RESUMEN.

Este trabajo resulta de comparar dos diferentes métodos para la obtención de la curva de retención del agua en los suelos, en suelos ubicados en la cuenca del río Paute, siendo estos sectores el bosque de pino de EMAC, Turi sector Mall del Río, Cachi sector El Valle, Cubilan, bosque protector se Saguín y Cubilan turbera Saguín, Tuñi y Chica despensa sector Biblián.

Estos suelos presentan diversas características como son: arcillosos, arenosos, con histosoles, andosoles, etc. Teniendo una gran variedad y pudiendo realizar varios ensayos con los mismos.

Las muestras las obtuvimos llegando a los sitios indicados, ubicados mediante GPS, tomamos las muestras con los equipos de muestreo para muestras alteradas e inalteradas, luego transportamos las muestras hacia el laboratorio donde empezamos a realizar los análisis.

El primer método es el Método por Etapas Múltiples (Multistep), que no es más que un elaborado sistema de múltiples etapas que mediante celdas sometidas a diversas presiones nos permite obtener datos para realizar la curva de retención de agua en suelos, este método resulta ser costoso. Difícil de transportar a lugares por constar de partes de vidrio.

El segundo método es la Caja de Arena, siendo un método mucho más simple y menos costoso de fácil elaboración y fácil de transportar, obteniéndose resultados que apenas varían en un 1.5% con respecto al primer método.

Estos dos métodos para la comparación de sus resultados siempre estuvieron ligados a un tercer método que es el Aparato de Membrana a presión el mismo que sirve para calcular el Punto de Marchitez permanente del Suelo.

PALABRAS CLAVES: Curva de retención de agua en los suelos, Multistep, Caja de Arena, Aparato de Membrana, Andosoles.

INDICE GENERAL

LISTA DE FIGURAS 4
LISTA DE GRAFICOS 5
LISTA DE TABLAS 6
CAPÍTULO 1 12
1.1 INTRODUCCIÓN 12
1.2 ANTECEDENTES 13
1.3 ALCANCE 14
1.4 JUSTIFICACIÓN 14
1.5 AUSPICIO 14
1.6 OBJETIVOS 15
1.6.1 Objetivo principal 15
1.6.2 Objetivos específicos 15
CAPÍTULO 2 16
2.1 EL SUELO 16
2.2 PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO 16
2.2.1 Textura 17
2.2.2 Estructura 19
2.2.3 Consistencia 24
2.2.4 Densidad 28
2.2.5 Porosidad 29
2.2.6 Temperatura 31
2.2.7 Color 31
2.3 PROPIEDADES HIDROFÍSICAS 33
2.3.1 Profundidad efectiva 33
2.3.2 Peso Volumétrico 35
2.3.3 Capacidad de Campo 35
2.3.4 Punto de Marchitez Permanente 36
2.4 CARACTERÍSTICAS HÍDRICAS DE LOS SUELOS 36
2.5 TIPOS DE HORIZONTES 37
2.6 POTENCIAL MÁTRICO DEL SUELO 39
2.7 INFILTRACION EN LOS SUELOS 40
2.7.1 Infiltración. 40
2.7.3 Capacidad de infiltración. 41
2.8 FASES DEL SUELO 41
2.8.1 Fase sólida. 41
2.8.2 Fase liquida. 42
2.8.3 Fase gaseosa 42
2.9 MEDICIÓN DEL AGUA EN EL SUELO 43

2.9.1 Medidas directas del contenido del agua en el suelo 43
2.9.2 Medidas indirectas del contenido del agua en el suelo 45

2.10 MODELO DE RETENCIÓN DEL AGUA 46
2.10.1 Capacidad de retención de agua disponible 46
2.10.2 Curva de retención del agua del suelo y aplicaciones 46

2.11 MÉTODOS 49
2.11.1 Equipos de Laboratorio 49
2.11.1.1 Método de Etapas Múltiples 49
2.11.1.2 Aparato de Membrana a Presión 51
2.11.1.3 Método de Caja de Arena 51

CAPÍTULO 3 53

3.1 ÁREA DE ESTUDIO 53
3.1.1 Descripción del área de estudio 53
3.1.2 Sitios de muestreo 55
3.1.2.1 Sector Bosque de Pino "EMAC" 55
3.1.2.2 Sector Mall "Turi" 56
3.1.2.3 Sector Cubilán "Turbera y Bosque" 57
3.1.2.4 Sector Tuñi y Chica Despensa 58
3.1.2.5 Sector Quimsacocha 59

3.2 EQUIPOS DE LABORATORIO UTILIZADOS EN EL ANALISIS 60
3.2.1 Método de Etapas Múltiples (Multistep out-flow) 60
3.2.1.1 Regulador de presión 72
3.2.2 Aparato de Membrana a Presión 75
3.2.3 Método de Caja de Arena. 81

3.3 TOMA DE MUESTRAS INALTERADAS Y ALTERADAS 89
3.3.1 Muestreo mediante extracción de muestras inalteradas 89
3.3.2 Muestreo mediante extracción de muestras alteradas 91

CAPÍTULO 4 93

4.1 PROCESAMIENTO DE DATOS 93
4.1.1 Tablas de resultados por el método Aparato de Membrana a presión. 93

4.2 RESULTADOS 108
4.2.1 Datos de Densidad Aparente 108
4.2.2 Datos de Contenido Volumétrico 108
4.2.3 Datos de Humedad Volumétrica por el Método de Etapas Múltiples 110
4.2.4 Datos de Humedad Volumétrica por el Método de Caja de Arena 119

CAPÍTULO 5 135

5.1 CONCLUSIONES 135

5.2 RECOMENDACIONES 136

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 137

ANEXOS 138

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Agregado 20
Figura 2.2 Estructura Buena 20
Figura 2.3 Estructura Granular 22
Figura 2.4 Estructura en Bloques 23
Figura 2.5 Estructura Prismática 23
Figura 2.6 Estructura Laminar 23
Figura 2.7 Prueba del límite plástico 25
Figura 2.8 Prueba del límite líquido 26
Figura 2.9 Tabla de Colores Munsell. Este tono (hue) es uno de los más utilizados en suelos. 32
Figura 2.10 Barrena para muestreo de suelos 35
Figura 2.11 Horizonte O 37
Figura 2.12 Horizonte A 38
Figura 2.13 Horizonte E 38
Figura 2.14 Horizonte B 38
Figura 2.15 Horizonte C 39
Figura 2.16 Horizonte R 39
Figura 2.17 Medidas indirectas del contenido del agua en el suelo 45
Figura 2. 18 Curva de retención de agua 47
Figura 2. 19 Ejemplo de curvas de retención de agua en el suelo 47

Figura 3.1 Experimento establecido para el método Etapas Múltiples 65
Figura 3.2 Provisión de presión de aire 66
Figura 3.3 Unidad de presión. 66
Figura 3.4 Componentes del regulador de presión 72
Figura 3.5 Presostatos del regulador de presión 73
Figura 3.6 Compresor. Aparato de Membrana. Válvula de aire 76
Figura 3.7 Muestra de suelo preparada 77
Figura 3.8 Armado del aparato de membrana de presión 78
Figura 3.9 Llenado del aparato de membrana de presión 78
Figura 3.10 Pesado de muestras 80
Figura 3.11 Caja de arena 82
Figura 3.12 Saturación de las muestras 84
Figura 3.13 Caja de Arena 85
Figura 3.14 Colocación de muestras en la Caja de Arena 87
Figura 3.15 Equipo utilizado para muestreo de suelos de campo 89
Figura 3.16 Toma de muestras alteradas 91

LISTA DE GRAFICOS

Gráfica 4.1 Curva de retención de agua Cubilán, Turbera. _____ 111
Gráfica 4.2 Curva de retención de agua, Tuñi_____ 112
Gráfica 4.3 Curva de retención de agua, Chica Despensa _____ 113
Gráfica 4.4 Curva de retención de agua, Mall "Turi" _____ 113
Gráfica 4.5 Curva de retención de agua, EMAC _____ 114
Gráfica 4.6 Curva de retención de agua, Cachi 2 _____ 115
Gráfica 4.7 Curva de retención de agua, Cachi 1 _____ 116
Gráfica 4.8 Curva de retención de agua, Cubilán Bosque _____ 117
Gráfica 4.9 Curva de retención de agua, Quimsacocha 1_____ 118
Gráfica 4.10 Curva de retención de agua, Quimsacocha 2_____ 119
Gráfica 4.11 Curva de retención de agua, Cubilán Turbera 1 _____ 120
Gráfica 4.12 Curva de retención de agua, Cubilán Turbera 2 _____ 120
Gráfica 4.13 Curva de retención de agua, Tuñi_____ 121
Gráfica 4.14 Curva de retención de agua, Chica Despensa _____ 122
Gráfica 4.15 Curva de retención de agua, Mall "Turi" _____ 123
Gráfica 4.16 Curva de retención de agua, EMAC _____ 124
Gráfica 4.17 Curva de retención de agua, Cachi 1 _____ 124
Gráfica 4.18 Curva de retención de agua, Cachi 2 _____ 125
Gráfica 4.19 Curva de retención de agua, Cubilán Bosque 1 _____ 126
Gráfica 4.20 Curva de retención de agua, Cubilán Bosque 2 _____ 126
Gráfica 4.21 Curva de retención de agua, Cubilán Bosque 3 _____ 127
Gráfica 4.22 Curva de retención de agua, Quimsacocha 1_____ 128
Gráfica 4.23 Curva de retención de agua, Quimsacocha 2_____ 129
Gráfica 4.24 Curva de retención de agua, Quimsacocha 12 A _____ 130
Gráfica 4.25 Curva de retención de agua, Quimsacocha 8 A _____ 130
Gráfica 4.26 Curva de retención de agua, Quimsacocha 8 AC_____ 131
Gráfica 4.27 Curva de retención de agua, Quimsacocha 3 A _____ 132
Gráfica 4.28 Curva de retención de agua, Quimsacocha 3 C _____ 133
Gráfica 4.29 Curva de retención de agua, Quimsacocha 4 AH_____ 133
Gráfica 4.30 Curva de retención de agua, Quimsacocha 4C _____ 134

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Tamaño de las partículas del suelo 17
Tabla 2.2 Composición media de los gases en el suelo 43
Tabla 2.3 Relación entre Hg y Hv 44
Tabla 2.4 Equivalencias y transformaciones para valores de pF 48
Tabla 4.1 Resultados de datos obtenidos mediante el Aparato de Membrana de presión 93
Tabla 4.2 Resultados de datos obtenidos mediante el Aparato de Membrana de presión 94
Tabla 4.4 Resultados de datos obtenidos mediante el Aparato de Membrana de presión 96
Tabla 4.5 Resultados de datos por el Método de Etapas Múltiples. 97
Tabla 4.6 Resultados de datos por el Método de Etapas Múltiples. 98
Tabla 4.7 Resultados de datos por el Método de Etapas Múltiples. 99
Tabla 4.8 Resultados de datos por el Método de Etapas Múltiples. 100
Tabla 4.9 Resultados de datos por el Método de Etapas Múltiples. 101
Tabla 4.10 Resultados de datos por el Método de Etapas Múltiples. 102
Tabla 4.11 Resultados de datos por el Método de Etapas Múltiples. 103
Tabla 4.12 Resultados de datos por el Método de Etapas Múltiples. 104
Tabla 4.13 Resultados de datos por el Método Caja de Arena. 105
Tabla 4.14 Resultados de datos por el Método Caja de Arena. 106
Tabla 4.15 Resultados de datos por el Método Caja de Arena. 107
Tabla 4.16 Densidades Aparentes de los sitios analizados. 108
Tabla 4.17 Contenido Volumétrico a 3 bares de presión de los sitios analizados 109
Tabla 4.18 Contenido Volumétrico a 14,5 bares de presión de los sitios analizados 109
Tabla 4.19 Humedad Volumétrica "Cubilán Turbera" 110
Tabla 4.20 Humedad Volumétrica "Tuñi" 111
Tabla 4.21 Humedad Volumétrica "Chica Despensa" 112
Tabla 4.22 Humedad Volumétrica "Mall" 113
Tabla 4.23 Humedad Volumétrica "EMAC" 114
Tabla 4.24 Humedad Volumétrica "Cachi 2" 115
Tabla 4.25 Humedad Volumétrica, "Cachi 1" 115
Tabla 4.26 Humedad Volumétrica, "Cubilán Bosque" 116
Tabla 4.27 Humedad Volumétrica "Quimsacocha 1" 117
Tabla 4.28 Humedad Volumétrica "Quimsacocha 2" 118
Tabla 4.29 Humedad Volumétrica "Cubilán Turbera 1" 119
Tabla 4.30 Humedad Volumétrica "Cubilán Turbera 2" 120
Tabla 4.31 Humedad Volumétrica "Tuñi" 121
Tabla 4.32 Humedad Volumétrica "Chica Despensa" 121
Tabla 4.33 Humedad Volumétrica "Mall" 122
Tabla 4.34 Humedad Volumétrica "EMAC" 123
Tabla 4.35 Humedad Volumétrica "Cachi 1" 124
Tabla 4.36 Humedad Volumétrica "Cachi 2" 125
Tabla 4.37 Humedad Volumétrica "Cubilán Bosque 1" 125

Tabla 4.38 Humedad Volumétrica "Cubilán Boque 2" _____ *126*
Tabla 4.39 Humedad Volumétrica "Cubilán Bosque 3" _____ *127*
Tabla 4.40 Humedad volumétrica "Quimsacocha 1" _____ *127*
Tabla 4.41 Humedad Volumétrica "Quimsacocha 2" _____ *128*
Tabla 4.42 Humedad Volumétrica "Quimsacocha 12 A" _____ *129*
Tabla 4.43 Humedad Volumétrica "Quimsacocha 8 A" _____ *130*
Tabla 4.44 Humedad Volumétrica "Quimsacocha 8 AC" _____ *131*
Tabla 4.45 Humedad Volumétrica "Quimsacocha 3 A" _____ *131*
Tabla 4.46 Humedad Volumétrica "Quimsacocha 3 C" _____ *132*
Tabla 4.47 Humedad Volumétrica "Quimsacocha 4 AH" _____ *133*
Tabla 4.48 Humedad Volumétrica "Quimsacocha 4 C" _____ *134*

UNIVERSIDAD DE CUENCA.

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

"VALIDACIÓN DE LOS MÉTODOS DE LABORATORIO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA EN SUELOS"

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

AUTORA: TANIA FERNANDA ORELLANA GUANUCHI

DIRECTOR: ING. AGUSTÍN RENGEL

Cuenca – Ecuador

FEBRERO 2010

DEDICATORIA.

A mis padres, hermanos y a todas las personas que de una u otra forma ayudaron para que este trabajo se concluya.

AGRADECIMIENTO.

Expreso mi más sincero e imperecedero agradecimiento a:

Dios por darme la vida.

A mis padres y hermanos por el amor y el apoyo brindados.

Al Ing. Agustín Rengel por la generosidad de dirigir esta tesis.

Al Ing. Esteban Pacheco, Ing. Pedro Cisneros e Ing. Sandra Mejía por la generosidad con la que impartieron sus amplísimos conocimientos durante la elaboración de esta tesis.

Al Ing. Felipe Cisneros Director del PROMAS Universidad de Cuenca y por medio de él a todas las personas que conforman esta institución, ya que sin su apoyo no hubiera sido posible realizar este trabajo.

A Juan Fernando por su apoyo incondicional durante el tiempo que duro este trabajo.

A la Universidad de Cuenca de manera especial a los profesores de la Escuela de Ingeniería Civil por las enseñanzas impartidas a lo largo de la carrera.

A todas las personas que de una u otra manera colaboraron en la elaboración de esta tesis.

LA AUTORA

AUTORÍA

Todos los criterios, opiniones, afirmaciones, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y todos los demás aspectos vertidos en la presente tesis son de absoluta responsabilidad del autor.

Cuenca, febrero del 2010

Tania Fernanda Orellana Guanuchi
CI: 010412242-9

CAPÍTULO 1

VALIDACIÓN DE LOS MÉTODOS DE LABORATORIO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA EN SUELOS

1.1 INTRODUCCIÓN

El agua y el suelo constituyen uno de los factores más importantes en el equilibrio de la biosfera, ya que ellos hacen posible el crecimiento de las plantas y la vida en general.

El agua en el suelo es de gran importancia para los procesos hidráulicos e hidrológicos, dentro de esos procesos se encuentran la infiltración de agua en el suelo, la misma que ha sido ampliamente estudiada debido a la importancia para la agricultura (conservación del agua, riego y drenaje), así también con fines ingenieriles (estabilidad de taludes y laderas, presas, conservación y manejo de acuíferos subterráneos).

Al ser las propiedades hidrofísicas de los suelos, parámetros de suma importancia para el diseño de sistemas de riego y drenaje por medio de los programas para el manejo de agua y del suelo PROMAS se vio la necesidad de realizar el presente estudio denominado “Validación de los métodos de laboratorio para la determinación de la capacidad de retención de agua en suelos”

1.2 ANTECEDENTES

Las propiedades hidrofísicas de retención de agua en los suelos, son fundamentales en el entendimiento de los procesos hidrológicos y en establecimiento de balance de agua en cuencas hidrográficas, en este sentido, se ha realizado algunos esfuerzos encaminados al establecimiento de métodos y procedimientos de caracterización de variación, sin embargo, debido a las características propias de los suelos en la región es necesario adaptar y ajustar dichos procedimientos a fin de contemplar aspectos influyentes como pendientes, profundidad efectiva de los suelos, tipo, contenido de materia orgánica etc.

La Universidad de Cuenca mantiene actualmente un convenio con el Consejo Interuniversitario Flamenco VLIR, dentro del cual se están desarrollando varios proyectos como el Integrated Water Quality Management IWQM. Adicionalmente la KU Leuven de Bélgica a participado en el desarrollo de proyectos de investigación como: “Hacia un Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas de Montaña: Estudio del caso de la Cuenca del Río Paute” (VLIR 005) y Desarrollo de un Sistema de Soporte de Decisiones para Iniciativas de Intervención en la Cuenca Media del Río Paute (VLIR 006 en ejecución), proyectos con los cuales se pretende lograr un mejor entendimiento de los aspectos relacionados a los diferentes efectos que tienen las intervenciones antrópicas en los procesos hidrológicos de escorrentía e infiltración y de los impactos en las propiedades y en erosión de los suelos, la producción de sedimentos y los regímenes de caudales.

1.3 ALCANCE

El desarrollo del tema propuesto permitirá ajustar los procedimientos de laboratorio para una mejor caracterización de las propiedades hidrofísicas de suelo relacionadas a retención de humedad y al comportamiento hidráulico de los mismos. Se realizará la revisión de los métodos disponibles para determinación de humedad de suelo y de su variación a fin de establecer un procedimiento estandarizado.

1.4 JUSTIFICACIÓN

La realización del tema se justifica en el sentido de que para lograr resultados que permitan el análisis adecuado del comportamientos de los suelos, se requiere una revisión, adaptación de los procedimientos de laboratorio convencionales, especialmente si se trata de suelos con características particulares como los presente en la región, por ejemplo los suelos de ecosistemas de páramo (Andosoles), carecen aún de los estudios suficientes que permitan establecer de manera científica los cambios, y propiedades referentes a retención de agua, aspecto muy importante en el futuro de la gestión del recurso hídrico.

1.5 AUSPICIO

El presente tema será realizado en el contexto de varios proyectos de investigación que se vienen ejecutando en el PROMAS Universidad de Cuenca, entre ellos se encuentra el proyecto: “Establecimiento de la línea de base de los páramos de Quimsacocha”, y el proyecto Integrated Water Quality management que se ejecuta en el marco del convenio que se mantiene con el Consejo Interuniversitario Flamenco VLIR.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo principal

- Aportar al establecimiento de métodos y procedimientos de laboratorio que permitan una caracterización adecuada y coherente con las características propias de los suelos de la región

1.6.2 Objetivos específicos

- Revisar los métodos y procedimientos de laboratorio para la determinación de la capacidad de retención de agua en los suelos.
- Validar los procesos de laboratorio en la determinación de la capacidad de retención del suelo.
- Analizar el comportamiento de retención de agua para suelos representativos.

CAPÍTULO 2

2.1 EL SUELO

El vocablo suelo deriva de la palabra latina “solum” con la que se denominaba a la superficie sólida de la Tierra, que solo constituye, 149 millones de km², al 29% de la superficie del planeta, que alcanza los 510 millones de km².

El suelo es el cuerpo que se forma en la superficie terrestre como consecuencia, en principio, del proceso de meteorización del material geológico de partida, proceso cuyo desarrollo en el tiempo está condicionado fundamentalmente por el clima y coadyuvado por otros factores como el relieve y los organismos, destacando entre estos últimos la vegetación.

El suelo corresponde a la última capa de la superficie de la tierra y es un sistema poroso formado por infinidad de partículas sólidas de diferentes tamaños y composición química. Tiene diferentes capas, a las que se les llama Horizontes. Esto constituye el Perfil del Suelo.

2.2 PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

El suelo es una mezcla de materiales sólidos, líquidos (agua) y gaseosos (aire).

La adecuada relación entre estos componentes determina la capacidad de hacer crecer las plantas y la disponibilidad de suficientes nutrientes para ellas.

La proporción de los componentes determina una serie de propiedades que se conocen como propiedades físicas o mecánicas del suelo: textura, estructura, consistencia, densidad, porosidad, temperatura y color.

2.2.1 Textura

La textura del suelo depende del tamaño de las partículas que la forma. Entre las partículas tenemos la arena, el limo y la arcilla.

Clasificación de las partículas del suelo según el United States Departament of Agriculture.

Tabla 2.1 Tamaño de las partículas del suelo

La propiedad del suelo directamente relacionada con el área superficial de las partículas es la textura o distribución de las partículas minerales según su tamaño. Conociendo la textura se pueden conocer muchas de las propiedades hídricas de los suelos. Además la textura es una propiedad muy estable en los suelos, mientras que la estructura y la cantidad y tipo de materia orgánica, que también influyen en las propiedades hídricas, son propiedades que pueden variar a corto y medio plazo (lluvias intensas, cambios en la vegetación, puesta en cultivo de los suelos.)

Se puede generalizar afirmando que:

A. Cuanto mayor es el tamaño de las partículas más rápida es la infiltración y menor es el agua retenida por los suelos (los suelos arenosos son más permeables y retienen menos agua que los arcillosos).

B. Los suelos con buena estructura tienen mayor velocidad de infiltración que los compactados.
C. El mayor contenido en materia orgánica aumenta el agua retenida por el suelo.
D. Como es lógico, a mayor espesor del suelo mayor capacidad de retener agua.

La textura y las propiedades hídricas de un suelo están muy relacionadas, por lo que se puede atribuir a cada tipo de textura un determinado comportamiento hídrico.

Suelos arenosos: En ellos predominan las arenas o partículas minerales mayores de 0,05mm de diámetro (cuando las partículas son mayores de 0,2mm se denominan gravas). Son suelos muy permeables (la permeabilidad es la velocidad de infiltración del agua de gravitación), pues en ellos predominan los macro poros.

Su capacidad de retención de agua o capacidad de campo es baja, y también lo es el agua disponible por las plantas o agua útil, pues presentan una baja micro porosidad. Deben ser regados, frecuentemente. Sus ventajas serían que son fáciles de trabajar y no presentan problemas de aireación.

Suelos Limosos: En ellos predominan los limos o partículas entre 0,05 y 0,002mm la permeabilidad varía mucho en ellos, según su estructura. Puede ser muy lenta cuando la estructura es masiva (sin formar agregados) o bastante rápida cuando la estructura es grumosa. Son fácilmente apelmazables cuando se destruye su estructura, dificultando la circulación del aire y del agua.

Sin embargo suelen presentar una buena cantidad de agua disponible para las plantas, pues retienen mucha más agua que los suelos arenosos a capacidad de campo, aunque su punto de marchitamiento también es mayor.

Suelos arcillosos: En ellos predominan las arcillas o partículas menores de 0.002 mm. Son muy impermeables y mal aireados, pues en ellos predominan los microporos. Son difíciles de trabajar pues son muy plásticos cuando están húmedos y compactos cuando están secos. En ellos las lluvias finas y duraderas aportan más agua al suelo que las intensas y rápidas. Aunque esto ocurre también en la mayoría de los suelos, en el caso de los suelos arcillosos.
Si presentan alto contenido en materia orgánica (o la aportamos nosotros) se corrigen en gran parte estas propiedades desfavorables.

Suelos francos: En ellos no predomina claramente ninguno de los tres tipos de partículas. Presentan una mezcla de arenas, limos y arcillas en proporciones equilibradas. Estos suelos son los mejores para el crecimiento de la mayoría de las plantas (aunque hay plantas adaptadas y que prefieren los suelos arenosos muy permeables y otras los suelos arcillosos encharcables). Presentan las ventajas de los distintos tipos de partículas, eliminándose sus desventajas. Así son ligeros, aireados y permeables (pero no tanto como los arenosos) y de media-alta capacidad de retención de agua (aunque no retienen tanta como los arcillosos).

2.2.2 Estructura

Es la forma en que las partículas del suelo se reúnen para formar agregados. De acuerdo a esta característica se distinguen suelos de estructura esferoidal (agregados redondeados), laminar (agregados en láminas), prismática (en forma de prisma), blocosa (en bloques), y granular (en granos).

La estructura del suelo se define por la forma en que se agrupan las partículas individuales de arena, limo y arcilla. Cuando las partículas individuales se agrupan, toman el aspecto de partículas mayores y se denominan agregados.

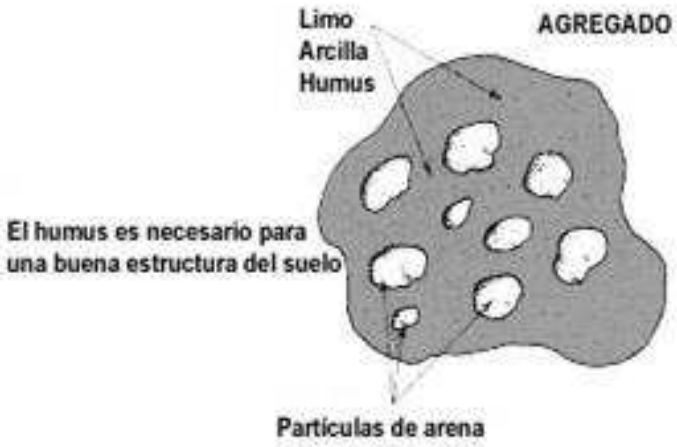


Figura 2.1 Agregado

Figura 2.2 Estructura Buena

Grados de estructura del suelo

El grado de estructura es la intensidad de agregación, y expresa la diferencia entre la cohesión dentro de los agregados y la adhesividad entre ellos. Debido a que estas propiedades varían según el contenido de humedad del suelo, el

grado de estructura debe determinarse cuando el suelo no esté demasiado húmedo o seco.

