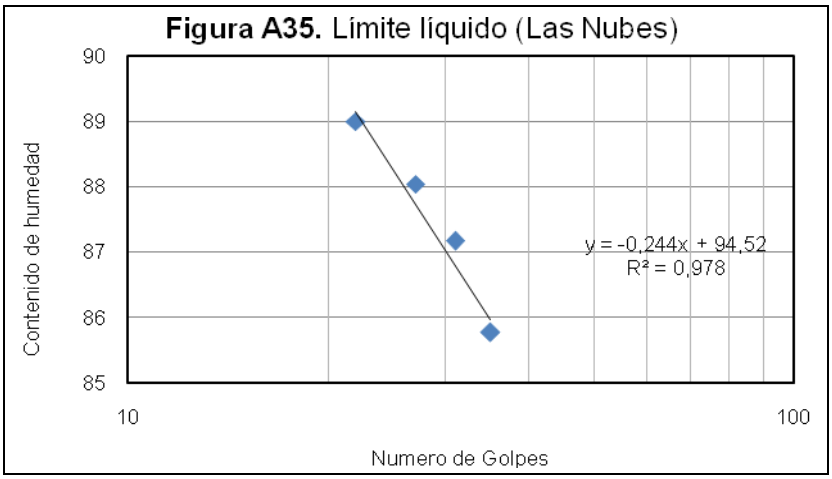
Tabla A46. Densidad (in situ)

Pesos específicos-densidad por volumen de agua desplazado. Fecha: 07/01/2009			
Localización: Las Nubes. Profundidad: 3 m			
Descripción del suelo: suelo color café. presencia de raíces			
Método de prueba: BS 1377: Parte 2: 1990: sección 7.4			
Densidad del Agua:	γ_{agua} = 1 g/cm^3	Densidad de la cera:	γ_{cera} = 0,9008 g/cm^3
Espécimen de referencia: Queso Inalterado		Volumen total (cm^3)	82,5
Masa de suelo masiva (g)	81,17	$V_{parafina\ desplazado}$ (cm^3)	10,1
Masa del suelo masiva + Parafina (g)	90,29	$V_{desplazado\ por\ el\ suelo}$ (cm^3)	58,1
Masa de la Parafina (g)	9,12	ρ_T (Ton/cm^3)	1,397
Masa del vaso (g)	411,15	ρ_d (Ton/cm^3)	0,731
Masa vaso + agua al nivel de lectura (g)	635,54	Contenido de humedad	Queso inalterado
Masa de agua al nivel de lectura (g)	224,39	Capsula #	B-13
Masa de suelo masiva + vaso + agua al mismo nivel de lectura (g)	657,6	$W_{capsula}$ (g)	51,6
Masa del suelo masiva + agua (g) al mismo nivel de lectura	246,45	$W_{suelo\ húmedo\ +\ capsula}$ (g)	266,42
Masa sumergida de suelo (g) Masa del suelo masiva + cera	22,06	$W_{suelo\ seco\ +\ capsula}$ (g)	163,97
%Saturación	92,4	%w	91,2

- Límites de consistencia

Tabla A46. Límites de consistencia por el método ASTM D4318 (humedad natural)

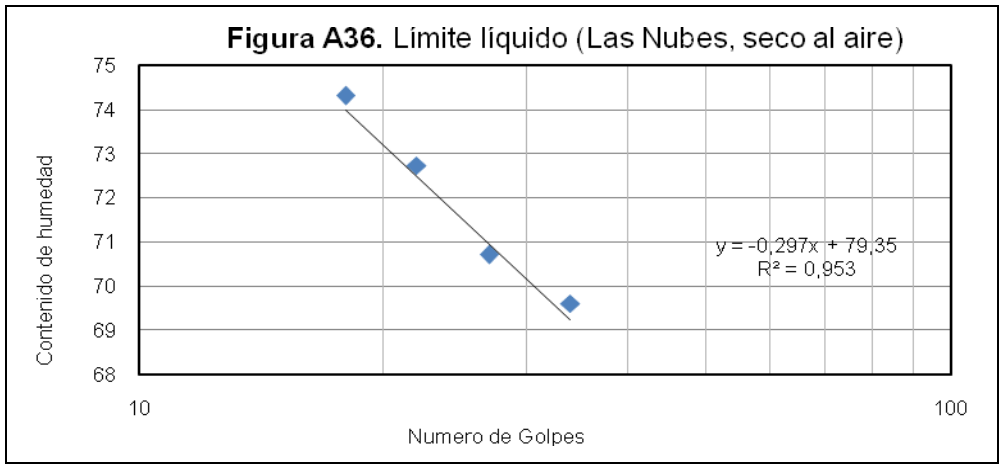
LÍMITE LÍQUIDO						**LÍMITE PLÁSTICO**		
DETERMINACIÓN No.	L09	L10	L11	L12		DETERMINACIÓN No.	2	2
No. DE GOLPES	35	31	27	22		RECIPIENTE No.	L14	L15
Wc + Ww (g)	20,31	21,31	20,86	19,77		Wc + Ww (g)	15,26	13,89
Wc + Ws (g)	15,97	16,42	16,22	15,56		Wc + Ws (g)	13,72	12,67
Ww	4,34	4,89	4,64	4,21		Ww	1,54	1,22
Wc	10,91	10,81	10,95	10,83		Wc	11,26	10,73
Ws	5,06	5,61	5,27	4,73		Ws	2,46	1,94
% W	85,8	87,2	88,0	89,0		% W	62,60	62,89
						PROMEDIO		62,4



%w=91,17% & IL=1,11 & LL=88,4% & LP=62% & IP=26%

Tabla A47. Límites de consistencia por el método ASTM D4318 (seco al aire)

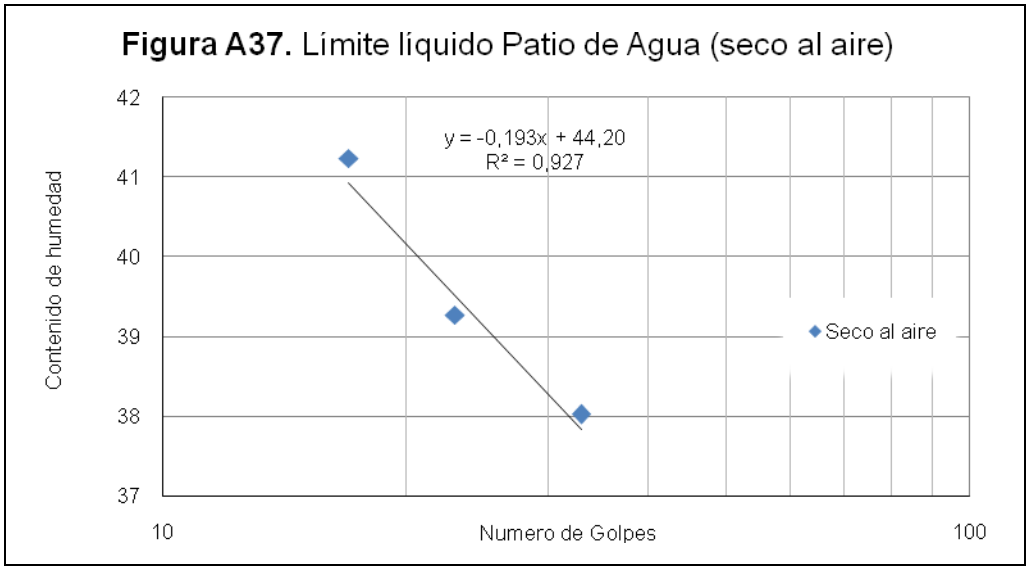
LÍMITE LÍQUIDO						LÍMITE PLÁSTICO		
DETERMINACIÓN No.	L12	L13	L14	L15		DETERMINACIÓN No.	1	2
No. DE GOLPES	34	27	22	18		RECIPIENTE No.	L29	L30
Wc + Ww (g)	26,79	24,34	23,68	22,34		Wc + Ww (g)	17,57	19,63
Wc + Ws (g)	20,24	18,74	18,45	17,39		Wc + Ws (g)	14,92	16,19
Ww	6,55	5,60	5,23	4,95		Ww	2,65	3,44
Wc	10,83	10,82	11,26	10,73		Wc	10,53	10,49
Ws	9,41	7,92	7,19	6,66		Ws	4,39	5,70
% W	69,6	70,7	72,7	74,3		% W	60,36	60,35
						PROMEDIO		60,4



%w=15,1% & IL=-3,90 & LL=72,0% & LP=60% & IP=12%

Tabla A47. Límites de consistencia por el método ASTM D4318 (seco al aire)