Existen cuatro grados fundamentales de estructura:

A. **Sin estructura**: condición en la que no existen agregados visibles o bien no hay un ordenamiento natural de líneas de debilidad, tales como:

   - **Estructura de aglomerado** (coherente) donde todo el horizonte del suelo aparece cementado en una gran masa;
   - **Estructura de grano simple** (sin coherencia) donde las partículas individuales del suelo no muestran tendencia a agruparse, como la arena pura;

B. **Estructura débil**: está deficientemente formada por agregados indistintos apenas visibles. Cuando se extrae del perfil, los materiales se rompen dando lugar a una mezcla de escasos agregados intactos, muchos quebrados y mucho material no agregado

C. **Estructura moderada**: se caracteriza por agregados bien formados y diferenciados de duración moderada, y evidentes aunque indistintos en suelos no alterados. Cuando se extrae del perfil, el material edáfico se rompe en una mezcla de varios agregados enteros distintos, algunos rotos y poco material no agregado;

D. **Estructura fuerte**: se caracteriza por agregados bien formados y diferenciados que son duraderos y evidentes en suelos no alterados. Cuando se extrae del perfil, el material edáfico está integrado principalmente por agregados enteros e incluye algunos quebrados y poco o ningún material no agregado.

Clases y tipos de estructura del suelo

La clase de estructura describe el tamaño medio de los agregados individuales. En relación con el tipo de estructura de suelo de donde proceden los agregados, se pueden reconocer, en general, cinco clases distintas que son las siguientes:

- **Muy fina** o **muy delgada**
- **Fina** o **delgada**
- **Mediana**
- **Gruesa** o **espesa**
- **Muy gruesa** o **muy espesa**

El tipo de estructura describe la forma o configuración de los agregados individuales. Estos se clasifican de la forma siguiente:

A. **Estructuras granulares y migajosas:** son partículas individuales de arena, limo y arcilla agrupadas en granos pequeños casi esféricos. El agua circula muy fácilmente a través de esos suelos. Por lo general, se encuentran en el horizonte A de los perfiles de suelos.

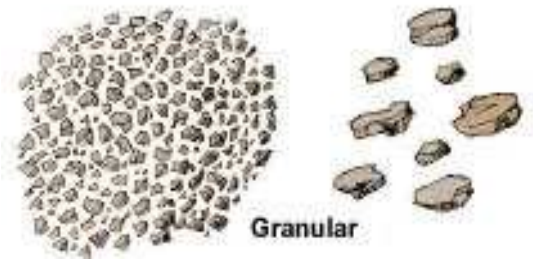


Figura 2.3 Estructura Granular

B. **Estructuras en bloques o bloques sub-angulares:** son partículas de suelo que se agrupan en bloques casi cuadrados o angulares con los bordes más o menos pronunciados. Los bloques relativamente grandes indican que el suelo resiste la penetración y el movimiento del agua. Suelen encontrarse en el horizonte B cuando hay acumulación de arcilla.

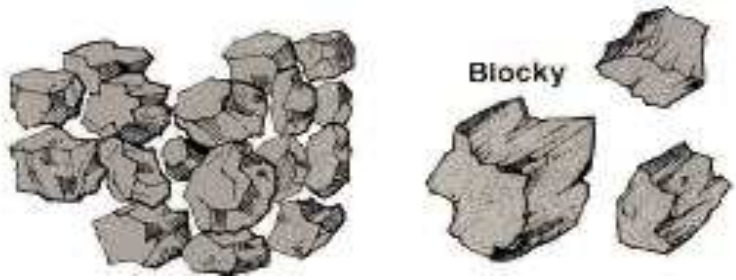


Figura 2.4 Estructura en Bloques

C. **Estructuras prismáticas y columnares:** son partículas de suelo que han formado columnas o pilares verticales separados por fisuras verticales diminutas, pero definidas. El agua circula con mayor dificultad y el drenaje es deficiente. Normalmente se encuentran en el horizonte B cuando hay acumulación de arcilla.

Figura 2.5 Estructura Prismática

D. **Estructura laminar:** se compone de partículas de suelo agregadas en láminas o capas finas que se acumulan horizontalmente una sobre otra. A menudo las láminas se traslapan, lo que dificulta notablemente la circulación del agua. Esta estructura se encuentra casi siempre en los suelos boscosos, en parte del horizonte A y en los suelos formados por capas de arcilla.

Figura 2.6 Estructura Laminar

2.2.3 Consistencia

Es la característica física que gobierna las fuerzas de cohesión-adhesión, responsables de la resistencia del suelo a ser moldeado o roto.

Dichas fuerzas dependen del contenido de humedades por esta razón que la consistencia se debe expresar en términos de seco, húmedo y mojado.

Se refiere a las fuerzas que permiten que las partículas se mantengan unidas, se puede definir como la resistencia que ofrece la masa de suelo a ser deformada o amasada.- Las fuerzas que causan la consistencia son: cohesión y adhesión.

Cohesión.- Esta fuerza es debida a atracción molecular en razón, a que las partículas de arcilla presentan carga superficial, por una parte y la atracción de masas por las fuerzas de Van der Walls, o por otra (gavande, 1976). Además de estas fuerzas, otros factores tales como compuestos orgánicos, carbonatos de calcio y óxidos de hierro y aluminio, son agentes que integran el mantenimiento conjunto de las partículas.

La cohesión, entonces es la atracción entre partículas de la misma naturaleza.
Adhesión.- Se debe a la tensión superficial que se presenta entre las partículas de suelo y las moléculas de agua. Sin embargo, cuando el contenido de agua aumenta, excesivamente, la adhesión tiende a disminuir. El efecto de la adhesión es mantener unidas las partículas por lo cual depende de la proporción Agua/Aire.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto se puede afirmar que la consistencia del suelo posee dos puntos máximos; uno cuando esta en estado seco debido a cohesión y otro cuando húmedo que depende de la adhesión.

Plasticidad

Cualidad por la cual el material edáfico cambia continuamente de forma al aplicarse una presión y mantiene esa forma luego de eliminar la presión.

Límites de Atterberg

Límite Plástico (LP): contenido de humedad al cual el suelo comienza a comportarse como un material plástico.

Límite Líquido (LL): contenido de humedad al cual el suelo comienza a comportarse como un material líquido y fluye.

Índice de Plasticidad (IP): contenido de humedad entre el LL y el LP (LL – LP).

Limite Plástico (LP).- Se puede realizar una tira cilíndrica cuya finalidad es hacer una pasta de suelo con agua luego es amasada hasta crear o formar un cilindro de 10cm x 0.5cm el grosor.

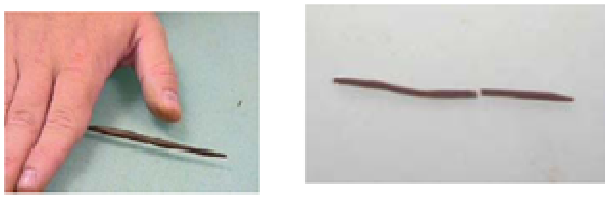


Figura 2.7 Prueba del límite plástico

Después de fragmentar los cilindros se pesa y se lleva al horno a una temperatura de 105 a 110ºC, se deja secar por 24 horas y finalmente se vuelve a pesar la muestra.

$$PW = \frac{Psh - Pss * 100}{Pss} \qquad (2.1)$$

Donde:

PW = Contenido de Humedad.

Psh = Peso de Suelo Húmedo.

Pss = Peso de Suelo Seco.

Límite Líquido (LL).- Contenido de humedad (%) requerido para cerrar una ranura de 2mm de ancho en una muestra húmeda de suelo después de 25 golpes.

Aparato de Casagrande (ASTM D 4318)

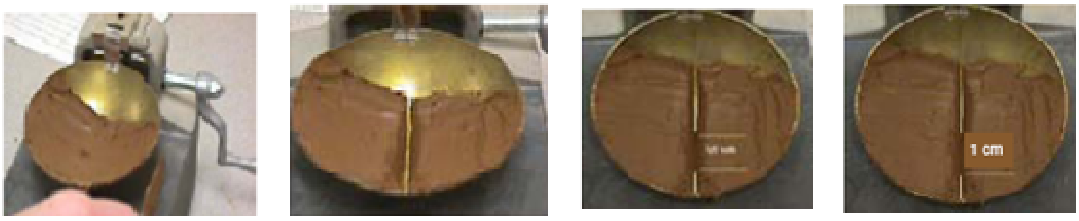


Figura 2.8 Prueba del límite líquido

Si se logra un número de golpes entre 12 y 38 se recoge el suelo que se encuentre en la unión y se lo coloca en una lata, luego se pesa la lata con el suelo se lo lleva la muestra al horno a 105 -110ºC por 24 horas y finalmente se pesa la muestra seca.

Índice de Plasticidad.- Es un parámetro físico que se relaciona con la facilidad de manejo del suelo, con el contenido y tipo de arcilla presente en el suelo.

Se obtiene de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico:

$$IP = LL - LP > 10 \text{ plástico.}$$

$$IP = LL - LP < 10 \text{ no plástico.}$$

Valores Menores de 10 indican baja plasticidad, y valores cercanos a los 20 señalan suelos muy plásticos.

Consistencia en suelo húmedo.- Se determina a un contenido de humedad aproximadamente intermedio entre suelo seco al aire y en su capacidad de campo, intentando desmenuzar en la mano una masa de suelo que se encuentra ligeramente humedecida. Entre los suelos de consistencia húmeda esta los siguientes.

- **Suelto:** Sin coherencia.
- **Muy friable:** El material se desmenuza bajo muy ligera presión, pero se une cuando se comprime.
- **Friable:** El material se desmenuza fácilmente bajo ligera o moderada presión entre pulgar e índice.
- **Firme:** El material se desmenuza bajo fuerte presión entre pulgar e índice, pero se nota una clara resistencia.
- **Muy firme:** El material se desmenuza bajo fuerte presión; apenas desmenuzable entre pulgar e índice.
- **Extremadamente firme:** El material se desmenuza solamente bajo una presión muy fuerte; no se puede desmenuzar entre pulgar e índice y se debe romper pedazo a pedazo.

Consistencia en suelo seco.- Se determina tratando de romper una masa de suelo seca al aire entre pulgar e índice, o bien en la mano. Entre los suelos de consistencia seca esta los siguientes.

- **Suelto:** Sin coherencia.
- **Blando:** La masa del suelo tiene débil coherencia; se deshace en polvo o granos sueltos bajo poca presión.
- **Ligeramente duro:** Débilmente resistente a la presión; se rompe fácilmente entre pulgar e índice.
- **Duro:** Moderadamente resistente a la presión; se puede romper en la mano sin dificultad, pero difícilmente se rompe entre pulgar e índice.
- **Muy duro**: Muy resistente a la presión; se puede romper en la mano solamente con dificultad; no se rompe entre pulgar e índice.

- **Extremadamente duro:** Extremadamente resistente a la presión; no se puede romper en la mano.

2.2.4 Densidad

La densidad es una medida de cuánto material se encuentra comprimido en un espacio determinado; es la cantidad de masa por unidad de volumen, y está en relación a la porosidad. Un suelo muy poroso será menos denso; un suelo poco poroso será más denso. A mayor contenido de materia orgánica, más poroso y menos denso será el suelo.

Ahora bien, dado su carácter poroso, conviene distinguir entre la densidad de sus componentes sólidos y la del conjunto del suelo, incluyendo los huecos, por ello nos referiremos a dos tipos de densidad.

Densidad real.- Es la relación entre la masa total de las partículas sólidas y su volumen, sin tomar en cuenta el espacio poroso existente

$$Dr = \frac{Ms}{Vs} \qquad (2.2)$$

Donde:

Dr= Densidad real (gr/cm³)
Ms= Masa de sólidos (gr)
Vs= Volumen de sólidos (cm³)

Se puede tomar un valor estándar de 2,6 y 2,7gr/cm³ para los suelos minerales

Densidad aparente.- Es la relación entre la masa del suelo seco y su volumen total (conjuntamente sólidos y poros)

$$Da = \frac{Ms}{Vt} = \frac{Ms}{(Vs + Va + Vw)} \qquad (2.3)$$

Donde:

Da= Densidad aparente (gr/cm³)
Ms= Masa de sólidos (gr)
Vt= Volumen total (cm³)
Va= Volumen de aire (cm³)
Vw= Volumen de agua (cm³)

El valor de Da es menor al de la densidad real (Dr) fluctuando entre 1,3 y 1,35gr/cm³.

En suelos arenosos puede llegar a 1,6gr/cm³; y en suelos de tipo arcillosos puede ser 1,1gr/cm³ (Valarezo, y otros 1998)

2.2.5 Porosidad

Debido a que las partículas constituyentes del suelo varían en tamaño, forma, regularidad, entre otras características, los poros difieren considerablemente unos de otros en forma, dimensiones laterales, longitudinales, etc.

Se pueden evaluar dos parámetros: la porosidad total y la distribución del tamaño de poros; en donde el primero corresponde al índice del volumen relativo de poros, es decir, la relación entre el espacio poroso y el volumen total de una muestra inalterada, así:

$$Po = \frac{Vp}{Vt} = \frac{(Va + Vw)}{(Vs + Va + Vw)} \qquad (2.4)$$

Donde:

Po= Porosidad total

Vp= Volumen de poros (cm³)

Vt= Volumen total del suelo (cm³)

Otra manera de obtener la porosidad total es mediante los valores de Dr y Da, mediante la siguiente ecuación:

$$Po = 100\left[1 - \left(\frac{Da}{Dr}\right)\right] \qquad (2.5)$$

La distribución del tamaño de los poros se estima a partir de los volúmenes de agua extraídos a diferentes rangos de succión, para lo cual es indispensable disponer de la curva del pF del suelo, que se repasará más adelante.

Relación de vacíos.- Es la relación entre el volumen de poros y el volumen de sólidos, así:

$$e = \frac{(Va + Vw)}{Vs} = \frac{Vp}{(Vt - Vp)} \qquad (2.6)$$

El valor de e generalmente fluctúa entre 0,3 y 2,0

En líneas generales la porosidad varía dentro de los siguientes límites:

- Suelos ligeros: 30 - 45 %
- Suelos medios: 45 - 55 %
- Suelos pesados: 50 - 65 %
- Suelos turbosos: 75 - 90 %

2.2.6 Temperatura

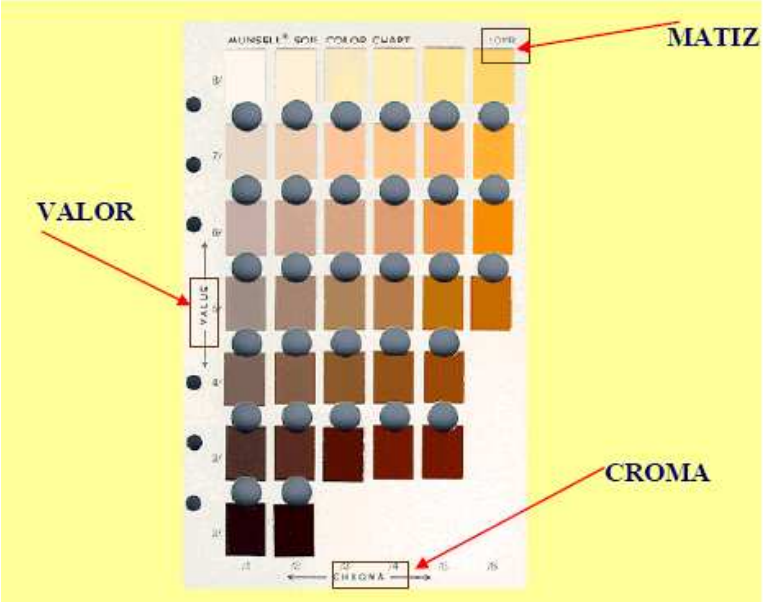
La temperatura del suelo es importante porque determina la distribución de las plantas e influye en los procesos bióticos y químicos. Cada planta tiene sus requerimientos especiales. Sobre los 5º C es posible la germinación.

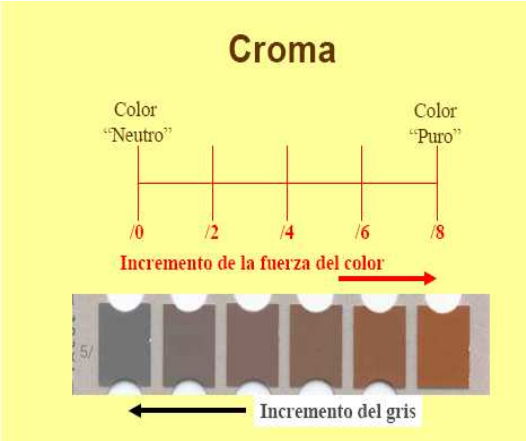
2.2.7 Color

El color del suelo depende de sus componentes y puede usarse como una medida indirecta de ciertas propiedades. El color varía con el contenido de humedad. El color rojo indica contenido de óxidos de hierro y manganeso; el amarillo indica óxidos de hierro hidratado; el blanco y el gris indican presencia de cuarzo, yeso y caolín; y el negro y marrón indican materia orgánica. Cuanto más negro es un suelo, más productivo será, por los beneficios de la materia orgánica.

El color del suelo puede proporcionar información clave sobre otras propiedades del medio edáfico. Por ejemplo, suelos de colores grisáceos y con presencia de "moteados o manchas" son síntomas de malas condiciones de aireación. Horizontes superficiales de colores oscuros tenderán a absorber mayor radiación y por consiguiente a tener mayores temperaturas que suelos de colores claros. La medición del color del suelo se realiza con un sistema estandarizado basado en la "Tabla de Colores Munsell". En esta tabla se miden los tres componentes del color:

- Tono (hue) (En suelos es generalmente rojizo o amarillento)
- Intensidad o brillantez (chroma)
- Valor de luminosidad (value)





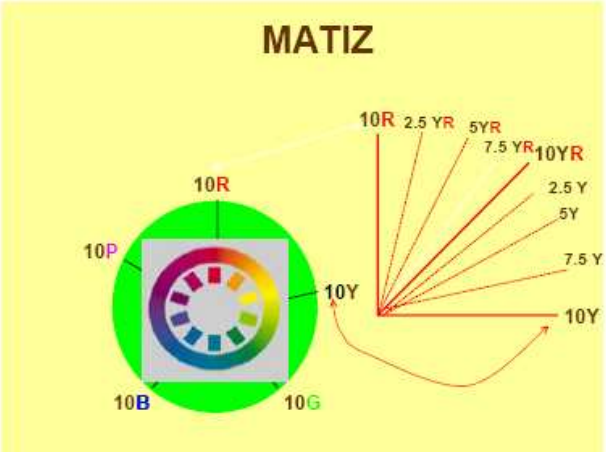
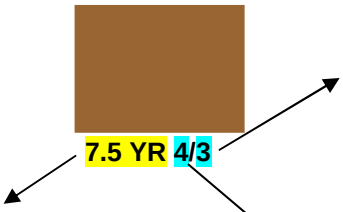


Figura 2.9 Tabla de Colores Munsell. Este tono (hue) es uno de los más utilizados en suelos.

Notación Munsell.- El código Munsell de cada color en la tabla es una notación universal que describe el color de los suelos.



Croma (Choma).- Describe cuán intenso es un color. Su escala varía desde 1 hasta8. Para colores neutros, el cromo =0.

Valor (Value).- Indica la claridad de un color. Su escala fluctúa desde 0 para el negro puro a 8 para el blanco puro.

Matiz (hue).- Representa el tipo de luz reflejada por el suelo.

Y=Amarillo **R=Rojo** **G=Verde** **B=Azul** **YR=Rojo amarillento**

2.3 PROPIEDADES HIDROFÍSICAS

2.3.1 Profundidad efectiva

La profundidad efectiva de un suelo es el espacio en el que las raíces de las plantas comunes pueden penetrar sin mayores obstáculos, con vistas a conseguir el agua y los nutrimentos indispensables. Tal información resulta ser de suma importancia para el crecimiento de las plantas. La mayoría de las últimas pueden penetrar más de un metro, si las condiciones del suelo lo permiten.

Un suelo debe tener condiciones favorables para recibir, almacenar y hacer aprovechable el agua para las plantas, a una profundidad de por lo menos de un

metro. En un suelo profundo las plantas resisten mejor la sequía, ya que a más profundidad mayor capacidad de retención de humedad. De igual manera, la planta puede usar los nutrimentos almacenados en los horizontes profundos del subsuelo, si éstos están al alcance de las raíces.

Cualquiera de las siguientes condiciones puede limitar la penetración de las raíces en el suelo:

a) Roca dura sana
b) Cascajo (pedregosidad abundante)
c) Agua (nivel, napa o manto freático cercano a la superficie)
d) Tepetales.

Con vistas a planificar su uso, los suelos pueden clasificarse en cuatro grupos, de acuerdo con su profundidad efectiva:

- Suelos profundos tienen un metro o más hasta llegar a una capa limitante.
- Moderadamente profundos tienen menos de un metro pero más de 0,60m.
- Suelos poco profundos tienen menos de un metro pero más de 0,60m.
- Suelos someros tienen menos de 0,25 m.

La profundidad de 0,60 m, es la mínima recomendable con vistas a la producción comercial de especies, tales como los cítricos. Esta determinación se puede hacer abriendo un perfil de al menos un metro de profundidad o haciendo uso de un barreno de suelos.

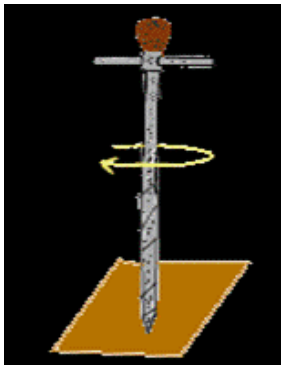


Figura 2.10 Barrena para muestreo de suelos

2.3.2 Peso Volumétrico

Peso volumétrico viene siendo la relación que existe entre el peso de un material y su volumen.

Se determina con la siguiente formula:

$$PV = \frac{Wm}{V} \qquad (2.7)$$

Donde:

PV = peso volumétrico (gr/cm³)
Wm = peso de una muestra de material en estado seco (gr)
V = Volumen que ocupa el material (cm³)

2.3.3 Capacidad de Campo

A la Capacidad de Campo se entiende como contenido de humedad que alcanza el suelo cuando no puede absorber más agua de forma natural de la lluvia. Se considera entonces que el suelo ha alcanzado la capacidad de campo. Este dato puede ser muy variable incluso en el mismo suelo a lo largo del tiempo. En laboratorio este valor se considera cuando el pF, potencial de succión, es igual a

2 bares o lo que es lo mismo cuando la succión ha alcanzado 100 centímetros de columna de agua. La capacidad de campo es un dato muy importante porque nos da una idea del grado de absorción que tiene el suelo, sus reservas de agua ante una previsible sequía o el momento en que empezará a escurrir.

2.3.4 Punto de Marchitez Permanente

El concepto de punto de marchitez ó de marchitamiento permanente ha sido definido como "el contenido de humedad en la zona de las raíces, según el cual la planta se marchita y no puede recobrar igual turgencia al colocarla en una atmósfera saturada de agua durante doce horas". Se puede determinar mediante membrana de Richard relacionándolo con el contenido en humedad a un potencial matricial de 15 bares (1500 kPa). Pues se ha comprobado que el contenido de humedad de un suelo a una succión matricial de 1500 kPa se encuentra dentro del intervalo en el que una gran parte de las plantas se marchitan

2.4 CARACTERÍSTICAS HÍDRICAS DE LOS SUELOS

Agua Estructural.- Esta contenida en los minerales del suelo (hidromica, óxidos hidratados, etc.) solamente son liberados en procesos edáficos.

Agua Hidroscópica.- Es Agua inmóvil, es removida solamente por calentamiento o sequía prolongada.

Agua Capilar.- Es agua retenida en los microporos por fuerza de capilaridad, el agua de los capilares mayores se puede percolar pero no puede drenar fuera del perfil

Agua Gravitacional.- Es agua retenida en los macro poros y puede drenar fuera del perfil.

2.5 TIPOS DE HORIZONTES

Se conoce como horizonte del suelo a un nivel o porción de suelo paralela a la superficie, para reconocer las diferentes capas u horizontes hay que diferenciarlas por sus propiedades físicas, químicas y de composición y por su desigualdad con las demás capas adyacentes. Los horizontes o niveles de suelo son clasificados de acuerdo a sus propiedades cualitativas y a sus propiedades cuantitativas. Los horizontes genéticos son considerados básicamente por las propiedades cualitativas del suelo.

Tipos de horizontes genéticos. El suelo posee diversos horizontes genéticos como son:

Horizonte O. Capa de hojarasca sobre la superficie del suelo (sin saturar agua; >35%), frecuente en los bosques. (Fig. 2.11)

Figura 2.11 Horizonte O

Horizonte A, formado en la superficie, con mayor porcentaje de materia orgánica (transformada) que los horizontes situados debajo. Típicamente de color gris oscuro, más o menos negro, pero cuando contiene poca materia orgánica (suelos cultivados) puede ser claro. Estructura migajosa y granular. (Fig. 2.12)

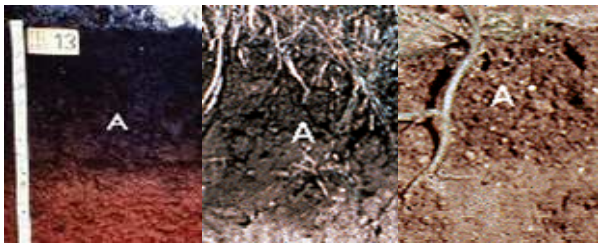


Figura 2.12 Horizonte A

Horizonte E, horizonte de fuerte lavado. Típicamente situado entre un horizonte A y un B. Con menos arcilla y óxidos de Fe y Al que el horizonte A y el horizonte B. Con menos materia orgánica que el horizonte A. Muy arenosos y de colores muy claros. Estructura de muy bajo grado de desarrollo (la laminar es típica de este horizonte). (Fig. 2.13)

Figura 2.13 Horizonte E

Horizonte B, horizonte iluvial o de acumulación, es un horizonte mineral en el cuál la estructura de la roca está destruida o sólo queda débilmente manifestada. Está formado por el aporte de materiales desde los horizontes A o C, o alteración del material "in situ". Puede incluir costras minerales calcáreas, férricas o de otra composición. Es el que presenta características más diversas. (Fig. 2.14)

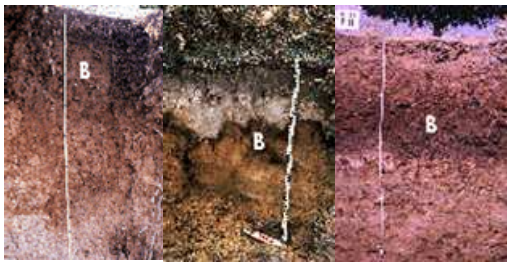


Figura 2.14 Horizonte B

El horizonte C, es un horizonte mineral de roca no consolidada, poco afectada por los cambios edafogénicos, excepto por la meteorización y el hidromorfismo que comparte alguna de sus propiedades con las de horizontes superiores. El horizonte C también es llamado material parental y se extiende en profundidad hasta la roca consolidada, la cual es denominada horizonte R. (Fig. 2.15)

Figura 2.15 Horizonte C

El horizonte R, esta compuesto por la roca madre, es lo suficientemente coherente para no poder romperse con la mano y no se deshace con el agua. (Fig. 2.16).