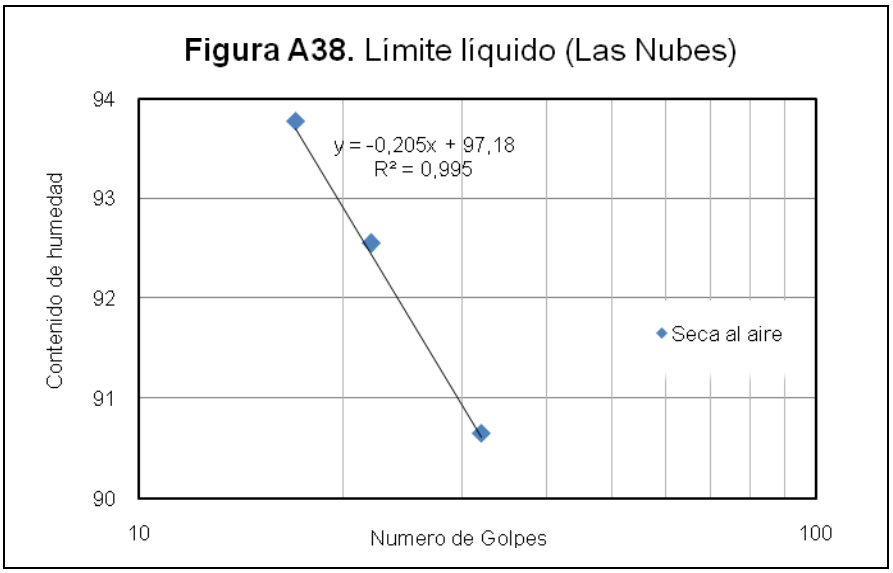
LÍMITE LÍQUIDO					LÍMITE PLÁSTICO		
DETERMINACIÓN No.	L06	L07	L08		DETERMINACIÓN No.	1	2
No. DE GOLPES	33	23	17		RECIPIENTE No.	L11	L15
Wc + Ww (g)	28,84	30,53	27,43		Wc + Ww (g)	20,64	21,60
Wc + Ws (g)	23,81	24,86	22,61		Wc + Ws (g)	18,12	18,79
Ww	5,03	5,67	4,82		Ww	2,52	2,81
Wc	10,58	10,42	10,92		Wc	10,96	10,73
Ws	13,23	14,44	11,69		Ws	7,16	8,06
% W	38,0	39,3	41,2		% W	35,20	34,86
					PROMEDIO		35,0



%w=27,34% & IL= -1,77 & LL=39,4% & LP=35% & IP=4%

Tabla A48. Límites de consistencia por el método ASTM D4318 (seco al aire)

LÍMITE LÍQUIDO					LÍMITE PLÁSTICO		
DETERMINACIÓN No.	L40	L41	L42		DETERMINACIÓN No.	1	2
No. DE GOLPES	32	22	17		RECIPIENTE No.	L43	L44
Wc + Ww (g)	22,24	26,58	24,79		Wc + Ww (g)	18,38	18,42
Wc + Ws (g)	16,71	19,25	18,16		Wc + Ws (g)	15,51	15,44
Ww	5,53	7,33	6,63		Ww	2,87	2,98
Wc	10,61	11,33	11,09		Wc	11,22	10,99
Ws	6,10	7,92	7,07		Ws	4,29	4,45
% W	90,7	92,6	93,8		% W	66,90	66,97
					PROMEDIO		66.9



%w=56,94% & IL= -0,40 & LL=92,1% & LP=67% & IP=25%

Tabla A49. Análisis mediante caída de cono

Límite líquido sitio: Patio de Agua				
Determinación	1	2	3	4
Penetración promedio	4,95	20,90	21,60	25,20
Capsula	L27	L28	L29	L30
$W_{capsula}$	10,62	10,7	10,53	10,49
$W_{suelo\ húmedo + capsula}$	23,47	26,3	24,3	28,85
$W_{suelo\ seco + capsula}$	18,77	19,92	18,65	21,24
W_{agua}	4,7	6,38	5,65	7,61
$W_{suelo\ seco}$	8,15	9,22	8,12	10,75
%w	57,7	69,2	69,6	70,8

w =12,8% & LL =68,69 % & LP =51,39 % & IP =17,3 %

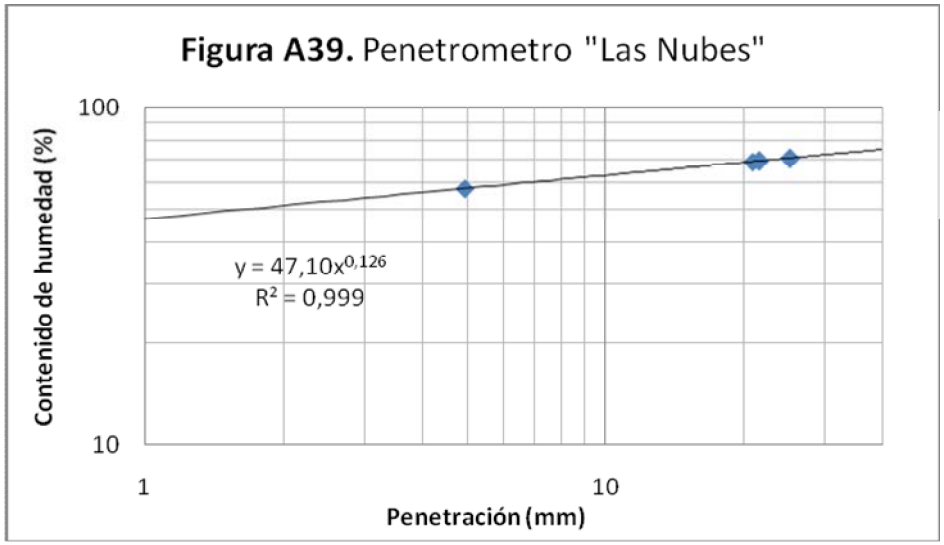


Figura A39. Penetrometro "Las Nubes"

Tabla A50. Análisis mediante caída de cono

Límite líquido sitio: Patio de Agua				
Determinación	1	2	3	4
Penetración promedio	6,35	15,81	18,62	21,43
Capsula	L27	L28	L29	L30
$W_{capsula}$	10,62	10,7	10,53	10,49
$W_{suelo\ húmedo\ +\ capsula}$	20,47	22,93	25,21	22,75
$W_{suelo\ seco\ +\ capsula}$	15,77	16,73	17,72	16,45
W_{agua}	4,7	6,2	7,49	6,3
$W_{suelo\ seco}$	5,15	6,03	7,19	5,96
%w	91,3	102,8	104,2	105,7

w =67,5% & LL =104,99 % & LP =79,28 % & IP =25,71 %

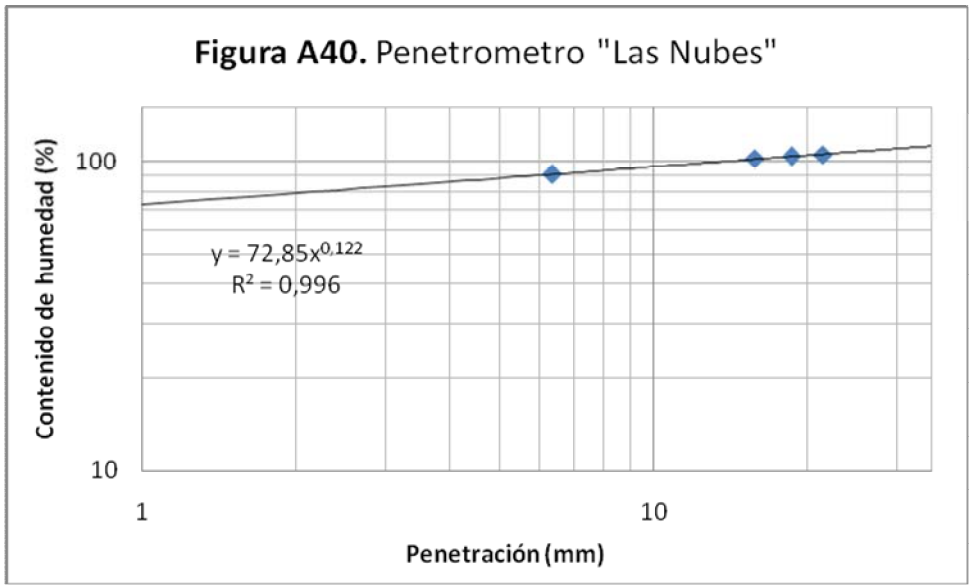


Tabla A51. Análisis mediante caída de cono

Límite líquido sitio: Patio de Agua				
Determinación	1	2	3	4
Penetración promedio	7,05	11,05	18,00	21,10
Capsula	L05	L06	L07	L08
$W_{capsula}$	10,54	10,58	10,42	10,92
$W_{suelo\ húmedo\ +\ capsula}$	20,57	20,95	23,14	25,21
$W_{suelo\ seco\ +\ capsula}$	15,86	15,93	16,75	17,96
W_{agua}	4,71	5,02	6,39	7,25
$W_{suelo\ seco}$	5,32	5,35	6,33	7,04
%w	88,5	93,8	100,9	103,0