Figura 2.16 Horizonte R

El Horizonte D, es el llamado material parietal o roca madre fresca.

2.6 POTENCIAL MÁTRICO DEL SUELO

Potencial mátrico (ψm).- Es la reducción de energía libre del agua debido a las fuerzas de cohesión y adhesión entre moléculas. Debido a que en la matriz del suelo existen poros con aire y agua. Se produce un fenómeno que se conoce como tensión superficial. La magnitud en que disminuye la energía libre es función del radio efectivo de los poros, a mayor radio efectivo mayor es el potencial mátrico. Se mide con tensiómetros.

A la fuerza de unión entre la fase sólida del suelo y la líquida se le conoce como "potencial matricial" y se le representa por Ψm. Como es una fuerza por unidad de superficie, se expresa en unidades de presión y se le otorga un signo negativo, pues es una fuerza que se opone al movimiento de las moléculas de agua. Tradicionalmente se le ha expresado en atmósferas y ahora se hace kilo pascales (kpa) y al logaritmo de su opuesto, cuando se expresa en milibares, se le representa por "pF".

2.7 INFILTRACION EN LOS SUELOS

2.7.1 Infiltración.

La infiltración es el movimiento del agua de la superficie hacia el interior del suelo. La infiltración es un proceso de gran importancia económica, es vista por el ingeniero como un proceso de pérdida y por el agricultor como una ganancia.

Del agua infiltrada se proveen casi todas las plantas terrestres y muchos animales; alimenta al agua subterránea y a la vez a la mayoría de las corrientes en el período de estiaje; reduce las inundaciones y la erosión del suelo.

En el proceso de infiltración se pueden distinguir tres fases:

a) **Intercambio.** Se presenta en la parte superior del suelo, donde el agua puede retornar a la atmósfera por medio de la evaporación debido al movimiento capilar o por medio de la transpiración de las plantas.

b) **Transmisión.** Ocurre cuando la acción de la gravedad supera a la de la capilaridad y obliga al agua a deslizarse verticalmente hasta encontrar una capa impermeable.

c) **Circulación.** Se presenta cuando el agua se acumula en el subsuelo debido a la presencia de una capa impermeable y empieza a circular por la acción de la gravedad, obedeciendo las leyes del escurrimiento subterráneo.

2.7.3 Capacidad de infiltración.

Es la cantidad máxima de agua que un suelo puede absorber por unidad de superficie horizontal y por unidad de tiempo. Se mide por la altura de agua que se infiltra, expresada en mm/hora.

La capacidad de infiltración disminuye hasta alcanzar un valor casi constante a medida que la precipitación se prolonga, y es entonces cuando empieza el escurrimiento.

A la lluvia que es superior a la capacidad de infiltración se le denomina *lluvia neta* (es la que escurre). A la lluvia que cae en el tiempo en que hay lluvia neta se le llama *lluvia eficaz*, por lo tanto, la lluvia neta equivale a la lluvia eficaz.

2.8 FASES DEL SUELO

2.8.1 Fase sólida.

Los minerales constituyen la base del armazón sólido que soporta al suelo. Cuantitativamente en un suelo normal la fracción mineral representa de un 45 - 49% del volumen del suelo. Pero dentro de la fase sólida constituyen, para un suelo representativo, del orden del 90 - 99% (el 10 - 1% restante corresponde a la materia orgánica). La fase sólida representa la fase más estable del suelo y por tanto es la más representativa y la más ampliamente estudiada. Es una fase muy heterogénea, formada por constituyentes inorgánico y orgánico.

2.8.2 Fase liquida.

Se caracteriza por su variabilidad en el espacio y por el tiempo, tanto a nivel cualitativo como cuantitativo. Esta variabilidad esta condicionada por las propiedades específicas de esa fase líquida, por las características de los espacios en que se encuentra y por las propiedades del suelo que la sustenta.

La fase líquida circula a través del espacio poroso, quedando retenida en los poros del suelo, está en constante competencia con la fase gaseosa. Los cambios climáticos estacionales, y concretamente las precipitaciones atmosféricas, hacen variar los porcentajes de cada fase en cada momento.

2.8.3 Fase gaseosa

Es la mezcla de gases que ocupa los espacios que la fase liquida deja libre en la porosidad de suelo. Debido a sus características intrínsecas como fluido, la fase gaseosa presenta una marcada similitud con la fase líquida del suelo, sobre todo en lo que se refiere a su dinámica, aunque tiene algunas diferencias con respecto a ésta.

Un suelo en capacidad máxima no contendrá fase gaseosa mientras que otro en punto de marchitamiento presentará valores muy altos. En condiciones ideales la fase atmosférica representa un 25% del volumen total del suelo. Se admite que un porcentaje de aire del 10% es insuficiente. La fase gaseosa del suelo se supone que tiene una composición parecida a la del aire atmosférico (oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono, vapor de agua).

COMPOSICION MEDIA		
COMPONENTE	**GAS DEL SUELO**	**AIRE**
Oxígeno	10 - 20 %	21%
Nitrógeno	78,5 - 80 %	78%
Dióxido de carbono	0,2 - 3,5 %	0,03%
Agua	Saturado	Variable
Otros	< 1%	> 1%

Tabla 2.2 Composición media de los gases en el suelo

2.9 MEDICIÓN DEL AGUA EN EL SUELO

El contenido de agua en el suelo se puede determinar de forma directa utilizando muestras de suelo o bien de forma indirecta usando aparatos específicos.

2.9.1 Medidas directas del contenido del agua en el suelo

Humedad gravimétrica (Hg.)

Es la relación entre la masa de agua y la masa de suelo una vez seco.

Por ejemplo, si en una muestra de suelo humedecido 14gr son de agua y 65gr son de suelo, la humedad gravimétrica será el resultado de dividir 14 entre 65 y multiplicar por 100, es decir, el 21,5%.

$$Hg = \frac{ma}{ms} * 100 \qquad (2.8)$$

Donde,

ma = masa de agua
ms = masa de suelo seco

Humedad volumétrica (Hv)

Es la relación entre el volumen de agua y el volumen total o aparente del suelo una vez seco.

Por ejemplo, si en una muestra de suelo humedecido, 12cm³ son de agua y 48cm³ son de suelo, la humedad volumétrica, será el resultado de dividir 12 entre 48 y multiplicar por 100, es decir, el 25%.

$$Hv = \frac{Vag}{Vss} * 100 \qquad (2.9)$$

Donde,

Vag = volumen de agua
Vss = volumen total o aparente del suelo seco

Relación entre Hg y Hv	
Hv = Hg * Da	
Textura del suelo	**Densidad Aparente (Da) gr/cm3**
Arenoso	1,65
Franco - arenoso	1,5
Franco	1,4
Franco - arcilloso	1,35
Franco - limoso	1,3
Arcilloso	1,25

Tabla 2.3 Relación entre Hg y Hv

2.9.2 Medidas indirectas del contenido del agua en el suelo

Figura 2.17 Medidas indirectas del contenido del agua en el suelo

Tensiómetros.- Son aparatos que miden la succión o fuerza que ejerce el suelo sobre el agua. A medida que el suelo pierde agua la succión aumenta, es decir, el suelo ejerce mas fuerza para retener agua. Por lo tanto observando cómo varía el valor de la succión podemos saber la evolución del agua en el suelo. Normalmente se instalan dos tensiómetros a distintas profundidades de esta forma podríamos medir gradientes hidráulicos y por tanto conocer la dirección de los flujos de agua en el suelo.

Sonda de neutrones.- Se introduce en el suelo a la profundidad deseada y emite neutrones. Los neutrones se reflejan más o menos dependiendo del contenido de agua del suelo. Un receptor cuenta los neutrones reflejados y transforma la señal en contenido de agua.

TDR.- Consta de varillas metálicas que se introducen en el suelo y un emisor receptor de impulsos magnéticos. Genera un pulso electromagnético y mide el tiempo que tarda en recorrer las varillas, que será mayor o menor dependiendo del contenido de humedad del suelo.

2.10 MODELO DE RETENCIÓN DEL AGUA

2.10.1 Capacidad de retención de agua disponible

La capacidad de retención de agua disponible (CRAD) es el intervalo de humedad disponible que se define como el agua del suelo que puede ser absorbida a un ritmo adecuado para permitir el crecimiento normal de las plantas. Se suele calcular como la diferencia entre los valores de la capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente.

$$CRAD = CC - PM \qquad (2.11)$$

Donde:

CRAD = capacidad de retención de agua disponible (%)
CC = capacidad de campo (%) (Contenido de humedad a 10-33 kPa)
PM = punto de marchitamiento permanente (%) (Contenido de humedad a 1500 kPa)

2.10.2 Curva de retención del agua del suelo y aplicaciones

Llamada también, **curva de retención de humedad** (Figuras 2.18-2.19), muestra la relación entre la fracción de volumen del agua y la carga de presión en el suelo, (Valarezo, y otros 1998)

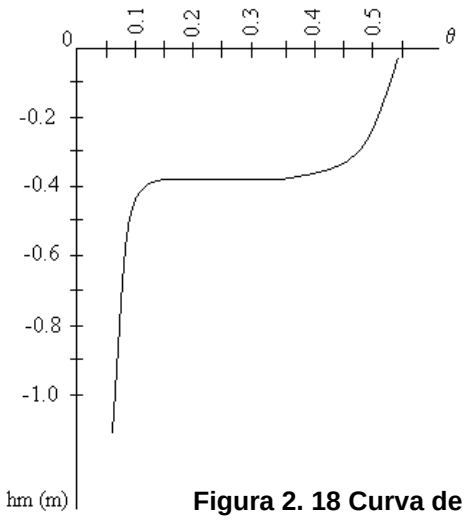


Figura 2. 18 Curva de retención de agua

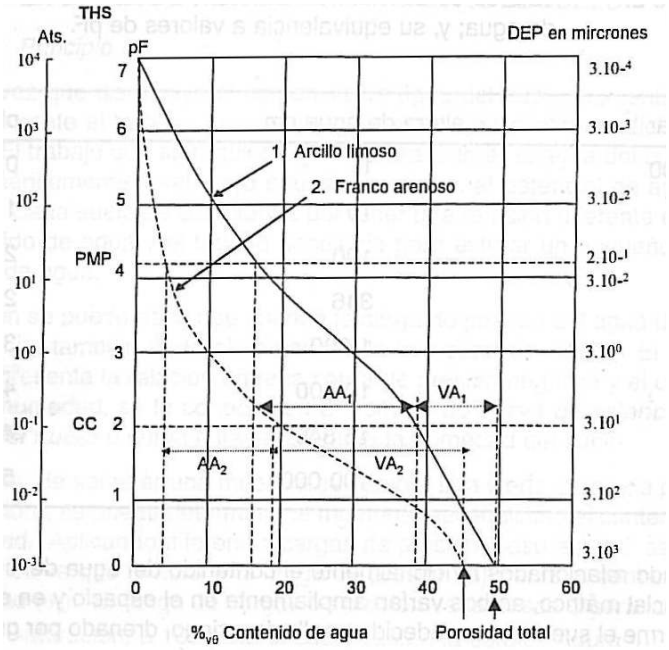


Figura 2. 19 Ejemplo de curvas de retención de agua en el suelo

Debido a que en cada suelo es diferente, se la denomina *característica hídrica del suelo.*

Cada vez que disminuye el contenido de agua del suelo, aumenta exponencialmente el trabajo necesario para extraer una cantidad adicional de agua; el almacenamiento o la retención del agua es el resultado de fuerzas de

atracción entre las fases sólida y liquida que ocurren en los poros del suelo, dependiendo de la textura del suelo.

Debido a que la energía (trabajo) necesaria para extraer el agua del suelo aumenta exponencialmente, mientras que el contenido de agua disminuye linealmente, se utiliza el logaritmo de la tensión de humedad del suelo expresado en función de centímetros de columna de agua, conocido como pF (p= potencial, F= energía libre).

A continuación se coloca un cuadro con los valores de succión en atmósferas/bares y centímetros de columna de agua con su respectiva equivalencia a valores de pF.

$\frac{atm}{bar}$	**altura de agua (cm)**	**pF**
1/1000	1	0,0
1/100	10	1,0
1/10	100	2,0
1/3	346	2,54
1	1000	3,0
10	10000	4,0
15	15849	4,2
100	100000	5,0

Tabla 2.4 Equivalencias y transformaciones para valores de pF

Entre algunas aplicaciones generales tenemos:

- Conocer el volumen total de poros y la distribución de estos por rangos de tamaño
- Determinar la capacidad de aireación del suelo
- Determinar el rango de agua aprovechable para las plantas y el volumen rápidamente aprovechable

Los puntos más importantes de la curva pF se presentan a continuación:

Saturación.- Cuando todos los poros del suelo se encuentran llenos de agua (h=0cm), el suelo está saturado, es decir, el punto de intersección de la curva con el eje de las abscisas corresponde a un valor de tensión de 1cm, lo cual significa que este valor es prácticamente similar a la porosidad total.

Coeficiente Higroscópico.- Es la cantidad de agua que el suelo se obtiene cuando ha alcanzado el equilibrio bajo las siguientes condiciones; 98% de humedad relativa, una atmósfera estándar de presión, y a la temperatura ambiente.

2.11 MÉTODOS

El método de flujo de salida por etapas múltiples (Multistep out–flow) (Van Dam et al., 1992) fue aplicado en muestras tomadas en anillos de kopecky con un volumen de 100cm^3, para obtener la curva de humedad del suelo en laboratorio.

2.11.1 Equipos de Laboratorio

2.11.1.1 Método de Etapas Múltiples

Una de las técnicas que pueden usarse para estimar los parámetros del modelo de Mualem-Van Genuchten (modelo MVG) es el método de flujo por etapas múltiples. Consiste en colocar una muestra inalterada de suelo en una celda de presión sobre un plato de cerámica, y se la satura de abajo hacia arriba, mediante la aplicación de un incremento escalonado de presión neumática sobre la muestra, se induce un flujo no saturado en la muestra de suelo permaneciendo el plato de cerámica saturado. Se registra el flujo acumulado de salida de agua a intervalos discretos.

La curva de retención de humedad y conductividad hidráulica fue descrita por Mualem (1976) y Van Genuchten (1980) mediante ecuaciones de forma cerrada denominadas el modelo MVG. Estas ecuaciones matemáticas describen las relaciones entre el contenido volumétrico de agua Θ, la conductividad hidráulica k y la carga de presión h mediante expresiones matemáticas con seis parámetros; conocidos los parámetros de MVG. Determinados estos parámetros, es posible caracterizar las propiedades hidráulicas de un suelo a través de la construcción de la curva de retención de humedad y conductividad hidráulica.

Los parámetros MVG pueden ser medidos en el campo o en el laboratorio.

Parámetros Directos.- que pueden ser medidos en el campo o en el laboratorio:

- Contenido de agua saturada: Θ_s.
- Contenido de agua residual: Θ_r.
- Conductividad hidráulica saturada: k_s.

Parámetros Empíricos.- determinan la forma de la curva de retención y conductividad.

$$\alpha, n, \gamma$$

Utilizando el método de flujo por etapas múltiples y el programa MULTISTEP, se estiman los parámetros requeridos.

Descripción del Equipo

Este equipo consta de:

1. Un compresor de aire (1/4 HP)
2. Un regulador de presión (0-1 bares)
3. Celdas de presión, cada una de ellas esta conformada por, cuatro anillos de caucho, papel filtro, placa cerámica y mariposas.

4. Soportes para celdas de presión.
5. Buretas de 1000cm³ (precisión 1cm³).
6. Acoples rápidos.
7. Tubos de cobre.

Equipos adicionales para realizar este ensayo son;

8. Horno.
9. Balanzas (precisión de décima y centésima).

2.11.1.2 Aparato de Membrana a Presión

El aparato de membrana a presión es el instrumento más preciso de los que se dispone hoy para mediciones de potenciales mátricos de suelos en laboratorio. Usado para la determinación de los puntos de retención de agua en el suelo dentro de un rango de presiones altas de 1 a 15 bares.

El agua que retiene la muestra al aplicar una determinada diferencia de presión (ΔP), estará en equilibrio con la tensión matricial del agua del suelo.

Descripción del equipo

Este equipo consta de:

1. Aparato de membrana.
2. Compresor de 18 bares, incluye válvula reductora con manómetro.
3. Filtro de aire con soporte.
4. Membranas de celofán y filtro.

2.11.1.3 Método de Caja de Arena

La caja de arena es un aparato utilizado para la medición de diferentes puntos de retención de agua en el suelo. Con esta información se puede construir la parte inicial de la curva de retención de agua que posee un suelo (pF=0–2 bares). Para este método de laboratorio se requieren muestras de suelo inalteradas, generalmente tomadas en anillos de kopecky.

Para la determinación en laboratorio, se aplica el principio de equilibrio hidrostático sobre muestras de suelo inalterado. Las muestras de suelo son colocadas sobre una capa de fina arena saturada que se encuentra en un depósito denominado caja de arena, conectado hidráulicamente a un tubo de salida.

Descripción del equipo

El sistema estándar para la determinación de pF=0–2 bares consiste en:

1. Una caja de plástico
2. Arena.
3. El regulador de succión, con soporte.
4. Reservorio de agua (botella para abastecimiento de agua).
5. La tela filtrante (140-150 micrones).
6. Una cantidad aproximada de 10cm de la altura del recipiente de arena sintética de tamaño de grano de aproximadamente 73 micrones.
7. Accesorios complementarios.

CAPÍTULO 3

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

3.1.1 Descripción del área de estudio

En la región sur del Ecuador, yace la cordillera de los Andes, la cual se divide a su vez en tres, la occidental, la central y la oriental. El estudio que se hace referencia en este trabajo a tenido lugar en la cuenca del Paute, la misma que se encuentra entre las cordilleras, en la llamada depresión andina. La cuenca hidrográfica del río Paute se localiza en la región centro sur del Ecuador, y forma parte de la cuenca del Santiago - Namangoza, que es a su vez parte integral de la cuenca del río Amazonas. Se ubica entre los paralelos 2º15' y 3º15' de latitud sur y entre los meridianos 78º30' y 79º20' de latitud oeste.

La Cuenca del Río Paute y sus afluentes está localizada en las provincias de Azuay, Cañar y Morona Santiago, nace en la región interandina y alcanza luego la cuenca amazónica. Hasta el sitio de emplazamiento de la presa Amaluza se estima que el área de drenaje es de 5.000 Km². El río Paute, de gran extensión, drena hacia el este para su desembocadura en el río Amazonas. El clima es característico de los valles andinos, con una variedad de microclimas debido a lo quebrado del terreno, con una pendiente media del orden del 55%; como es de esperar está relacionado con la gran altura, por ejemplo la de la ciudad de Cuenca a 2700m sobre el nivel del mar; pero también, la cuenca está localizada cerca del ecuador, por lo que la extensión de los días varían muy poco a lo largo del año, con luz desde las 5h30am hasta las 6h30pm, con un sol que se vuelve perpendicular a la tierra al medio día. Hay dos estaciones lluviosas, la primera es entre los meses de febrero a mayo y la segunda entre octubre y noviembre. El lapso entre los meses de julio a septiembre es el periodo más seco del año. La precipitación anual en la cuenca del Paute varía entre 1040mm y 2200mm, y la temperatura media anual en Cuenca es de 14℃.

El área de estudio, considerando su geomorfología y principalmente las zonas circunscritas de las micro-cuencas que alimentan el Paute, se encuentra influenciada por dos regiones bio-climáticas: Región subtropical muy húmedo (régimen oriental) y región temperado húmedo a muy húmedo (régimen oriental).

Región Subtropical Muy Húmedo, Régimen Oriental.- Esta localizada por ambas márgenes del Río Paute en la zona de estudio, donde la precipitación supera a los 2.500 mm y la temperatura supera los 15,5ºC.

Región Temperado Húmedo a Muy Húmedo, Régimen Oriental.- Corresponde a las cuencas medias y bajas de las micro-cuencas de los Ríos Púlpito, Juval y Mazar además de la cordillera hacia el este de Amaluza y final en la descarga de Sopladora. La región presenta una temperatura media anual de 12 a 18℃, y las lluvias promedian entre 2.000 y 3.000mm. Prácticamente en esta región llueve durante todo el año.

En el mes de diciembre de 2006 el PROMAS de la Universidad de Cuenca realizó la caracterización in situ de aspectos geológicos en diferentes zonas de estudio en el marco de un proyecto de investigación que venía desarrollando sobre producción de sedimentos, teniendo como objetivo principal una evaluación de las intervenciones humanas realizadas en el pasado, principalmente lo concerniente a forestaciones en áreas degradadas de la cuenca media del Río Paute.

El objetivo fue identificar en algunos de los sitios del proyecto la geología y aspectos de importancia relacionados; además, dado que los árboles ya fueron plantados directamente en el material parental, se deseaba conocer si las características geológicas juegan un papel importante en la explicación de los procesos dados.

3.1.2 Sitios de muestreo

3.1.2.1 Sector Bosque de Pino "EMAC"

El bosque de la EMAC se encuentra en el sector Pichacay, Parroquia Santa Ana, al sureste de la ciudad de Cuenca a una altura de 2650–2800m por encima del nivel del mar. Antes de la reforestación los suelos de la EMAC, se vieron gravemente degradados debido a la sobreexplotación por los propietarios. El objetivo de la reforestación básicamente es para el control de la erosión del suelo y la regeneración de los suelos de una manera correcta. En 1990 la UMACPA plantó un promedio de 1333 plantas/ha con Eucalyptus globulus y Pinus patula.

A unos 50m al oeste del punto 729.618E y 9´671.500N y cota 2.643 m sobre es nivel del mar, a mitad de la ladera, en la margen izquierda de la quebrada afluente hay un pobre afloramiento de las rocas sedimentarias de la Formación Yunguilla, cuyo valor de estratificación es N8ºW/18ºW. Hay estratos grises de 2 tipos: unos gruesos de 15cm de espesor intercalados con capas de 2cm de sílice; y, capas de entre 3 y 10cm, de láminas muy finas que parecen lutitas silicificadas. El suelo orgánico no supera los escasos 5cm. Las lutitas se fisuran en forma de cuadrados de tamaños milimétricos y de espesores igualmente milimétrico a centimétrico. Las láminas de las lutitas son muy físiles y se ven microfisuradas.

El sembrío de pinos que se encuentra en la ladera visitada, tiene unos 25 años de edad sin embargo no posee el espesor suficiente que se espera para esa edad, mostrando una aguda deficiencia y una insuficiencia de elementos necesarios para su crecimiento, lo que estaría íntimamente relacionado a la composición geológica y al grado de meteorización de las rocas existentes; pudiéndose decir que las lutitas de la Formación Yunguilla no son aptas para este tipo de vegetación. La mínima permeabilidad adicionada a la poca

meteorización, no permite acumulación de material y el agua que probablemente obtienen las plantas es por las fisuras nada más.

Fundamentalmente el sector corresponde a rocas sedimentarias de la Formación Yunguilla en la cuenca sedimentaria de Cuenca, la cual está conformada predominantemente por argilitas negras duras, a veces silicificadas y bien estratificadas; localmente se notan calizas. El espesor de la formación alcanza los 1.200m.

3.1.2.2 Sector Mall "Turi"

Ubicado al sur de la ciudad de Cuenca, limitando al norte con esta; al este, la parroquia El Valle al sur, la parroquia Tarqui y al oeste, la parroquia Baños. Turi tiene una superficie de 26,2 km², ocupa el 0,8 por ciento del territorio cantonal. Localizado a una distancia de 3 km desde la ciudad de Cuenca; su principal vía de acceso es la avenida 24 de Mayo la vía de acceso es asfaltada. Paulatinamente su territorio va convirtiéndose en zona urbana.

La parroquia está dividida en tres núcleos: Turi Centro, integrada por las comunidades de Bellavista, Trinidad, Ascensión, Hierba Buena, Agua Santa, Playa de la Paz, San Isidro, Virgen de la Nube. El Carmen de Guzho, con las comunidades de El Calvario, La Merced, El Cisne, Tres Marías, Guaribiña, Tres Cruces, Rumiloma, La Pradera. Puntacorral, formada por las comunidades de Patapamba, Corazón de Jesús, Santa Anita, Tres Claveles, El Recreo, Chaguacorral y Rosaspamba.

Como las principales características de la composición litológica se puede anotar que los clastos son centimétricos con una forma de redondeados a semiangulares, hay presencia de muchos lentes de aglomerados, también observamos lentes de areniscas y arcillas. La potencia del talud es de alrededor de 20m a 60m.

Dentro de las estructuras existentes se tienen cárcavas, también un contacto entre la formación Mangán y la Turi, además un contacto entre Turi y un depósito Coluvial. Se localizó, lentes de aglomerados, de areniscas y arcillas además de un depósito de desembocadura.

La geología del sector de Turi viene dada por la formación Mangán, (Terciario-Mioceno) que es una secuencia alternante de areniscas (litología encontrada en el sitio de muestreo) tobáceas cafés, gruesas y lutitas limosas verdes y rojas. Además se pueden encontrar lutitas finamente laminadas las mismas que están asociadas con el yacimiento de carbón inferior. En ciertas partes es común la existencia de conglomerados, los mismos que incluyen argilitas de la Yunguilla, pudiendo también encontrarse arcillas limosas rojas y arcillas fosilíferas grises.

3.1.2.3 Sector Cubilán "Turbera y Bosque"

El Cubilán, presenta una superficie aproximada de 990,93 hectáreas, declarado bajo acuerdo ministerial Nº 0228 del 23 de julio de 1982, por el Programa Nacional Forestal y el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos del Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador.

Se localiza en el extremo centro-norte de la cuenca del río Paute, en el sector rural de las Parroquias Sageo y Biblián del Cantón Biblián y Guapán del Cantón Azoques, Provincia de Cañar, entre los 2.840 y 3.420 m por encima del nivel del mar, la precipitación es de tipo frío a muy frío en la parte alta y templado en la zona baja.

Desde Azogues se puede acceder a la Parroquia Guapán, por una carretera de segundo orden, hasta llegar al sector de Cachipamba, en donde se encuentra una carretera de tercer orden que se dirige a las comunas de Zhindilig y Virgenpamba, esta misma carretera permite acceder a la Turbera Saguín, zona alta de esta área protegida (Bosque). Para llegar a la comuna de Aguilán, desde

Azogues se sigue la vía principal Azogues-Biblián, en el sector de Cachapamba, “Puente de San José”, se accede a una vía de tercer orden que conduce a la comunidad y terrenos comunales de Aguilán. Desde Biblián, se puede acceder al Santuario de la virgen del Rocío, atractivo turístico de esta ciudad, en donde se encuentra una vía de tercer orden que dirige a los terrenos comunales de Atar, Curiacu, Cuchincay y San Camilo

Cubilán presenta tipos de Vegetación que van desde el bosque húmedo montano hasta el páramo. Las formaciones vegetales, presentan una estructura importante desde el punto de vista de la regulación del ciclo hidrológico, en el bosque protector identificamos; páramo herbáceo, páramo arbustivo y Bosque siempre verde montano alto, en los alrededores del área boscosa, se encuentran zonas de matorrales densos, dominados por arbustos melastomatáceos, asteráceos, ericáceos y poáceos, además existen áreas destinadas a cultivos de ciclo corto y pastizales.