w =104,7% & LL =102,04 % & LP =74,1 % & IP =27,94 %

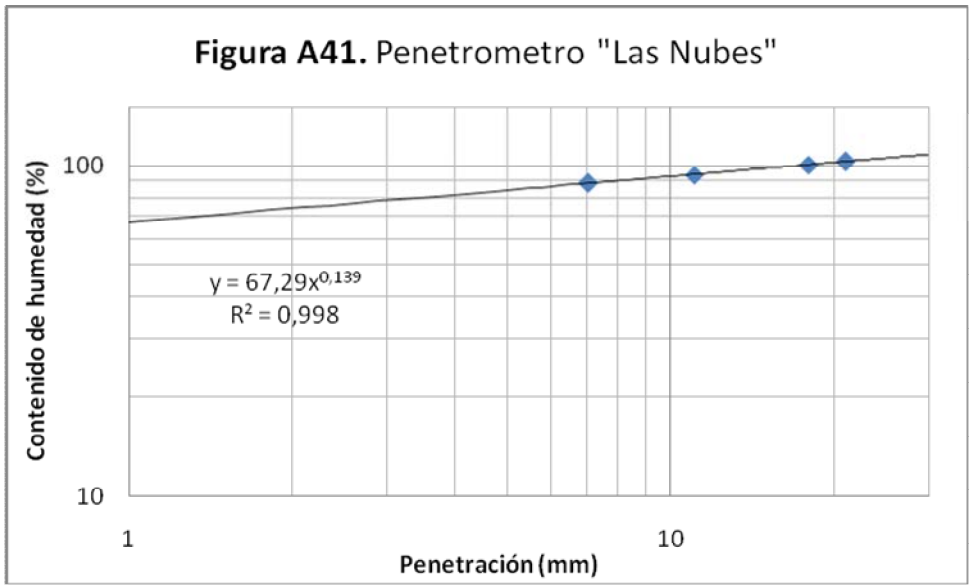


Tabla A52. Análisis mediante caída de cono

Límite líquido sitio: Patio de Agua				
Determinación	1	2	3	4
Penetración promedio	6,51	18,02	19,86	21,59
Capsula	L19	L20	L21	L22
$W_{capsula}$	10,81	10,95	10,96	11,12
$W_{suelo\ húmedo\ +\ capsula}$	20,21	23,37	23,76	24,91
$W_{suelo\ seco\ +\ capsula}$	16,05	17,35	17,52	18,1
W_{agua}	4,16	6,02	6,24	6,81
$W_{suelo\ seco}$	5,24	6,4	6,56	6,98
%w	79,4	94,1	95,1	97,6

w =42,6 % & LL =95,61 % & LP =65,08 % & IP =30,53 %

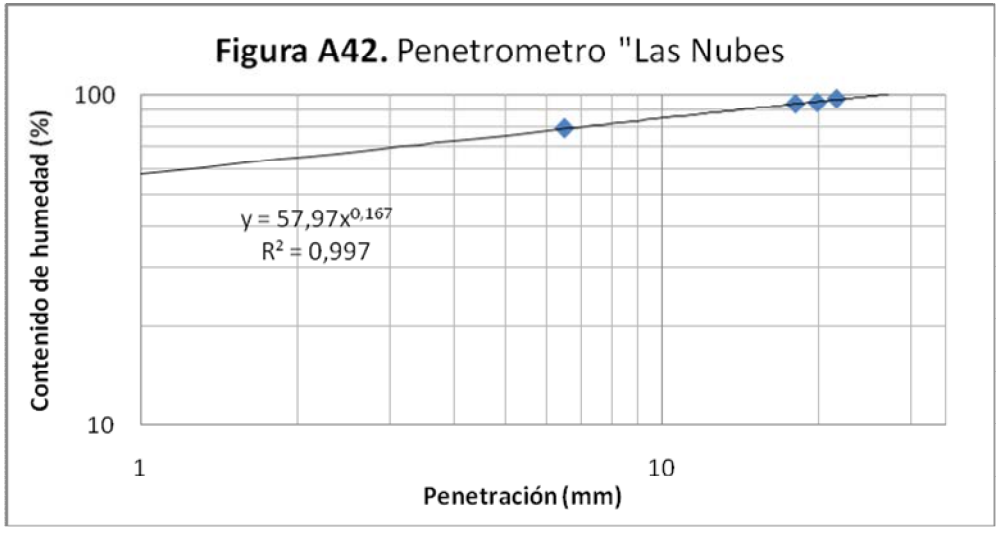


Figura A42. Penetrometro "Las Nubes

- Análisis Granulométrico

Análisis de la parte gruesa, retenida y lavada en la malla #200

Fecha inicial: 26/01/2009 Fecha final: 29/01/2009

Localización: Las Nubes

Prueba: Granulometría de gruesos

Método: Lavado en la malla #200 y secado al horno para tamizar.