Cubilán se encuentra compuesta por la formación de Yunguilla, la cual esta formada especialmente por lutitas, calizas y volcanoclastos. La silicificación es común en varios niveles, encontrándose depósitos de caliza y capas guijarrosas son observadas en varias localidades.

3.1.2.4 Sector Tuñi y Chica Despensa

Tuñi y Chica Despensa están geológicamente compuestas por la formación de volcánicos Pisayambo, la cual está formada litológicamente con andesitas, riolitas y piroclastos,

3.1.2.5 Sector Quimsacocha

Quimsacocha es una zona de páramo del Austro Ecuatoriano a una altitud superior a los 3700 m sobre es nivel del mar, ubicada a unos 85km al sur-oeste de la ciudad de Cuenca.

Los suelos dominantes en este ecosistema son los Andosoles e Histosoles. La vegetación que predomina está representada por *Calamagrostis sp.* (Pajonal en suelos Andosoles) y *Plantago rígida* (almohadillas, en suelos Histosoles). Estos suelos están caracterizados por una alta capacidad de retención de agua la cual es atribuida principalmente al elevado contenido de materia orgánica (Buytaert, 2004).

Otras características son baja densidad aparente (0,27 – 0,94 para Andosoles y 0,04 – 0,27 gr/cm³ para Histosoles), bajo pH en agua (4 – 5,1 para Andosoles y 4 – 7 para Histosoles) de acuerdo con los datos obtenidos a partir de muestras tomadas en diferentes sitos dentro del área de estudio.

Quimsacocha geológicamente está dominada por rocas volcánicas del Mioceno Superior y volcanoclastos, incluido el Turi, Turupamba, Quimsacocha y Formaciones Tarqui. La propiedad está ubicada entre dos fallos importantes, el Gañarin y la falla de Girón. La formación Turi se compone de tobáceas, conglomerados y areniscas y sirve de base a tobas riolíticas dacitas de menor importancia de la Formación Turupamba. La formación que cubre Quimsacocha comprende flujos de lava de andesita, tobas y brechas.

3.2 EQUIPOS DE LABORATORIO UTILIZADOS EN EL ANALISIS

3.2.1 Método de Etapas Múltiples (Multistep out-flow)

La curva de retención de humedad y conductividad hidráulica fue descrita por Mualem (1976) y Van Genuchten (1980) mediante ecuaciones denominadas de forma cerrada, el modelo Mualem-Van Genuchten. Estas ecuaciones matemáticas describen las relaciones entre el contenido volumétrico del agua θ, la conductividad hidráulica K, y la carga de presión h, mediante expresiones matemáticas conocidas con seis parámetros, los parámetros de Mualem-Van Genuchten (parámetros MG). Cuando se pueden determinar estos parámetros, es posible caracterizar las propiedades hidráulicas de un suelo a través de la construcción de la curva de retención de humedad y conductividad hidráulica.

Los parámetros MG pueden dividirse en dos grupos:

A. Los parámetros directos: el contenido de agua saturada (θ_s), el contenido de agua residual (θ_r), y la conductividad hidráulica saturada (K_s); estos parámetros pueden ser medidos en el campo o en el laboratorio.

B. Los parámetros empíricos α, η, y γ, que determinan la forma de la curva de retención y conductividad. La combinación del método de flujo por etapas múltiples y el programa de optimización MULTISTEP puede usarse para estimar los parámetros requeridos.

Muestreo de Suelo

Para contar con mediciones confiables y reproducibles de las propiedades hidráulicas del suelo, tales como las características de retención de humedad y la conductividad hidráulica, requieren tener muestras representativas. Pueden distinguirse dos tipos de muestras; muestras alteradas y muestras inalteradas. Las muestras alteradas pueden ser usadas para el análisis químico o para la determinación de los puntos de retención mediante el uso de bandejas de

presión. Como la toma de muestras alteradas es de menor importancia para la caracterización física.

El procedimiento general es que se escoge un sitio representativo con un barreno Edelman. En este sitio el muestreo se efectúan en horizontes funcionales del suelo antes que a intervalos regulares de profundidad. Si se encuentran disponibles, se usan muestreadores tubulares, con anillos de muestreo de volumen estándar. Debe evitarse perturbar la estructura interna de las muestras, generalmente, puede decirse que con una buena preparación el procedimiento de muestreo ya está a medio camino, y en último esto también beneficiará la calidad de las muestras.

Materiales

Los materiales necesarios para el muestreo del suelo dependen principalmente de los métodos que se emplearán para la caracterización física. A continuación se listan los materiales que generalmente son los más importantes:

- Palas planas
- Barreno Edelman con extensión
- Cuchillos
- Fundas plásticas para recoger muestras alteradas
- Cuaderno
- Cinta de medición
- Anillos de kopecky
- Cajas de muestras para los anillos

Procedimiento.- Se escoge uno o más sitios de muestreo representativos. Se usa el barreno Edelman para identificar los horizontes funcionales en el perfil. Si el suelo es muy duro, por ejemplo si se trata de suelos de arcilla endurecida, debe posponerse el muestreo por lo que es inevitable la perturbación de las

muestras. Una posibilidad de evitar tener que posponer es el humedecimiento del suelo con riego por goteo bajo cubierta por 2 o 3 días.

Se marca un espacio de trabajo de por lo menos 1,5x1,5m en un área que se encuentra a nivel. Remueva la parte superior del suelo hasta alcanzar el horizonte que será muestreado. Prepare un plano horizontal al nivel deseado, ahora pueden tomarse las muestras. Coloque el anillo de kopecky, con el borde afilado hacia abajo, sobre el horizonte del suelo y presione ligeramente hacia abajo. Escarbe regularmente la tierra que se encuentre alrededor del anillo para evitar la compactación de la muestra y facilitar la acción de hundir el anillo hacia abajo.

Cuando el anillo de kopecky ha penetrado a suficiente profundidad, se lo excava usando una pala plana pequeña, debe tener suficiente material de suelo en la parte superior e inferior del anillo de kopecky. La preparación final se efectúa en el laboratorio. Cubra la superficie de las muestras con láminas de plástico o con tapas de plástico. Además de las muestras inalteradas también deben tomarse muestras alteradas. Raspe algo del material del suelo y coloque la cantidad necesaria en una funda plástica rotulada. Después de haber muestreado el horizonte, se repite el mismo procedimiento para los otros horizontes del perfil que requieren ser muestreados.

Las mediciones en el laboratorio deben comenzar lo antes posible después del muestreo para evitar toda perturbación posible de la estructura interna de las muestras. Cuando deben almacenarse las muestras, deben tomarse en cuenta unas pocas reglas. Coloque las muestras en un lugar fresco con temperatura constante para evitar la evaporación de la humedad del suelo. Use siempre tapas o pedazos de lámina plástica para tapar las muestras.

Para el método o flujo por etapas múltiples se sugiere un mínimo de tres muestras por sitio.

El método de flujo por etapas múltiples

Una de las técnicas que pueden usarse para estimar los parámetros del método de Mualem-Van Genuchten (modelo MVG) es el método de flujo por etapas múltiples. Se coloca una muestra inalterada de suelo en una celda de presión sobre un plato de cerámica, y se la satura desde abajo. Mediante la aplicación de un incremento escalonado de presión neumática sobre la muestra, se induce un flujo no saturado en la muestra de suelo permaneciendo el plato de cerámica saturado. Se registra el flujo acumulado de salida de agua a intervalos discretos.

Kool et al. (1985) describieron el procedimiento de flujo de una etapa (one-step outflow-OSO). Siguiendo este procedimiento se determinan los parámetros del modelo MVG a partir de datos del flujo de salida iniciado con un solo incremento grande de presión. Aunque el acoplamiento del procedimiento OSO son el procedimiento de optimización dio buenos resultados, a veces ocurren problemas con respecto a la unicidad de los estimados obtenidos de los parámetros (Vn Dam et al., 1994). Hopmans et al. (1992) demostraron la existencia de un flujo no uniforme en experimentos con OSO comenzando desde la saturación, lo que viola los conceptos de flujo uniforme de Darcy. Aún más, los experimentos con Oso no reflejan situaciones reales de campo. Por ella Van Dam et al. (1990, 1992) complementaron los datos de flujo de salida con datos de retención de humedad y usaron varios incrementos más pequeños de presión neumática para inducir un flujo uniforme en la muestra de suelo. Concluyeron que el experimento de flujo por etapas múltiples (multistep outflow – MSO) tiene ventajas teóricas y prácticas sobre el enfoque de OSO, en tanto que los flujos de agua y las gradientes de presión del suelo durante el experimento fueron más comparables a las situaciones naturales.

Pueden hacerse simulaciones numéricas del flujo vertical del agua en una muestra de suelo combinando la ley de Darcy y la ley de conservación de la masa con la ecuación de Richard.

$$\frac{\delta\theta}{\delta t}=\frac{\delta}{\delta z}\left[K(h)\left(\frac{\delta h}{\delta z}-1\right)\right] \qquad (3.1)$$

En que *z* es la coordenada vertical (positivo hacia abajo) y *t* es el tiempo. El sistema de suelo y plato tiene las siguientes condiciones iniciales y de límite:

$h = h_o(z)$	$t = 0$	$0 \leq z \leq L$	(3.2a)
$\frac{\delta h}{\delta z}=1$	$t > 0$	$z = 0$	(3.2b)
$h = h_L - h_z$	$t > 0$	$z = L$	(3.2c)

Donde *L* es la altura total de la muestra de suelo incluyendo el plato de cerámica, h_L es la presión del agua debajo del plato de cerámica, y h_z es la presión neumática aplicada.

Para resolver este sistema de ecuaciones se requiere información adicional sobre las propiedades hidráulicas de la muestra de suelo. Por lo que el plato de cerámica permanece saturado, solamente se requiere conocer la conductividad hidráulica saturada. Van Genuchten (1980) y Mualem (1976) describieron las funciones hidráulicas del suelo empleadas en un modelo numérico, y asumieron una ecuación cerrada para la curva de retención y conductividad.

$$S_e=\left[1+|\alpha h|^n\right]^{-m} \qquad (3.3)$$

Donde, S_e es la saturación relativa, *h* es la carga de presión (cm), *α* es la inversa del valor de entrada de aire (cm^{-1}), y *m* y *n* son parámetros empíricos sin dimensiones. El valor de *m* dado por Mualem es:

$$m=1-\frac{1}{n} \qquad (3.4)$$

El contenido de agua del suelo (θ) como función de la carga de presión (h) puede ser ahora calculado:

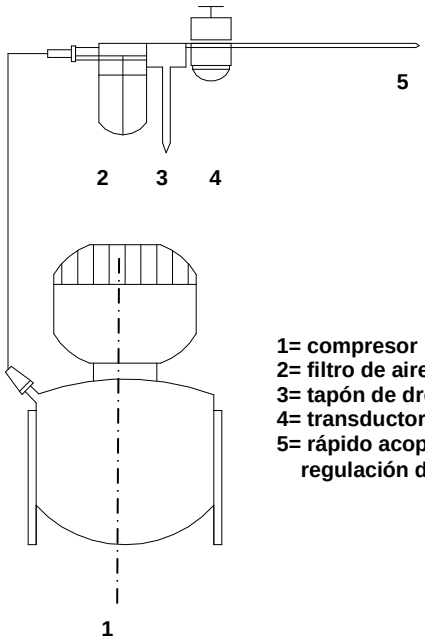
$$\theta=\theta_r+(\theta_s-\theta_r)\left[1+(-\alpha\, h)^n\right]^{-m} \qquad (3.5)$$

Donde θ_r es el contenido residual de agua (cm^3/cm^3) y θ_s es el contenido saturado de agua (cm^3/cm^3). La relación k(h) está dada por la ecuación (3.6):

$$K(h)=K_s\, S_e^{\gamma}\left[1-\left(1-S_e^{1/m}\right)^m\right]^2 \qquad (3.6)$$

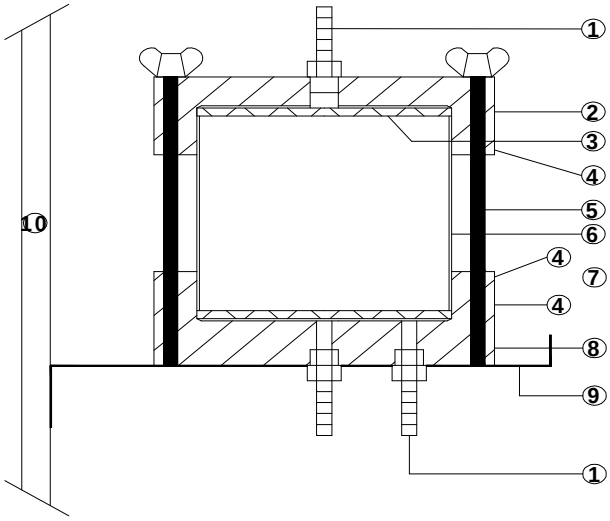
O, expresada en términos de carga de presión del agua del suelo:

Figura 3.1 Experimento establecido para el método Etapas Múltiples

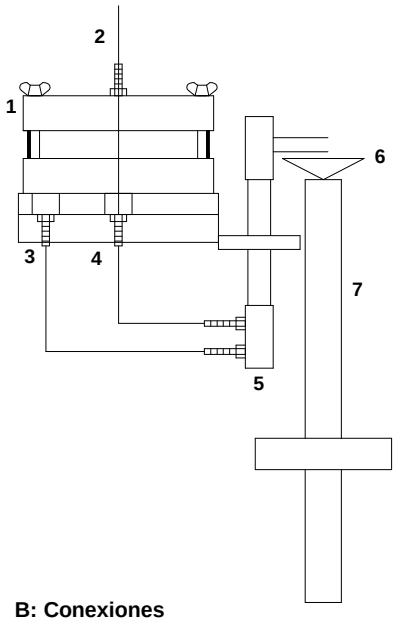


1= compresor
2= filtro de aire
3= tapón de drenaje
4= transductor de presión
5= rápido acoplamiento de la unidad de regulación de presión

Figura 3.2 Provisión de presión de aire



A: Detalle



B: Conexiones

1= Pilar del tubo conectado con el suministrado de aire
2= Cubierta
3= Filtro sintético
4= Anillo de Cuadro
5= Cuerda para halar
6= Anillo de muestra
7= Filtro cerámica
8= Fondo
9= Placa base
10= Pared

1= Celda de presión
2= Pilar del tubo conectado con el suministrador
3= Pilar del tubo para exclusión de aire
4= Pilar del tubo para descargar agua
5= Rebosador de flujo
6= Embudo
7= Bureta

Figura 3.3 Unidad de presión.
A: Detalle, B: Conexiones

La disposición experimental del método de flujo por etapas múltiples como se muestra en la (Figura 3.1), contiene unidad de regulación de presión y unas celdas de presión. La unidad de regulación de presión (Figura 3.2) está conformada por cuatro partes: un filtro de aire, una llave de desagüe, un regulador de presión.

La celda de presión está conformada por un anillo de muestra llamado kopecky, 4 anillos de caucho, un plato de cerámica y papel filtro. Estas piezas son colocadas en un recipiente de perspex (Figura 3.3a) sobre un soporte. El plato de cerámica cuenta con una válvula de entrada de aire de aproximadamente 100kPa. Una entrada para el aprovisionamiento de presión se encuentra en la parte superior de la celda de presión. La presión de aire es proporcionada por un compresor que se encuentra conectado a la unidad de regulación de presión. En la parte inferior de la celda se encuentran dos salidas para la descarga del agua en una bureta de 100ml. Tubos plásticos conectan las salidas y los soportes para las celdas de presión se encuentran fijadas a una placa de madera, que se conecta a la pared (Figura 3.3b). Es posible usar 9 celdas de presión al mismo tiempo. Todas las conexiones entre los tubos de cobre de presión de aire y los tubos plásticos a las celdas de presión se realizan con los denominados acoples rápidos. De esta forma es posible utilizar las celdas restantes cuando una celda está desconectada, sin afectar el control de presión.

En la práctica la aplicación del experimento de flujo por etapas múltiples puede dividirse en cinco partes:

1. Preparación y presaturación de las muestras de suelo.
2. Instalación y saturación de las muestras en las celdas de presión.
3. Medición de dos puntos de retención en la parte mojada de la curva de retención.
4. Medición de los volúmenes de flujo de salida para tres etapas de presión sucesivas.

5. Determinación del contenido de agua residual y de la densidad real seca de las muestras de suelo.

Preparación y presaturación de las muestras de suelo

Primero se preparan las muestras que fueron tomadas en el campo, el material de suelo que sobre sale de la parte inferior y de la parte superior del anillo de kopecky debe removerse cuidadosamente con una sierra pequeña y/o un cuchillo. Las superficies de la muestra deben ser lo más planas posibles, para asegurar un buen contacto entre la muestra de suelo y el plato de cerámica.

Después de la preparación se colocan las muestras en una bandeja conteniendo agua para la saturación. El extremo inferior de la muestra que se introduce en el agua se cubre con una tela para evitar que el material de suelo escape del anillo. Se cubre el extremo superior con una funda plástica para evitar la evaporación. La cantidad de tiempo que se necesita para saturar la muestra depende de la textura. Para ello demora un día para suelos de textura gruesa a media, y tres días para suelos arcillosos pesados.

Instalación y saturación de las muestras en las celdas de presión

Preparar las diferentes piezas de la celda. Se colocan los platos de cerámica en una bureta durante un día para que se saturen. Debe limpiarse todo material, preferiblemente con agua caliente y jabón. Los platos de cerámica solamente con agua y un cepillo, no con jabón. Después de la limpieza, se engrasan los anillos de caucho con una pequeña cantidad de grasa de silicona. Instalar los platos y los anillos de caucho en el recipiente de perspex (figura 3.3)

Se colocan las celdas de presión en el soporte y se conectan los tubos del rebosador a las salidas de las celdas. Se pone el rebosador en su posición más alta y se llenan los tubos con agua usando un sifón. Ahora debe eliminarse el aire de los tubos y de la parte inferior de la celda de presión. Se elimina el aire que se encuentra debajo del plato de presión presionando los tubos con

regularidad, mientras se guía a las burbujas de aire hacia la otra salida a través de los canales que se encuentran en el fondo del perspex. Cuando se haya logrado eliminar el aire del fondo del perspex, del rebosador y de los tubos, se colocan dos anillos de caucho, el pequeño en el fondo y el plato de cerámica en la parte inferior, mientras que se instala el plato sintético y un anillo de caucho en la parte superior. Cuidado que nada de grasa de silicona se pegue al plato de cerámica, pues esto afectarás mediciones. Ahora puede instalarse la muestra de suelo.

Primero presionar la parte superior en el anillo, luego empujar todo el conjunto sobre la parte inferior de la celda de presión. Asegurar las cuatro tuercas de mariposa manualmente. Muy fuertemente enroscadas puede causar que se rompan los platos de cerámica, pero si se encuentran muy flojas se producen fugas.

Al colgar las celdas en los soportes, se crea una mayor diferencia de presión y se acelera el proceso de saturación. Chequear regularmente la cantidad de agua del rebosador. Chequear además si se producen fugas cerca de los bordes del anillo de muestras. Si éste fuera el caso, debe sacarse la muestra del recipiente de perspex, limpiarse todo, e instalar la muestra nuevamente. Cuando sea visible agua en la entrada de presión de aire en la parte superior de la celda, se coloca la celda en el soporte. La saturación de las muestras demorará uno o dos días dependiendo de su textura.

Determinación del contenido de agua residual y de la densidad real seca

Este paso es muy importante, pues los valores de los puntos de retención deben ser calculados con el contenido de agua residual y la densidad real seca. Se pesan las muestras de suelo (m_e) y se las coloca en la estufa por 24 horas a una temperatura de 105ºC. Después de 24 horas se pesan las muestras nuevamente (m_d), y después de dejarlas enfriar se saca el material de suelo del anillo (m_r). Igualmente, se limpian pesan los anillos.

Cálculos

Después de haber realizado todas las mediciones con los equipos de flujo por etapas múltiples, deben calcularse algunos valores que servirán de insumo para el programa MULTISTEP. Al tener que realizarse los cálculos para 9 muestras de suelo simultáneamente, se necesitó la ayuda de un programa creado en una hoja electrónica en Excel, el mismo que usando las fórmulas ya indicadas anteriormente, nos indican los resultados que detallan en tablas posteriormente.

Densidad aparente seca.- La densidad aparente seca se calcula como sigue:

$$DB = \frac{(m_d - m_r)}{V_r} \qquad (3.10)$$

Donde,

DB= densidad aparente seca (gr/cm^3)
m_d = peso de la muestra de suelo secada en estufa (gr)
m_r = peso del anillo de muestreo (gr)
V_r = volumen del anillo de muestreo (cm^3)

Contenido de agua después de las mediciones de flujo de salida.- El contenido del agua de la muestra de suelo después de la medición del flujo de salida constituye el punto de partida para cálculos adicionales que se describen a continuación, y se los calcula como sigue:

$$\theta_e = \frac{(m_e - m_d)}{(m_d - m_r)} * \frac{DB}{\rho_w} \qquad (3.11)$$

Donde,

θ_e= contenido volumétrico de agua de la muestra después del experimento de flujo de salida (cm^3/cm^3)
m_e= peso de la muestra de suelo después del experimento de flujo de salida (gr)

ρ_w= densidad del agua (= 1 gr/cm^3)

Los contenidos de agua se calculan de la siguiente forma:

$$\theta_x = \theta_e + \frac{(wl_x - wl_f)}{(m_d - m_r)} * \frac{DB}{\rho_w} \qquad (3.12)$$

Donde,

θ_x= contenido volumétrico de agua para los dos puntos de retención (r1 o r2) o de la situación saturada (s)(cm/cm^3)
wl_f= nivel final del agua después de las mediciones de flujo de salida (ml)
wl_x= nivel del agua en la bureta para los dos puntos de retención (r1 o r2) o para la situación saturada (s)(ml).

El volumen acumulado de flujo de salida.- La serie de volúmenes acumulativos de flujo se calcula como sigue:

$$V_n = (wl_0 - wl_n) \qquad for \quad n = 1 \quad to \quad n = n_f \qquad (3.13)$$

Donde,

V_n = volumen de flujo de *n* medición de salida (ml)
wl_0 = nivel del agua en la bureta antes de realizar el primer incremento de presión (ml)
wl_n = nivel del agua de *n* medición de flujo (ml)
n_f = número total de mediciones de flujo

Conductividad hidráulica saturada del plato.- Además de los cálculos anteriores es a veces necesario determinar la conductividad hidráulica saturada (k_{pl}) del mismo plato de cerámica. Este es un factor importante en la determinación de las propiedades hidráulicas del suelo a partir de experimentos de flujo transitorio, y constituye también un parámetro de insumo para el programa MULTISTEP.

La conductividad de un plato de cerámica puede calcularse como sigue:

$$k_{pl} = \frac{d}{t} * \frac{A1}{A0} * \ln\left(\frac{\rho - x_0}{\rho - x}\right) \qquad (3.14)$$

Donde,

K_{pl} = conductividad del plato de cerámica (cm/h)

d = grosor del plato de cerámica (cm)

A0 = área de corte transversal del plato de cerámica (cm^2)

A1 = área de corte transversal de la bureta (cm^2)

t = tiempo transcurrido después del incremento de presión (h)

ρ = incremento de presión por encima de la presión atmosférica (cm)

x_0 = nivel cero de la bureta (cm)

x = incremento del nivel de la bureta (cm)

3.2.1.1 Regulador de presión

Figura 3.4 Componentes del regulador de presión

El regulador de presión consta de tres presostatos, cuyas presiones de trabajo son:

Canal 1: 0 – 1bar

Canal 2: 0 – 10 bares

Canal 3: 0 – 16 bares

Figura 3.5 Presostatos del regulador de presión

El presostato a utilizarse en todos los ensayos que se realicen en el Multistep será el canal 1.

Calibración del regulador de presión.- Puesto que la presión ambiente varía según altitud, el usuario debe calibrar el punto cero para corresponder con las condiciones locales. Antes de empezar a trabajar con el Multistep es necesario verificar que el regulador de presión esta calibrado. Los siguientes pasos tienen que ser realizados cuando no exista presión en los tubos del Multistep.

1. El interruptor del regulador de presión debe estar en 0
2. Pulsar RP y manténgalo presionado.
3. Colocar el interruptor del regulador de presión en DS ein
4. Después de dos segundos la pantalla muestra OFS
5. Soltar RP
6. Ajustar la presión a 0 bares con los botones ↑ ↓
7. Configurar el ajuste de presión pulsando SP

Verificar modo de funcionamiento HYS

1. El interruptor del regulador de presión debe estar en 0
2. Pulsar simultáneamente SP y ↓ manténgalos presionados
3. Colocar el interruptor del regulador de presión en DS ein. Esperar tres segundos

4. Soltar SP y ↓
5. El display muestra el modo de trabajo, si éste es HYS, aceptar con la tecla SP. Caso contrario utilizar los botones ↓ ↑ hasta obtenerlo y finamente aceptar.

Una vez verificado el modo de trabajo se ajusta las diferentes presiones de trabajo.

Ajustar la presión de funcionamiento.- Cada vez que se quiera ajustar una nueva presión en el Multistep se tendrá que realizar este procedimiento.

Ajuste del punto de la conmutación (SP)

1. Presionar y sostener el botón del SP. La pantalla mostrará el ajuste anterior de la presión de la conmutación y la barra punteada del diagrama de conmutación destellará mientras que el botón se presiona abajo.
2. Utilizar las llaves de cursor ↑ ↓ para ajustar el punto de la conmutación hacia arriba o hacia abajo.
3. Cuando el botón SP se suelta la presión dejará de cambiar y dicho ajuste se almacena, después de lo cual la pantalla mostrará el valor de la presión y la barra parará de destellar.

Ajuste del punto reajustado o histéresis (RP)

1. Presionar y sostener el botón del RP. La pantalla mostrará el ajuste anterior de la histéresis, y la barra punteada del diagrama de conmutación destellará mientras que el botón se presiona hacia abajo.
2. Utilizar las llaves de cursor ↓ ↑ para ajustar el punto reajustado de manera semejante según lo descrito arriba.
3. Suelte el botón RP para que la presión sea almacenada.

Ajustados los puntos SP y RP, la presión de funcionamiento es igual a la suma de las dos presiones (=SP+RP).

3.2.2 Aparato de Membrana a Presión

El aparato de membrana a presión es el instrumento más preciso de los que se dispone hoy para mediciones de potenciales mátricos de suelos en laboratorio. Usado para la determinación de los puntos de retención de agua en el suelo dentro de un rango de presiones altas de 1 a 15 bares.