Peso inicial (g): 293,37 Peso final (g): 87,44

Tabla A53. Granulometría de partículas gruesas

Malla	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	%Retenido	%Ret. Acum.	%Pas. Acum.
#4	4,75	0,27	0,1	0,1	99,9
#10	2	0,39	0,1	0,2	99,8
#20	0,84	0,83	0,3	0,5	99,5
#40	0,425	1,85	0,6	1,1	98,9
#60	0,25	5,15	1,8	2,9	97,1
#100	0,15	14,21	4,8	7,7	92,3
#140	0,106	23,26	7,9	15,7	84,3
#200	0,075	33,42	11,4	27,1	72,9
charola		7,87	9,0	36,1	
Total		87,25			
Perdidas		0,19			

Tabla A54. Análisis de las partículas finas que pasan la malla #200, mediante el hidrómetro. Las Nubes, 8/06/2009

Tiempo transcurrido (min.)	Temp. (^{0}C)	Lectura del hidrómetro	Corrección por Temp.	Lectura corregida	R	% más fino	L(cm)	L/t	K	D(mm)
2	25,7	23,5	1,545	20,05	24,50	45,6	12,3	6,15	0,012955	0,0321
5	25,7	20	1,545	16,55	21,00	37,7	12,9	2,58	0,012955	0,0208
15	25,8	16	1,580	12,58	17,00	28,6	13,5	0,900	0,01294	0,01228
30	25,8	14	1,580	10,58	15,00	24,1	13,8	0,460	0,01294	0,00878
60	25,7	12	1,545	8,55	13,00	19,5	14,2	0,237	0,012955	0,00630
250	25,8	9	1,580	5,58	10,00	12,7	14,7	0,0588	0,01294	0,00314
1440	25,7	8	1,545	4,55	9,00	10,3	14,8	0,0103	0,012955	0,001313

Peso inicial (g): 44,4 (50g corregido) Peso final (g): 4,76

Porcentaje de Finos: 10,3

Malla	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	%Retenido	%Ret. Acum.	%Pas. Acum.
#4	4,75	0	0,0	0,0	100,0
#10	2	0	0,0	0,0	100,0
#20	0,84	1,08	2,4	2,4	97,6
#40	0,425	0,71	1,6	4,0	96,0
#60	0,25	0,78	1,8	5,8	94,2
#100	0,15	0,72	1,6	7,4	92,6
#140	0,106	0,57	1,3	8,7	91,3
#200	0,075	0,56	1,3	10,0	90,0
charola		0,17			
Total		4,59			
Perdidas		0,17			
Finos		90,0			

ANEXO III

Recopilación de resultados para suelos de la GAM

Tabla A55. Autores y sitios muestreados previamente

Autor	Localización
Selba, 1985	Zona norte en Guatuso
Chávez, 1992	Nubes de coronado
Cordero, 1995	Santo Domingo de Heredia
	San Vicente de Moravia
	Sabana norte
	Colima de Tibas
	Nubes de Coronado
	Alajuela centro
Mora, 1998	Oreamuno de Cartago
	Paraíso de Cartago
Zamora, 2000	San Ramón
Rodríguez, 2001	Curridabat
	Tres Rios
Murillo, 2003	San Cruz de Turrialba
Muñoz 2003	Carmen de Guadalupe, Goicoechea
	Granadilla norte de Curridabat
Quesada 2006	Dulce nombre de Coronado
	Distrito central de Coronado
	San Francisco de Coronado
	Cascajal de Coronado
	Granadilla de Curridabat
	Guayabos de Curridabat
	San Rafael de Montes de Oca
	San Ramón de Tres Ríos
	San Diego de Tres Ríos
	Los Cartagos de Heredia

Fuente: recopilación Novoa (2007)

Tabla A56. Coordenadas de los sitios recopilados por Novoa.

Punto	Localización	Longitud	Latitud
1	Granadilla de Curridabat, urbanización Altamonte	534 500	212 500
2	Granadilla norte de Curridabat, Urbanización Monteran	535 200	212 200
3	2Km de la sede occidente UCR, San Ramón	482 500	231 410
4	300m sur de la iglesia Tremedal, San Ramón	484 300	229 730
5	700m oeste de la iglesia de San Ramón	485 650	230 380
6	El Carmen de Guadalupe, Urbanización Buenavista	536 000	215 500
7	Granadilla norte de Curridabat, Urbanización Monteran	535 210	212 210
8	Las Nubes de Coronado, casa de retiros del Opus Dei	539 200	218 100
9	Santo Domingo de Heredia, Subestación del ICE	530 900	218 400
10	San Vicente de Moravia, edificio del IFAM	530 000	216 100
11	Sabana Norte, Laboratorio de Suelos del ICE	525 100	214 000
12	Colima de Tibás, subestación del ICE	526 200	215 200
13	Las Nubes de Coronado, casa de retiros del Opus Dei	539 200	218 100
14	Alajuela, Hospital de Alajuela	513 100	221 200
15	Santa Cruz de Turrialba, detrás de la escuela	566 000	216 700
16	Dulce nombre de Coronado, Barrio Don Jacinto	534 550	218 600
17	Distrito central de Coronado, Urbanización Sinaí	536 400	218 800
18	San Francisco de Coronado, Urbanización la Calabria	536 300	217 200
19	Cascajal de Coronado, Lote 1 Hacienda la Guacamaya	540 100	219 700
20	Cascajal de Coronado, Lote 2 Hacienda la Guacamaya	540 100	220 100
21	Granadilla de Curridabat, Urbanización Altamonte	533 500	212 700
22	Guayabos de Curridabat, Residencial Abeludes	533 800	211 900
23	Guayabos de Curridabat, Urbanización Cataluña	532 900	211 600
24	Iglesia Católica, San Rafael de Montes de Oca	534 500	214 100
25	Urb. Las Cumbres, San Rafael de Montes de Oca	537 650	213 450
26	San Ramón de Tres Ríos	537 400	213 750
27	San Diego de Tres Ríos, Lote 1 Calle Mesen	535 150	208 450
28	San Diego de Tres Ríos, Lote 2 Calle Mesen	535 200	208 750
29	Los Cartagos de Heredia, sitio 1 Hacienda la Garita	519 000	236 000
30	Los Cartagos de Heredia, sitio 2 Hacienda la Garita	519 100	236 100
31	Oreamuno de Cartago, Finca Ivancovich	549 700	206 200
32	Paraíso de Cartago, Rio Títere	555 000	203 750

Fuente: recopilación por Novoa (2007)

Tabla A57. Continuación.

Punto	Localización	Longitud	Latitud
33	Carrizal, Alajuela (Novoa)	516 950	230 200
34	San José de la Montaña, Heredia (Novoa)	523 400	227 500
35	San Miguel, Heredia (Luis Alonso Aguilar)	-	-
36	IFAM (Luis Alonso Aguilar)	-	-
37	Sabanilla, San José (Luis Alonso Aguilar)	-	-
38	Coronado, San José (Luis Alonso Aguilar)	-	-
39	Ciruelas, Alajuela (Luis Alonso Aguilar)	-	-
40	Coyol, Alajuela (Luis Alonso Aguilar)	-	-
41	Santa Ana, San José (Luis Alonso Aguilar)	-	-
42	Lindora, Heredia (Luis Alonso Aguilar)	-	-
43	Alajuela (Luis Alonso Aguilar)	-	-
44	Ciruelas, Alajuela (Luis Gonzalo Lacayo)	-	-
45	Rio Grande, Alajuela (oeste) (Luis Gonzalo Lacayo)	-	-
46	Rio Grande, Alajuela (este) (Luis Gonzalo Lacayo)	-	-
47	Paraíso, Cartago (Hugo Brenes Guzmán)	-	-
48	Zapote, San José (Hugo Brenes Guzmán)	-	-
49	Santa Ana, San José (Hugo Brenes Guzmán)	-	-
50	Pacayas	556 579	211 000
51	Río Grande	499 500	217 400
52	Matinilla Santa Ana	517 936	207 087
53	Patio de Agua	533 686	218 607
54	Las Nubes	540 649	217 551
55	La Trinidad punto1 (TCU)	533 689	218 647
56	La Trinidad punto 2 (TCU)	533 700	218 634

Fuente: Novoa (2007)

Tabla A60. Clasificación de los suelos de sitios recopilados en trabajos previos.