Descripción del equipo.- El equipo consta de lo siguiente:

1. Membrana de presión (celofán).
2. Tela filtro
3. Anillos plásticos.
4. Recipientes para secado de muestras
5. Compresor de 20 bares.
6. Vasos, plástico, ligas.
7. Horno eléctrico.
8. Balanza de 0.01 gramos de sensibilidad.
9. Cápsulas.
10. Cuchara pequeña.

Armado del aparato de membranas

1. Unir el aparato de membrana de presión a una mesa firme.
2. La manguera de alta presión es fijada a la pieza protectora de boca en la válvula de reducción. El otro dado de la manguera es fijada al filtro de aire de la misma manera.

   El filtro de aire debe ser situado tan cerca como sea posible al aparato de membrana.

3. Otra manguera de alta presión está al final del filtro de aire y el otro lado se conecta al aparato de membrana.
4. Una manguera de alta presión es unida al manómetro y la otra parte de la manguera se une a la pieza de la boca de la tapa.
5. En el fondo de la plancha se coloca una manguera muy delgada y arriba un tubo de desagüe plástico. Este tubo se deposita en una bureta de cristal.

Se debe asegura de que las uniones estén firmes y fijas, libre de escape de aire.

Figura 3.6 Compresor. Aparato de Membrana. Válvula de aire

Preparado de la muestras

1. Tomamos 100gr aproximadamente de la muestra alterada que se obtuvo en el campo y colocamos en un vaso de plástico.
2. Verter cuidadosamente el agua en el vaso, el suelo debe estar saturado. Evite que la tierra tenga impurezas.
3. Cubrir el vaso con una funda plástica y amarrarla con una liga, para evitar evaporaciones.
4. La saturación de las muestras húmedas toma de 1 a 2 días. Las muestras secas toman de 1 a 6 días según el tipo de suelo, aunque es recomendable que se sature por 6 días.

Arena gruesa	1 – 2 días
Arena fina	2 – 3 días
Tierra negra	2 – 4 días
Arcilla arenosa y clara	3 – 4 días
Arcilla pesada y muy pesada	4 – 6 días

Figura 3.7 Muestra de suelo preparada

Preparación del aparato de membrana para el uso

1. Una tela de filtro aproximadamente unos 80cm x 35cm. Esta tela se puede volver a usar luego de lavarla después de cada utilizada, solo se deje lavar con agua.
2. Dos piezas de corte de celofán (membrana) 2 o 3cm más grande que la plancha baja. Esta membrana puede volverse a usar también. Es recomendable utilizar una nueva membrana en cada nueva operación.
3. Sature el celofán con agua por un periodo de 24 horas.
4. Limpie la plancha baja. El área donde el anillo entra al contacto debe ser especialmente delgado y libre de grasa para asegurarlo bien.
5. Humedecer la tela filtro.
6. Poner 2 capas de tela filtro, una sobre la otra, en la plancha baja, alisando y quitando rastros de aire con la mano.
7. Alise el celofán, quitar cualquier impureza presente entre esas hojas, ya que puede dar lecturas falsas. Ponga la membrana de celofán sobre la tela filtro y suavice todas las burbujas de aire presentes.

Figura 3.8 Armado del aparato de membrana de presión

Llenado del aparato de membrana de presión

1. Organizar los anillos plásticos numerados o identificados de acuerdo al tipo de suelo al que pertenecen, en orden sobre la membrana húmeda en un número máximo de 18 anillos.
2. Llenar los anillos con el suelo saturado usando una cuchara pequeña.
3. Aplique una presión pequeña al suelo con una espátula para asegurar un contacto bueno con la membrana.
4. Es recomendable colocar 2 o 3 muestras del mismo suelo para precisar los datos.

Figura 3.9 Llenado del aparato de membrana de presión

Aparato de membrana de presión en uso.

1. Bajar la cubierta girando el tornillo de gusano y asegurar que no exista ningunas partículas de suelo entre la membrana.
2. Sellar la cubierta firmemente en una dirección según las manecillas del reloj.
3. Cerrar la válvula de aire.

4. Asegurar que el compresor ejerza la presión suficiente.
5. Girar el control del compresor hasta la presión requerida, verificar ese valor en el manómetro y lentamente abrir la palanca que permite el paso de la presión al aparato de membrana.
6. Si la presión indicada en el manómetro es demasiado baja, cerrar inmediatamente la palanca. Las causas de escape pueden ser :
   - Un agujero en la membrana. Esto se puede hacer visible inmediatamente ya que la manguera de desagüe presenta burbujas evidentes. La solución; colocar una nueva membrana.
   - Un sellado imperfecto. El escape de aire puede ser por aplicar una solución jabonosa al sello.
   - Mala conexión de las mangueras. La solución; apreter las mangueras.

   Las muestras se pueden volver a usar si el escape es hallado en pocas horas de la colocación, si esto no es el caso entonces nuevas muestras deben ser usadas.

   Si el equipo va estar sin usar el fin de semana se deben cerrar todas las válvulas.
7. Para establecer el equilibrio se debe depender del tipo de suelo.

Arena gruesa y media	2 – 4 días
Arena fina	4 – 7 días
Tierra negra y pesada	6 – 9 días
Arcilla pesada y muy pesada	9 – 12 días

Abrir el aparato de membrana de presión

1. Cerrar la válvula del compresor
2. Abrir la válvula de aire, eso permite bajar la presión del aparato de membrana y cerrar cuando la presión alcance 0.5 bares
3. Desatornillar el gusano.
4. Quitar la cubierta y retirar las muestras.

Pesar las muestras

1. Quitar los anillos que contienen las muestras de suelo de la membrana y colocarlas en cápsulas. (Los pesos de las cápsulas se deben pesar antes de colocar las muestras).
2. Pesar el suelo con la capsula en una balanza de 0,01gr de sensibilidad y registrar el peso que indica.
3. Colocar las cápsulas con el suelo en un horno eléctrico durante 24 horas a una temperatura de 105ºC.
4. Sacar las muestras del horno y dejar que se enfríen para poder pesarlas.
5. Pesar las muestras secas.

Figura 3.10 Pesado de muestras

Cálculos

El contenido gravimétrico de humedad de las muestras sometidas al procedimiento experimental se calcula de la siguiente forma:

$$w = \frac{m_{sh+r} - m_{ss+r}}{m_{ss+r} - m_r} \qquad (3.15)$$

Contenido volumétrico es: $$\theta = w\frac{\rho}{\rho_w} \qquad (3.16)$$

Donde,

m_{sh+r} = Masa de la muestra al sacarla del aparato de membrana más recipiente.

m_{ss+r} = Masa de la muestra seca más recipiente

m_r = Masa del recipiente

ρ = Densidad aparente del suelo, obtenida separadamente con una muestra inalterada

ρ_w = Densidad del agua = 1gr/cm³

3.2.3 Método de Caja de Arena.

Definición de pF y curva de pF.- Si la succión que se aplica en una muestra de suelo aumenta, entonces el porcentaje de humedad disminuye. El porcentaje de humedad es calculado por peso y expresado en volumen cm³/ cm³.

La característica llamada retención de humedad, se puede representar en una gráfica, donde la ordenada es la humedad volumétrica cm³/ cm³ y la abscisa es pF.

Los niveles de succión se medían originalmente en cm de columna de agua y el valor de la tensión de humedad pueden alcanzar 10cm de columna de agua representado con el símbolo pF, que ha sido introducido hace 45 años por Schofield.

El valor del logaritmo de la fuerza de succión se expresó en cm de columna de agua. Esto simplifica la construcción de la gráfica en ese momento.

Según el sistema de SI (Sistema Internacional) el nivel de succión es ahora normalmente representado en bares. Cada tipo de suelo posee su propia característica de humedad.

El porcentaje de humedad es calculado de 0 a 2 bares de presión. Y el secado de las muestras se realiza a una temperatura de 105ºC.

Muestreo de Suelo

El procedimiento que se debe seguir para la obtención de muestras para la caja de arena, es la misma que lo realizamos para el aparato de etapas múltiples, explicado anteriormente.

El método de Caja de Arena

Para la determinación en laboratorio, se aplica el principio de equilibrio hidrostático sobre muestras de suelo inalteradas. Las muestras de suelo son colocadas sobre una capa de arena fina saturada que se encuentra en un depósito denominado caja de arena, conectado hidráulicamente a un tubo de salida, como se observa en la siguiente figura 3.11.

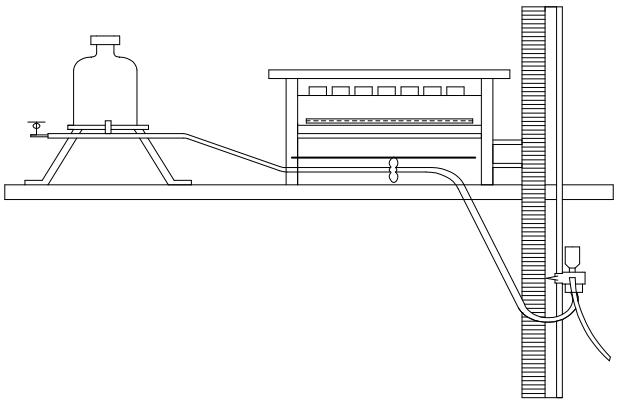


Figura 3.11 Caja de arena

Primero, las muestras de suelo se saturan con agua, posteriormente, para fijar los valores de las presiones negativas se procede de la siguiente forma.

El primer valor de la cabeza de presión negativa *h* es inducido por descenso del tubo de salida. Esta nueva posición del nivel de agua produce la salida de la misma. El contenido de agua resultante en el suelo después de alcanzado el equilibrio con la aplicación de la cabeza de presión *h,* es determinado gravimétricamente. Luego se procede a incrementar gradualmente el valor de *lhl*.

En el rango de $0>h=h_A$, el secado de la arena se asemeja a una membrana semipermeable, esto es permeable al agua e impermeable al aire. Cuando $h>h_A$, el aire entra en la arena rompiendo la continuidad del agua en estos largos poros posibilitando el drenaje en el suelo.

Descripción del equipo

El sistema estándar para la determinación de pF = 0–2 bares consiste en:

1. Un recipiente de plástico de forma rectangular.
2. Arena sintética.
3. El regulador de succión, con soporte.
4. Reservorio de agua (botella para abastecimiento de agua).
5. La tela filtrante (140 - 150 micrones).
6. Una cantidad necesaria para cubrir 10cm de la altura del recipiente plástico con arena sintética de tamaño de grano de aproximadamente 73 micrones.
7. Horno eléctrico
8. Balanza de precisión de 0,1gr sensibilidad

Preparación y presuturación de las muestras d suelo

Primero se preparan las muestras que fueron tomadas en el campo, el material de suelo que sobre sale de la parte inferior y de la parte superior del anillo de kopecky, este debe removerse cuidadosamente con una sierra pequeña y/o un cuchillo. Las superficies de la muestra deben ser lo más planas posibles, para asegurar un buen contacto entre la muestra de suelo y la arena.

Después de la preparación se colocan las muestras en una bandeja conteniendo agua para la saturación. El extremo inferior de la muestra que se introduce en el agua se cubre con una tela para evitar que el material de suelo escape del anillo. Se cubre el extremo superior con una funda plástica para evitar la evaporación.

La cantidad de tiempo que se necesita para saturar la muestra depende de la textura. Para ello demora un día para suelos de textura gruesa a media, y tres días para suelos arcillosos pesados.

El procedimiento de preparación y presuturación es el mismo que utilizamos para el método de etapas múltiples.

Figura 3.12 Saturación de las muestras

Ensamblado de la Caja de Arena.

a. Antes de ensamblar la caja de arena, el tubo de drenaje que va dentro de la caja debe estar cubierta con tres capas de tela filtrante (140 – 150 micrones), para dispersar la succión y para evitar que la arena bloquee los agujeros cuando se aplica una succión.
b. Para colocar la tela filtrante, primero cortar de tal manera que se obtenga un sección de aproximadamente 12cm x 500cm. Luego saturarla en agua desmineralizada. Posteriormente atar a un extremo de la tubería y empezar a envolverla de tal manera que cada vuelta cubra dos tercios de la anterior, esto asegurará que toda la tubería sea cubierta por tres capas de tela filtrante.
c. Finalmente atar el otro extremo al tubo.
d. La superficie sobre la cual se coloca la caja de arena debe estar al menos 1m de alto, nivelada y aislada contra la vibración (ya que podría causar goteo entre las paredes de la caja y la arena).

e. Llenar el reservorio de agua tomando en cuenta que su nivel no debería ser más alto que la parte superior de la caja de arena, ya que esto podría causar que el agua fluya rápidamente.
f. Abrir la llave del reservorio y dejar que el agua fluya a la caja hasta que su nivel sea la mitad de ésta. Eliminar cualquier burbuja de aire existente en las mangueras entre el reservorio, la caja de arena y el regulador de succión. Cerrar la llave del reservorio.
g. Saturar la arena sintética con agua desmineralizada y remover firmemente para eliminar aire. Es necesario que haya suficiente agua para que se pueda verter la arena en la caja.
h. Verter lentamente la arena saturada en la caja mientras constantemente se remueve el agua para evitar aire atrapado. Tener cuidado de no dañar el tubo de drenaje.
i. Presionar la arena contra las paredes de la caja y sus esquinas para asegurarse que no hayan bolsas de aire y exista un buen sellado.
j. Cuando el nivel de agua en la caja es demasiado alto, bajar el regulador de succión y deje fluir agua en una cubeta. Mantener siempre una lámina de agua sobre la arena.
k. Dejar de adicionar arena saturada cuando el nivel de ésta es aproximadamente 5cm sobre la parte superior del tubo de drenaje.
l. Drenar el exceso de agua dejando una lámina de 0,5cm sobre la arena.
m. Alisar la superficie de arena y déjela reposar.

Figura 3.13 Caja de Arena

Colocación de las muestras en la Caja de Arena

a. Una vez que la Caja de Arena ha sido ensamblada, asegurarse que una lámina de agua de 0,5cm cubra la superficie de la arena.
b. Colocar las muestras de suelo, con una tela filtrante en la parte inferior que va a tener contacto con la arena en la caja y dejarla estabilizarse por una hora.
c. Para saturar las muestras, abrir lentamente la llave del reservorio de agua e incrementar el nivel de agua hasta que éste se encuentre a 1cm bajo la parte superior de la muestra. Cerrar la llave del reservorio. Tomar en cuenta que un rápido ascenso del nivel de agua causará que el aire quede atrapado en la arena y posiblemente un daño en la estructura de las muestras de suelo.
d. Tapar la caja de arena, para prevenir evaporación. Dejar saturar las muestras, en el caso de suelos arenosos es necesario de dos a tres días y en el caso de suelos arcillosos aproximadamente dos semanas.
e. Dibujar un diagrama de la ubicación de las muestras de suelo sobre la caja, de tal manera que éstas puedan ser colocadas siempre en el mismo sitio.
f. Sacar las muestras cuidadosamente de la caja y secarlas antes de pesarlas. Este peso, que incluye el del anillo servirá para calcular el contenido de agua en saturación, es decir en pF=0.
g. Es importante mencionar que la determinación del contenido de humedad a pF=0 es relativamente inexacto ya que:
    - Es difícil transferir las muestras de suelo saturadas, especialmente arenas, a la balanza sin cambiar el contenido de humedad.
    - El centro de la muestra de suelo es usado como el nivel de referencia cero de presión, pero el h=0 en realidad es 1cm bajo la parte superior de la muestra.

Figura 3.14 Colocación de muestras en la Caja de Arena

Determinación del porcentaje de humedad

a. Chequear que todas las mangueras en la mesa de arena estén llenas con agua (no debe existir aire en el sistema).
b. Cubrir los anillos de las muestras con una pieza de tela filtro, asegurándose de que ésta esté completamente lisa y este constantemente en contacto con la muestra. Colocar las muestras, en el mismo sitio (para ello utilizar el diagrama) dentro de la caja y presionar los anillos fuertemente hacia abajo para tener un buen contacto entre las muestras y la arena. Colocar el nivel del regulador de succión en pF=0,4; es decir 2,5cm bajo el nivel cero o centro de las muestras, que en el caso de anillos de kopecky corresponde al nivel de la arena.
c. Dejar que las muestras lleguen al equilibrio. En el caso de arenas esto tomará un par de días y para arcillas más de una semana.
d. Sacar las muestras cuidadosamente de la caja y secarlas antes de pesarlas.
e. Chequear que se ha llegado al equilibrio, para ello la diferencia entre dos pesadas debe ser menor a 0,2gr.

Determinación de el porcentaje de humedad a pF=1; 1,51; 1,57; 1,84; 2

1. Antes de colocar nuevamente las muestras en la caja de arena, humedecer la superficie de la arena con una esponja húmeda. No retirar la tela filtro, únicamente limpiarla y alisarla para eliminar bolsas de aire e imperfecciones.

2. Colocar las muestras en la caja de arena.
3. El nivel del regulador de succión es colocado a pF=1. Esto es a 10cm debajo de cero. Pesar las muestras cada 3 o 4 días hasta que la diferencia entre dos sucesivos pesos sea menor que 0.2gr. Una vez establecido el equilibrio, se pesan las muestras, se repite los pasos 1 y 2 se fija el nuevo pF, y así sucesivamente hasta pF=2 que equivale a 100cm.

Cuando un cambio es hecho de un nivel de succión a uno más alto es necesario colocar las muestras en la caja antes de que se realice el cambio. Para evitar que los poros de la arena se obstruyan debido a la existencia de algas y crecimiento bacterial, ésta puede ser lavada al menos una vez al año con agua caliente o con ácido acético para prevenir depósitos de calcio. Es también recomendable lavar regularmente la tela filtro que cubre la arena.

Cálculos

Una vez obtenidos los pesos para cada punto y el peso seco de las muestras al final de la prueba se determina el contenido de humedad para cada punto con la siguiente ecuación.

$$\theta = \frac{m_{\psi} - m_d}{V_t * \rho_w} * 100 \qquad (3.17)$$

Donde,

θ = Contenido volumétrico de agua
m_{ψ} = Peso de la muestra al potencial matricial (peso en cada presión)
m_d = Peso seco de la muestra
ρ_w = Densidad del agua
V_t = Volumen de la muestra

3.3 TOMA DE MUESTRAS INALTERADAS Y ALTERADAS

3.3.1 Muestreo mediante extracción de muestras inalteradas

Este tipo de muestreo se realiza cuando se desea obtener muestras de suelo que conserven la estructura y el empaquetamiento natural del suelo. Este tipo de muestras se utilizan para análisis en laboratorio, tales como densidad aparente, puntos de retención de humedad y conductividad hidráulica, etc.

El equipo para la ejecución del muestreo debe estar en condiciones de operación, limpio y completo en todas sus partes, entre ellos tenemos.

Figura 3.15 Equipo utilizado para muestreo de suelos de campo

- Herramientas manuales tales como; cuchillo, espátula
- Barreno Edelman
- Grasa o vaselina
- Toma muestras
- Martillo de impacto
- Anillos de muestreo
- Caja de muestras para anillos
- Cinta de medición
- Libreta de campo

- Mapa de la zona en estudio
- GPS

Procedimiento

A. Escoger uno o más sitios de muestreo representativos en la zona de estudio (mediante barrenaciones se verifica si es el mismo tipo de suelo).
B. Georeferenciar los sitio escogidos con ayuda de un GPS, de tal manera que sean ubicados en el mapa.
C. Barrenar para clasificar los diferentes horizontes presentes en el suelo de estudio.
D. Marcar un espacio de trabajo en un área que se encuentre a nivel.
E. Con ayuda de un barreno, se remueve la parte superior del suelo hasta alcanzar el horizonte que será muestreado.
F. Previo al muestre, cubrir las paredes de los anillos con grasa o vaselina a fin de evitar flujos de borde a lo largo de las paredes de éstos.
G. Colocar el anillo en el interior del toma muestra, con el borde afilado hacia abajo.
H. Poner el toma muestras sobre el horizonte de suelo y presionar ligeramente hacia abajo. Si el suelo es muy duro, se utilizará el martillo, evitando que se produzca la compactación de la muestra.
I. Cuando el anillo de muestreo ha penetrado suficiente profundidad, se lo extrae cuidadosamente.
J. Realizar la primera preparación de la muestra; cortando suficiente cantidad de suelo en la parte superior e inferior del anillo de muestreo. La preparación final se efectuará en laboratorio.
K. Cubrir las superficies de la muestra con tapas plásticas.
L. Después de haber muestreado el horizonte, se repite el mismo procedimiento para los otros horizontes del perfil que requieren ser muestreados.

M. Las mediciones en laboratorio deben comenzar lo antes posible después del muestreo para evitar toda perturbación posible de la estructura interna de las muestras.

El número de muestras depende de la técnica física que se utilice (tiempo disponible y las muestras que pueden ser manejadas simultáneamente) y de la escala de la investigación.

3.3.2 Muestreo mediante extracción de muestras alteradas

Este tipo de muestreo se realiza para análisis químico, clasificación de los suelos, textura, determinación de puntos de retención en el rango de presiones altas, etc.

El equipo para la ejecución del muestreo debe estar en condiciones de operación, limpio y completo en todas sus partes y consta de.

Figura 3.16 Toma de muestras alteradas

- Herramientas tales como; pico, pala, barreta, cuchillo, espátula.
- Barreno Edelman
- Cinta de medición
- Fundas plásticas para recoger muestras alteradas
- Marcadores de tinta permanente
- Stikers
- Libreta de campo

- Mapa de la zona en estudio
- GPS

Procedimiento

A. Escoger uno o más sitios de muestreo representativos en la zona de estudio (mediante barrenaciones se verifica si es el mismo tipo de suelo).
B. Georeferenciar los sitio escogidos con ayuda de un GPS, de tal manera que sean ubicados en el mapa.
C. Barrenar para clasificar los diferentes horizontes presentes en el suelo de estudio.
D. Los horizontes de interés se muestrean de arriba hacia abajo. La muestra por horizonte se puede obtener mediante ayuda de una pala (para los primeros horizontes) o por medio de barrenaciones (para los siguientes horizontes). En el primer caso, clavar la pala en el límite inferior del horizonte y rebanarlo de arriba hacia abajo con un cuchillo o una pala pequeña.

   Con el propósito de obtener una buena representatividad del área de estudio, se toman pequeñas muestras (sub muestras) de suelo dispersas en toda la zona y luego se mezcla para obtener una muestra compuesta única por zona de estudio. Se toman 100 a 200gr por cada sub muestra. Las sub muestras pueden ser tomadas de forma aleatoria, en cuadrantes, en diagonal o en zigzag.
E. Extraer 1,5 – 2kg de suelo por cada horizonte en estudio y colocarlo en una bolsa plástica resistente.

CAPÍTULO 4

4.1 PROCESAMIENTO DE DATOS

Las muestras para los análisis han sido tomadas en diferentes sectores del austro, tales como EMAC, Turi, Cachi, Tuñi, Chica Despensa, Cubilán y Quimsacocha, debido a que los suelos en estos sectores presentan diferentes características que merecen ser estudiadas en este trabajo de investigación.
De esta recopilación de muestras se obtuvieron un total de 81.

4.1.1 Tablas de resultados por el método Aparato de Membrana a presión.

PRESIÓN DE 3 BARES

SITIOS	Cápsula	Peso Húmedo	Peso Seco	Peso Cápsula	Contenido Volumétrico	Promedio
QUIMSACOCHA	8	20,25	15,84	12,59	1,36	1,38
	13	21	16,13	12,73	1,43	
	3	19,83	15,61	12,46	1,34	
CACHI 1	13	24,52	22,28	12,73	0,23	0,24
	3	26	23,4	12,46	0,24	
	7	25,77	23,08	12,21	0,25	
CACHI 2	20	28,52	25,97	12,66	0,19	0,20
	1	27,69	25,05	12,53	0,21	
	23	29,01	26,48	12,66	0,18	
MALL	4	28,7	25,1	12,39	0,28	0,28
	25	26,66	23,69	13	0,28	
	16	25,7	22,9	12,58	0,27	
PINO BOSQUE	2	28,03	25	12,29	0,24	0,25
	10	26,51	23,77	12,73	0,25	
	24	28,1	25,09	13,09	0,25	
TUÑI	14	20,17	15,64	12,61	1,50	1,50
	17	19,78	15,44	12,57	1,51	
	7	19,1	14,97	12,21	1,50	
CHICA DESPENSA	11	22,53	17,37	12,58	1,08	0,96
	15	22	17,3	12,36	0,95	
	10	21,83	17,62	12,73	0,86	
TURBERA	1	18,2	15,12	12,53	1,19	1,19
	18	19,14	15,68	12,73	1,17	
	16	19,45	15,69	12,58	1,21	
SAGUIN BOSQUE	9	20,6	16,58	12,5	0,99	1,00
	2	20,7	16,5	12,29	1,00	
	13	20,33	16,49	12,73	1,02	

Tabla 4.1 Resultados de datos obtenidos mediante el Aparato de Membrana de presión

PRESIÓN DE 3 BARES

SITIOS	Cápsula	Peso Húmedo	Peso Seco	Peso Cápsula	Contenido Volumétrico	Promedio
QUIMSACOCHA 3C	17	21,42	18,24	12,57	0,56	0,56
	7	22,37	18,7	12,21	0,57	
QUIMSACOCHA 3A	12	12,26	9,35	6,64	1,07	1,15
	2	18,37	15,02	12,29	1,23	
QUIMSACOCHA 12A	16	20,72	17,03	12,58	0,83	0,83
	6	20,09	16,56	12,28	0,82	
QUIMSACOCHA 8A	14	20,59	16,31	12,61	1,16	1,18
	4	19,15	15,45	12,39	1,21	
QUIMSACOCHA 4AH	13	18,16	15,08	12,73	1,31	1,26
	3	17,8	14,88	12,46	1,21	
QUIMSACOCHA 8AC	15	20,38	16,61	12,36	0,89	0,89
	5	20,23	16,76	12,85	0,89	
QUIMSACOCHA 4C	10	25,27	24,12	12,73	0,10	0,08
	1	25,68	24,84	12,53	0,07	

Tabla 4.2 Resultados de datos obtenidos mediante el Aparato de Membrana de presión

RESIÓN DE 14,5 BARES

SITIOS	Cápsula	Peso Húmedo	Peso Seco	Peso Cápsula	Contenido Volumétrico	Promedio
CACHI 1	15	29,75	26,52	12,36	0,23	0,22
	17	29,73	26,55	12,57	0,23	
	19	29,5	26,64	12,61	0,20	
PINO BOSQUE	22	26,92	24,78	12,95	0,18	0,19
	2	22,41	20,86	12,29	0,18	
	24	27,63	25,16	13,09	0,20	
MALL	13	27,02	24,66	12,73	0,20	0,20
	14	24,51	22,55	12,61	0,20	
	11	24,93	22,82	12,58	0,21	
CACHI 2	23	28,15	26,49	12,66	0,12	0,12
	7	30,05	28,22	12,21	0,11	
	10	31,55	29,62	12,73	0,11	
QUIMSACOCHA	26	14,4	10,18	6,9	1,29	1,31
	45	15,45	10,44	6,7	1,34	
	27	14,99	10,52	7,1	1,31	
TUÑI	20	20,42	16,25	12,66	1,16	1,40
	3	20,1	15,36	12,46	1,63	
	8	20	15,67	12,59	1,41	
CHICA DESPENSA	4	20,2	17,35	12,39	0,57	0,59
	7	20,29	17,28	12,21	0,59	
	25	20,85	17,94	13	0,59	
TURBERA	24	18,73	15,85	13,09	1,04	1,03
	23	18,14	15,4	12,66	1,00	
	10	17,88	15,24	12,73	1,05	
SAGUIN BOSQUE	11	20,61	16,97	12,58	0,83	0,84
	22	20,83	17,2	12,95	0,85	
	17	20,03	16,65	12,57	0,83	

Tabla 4.3 Resultados de datos obtenidos mediante el Aparato de Membrana de presión

PRESIÓN DE 14,5 BARES

SITIOS	Cápsula	Peso Húmedo	Peso Seco	Peso Cápsula	Contenido Volumétrico	Promedio
QUIMSACOCHA 3C	17	22,14	19,1	12,57	0,47	0,45
	7	20,96	18,28	12,21	0,44	
QUIMSACOCHA 3A	12	14,3	9,91	6,64	1,34	1,35
	2	19,4	15,3	12,29	1,36	
QUIMSACOCHA 12A	6	20,03	16,36	12,28	0,90	0,84
	16	21,36	17,52	12,58	0,78	
QUIMSACOCHA 8A	14	20,93	16,42	12,61	1,18	1,12
	4	20,27	16,21	12,39	1,06	
QUIMSACOCHA 4AH	13	18	15,23	12,73	1,11	1,20
	3	18,68	15,18	12,46	1,29	
QUIMSACOCHA 8AC	15	21,39	17,19	12,36	0,87	0,88
	5	20,89	17,12	12,85	0,88	
QUIMSACOCHA 4C	10	27,52	25,07	12,73	0,20	0,20
	1	25,53	23,39	12,53	0,20	

Tabla 4.4 Resultados de datos obtenidos mediante el Aparato de Membrana de presión

4.1.2 Tablas de resultados por el método de Etapas Múltiples

MULTISTEP

Bureta		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Número de anillo		65	104	77	64		31		21	4
Identificación		**QUIMSACOCHA**								
Observaciones										
Horizonte										
P. de retención 1 h_1 = 30 cm H_2O										
	Nivel inicial	**24,1**	**31,5**		**25,8**				**23,4**	**24**
Fecha	06-Jul-09	23,4	29,9		25,8				23,4	22,1
	07-Jul-09	23,4	30		25,6				23,4	22,1
	07-Jul-09	23,7	30,2		25,6				23,3	22,6
	Nivel final	**23,6**	**30,2**		**25,6**				**23,3**	**22,6**
P. de retención 2 h_2 = 60 cm H_2O										
	Nivel inicial	**23,6**	**30,2**		**25,6**				**23,3**	**22,6**
Fecha	08-Jul-09	23,6	30,2		25,6				23,3	22,6
	09-Jul-09	22,5	29,8		25,1				23,3	21,2
	10-Jul-09	22,5	29,8		25,2				23,3	21,4
	Nivel final	**22,5**	**29,8**		**25,2**				**23,3**	**21,4**
P. de retención 3 h_3 = 100 cm H_2O										
	Nivel inicial	**22,5**	**29,8**		**25,2**				**23,3**	**21,4**
Fecha	13-Jul-09	21,3	29,5		25,2				23,1	20,4
	13-Jul-09	19,9	29,4		23,9				18,1	19
	Nivel final	**19,9**	**29,4**		**23,9**				**18,1**	**19**
P. de retención 4 h_4 = 250 cm H_2O										
	Nivel inicial	**19,9**	**29,4**		**23,9**				**18,1**	**19**
Fecha	14-Jul-09	18,8	29,2		22,9				16,8	17,8
	14-Jul-09	18,6	29,2		22,7				16,6	17,7
	15-Jul-09	18,2	29,2		22,5				16,6	17,4
	Nivel final	**18,2**	**29,2**		**22,5**				**16,6**	**17,4**
P. de retención 5 h_5 = 500 cm H_2O										
	Nivel inicial	**18,2**	**29,2**		**22,5**				**16,6**	**17,4**
Fecha	15-Jul-09	17,6	28,7		22				15,4	16,6
	16-Jul-09	16,8	28,7		21,7				14,4	16,1
	Nivel final	**16,8**	**28,7**		**21,7**				**14,4**	**16,1**
Peso húmedo		**210,8**	**209,7**		**210,8**				**210,5**	**208,1**
Peso seco		**137,9**	**135,9**		**136,3**				**139,4**	**135,1**
Peso del anillo		**98,1**	**96,8**		**96,7**				**101,4**	**95,8**

Tabla 4.5 Resultados de datos por el Método de Etapas Múltiples.

MULTISTEP

Bureta		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Número de anillo		77	67	1	27		216	31	100	42
Identificación		**QUIMSACOCHA 2**								
Observaciones										
Horizonte										
P. de retención 1 h_1 = 30 cm H_2O										
	Nivel inicial	**22,7**	**22,2**	**19,9**	**25,2**		**19,8**	**20,1**	**23,1**	**23,9**
Fecha	17-Jul-09	22,7	22,2	19,9	25,2		19,8	20,1	23,1	23,9
	20-Jul-09	22,7	21,8	19,8	25,2		19,8	20,1	23,1	23,6
	Nivel final	**22,7**	**21,8**	**19,8**	**25,2**		**19,8**	**20,1**	**23,1**	**23,6**
P. de retención 2 h_2 = 60 cm H_2O										
	Nivel inicial	**22,7**	**21,8**	**19,8**	**25,2**		**19,8**	**20,1**	**23,1**	**23,6**
Fecha	20-Jul-09	21,2	21,3	18,2	22,7		19,8	18,9	21,4	21,9
	21-Jul-09	21	21,3	18,3	22,6		19,8	18,9	21,4	21,7
	21-Jul-09	21	22	18,6	22,8		20,3	18,9	21,4	21,9
	22-Jul-09	21	22	18,6	23		20,3	19	21,4	21,8
	Nivel final	**21**	**22**	**18,6**	**23**		**20,3**	**19**	**21,4**	**21,8**
P. de retención 3 h_3 = 100 cm H_2O										
	Nivel inicial	**21**	**22**	**18,6**	**23**		**20,3**	**19**	**21,4**	**21,8**
Fecha	22-Jul-09	19,8	22,2	17,4	21,7		20,3	17,6	21,4	20,5
	23-Jul-09	19,6	22,1	17,2	21,7		20,3	17,6	21,4	20,3
	23-Jul-09	19,5	22,4	17,2	21,7		20,3	17,5	21,4	20,3
	24-Jul-09	19,5	22,3	17,2	21,7		20,3	17,5	21,4	20,3
	24-Jul-09	18,1	20,8	dañada	20,4		20,2	16,9	21,3	18,6
	Nivel final	**18,1**	**20,8**		**20,4**		**20,2**	**16,9**	**21,3**	**18,6**
P. de retención 4 h_4 = 250 cm H_2O										
	Nivel inicial	**18,1**	**20,8**		**20,4**		**20,2**	**16,9**	**21,3**	**18,6**
Fecha	27-Jul-09	16,5	20,1		18,7		20,2	16,7	21,4	17
	27-Jul-09	16	20		18,2		20	16,6	21,3	16,9
	Nivel final	**16**	**20**		**18,2**		**20**	**16,6**	**21,3**	**16,9**
P. de retención 5 h_5 = 500 cm H_2O										
	Nivel inicial	**16**	**20**		**18,2**		**20**	**16,6**	**21,3**	**16,9**
Fecha	28-Jul-09	15,5	20		18,1		19,9	16,6	21,3	16,9
	28-Jul-09	15,5	20		18,1		19,9	16,6	21,3	16,9
	29-Jul-09	15,3	20		18,1		19,9	16,6	21,2	16,8
	Nivel final	**15,3**	**20**		**18,1**		**19,9**	**16,6**	**21,2**	**16,8**
Peso húmedo		**208,3**	**209,8**	**207,1**	**212,4**		**204,2**	**210,2**	**211,1**	**210,1**
Peso seco		**134**	**137**	**138**	**136,7**		**131,1**	**134,5**	**132,7**	**135,3**
Peso del anillo		**94,6**	**97**	**99,7**	**98,5**		**92,5**	**96,8**	**94,6**	**92,1**

Tabla 4.6 Resultados de datos por el Método de Etapas Múltiples.

MULTISTEP

Bureta		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Número de anillo		193	6	38			84	392	76	307
Identificación		**CACHI 2**	**MALL**	**CACHI 2**			**MALL**	**MALL**	**MALL**	**MALL**
Observaciones										
Horizonte										
P. de retención 1 h_1 = 30 cm H_2O										
	Nivel inicial	**22,3**	**22,5**	**24,3**			**24,5**	**24,6**	**26**	**25,5**
Fecha	31-Jul-09	22,3	22,5	24,3			24,5	24,6	26	25,5
	03-Ago-09	20	20,4	16,8			23,6	21,6	24,9	24,6
	Nivel final	**20**	**20,4**	**16,8**			**23,6**	**21,6**	**24,9**	**24,6**
P. de retención 2 h_2 = 60 cm H_2O										
	Nivel inicial	**20**	**20,4**	**16,8**			**23,6**	**21,6**	**24,9**	**24,6**
Fecha	03-Ago-09	18,4	18,4	15			22,5	21,6	24,9	24,6
	03-Ago-09	17,6	17,3	14,1			21,7	21,6	24,9	24,6
	04-Ago-09	15,8	16,9	13,3			20,9	21,6	24,9	24,5
	04-Ago-09	15,6	16,8	13,2			20,9	21,6	24,9	24,5
	Nivel final	**15,6**	**16,8**	**13,2**			**20,9**	**21,6**	**24,9**	**24,5**
P. de retención 3 h_3 = 100 cm H_2O										
	Nivel inicial	**15,6**	**16,8**	**13,2**			**20,9**	**21,6**	**24,9**	**24,5**
Fecha	05-Ago-09	14,5	13,5	11,4			19,3	21,6	18,8	24,5
	05-Ago-09	14,3	13,2	11,3			19	21,4	18,4	24,5
	06-Ago-09	14,2	13,1	11,3			18,8	21,4	18	24,5
	Nivel final	**14,2**	**13,1**	**11,3**			**18,8**	**21,4**	**18**	**24,5**
P. de retención 4 h_4 = 250 cm H_2O										
	Nivel inicial	**14,2**	**13,1**	**11,3**			**18,8**	**21,4**	**18**	**24,5**
Fecha	06-Ago-09	13,5	11,1	10			18,5	21,4	17,8	24,1
	07-Ago-09	12,7	9,3	9,3			18,4	21,4	17,8	24
	07-Ago-09	12,6	9	9,3			18,4	21,4	17,8	24
	Nivel final	**12,6**	**9**	**9,3**			**18,4**	**21,4**	**17,8**	**24**
P. de retención 5 h_5 = 500 cm H_2O										
	Nivel inicial	**12,6**	**9**	**9,3**			**18,4**	**21,4**	**17,8**	**24**
Fecha	11-Ago-09	12,3	7,3	9,1			18	21,2	17,6	24
	Nivel final	**12,3**	**7,3**	**9,1**			**18**	**21,2**	**17,6**	**24**
Peso húmedo		**254**	**256,6**	**249,9**			**268,6**	**248,8**	**259,2**	**252,2**
Peso seco		**220,6**	**221**	**221,5**			**230,9**	**221,6**	**218,8**	**224,9**
Peso del anillo		**91,6**	**94,5**	**94,6**			**97,9**	**90**	**97,3**	**97**

Tabla 4.7 Resultados de datos por el Método de Etapas Múltiples.

MULTISTEP

Bureta		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Número de anillo		22	13	95			117	82		
Identificación		**CACHI 1**	**BOSQ PINO**				**BOSQ PINO**			
Observaciones										
Horizonte										
P. de retención 1 h_1 = 30 cm H_2O										
	Nivel inicial	**24,9**	**22,2**	**22,1**			**20,9**	**24,4**		
Fecha	11-Ago-09	24,9	16,4	22,1			18,9	22,5		
	12-Ago-09	23,2	12,6	22,1			18,4	21,6		
	12-Ago-09	23,2	12,6	22,1			18,4	21,2		
	Nivel final	**23,2**	**12,6**	**22,1**			**18,4**	**21,2**		
P. de retención 2 h_2 = 60 cm H_2O										
	Nivel inicial	**23,2**	**12,6**	**22,1**			**18,4**	**21,2**		
Fecha	13-Ago-09	23,2	10,8	22,1			18,1	14,6		
	13-Ago-09	23,2	10,8	22,1			18,1	14,4		
	14-Ago-09	23,1	9,5	22,1			18,1	12		
	Nivel final	**23,1**	**9,5**	**22,1**			**18,1**	**12**		
P. de retención 3 h_3 = 100 cm H_2O										
	Nivel inicial	**23,1**	**9,5**	**22,1**			**18,1**	**12**		
Fecha	14-Ago-09	23,1	9,3	22,1			18	11,9		
	Nivel final	**23,1**	**9,3**	**22,1**			**18**	**11,9**		
P. de retención 4 h_4 = 250 cm H_2O										
	Nivel inicial	**23,1**	**9,3**	**22,1**			**18**	**11,9**		
Fecha	17-Ago-09	23	7,8	dañada			17,7	8,2		
	17-Ago-09						17,7			
	Nivel final	**23**	**7,8**				**17,7**	**8,2**		
P. de retención 5 h_5 = 500 cm H_2O										
	Nivel inicial	**25**	**9,5**				**19,9**	**11,6**		
Fecha	18-Ago-09	24,6	8,9				18,5	11,3		
	19-Ago-09	24,6	8,9				18,3	11,3		
	Nivel final	**22,4**	**7,2**				**16,1**	**7,9**		
Peso húmedo		**271,7**	**243**	**264,1**			**265,5**	**261,1**		
Peso seco		**237,9**	**210,2**	**231,7**			**231,7**	**225,9**		
Peso del anillo		**97,3**	**96,5**	**94,5**			**95,2**	**96**		

Tabla 4.8 Resultados de datos por el Método de Etapas Múltiples.

MULTISTEP

Bureta		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Número de anillo		102	11	120	40	90	98	114	43	71
Identificación		**BOSQUE PROTECTOR DE SAGUIN " CUBILAN "**								
Observaciones										
Horizonte										
P. de retención 1 h_1 = 30 cm H_2O										
	Nivel inicial	**24,3**	**22,6**	**23,4**	**25**	**25,4**	**26,2**	**26**	**24,1**	**24,8**
Fecha	24-Ago-09	24,3	22,6	23,4	25	25,4	20,4	26	24,1	24,2
	24-Ago-09	24,3	22,6	23,4	25	25,4	20,4	26	23,7	23,9
	25-Ago-09	24,3	22,6	23,4	25	24,6	20,4	26	23,7	23,9
	Nivel final	**24,3**	**22,6**	**23,4**	**25**	**24,6**	**20,4**	**26**	**23,7**	**23,9**
P. de retención 2 h_2 = 60 cm H_2O										
	Nivel inicial	**24,3**	**22,6**	**23,4**	**25**	**24,6**	**20,4**	**26**	**23,7**	**23,9**
Fecha	25-Ago-09	24,3	22,4	22,6	24,9	24,3	19,9	25,9	22,9	23,9
	26-Ago-09	24,3	22,4	22,6	24,9	24,3	19,9	25,9	22,9	23,9
	Nivel final	**24,3**	**22,4**	**22,6**	**24,9**	**24,3**	**19,9**	**25,9**	**22,9**	**23,9**
P. de retención 3 h_3 = 100 cm H_2O										
	Nivel inicial	**24,3**	**22,4**	**22,6**	**24,9**	**24,3**	**19,9**	**25,9**	**22,9**	**23,9**
Fecha	26-Ago-09	24,3	22,1	dañada	24,8	23,7	19,7	24,5	22,3	23,5
	27-Ago-09	24,1	22,1		dañada	dañada	17,1	23	21,3	22,1
	Nivel final	**24,1**	**22,1**				**17,1**	**23**	**21,3**	**22,1**
P. de retención 4 h_4 = 250 cm H_2O										
	Nivel inicial	**24,1**	**22,1**				**17,1**	**23**	**21,3**	**22,1**
Fecha	27-Ago-09	24,1	22,1				16,7	dañada	21	21,7
	28-Ago-09	23,8	22,1				16,7		21	21,1
	Nivel final	**23,8**	**22**				**16,7**		**21**	**21,1**
P. de retención 5 h_5 = 500 cm H_2O										
	Nivel inicial	**23,8**	**22**				**16,7**		**21**	**21,1**
Fecha	28-Jul-09	17,4	22				15,9		20,5	20,4
	Nivel final	**17,4**	**22**				**15,9**		**20,5**	**20,4**
Peso húmedo		**218,4**	**232,6**	**226,9**	**222,3**	**231,7**	**223,9**	**225,5**	**224,7**	**229,2**
Peso seco		**145,8**	**160,3**	**157,1**	**148,2**	**158,3**	**155,6**	**154**	**154,6**	**154,6**
Peso del anillo		**95,9**	**101,5**	**96,3**	**92,5**	**96,8**	**98,3**	**96**	**96,9**	**96**

Tabla 4.9 Resultados de datos por el Método de Etapas Múltiples.

MULTISTEP

Bureta		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Número de anillo		68	17	5	142	73	69	207	83	87
Identificación		**CUBILÁN "TURBERA"**								
Observaciones										
Horizonte										
P. de retención 1 h_1 = 30 cm H_2O										
	Nivel inicial	**24,5**	**22,7**	**19,8**	**24,3**	**24,5**	**27,8**	**24,6**	**18,3**	**31**
Fecha	28-Ago-09	23,6	22,2	19,8	23,2	24	27	23,7	17,8	30,4
	28-Ago-09	23,6	21,1	18,6	22,9	dañada	26,5	21,9	17	29,8
	31-Ago-09	23,6	21,1	18,6	22,9		26,5	21,9	17	29,8
	Nivel final	**23,6**	**21,1**	**18,6**	**22,9**		**26,5**	**21,9**	**17**	**29,8**
P. de retención 2 h_2 = 60 cm H_2O										
	Nivel inicial	**23,6**	**21,1**	**18,6**	**22,9**		**26,5**	**21,9**	**17**	**29,8**
Fecha	31-Ago-09	21,9	21,1	17,9	22,1		26,5	21,9	16,4	24,3
	31-Ago-09	21,8	21,1	17,9	22,1		26,5	21,9	16,4	24,1
	Nivel final	**21,8**	**21,1**	**17,9**	**22,1**		**26,5**	**21,9**	**16,4**	**24,1**
P. de retención 3 h_3 = 100 cm H_2O										
	Nivel inicial	**21,8**	**21,1**	**17,9**	**22,1**		**26,5**	**21,9**	**16,4**	**24,1**
Fecha	01-Sep-09	18,4	21	17,5	21,7		26,3	21,8	16,3	23,7
	01-Sep-09	18,3	20,9	dañada	dañada		dañada	21,4	16	23,7
	Nivel final	**18,3**	**20,9**					**21,4**	**16**	**23,7**
P. de retención 4 h_4 = 250 cm H_2O										
	Nivel inicial	**18,3**	**20,9**					**21,4**	**16**	**23,7**
Fecha	01-Sep-09	17,5	20,9					21,4	14,9	23,7
	02-Sep-09	16,5	20,9					21,4	14,3	23,7
	Nivel final	**16,5**	**20,9**					**21,4**	**14,3**	**23,7**
P. de retención 5 h_5 = 500 cm H_2O										
	Nivel inicial	**16,5**	**20,9**					**21,4**	**14,3**	**23,7**
Fecha	02-Sep-09	15,9	20,7					21,4	14,1	23,5
	02-Sep-09	15,5	20,7					21,4	13,9	23,5
	03-Sep-09	14,6	20,7					21,4	13,7	23,5
	Nivel final	**14,6**	**20,7**					**21,4**	**13,7**	**23,5**
Peso húmedo		**210,3**	**216**	**223,2**	**206,6**	**230,6**	**216,1**	**196**	**210**	**207,1**
Peso seco		**166**	**163,8**	**170,3**	**144,2**	**167,2**	**163**	**132**	**152,2**	**136**
Peso del anillo		**96,3**	**100,7**	**99,9**	**91,8**	**96,8**	**97,2**	**92,4**	**95,8**	**97,7**

Tabla 4.10 Resultados de datos por el Método de Etapas Múltiples.

MULTISTEP

Bureta		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Número de anillo						58	32	218	2	157
Identificación		**TUÑI**								
Observaciones										
Horizonte										
P. de retención 1 h_1 = 30 cm H_2O										
	Nivel inicial					**27,8**	**22,2**	**23,3**	**24,8**	**24**
Fecha	15-Ene-10					26,2	19,8	21,2	20,7	22,6
	18-Ene-10					26,2	19,7	21,1	20,7	22,5
	Nivel final					**26,2**	**19,7**	**21,1**	**20,6**	**22,5**
P. de retención 2 h_2 = 60 cm H_2O										
	Nivel inicial					**26,2**	**19,7**	**21,1**	**20,6**	**22,5**
Fecha	18-Ene-10					24,4	17,8	20,3	20,5	22,5
	19-Ene-10					24,4	17,7	20,2	20,3	22,4
	Nivel final					**24,2**	**17,7**	**20**	**20,4**	**22,3**
P. de retención 3 h_3 = 100 cm H_2O										
	Nivel inicial					**24,2**	**17,7**	**20**	**20,4**	**22,3**
Fecha	20-Ene-10					24	14,6	19,6	18	21
	21-Ene-10					23,9	13,4	18,6	17,9	21
	Nivel final					**23,8**	**13,2**	**18,4**	**17,7**	**20,9**
P. de retención 4 h_4 = 250 cm H_2O										
	Nivel inicial					**23,8**	**13,2**	**18,4**	**17,7**	**20,9**
Fecha	21-Ene-10					23,7	12,8	18,1	17,7	20,9
	22-Ene-10					23,6	11,9	17,4	17,7	20,8
	Nivel final					**23,6**	**11,9**	**17**	**17,5**	**20,8**
P. de retención 5 h_5 = 500 cm H_2O										
	Nivel inicial					**23,6**	**11,9**	**17**	**17,5**	**20,8**
Fecha	22-Ene-10					23,6	11,9	17	17,5	20,8
	23-Ene-10					23.6	11,5	17	17,5	20,5
	Nivel final					**23,6**	**9,8**	**15,8**	**17,3**	**20,4**
Peso húmedo						**213,1**	**211,9**	**206,5**	**211,5**	**209,5**
Peso seco						**146,7**	**148,4**	**131,6**	**142,5**	**149,3**
Peso del anillo						**97,1**	**96,7**	**91,6**	**95,3**	**92,3**

Tabla 4.11 Resultados de datos por el Método de Etapas Múltiples.

MULTISTEP

Bureta		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Número de anillo		22			6		21		50	13
Identificación		**CHICA DESPENSA**								
Observaciones										
Horizonte										
P. de retención 1 h_1 = 30 cm H_2O										
	Nivel inicial	**24,4**			**24,5**		**22**		**23**	**25,6**
Fecha	05-Ene-10	23,9			24,3		21,8		22,8	25,4
	05-Ene-10	23,5			24,1		21,4		22,8	25,1
	06-Ene-10	23,2			23,8		21,4		22,7	25
	Nivel final	**23,2**			**23,8**		**21,4**		**22,7**	**25**
P. de retención 2 h_2 = 60 cm H_2O										
	Nivel inicial	**23,2**			**23,8**		**21,4**		**22,7**	**25**
Fecha	06-Ene-10	23,1			23,8		21,2		22,4	24,9
	06-Ene-10	23,1			23,7		21,2		22,3	24,7
	07-Ene-10	23,1			23,7		21,1		22,3	24,7
	Nivel final	**23,1**			**23,7**		**21,1**		**22,3**	**24,7**
P. de retención 3 h_3 = 100 cm H_2O										
	Nivel inicial	**23,1**			**23,7**		**21,1**		**22,3**	**24,7**
Fecha	07-Ene-10	**Se apagó el equipo por daño en el compresor y se dejo de cargar por un fin de semana**								
	08-Ene-10									
	08-Ene-10	21,2			23		14,8		12,6	24,7
	Nivel final	**21,2**			**18,8**		**14,8**		**12,6**	**24,7**
P. de retención 4 h_4 = 250 cm H_2O										
	Nivel inicial	**21,2**			**18,8**		**14,8**		**12,6**	**24,7**
Fecha	11-Ene-10	20,6			15		14,7		12,3	24,5
	12-Ene-10	21,1			13,6		14,7		12,3	24,5
	12-Ene-10	21,1			13,3		14,7		12,3	24,5
	Nivel final	**21,1**			**13,3**		**14,7**		**12,3**	**24,5**
P. de retención 5 h_5 = 500 cm H_2O										
	Nivel inicial	**21,1**			**13,3**		**14,7**		**12,3**	**24,5**
Fecha	13-Ene-10	20,9			11,2		14,3		12	24,3
	13-Ene-10	20,9			11,2		14,3		12	24,3
	14-Ene-10	20,9			11		14,3		12	24,3
	Nivel final	**20,7**			**10,1**		**14,1**		**12**	**24,3**
Peso húmedo		**221,1**			**213,2**		**217,9**		**215,4**	**217,8**
Peso seco		**153,1**			**149,9**		**145,3**		**145**	**144,5**

Tabla 4.12 Resultados de datos por el Método de Etapas Múltiples.

4.1.3 Tablas de resultados por el método de Caja de Arena.

			P. inicial						P. Húmedo	P. seco (110ºC)
SITIOS	FECHA		13/10/09	26/10/09	09/11/09	19/11/09	08/12/09	18/12/09	06/10/09	07/10/09
	PRESION (cm)		0	2,5	10	32	37	68,7	100	
	PRESION (bar)		0	0,40	1	1,51	1,57	1,84	2	
	# ANILLOS	Peso anillo (gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)
Turbera Saguín	142	91,8	219,7	219,5	217,1	212,8	210,7	207,9	204,7	144,2
	83	95,8	223,7	223,2	221,1	218,2	216,9	214,5	211,6	152,2
	87	97,7	217,8	217,1	213,4	207,3	205,1	200,6	195,6	136
	53	96,9	225,7	225,1	224,8	221,3	220,4	216,2	213,1	162,5
	116	95,5	223,8	223,5	223,5	219,9	217,4	214	210,6	160,5
	207	92,4	208,7	208,4	205,3	200,5	198,2	194,6	189,5	132
	17	100,7	224,7	225	222,4	219	217,6	214,8	211,6	163,8
	69	97,2	222,9	222,8	221	217,3	215,2	212	208,6	163
	78	95,6	222,9	222,5	220	216,4	214,3	210,9	207,6	154,2
	68	96,3	222,1	221,9	220,2	216,7	215,5	213	210,3	166
	5	99,9	227	226,3	225,2	222	220,9	217,5	214,1	170,3
	73	96,2	224,4	224,3	223,8	222,8	220,9	217,6	213,7	165,2
Tuñi	58	97,1	218	217,8	216,8	215,2	214,5	212	210,6	146,7
	218	91,6	213,2	213	211,9	210	208,9	206,2	204,4	131,6
	2	95,3	215,5	215,2	212,8	210,5	209,2	206,5	204,8	142,5
	32	96,7	219,5	219,1	217,2	214,5	213,2	210,6	209	148,4
	157	92,3	214,8	214,5	213,4	211,3	210	207,6	205,8	149,3

Tabla 4.13 Resultados de datos por el Método Caja de Arena.