Punto	Localización	Clasificación SUCS	Clasificación por **w**	Clasificación por **β**
1	Granadilla de Curridabat, urbanización Altamonte	MH	LL	LH
2	Granadilla norte de Curridabat, Urbanización Monteran	MH	LL	LH
3	2Km de la sede occidente UCR, San Ramón	MH	HH	HH
4	300m sur de la iglesia Tremedal, San Ramón	MH	LL	LL
5	700m oeste de la iglesia de San Ramón	MH	LL	LL
6	El Carmen de Guadalupe, Urbanización Buenavista	ML-MH	LL	LL
7	Granadilla norte de Curridabat, Urbanización Monteran	ML-MH	LH	HH
8	Las Nubes de Coronado, casa de retiros del Opus Dei	MH	LH	HH
9	Santo Domingo de Heredia, Subestación del ICE	MH	LL	LL
10	San Vicente de Moravia, edificio del IFAM	ML	LL	HL
11	Sabana Norte, Laboratorio de Suelos del ICE	MH	LL	HL
12	Colima de Tibas, subestación del ICE	CL	-	-
13	Las Nubes de Coronado, casa de retiros del Opus Dei	ML	LL	LL
14	Alajuela, Hospital de Alajuela	MH	LL	LL
15	Santa Cruz de Turrialba, detrás de la escuela	MH	HH	HH
16	Dulce nombre de Coronado, Barrio Don Jacinto	MH	HH	HH
17	Distrito central de Coronado, Urbanización Sinaí	CH	-	-
18	San Francisco de Coronado, Urbanización la Calabria	MH	HH	HH
19	Cascajal de Coronado, Lote 1 Hacienda la Guacamaya	MH	HH	HH
20	Cascajal de Coronado, Lote 2 Hacienda la Guacamaya	ML	HH	HH
21	Granadilla de Curridabat, Urbanización Altamonte	MH	HH	HH
22	Guayabos de Curridabat, Residencial Abeludes	MH	HH	HH
23	Guayabos de Curridabat, Urbanización Cataluña	MH	HH	HH
24	Iglesia Católica, San Rafael de Montes de Oca	MH	HH	HH
25	Urb. Las Cumbres, San Rafael de Montes de Oca	MH	HH	HH
26	San Ramón de Tres Ríos	MH	HH	HH
27	San Diego de Tres Ríos, Lote 1 Calle Mesen	MH	HH	HH
28	San Diego de Tres Ríos, Lote 2 Calle Mesen	MH	HH	HH
29	Los Cartagos de Heredia, sitio 1 Hacienda la Garita	MH	HH	HH
30	Los Cartagos de Heredia, sitio 2 Hacienda la Garita	MH	HH	HH
31	Oreamuno de Cartago, Finca Ivancovich	MH	HH	HH
32	Paraíso de Cartago, Rio Títere	MH	HH	HH

Fuente: Novoa (2007) y el autor (2010)

Tabla A60. Clasificación de los suelos de sitios recopilados en trabajos previos. (Continuación).

Punto	Localización	Clasificación SUCS	Clasificación por **w**	Clasificación por **β**
33	Carrizal (Novoa)	MH	HH	HH
34	San José de la Montaña (Novoa)	MH	HH	HH
35	San Miguel (Luis Alonso Aguilar)	MH	LL	LL
36	IFAM (Luis Alonso Aguilar)	ML	LL	HL
37	ICE, Sabana (Luis Alonso Aguilar)	CL-ML	LL	LL
38	Sabanilla (Luis Alonso Aguilar)	MH	LL	LL
39	Coronado (Luis Alonso Aguilar)	ML	LL	LL
40	Alajuela (Luis Alonso Aguilar)	MH	LL	LL
41	Ciruelas (Luis Gonzalo Lacayo)	MH	LL	LL
42	Río Grande (oeste) (Luis Gonzalo Lacayo)	MH	LL	LL
43	Río Grande (este) (Luis Gonzalo Lacayo)	MH	LL	LL
44	Paraiso (Hugo Brenes Guzmán)	MH	LL	LL
45	Zapote (Hugo Brenes Guzmán)	MH	LL	LL
46	PACAYAS	MH	HH	HH
47	RIO GRANDE	MH	LL	HL
48	MATINILLA SANTA ANA	MH	LL	LL
49	PATIO DE AGUA	ML	LH	HH
50	LAS NUBES	MH	HH	HH
51	LA TRINIDAD punto1 (TCU)	MH	LL	HL
52	LA TRINIDAD punto 2 (TCU)	ML	LL	HL

Fuente: recopilación de información UCR (2010)

NOTA: se asume que todos los materiales están probados con la mayor humedad posible, lograda de recolectar muestras en la temporada lluviosa.