			P. inicial						P. Húmedo	P. seco (110ºC)
SITIOS	**FECHA**		13/10/09	26/10/09	09/11/09	19/11/09	08/12/09	18/12/09	06/10/09	07/10/09
	PRESION (cm)		0	2,5	10	32	37	68,7	100	
	PRESION (bar)		0	0,40	1	1,51	1,57	1,84	2	
	# anillos	**P. anillo (gr)**	**(gr)**	**(gr)**	**(gr)**	**(gr)**	**(gr)**	**(gr)**	**(gr)**	**(gr)**
Chica Despensa	22	95,8	223,8	223,7	223,5	222,7	222,6	218,8	215,7	153,1
	6	99,8	223,3	222,8	221,9	220,5	219,5	214,3	211,2	149,9
	13	94,6	218,7	218,4	218	217	216,2	213,5	211,1	144,5
	21	94,5	219,6	219,4	219,1	218,3	217,5	212,7	209,8	145,3
	50	95	217	216,7	215,5	214,3	213,4	209,8	207,1	145
Cachi 2	112	97,3	262,7	262,3	260,5	250,7	248,6	246,8	243,4	216,5
	38	94,6	272,2	271,8	261,9	254	252,2	250,2	248,2	221,5
	193	91,6	265,8	265,5	264,2	260,4	259,2	257,3	255,6	220,6
Cachi 1	22	97,3	282,8	282,3	280,9	278,4	277,6	276,6	275,1	237,9
Bosque de Pino	82	96	271,2	271,1	270,4	267,2	265,5	262,3	260,5	225,9
	13	96,5	256,6	256	252,3	246,8	245,3	244,3	242,6	210,2
	117	95,2	275,3	274,7	274,3	271,7	270,8	268,6	266,4	231,7
	95	94,5	275	274,7	271,1	270,9	269,5	266,6	264,1	231,7
Mall del Río	76	97,3	273,7	273,2	271	267,7	266,3	262,1	258,4	218,8
	84	97,9	279,5	279	278,3	276,1	274,8	271,6	268,7	230,9
	307	97	275,7	274,9	271,7	266,9	265,2	260,2	256,9	224,9
	392	90	265,8	264,8	261,1	258,3	256,8	254	251,6	221,6
	6	94,5	270,4	269,8	268,7	267,9	265,2	262,6	259,8	221

Tabla 4.14 Resultados de datos por el Método Caja de Arena.

			P. Inicial						P. Húmedo	P. seco (110ºC)
SITIOS	FECHA		04/01/10	12/01/10	15/01/10	22/01/10	29/01/10	01/02/10	04/02/10	05/02/10
	PRESION (cm)		0	2,5	10	32	37	68,7	100	
	PRESION (bar)		0	0,40	1	1,51	1,57	1,84	2	
	# Anillos	P. anillo (gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)
QUIMSACOCHA 12 A	67	97	233,8	233,7	233,4	231,7	231,3	229	228	182,3
	120	96,4	235,2	235	234,7	233,4	233,3	231,6	230,6	181,6
	71	96	227	227	225	221,7	221,2	219,3	218,9	173,8
QUIMSACOCHA 8 A	100	94,7	226	225,7	225,5	224,8	224,4	221	219,3	175,3
	31	96,8	228,5	228,5	228,3	226,7	226,5	223,6	222	178,3
	113	96,3	228,8	228,8	228,8	228,1	227,7	224,6	223	176
QUIMSACOCHA 3A	92	95,8	217,5	217,5	216,9	214,4	214	213,2	212,9	163,4
	43	96,9	219,6	219,3	219	218,2	217,1	214,8	214,5	173,7
	104	96,8	222,6	222,5	222,3	220,9	220,3	217,8	216,8	179
QUIMSACOCHA 3C	215	92,6	245	244,8	244,7	243,6	243,3	241,6	240,6	203,7
	18	96,4	238,3	238,3	238	236	235,5	238,7	232,6	191,6
	49	96,7	242,7	242,7	242,5	240,7	240,4	238	236,8	198,7
UIMSACOCHA 8AC	216	92,5	232,3	231,9	231,3	227,3	226,7	223,6	222,1	166,1
	90	96,8	236,1	235,3	235,2	231,6	231,1	228,2	226,7	167,5
	77	94,7	238	237,5	237,1	232,9	232,1	229	227,5	163
QUIMSACOCHA 4AH	181	92,4	216,6	216,6	215,3	213	212,7	211,1	209,9	152,2
	30	96,1	223	222,9	222,8	220	219,7	217,8	216,8	152,4
	20	96	220,9	220,9	220,7	218	217,7	215,7	214,5	151,3
QUIMSACOCHA 4C	2	100,1	279,4	279,2	278,6	276,5	276,2	274,6	273,9	239,5
	107	95,5	275,4	275,2	274,6	273,4	273,1	271,1	270,2	233,5
	214	95,3	275,8	275,5	275,2	273,8	273,5	271,9	271,3	230,1

Tabla 4.15 Resultados de datos por el Método Caja de Arena.

4.2 RESULTADOS

4.2.1 Datos de Densidad Aparente

Para la determinación de la densidad aparente de los diferentes sitios de estudio, se tomó en el campo muestras de suelo inalteradas.

En la Tabla 4.1, se indica los valores obtenidos para los suelos analizados.

Sitio	Capa	DENSIDAD APARENTE (gr/ cm³)					
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	PROMEDIO
Cubilán Turbera Bajo	1	0,524	0,564	0,656	0,65	0,631	0,605
Cubilán Turbera Alto	1	0,697	0,69	0,704	0,658	0,586	0,667
Tuñi	1	0,496	0,4	0,472	0,517	0,57	0,491
Chica Despensa	1	0,573	0,501	0,499	0,508	0,5	0,516
Mall "Turi"	1	1,215	1,33	1,279	1,316	1,265	1,281
Bosque de Pino	1	1,299	1,137	1,365	1,372	x	1,293
Cachi 1	1	1,406	x	x	x	x	1,406
Cachi 2	1	1,192	1,269	1,29	x	x	1,250
Cubilán Bosque 1	1	0,577	0,609	0,58	0,565	0,591	0,584
Cubilán Bosque 2	1	0,586	0,608	0,573	0,588	0,615	0,594
Quimsacocha 1	1	0,396	0,391	0,386	0,396	0,382	0,390
Quimsacocha 2	1	0,394	0,377	0,393	0,383	0,381	0,386
Quimsacocha 3 A	1	0,676	0,768	0,822	x	x	0,755
Quimsacocha 3 C	2	1,111	0,952	1,02	x	x	1,027
Quimsacocha 4AH	1	0,598	0,563	0,553	x	x	0,571
Quimsacocha 4 C	2	1,394	1,38	1,348	x	x	1,374
Quimsacocha 8 A	1	0,806	0,815	0,797	x	x	0,806
Quimsacocha 8 AC	2	0,736	0,707	0,683	x	x	0,709
Quimsacocha 12 A	1	0,853	0,852	0,778	x	x	0,828

Tabla 4.16 Densidades Aparentes de los sitios analizados.

4.2.2 Datos de Contenido Volumétrico

Para la determinación del contenido volumétrico sitios de estudio, se tomó en el campo muestras de suelo alteradas. Los resultados se obtuvieron con la utilización del Aparato de Membrana de presión.

En las Tablas 4.2 y 4.3, se indica los valores obtenidos para los suelos analizados a 3 y 14,5 bares de presión.

Sitio	Capa	Contenido Volumétrico gr/cm³ a 3 bares de presión				
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	PROMEDIO	Cont. Vol
Cachi 1	1	0,23	0,24	0,25	0,24	0,3375
Pino Bosque	1	0,24	0,25	0,25	0,247	0,3190
Mall "Turi"	1	0,28	0,28	0,27	0,277	0,3544
Cachi 2	1	0,19	0,21	0,18	0,193	0,2417
Quimsacocha	1	1,36	1,43	1,34	1,377	0,5372
Tuñi	1	1,5	1,51	1,5	1,503	0,7381
Chica Despensa	1	1,08	0,95	0,86	0,963	0,4973
Cubilán Turbera	1	1,19	1,17	1,21	1,19	0,7937
Cubilán Bosque	1	0,99	1,02	1	1,003	1,2977
Quimsacocha 3 A	1	1,07	1,23	x	1,150	0,8690
Quimsacocha 3 C	2	0,56	0,57	x	0,563	0,54120
Quimsacocha 4AH	1	1,31	1,21	x	1,259	0,71909
Quimsacocha 4 C	2	0,10	0,07	x	0,085	0,11624
Quimsacocha 8 A	2	0,89	0,89	x	0,887	0,71513
Quimsacocha 8 AC	1	1,16	1,21	x	1,183	0,83832
Quimsacocha 12 A	2	0,83	0,82	x	0,827	0,68447

Tabla 4.17 Contenido Volumétrico a 3 bares de presión de los sitios analizados

Sitio	Capa	Contenido Volumétrico gr/ cm³ a 14,5 bares de presión				
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	PROMEDIO	Cont. Vol
Cachi 1	1	0,23	0,23	0,2	0,22	0,3094
Pino Bosque	1	0,18	0,18	0,2	0,187	0,2414
Mall "Turi"	1	0,2	0,2	0,21	0,203	0,2605
Cachi 2	1	0,12	0,11	0,11	0,113	0,1417
Quimsacocha	1	1,29	1,34	1,31	1,313	0,5125
Tuñi	1	1,16	1,63	1,41	1,4	0,6874
Chica Despensa	1	0,57	0,59	0,59	0,583	0,3011
Cubilán Turbera	1	1,04	1	1,05	1,03	0,6870
Cubilán Bosque	1	0,83	0,85	0,83	0,837	1,0821
Quimsacocha 3 A	1	1,38	1,36	x	1,373	1,0374
Quimsacocha 3 C	2	0,47	0,44	x	0,454	0,4358
Quimsacocha 4AH	1	1,11	1,29	x	1,197	0,6841
Quimsacocha 4 C	2	0,20	0,20	x	0,198	0,2718
Quimsacocha 8 A	2	0,87	0,88	x	0,876	0,7062
Quimsacocha 8 AC	1	1,18	1,06	x	1,123	0,7960
Quimsacocha 12 A	2	0,90	0,78	x	0,838	0,6939

Tabla 4.18 Contenido Volumétrico a 14,5 bares de presión de los sitios analizados

4.2.3 Datos de Humedad Volumétrica por el Método de Etapas Múltiples

Para la determinación de la humedad volumétrica de los sitios de estudio, se tomó en el campo muestras de suelo inalteradas.

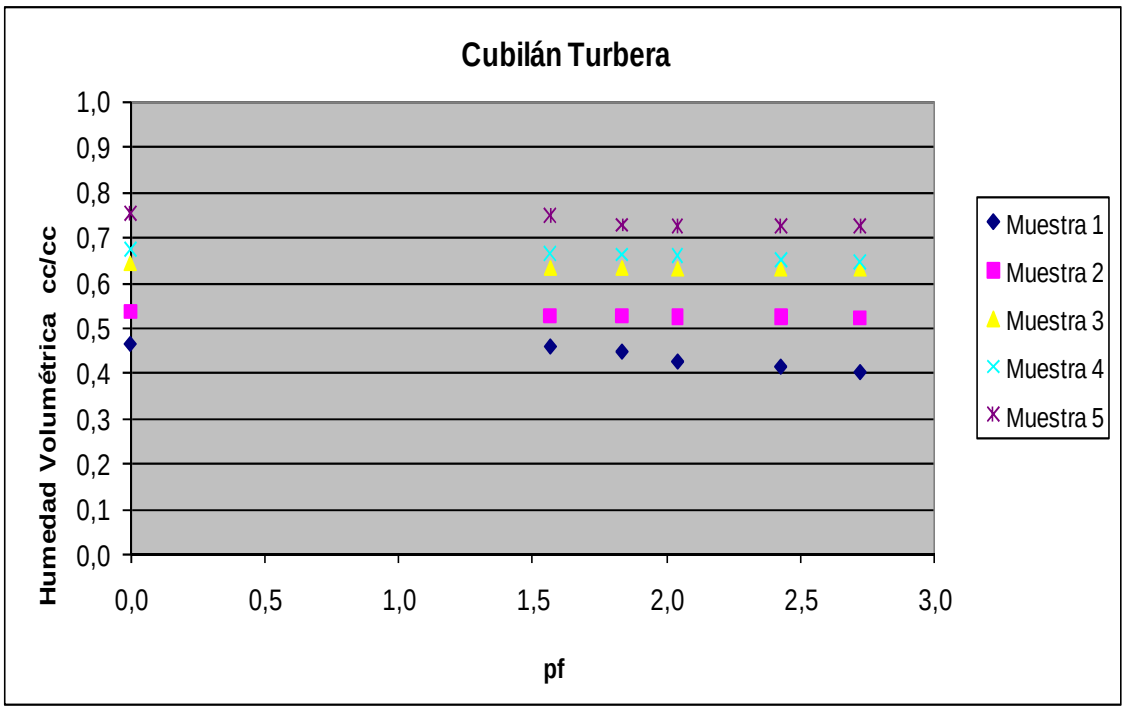
Los resultados se obtuvieron con la utilización del Método de Etapas múltiples.

En las siguientes tablas se indica los valores obtenidos para la representación de la curva de retención de agua, en los sitios de estudio.

Cubilán Turbera

pF	Humedad Volumétrica (cm^3/ cm^3)				
	Muestra 1	**Muestra 2**	**Muestra 3**	**Muestra 4**	**Muestra 5**
0	0,463	0,534	0,642	0,675	0,752
1,57	0,458	0,524	0,631	0,667	0,748
1,84	0,446	0,524	0,631	0,663	0,725
2,04	0,424	0,523	0,629	0,661	0,724
2,43	0,413	0,523	0,629	0,650	0,724
2,73	0,401	0,522	0,629	0,646	0,723

Tabla 4.19 Humedad Volumétrica “Cubilán Turbera”

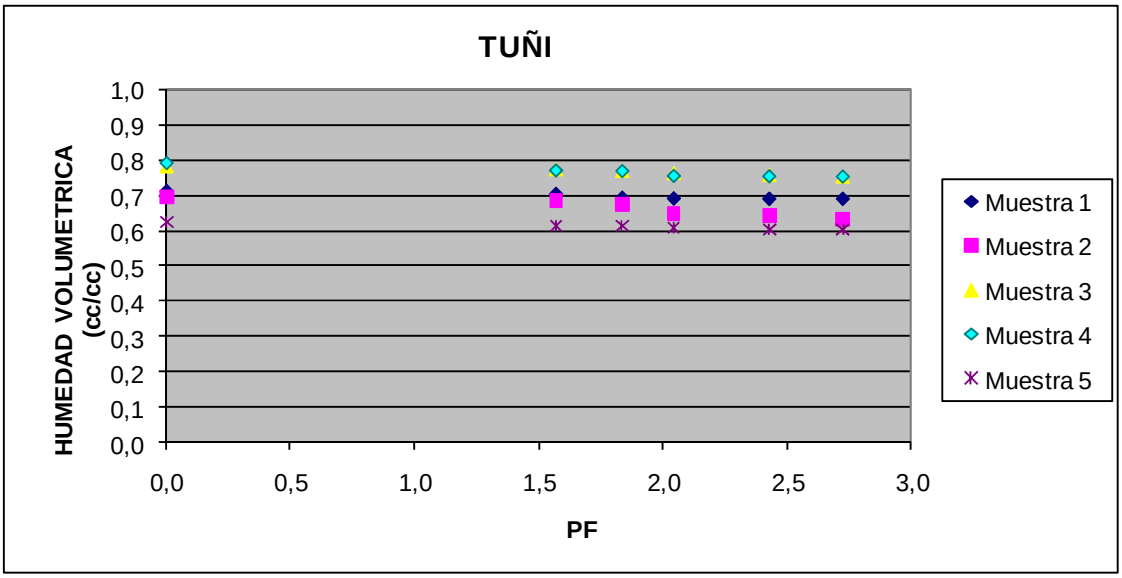


Gráfica 4.1 Curva de retención de agua Cubilán, Turbera.

Tuñi

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
0	0,709	0,695	0,779	0,790	0,623
1,57	0,701	0,682	0,770	0,769	0,614
1,84	0,691	0,672	0,766	0,767	0,614
2,04	0,689	0,648	0,759	0,753	0,605
2,43	0,688	0,642	0,754	0,752	0,603
2,73	0,688	0,631	0,749	0,751	0,602

Tabla 4.20 Humedad Volumétrica “Tuñi”

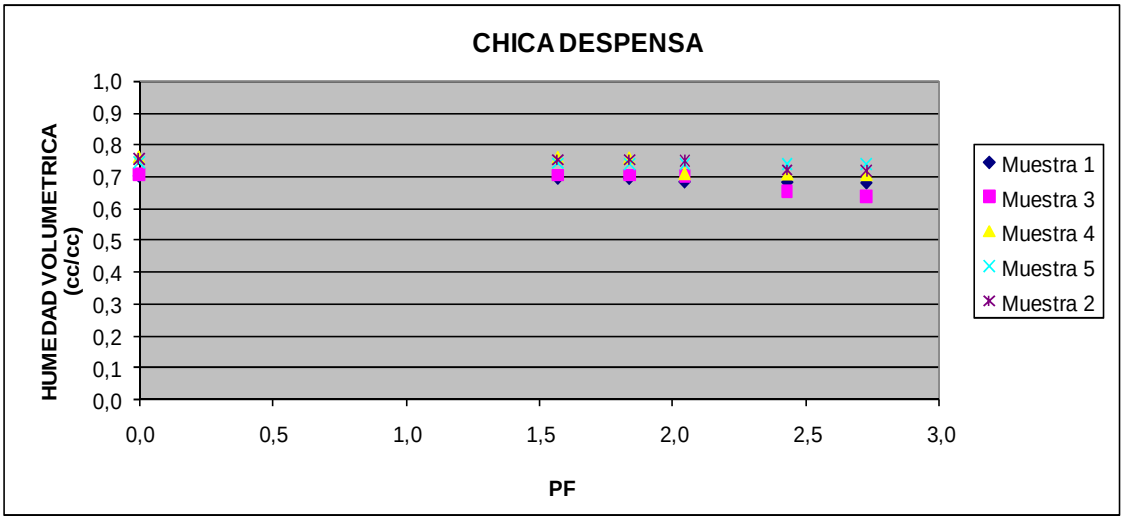


Gráfica 4.2 Curva de retención de agua, Tuñi

Chica Despensa

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
0	0,701	0,757	0,707	0,762	0,744
1,57	0,694	0,754	0,703	0,761	0,741
1,84	0,694	0,753	0,703	0,759	0,739
2,04	0,683	0,751	0,699	0,710	0,739
2,43	0,682	0,720	0,650	0,708	0,738
2,73	0,680	0,717	0,634	0,707	0,737

Tabla 4.21 Humedad Volumétrica “Chica Despensa”

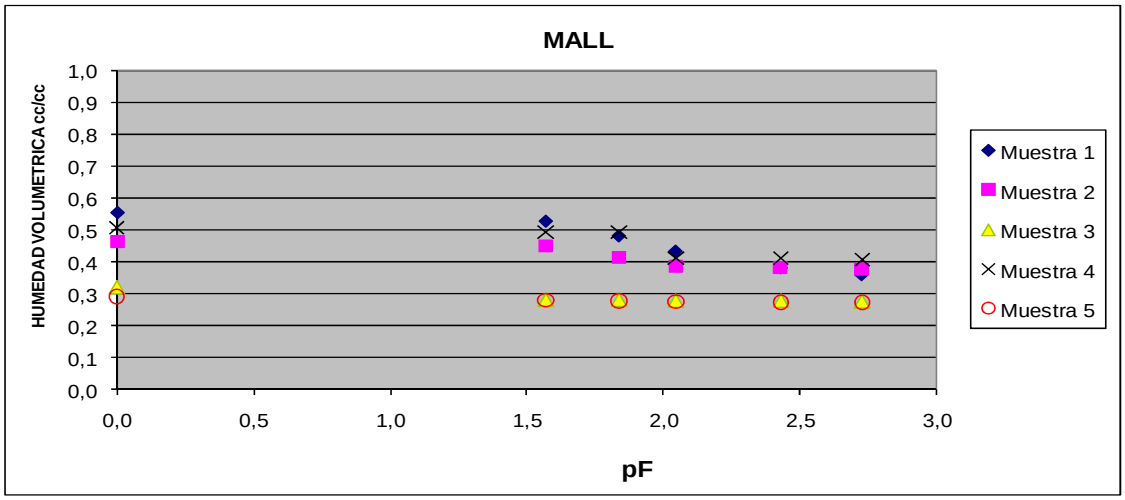


Gráfica 4.3 Curva de retención de agua, Chica Despensa

Mall "Turi"

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
0	0,551	0,461	0,318	0,506	0,291
1,57	0,525	0,449	0,279	0,493	0,279
1,84	0,479	0,413	0,279	0,493	0,277
2,04	0,432	0,386	0,276	0,409	0,274
2,43	0,380	0,380	0,276	0,406	0,272
2,73	0,358	0,375	0,273	0,404	0,272

Tabla 4.22 Humedad Volumétrica "Mall"

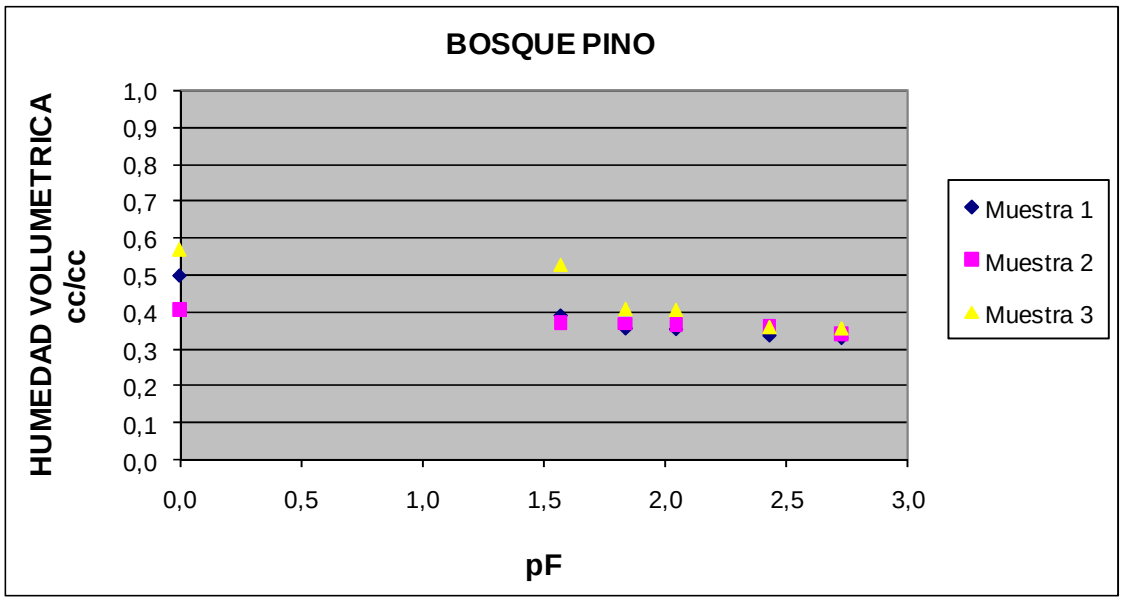


Gráfica 4.4 Curva de retención de agua, Mall "Turi"

Bosque de Pino "EMAC"

pF	Humedad Volumétrica (cm^3/ cm^3)		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
0	0,499	0,404	0,566
1,57	0,389	0,369	0,525
1,84	0,354	0,365	0,405
2,04	0,352	0,364	0,403
2,43	0,335	0,360	0,356
2,73	0,328	0,338	0,352

Tabla 4.23 Humedad Volumétrica "EMAC"

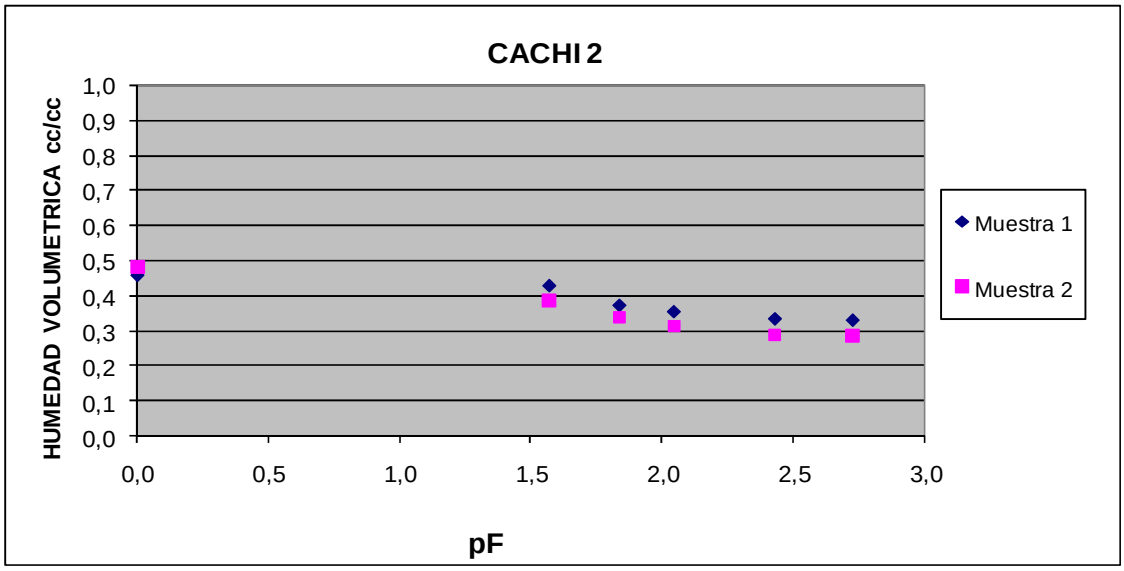


Gráfica 4.5 Curva de retención de agua, EMAC

Cachi 2

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)	
	Muestra 1	Muestra 2
0	0,459	0,481
1,57	0,430	0,385
1,84	0,374	0,339
2,04	0,356	0,314
2,43	0,335	0,289
2,73	0,331	0,286

Tabla 4.24 Humedad Volumétrica "Cachi 2"

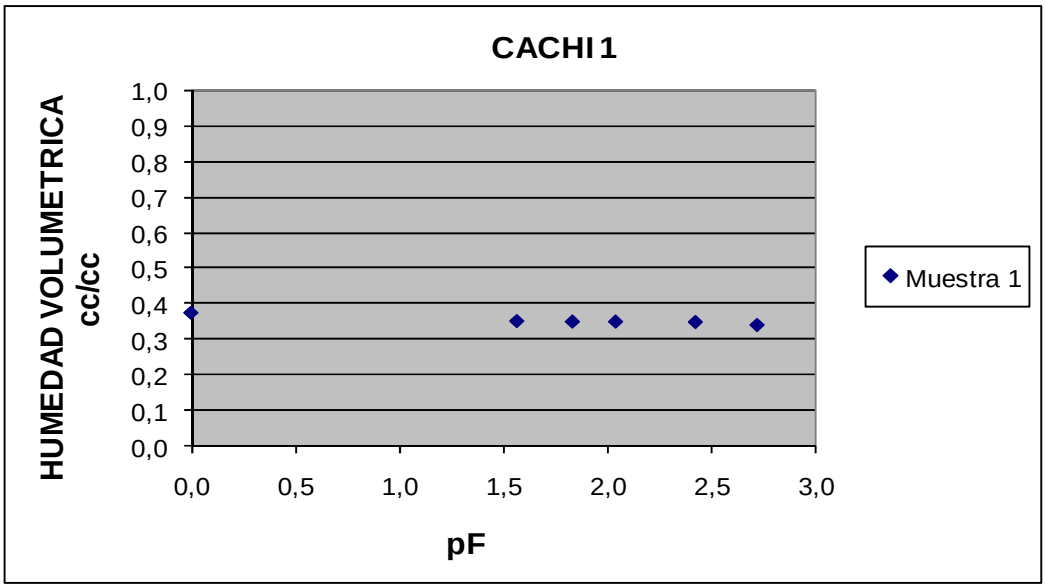


Gráfica 4.6 Curva de retención de agua, Cachi 2

Cachi 1

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)
	Muestra 1
0	0,373
1,57	0,349
1,84	0,348
2,04	0,348
2,43	0,346
2,73	0,338

Tabla 4.25 Humedad Volumétrica, "Cachi 1"

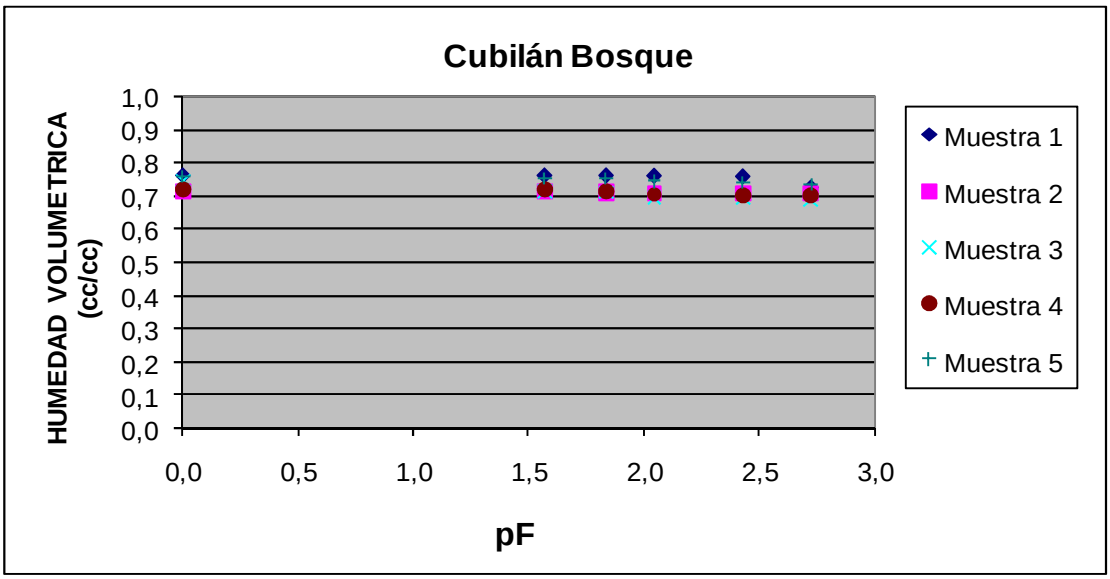


Gráfica 4.7 Curva de retención de agua, Cachi 1

Cubilán Bosque

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
0	0,760	0,711	0,745	0,720	0,758
1,57	0,760	0,711	0,712	0,717	0,752
1,84	0,760	0,710	0,709	0,713	0,752
2,04	0,759	0,708	0,693	0,703	0,742
2,43	0,758	0,707	0,690	0,702	0,736
2,73	0,726	0,707	0,686	0,699	0,732

Tabla 4.26 Humedad Volumétrica, “Cubilán Bosque”

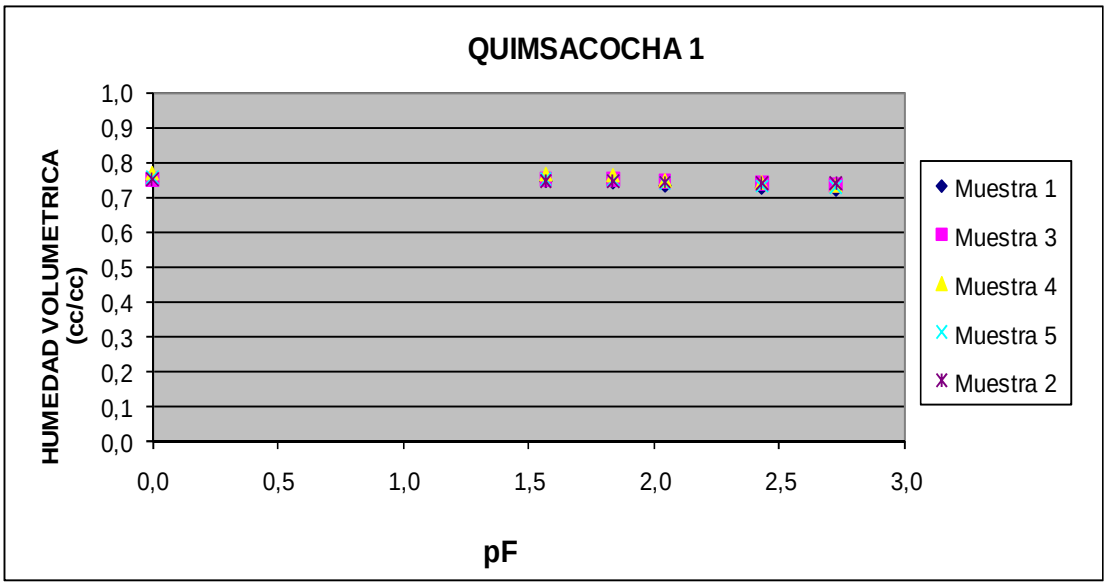


Gráfica 4.8 Curva de retención de agua, Cubilán Bosque

Quimsacocha 1

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
0	0,749	0,749	0,752	0,768	0,758
1,57	0,747	0,744	0,751	0,765	0,752
1,84	0,742	0,743	0,750	0,762	0,747
2,04	0,732	0,741	0,745	0,746	0,738
2,43	0,726	0,740	0,739	0,741	0,732
2,73	0,720	0,738	0,736	0,732	0,727

Tabla 4.27 Humedad Volumétrica “Quimsacocha 1”

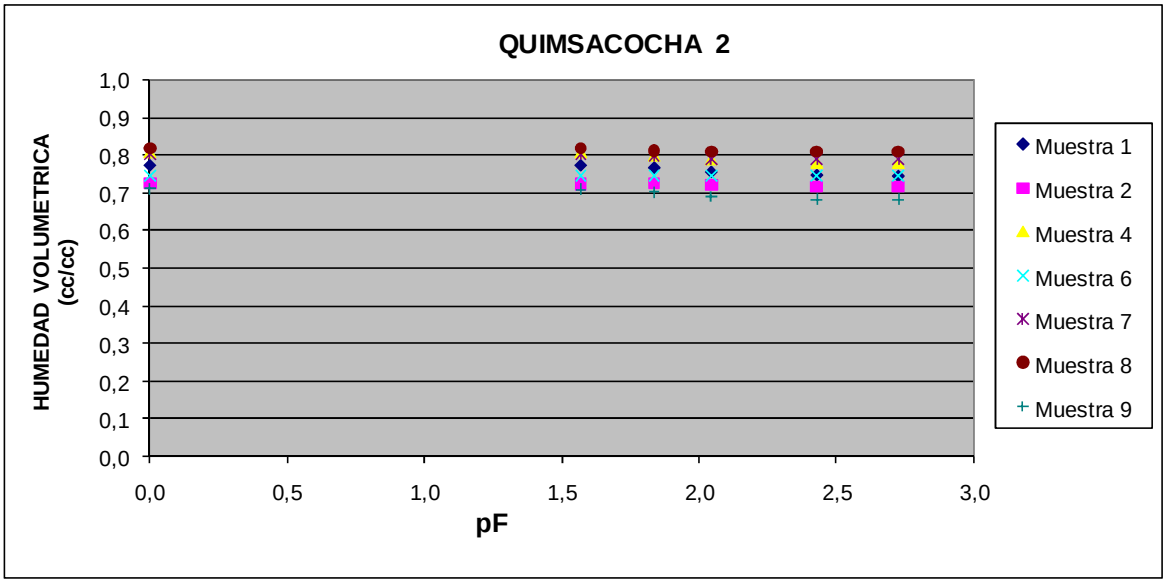


Gráfica 4.9 Curva de retención de agua, Quimsacocha 1

Quimsacocha 2

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 4	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9
0	0,770	0,724	0,807	0,744	0,803	0,816	0,709
1,57	0,770	0,723	0,807	0,744	0,803	0,816	0,707
1,84	0,764	0,723	0,798	0,746	0,799	0,810	0,700
2,04	0,752	0,719	0,788	0,746	0,791	0,809	0,688
2,43	0,744	0,716	0,779	0,745	0,789	0,809	0,681
2,73	0,741	0,716	0,779	0,745	0,789	0,809	0,681

Tabla 4.28 Humedad Volumétrica “Quimsacocha 2”



Gráfica 4.10 Curva de retención de agua, Quimsacocha 2

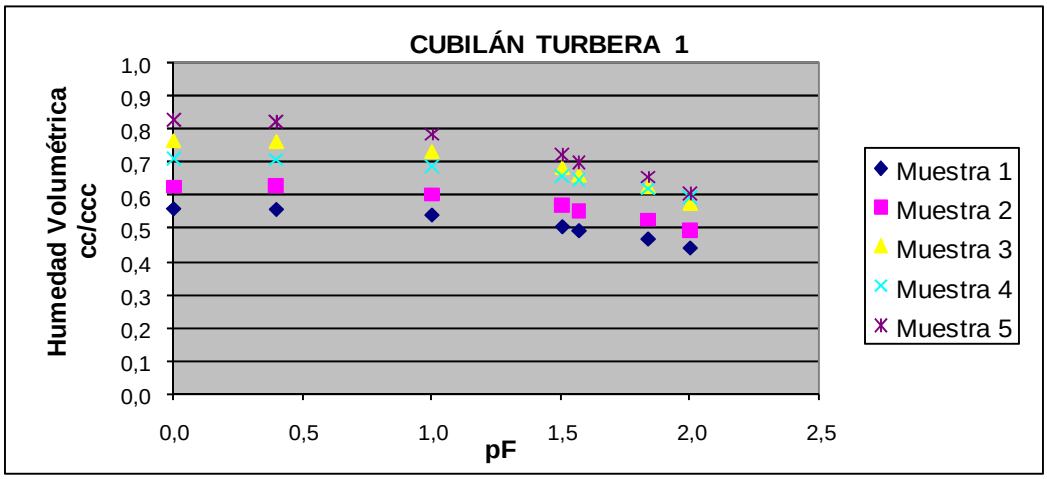
4.2.4 Datos de Humedad Volumétrica por el Método de Caja de Arena

Para la determinación de la humedad volumétrica de los sitios de estudio, se tomó en el campo muestras de suelo inalteradas.

Cubilán Turbera 1

PF	Humedad Volumétrica (cm^3/ cm^3)				
	Muestra 1	**Muestra 2**	**Muestra 3**	**Muestra 4**	**Muestra 5**
0	0,5610	0,6261	0,7670	0,7150	0,8319
0,4	0,5590	0,6292	0,7640	0,7100	0,8248
1	0,5420	0,6025	0,7330	0,6890	0,7871
1,51	0,5070	0,5675	0,6850	0,6600	0,7251
1,57	0,4950	0,5531	0,6620	0,6470	0,7027
1,84	0,4700	0,5243	0,6260	0,6230	0,6570
2	0,4430	0,4914	0,5750	0,5940	0,6061

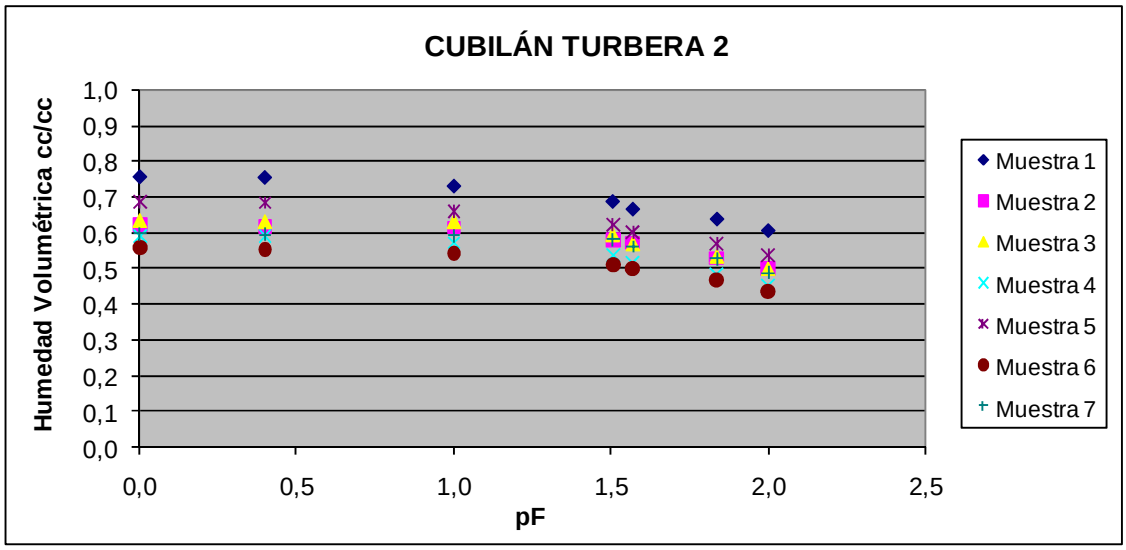
Tabla 4.29 Humedad Volumétrica “Cubilán Turbera 1”



Gráfica 4.11 Curva de retención de agua, Cubilán Turbera 1

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7
0	0,7550	0,62502	0,63178	0,59058	0,68700	0,56136	0,59801
0,4	0,7530	0,61908	0,62879	0,58959	0,68300	0,55443	0,59700
1	0,7290	0,61611	0,62879	0,57185	0,65800	0,54354	0,59194
1,51	0,6860	0,58150	0,59286	0,53537	0,62200	0,51186	0,58184
1,57	0,6650	0,57260	0,56791	0,51466	0,60100	0,50097	0,56265
1,84	0,6370	0,53107	0,53397	0,48311	0,56700	0,46731	0,52932
2	0,6050	0,50041	0,50004	0,44959	0,53400	0,43364	0,48992

Tabla 4.30 Humedad Volumétrica "Cubilán Turbera 2"

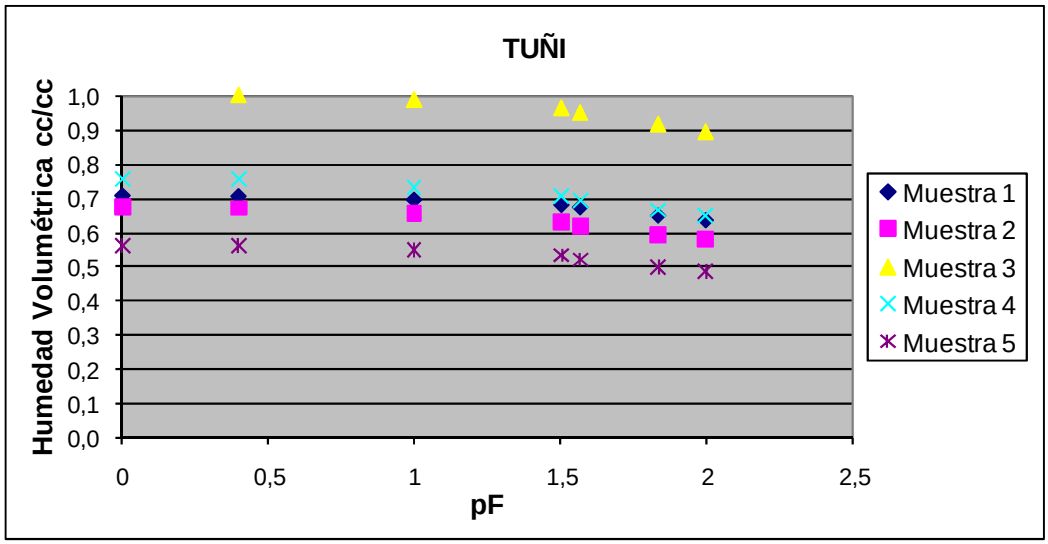


Gráfica 4.12 Curva de retención de agua, Cubilán Turbera 2

Tuñi

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
0	0,7058	0,6752	1,00	0,7594	0,5642
0,4	0,7038	0,6714	1,00	0,7563	0,5616
1	0,6939	0,6534	0,99	0,7313	0,5522
1,51	0,6781	0,6278	0,96	0,7074	0,5341
1,57	0,6712	0,6154	0,95	0,6938	0,5229
1,84	0,6464	0,5907	0,92	0,6658	0,5022
2	0,6326	0,5755	0,89	0,6481	0,4867

Tabla 4.31 Humedad Volumétrica "Tuñi"

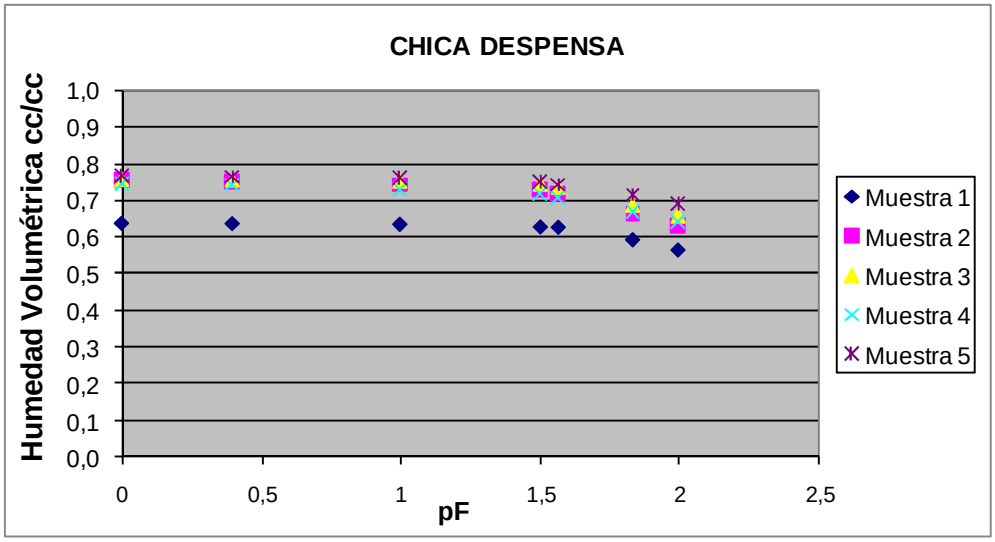


Gráfica 4.13 Curva de retención de agua, Tuñi

Chica Despensa

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
0	0,637	0,756	0,755	0,743	0,768
0,4	0,636	0,751	0,753	0,740	0,764
1	0,634	0,742	0,750	0,728	0,760
1,51	0,627	0,727	0,742	0,715	0,750
1,57	0,626	0,717	0,734	0,706	0,742
1,84	0,592	0,664	0,685	0,669	0,714
2	0,564	0,632	0,655	0,641	0,689

Tabla 4.32 Humedad Volumétrica "Chica Despensa"

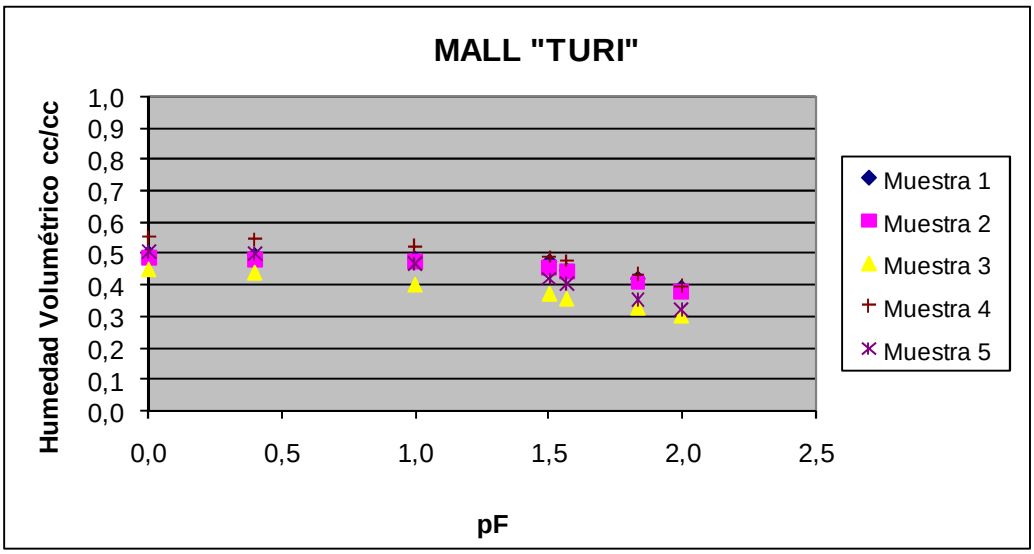


Gráfica 4.14 Curva de retención de agua, Chica Despensa

Mall "Turi"

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)				
	Muestra 1	**Muestra 2**	**Muestra 3**	**Muestra 4**	**Muestra 5**
0	0,4967	0,4834	0,4444	0,5490	0,5052
0,4	0,4907	0,4785	0,4343	0,5440	0,4973
1	0,4796	0,4715	0,3971	0,5220	0,4654
1,51	0,4716	0,4496	0,3690	0,4890	0,4177
1,57	0,4444	0,4367	0,3539	0,4750	0,4008
1,84	0,4183	0,4049	0,3257	0,4330	0,3511
2	0,3901	0,3760	0,3016	0,3960	0,3182

Tabla 4.33 Humedad Volumétrica "Mall"

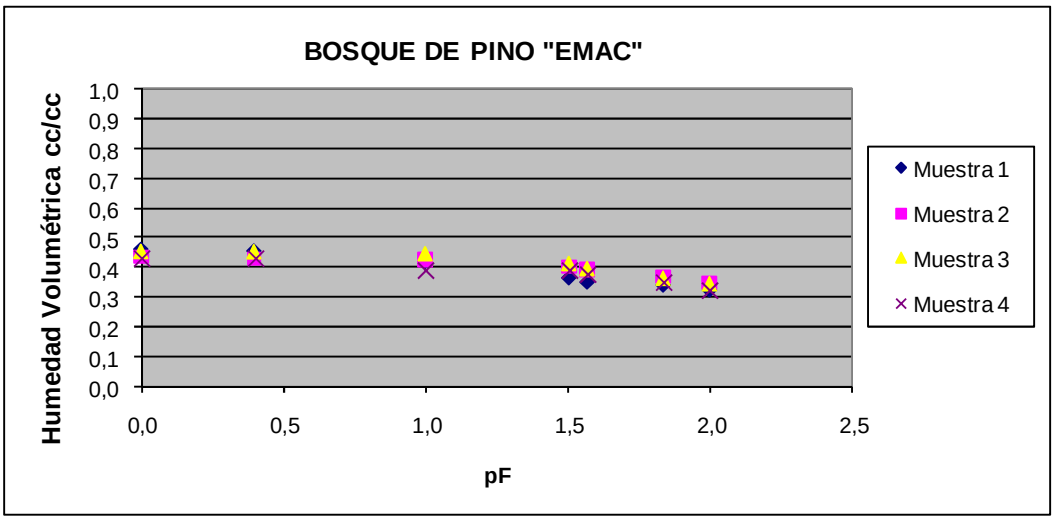


Gráfica 4.15 Curva de retención de agua, Mall "Turi"

Bosque de Pino "EMAC"

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)			
	Muestra 1	**Muestra 2**	**Muestra 3**	**Muestra 4**
0	0,464	0,437	0,453	0,432
0,4	0,458	0,431	0,452	0,429
1	0,421	0,427	0,445	0,393
1,51	0,366	0,401	0,413	0,391
1,57	0,351	0,392	0,396	0,377
1,84	0,341	0,370	0,364	0,348
2	0,324	0,348	0,346	0,323

Tabla 4.34 Humedad Volumétrica "EMAC"

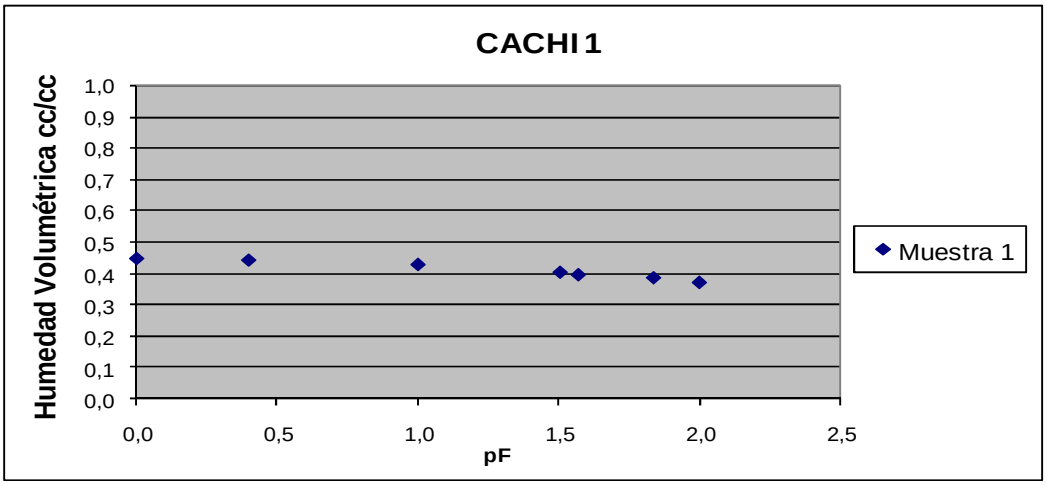


Gráfica 4.16 Curva de retención de agua, EMAC

Cachi 1

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)
	Muestra 1
0	0,449
0,4	0,444
1	0,43
1,51	0,405
1,57	0,397
1,84	0,387
2	0,372

Tabla 4.35 Humedad Volumétrica "Cachi 1"

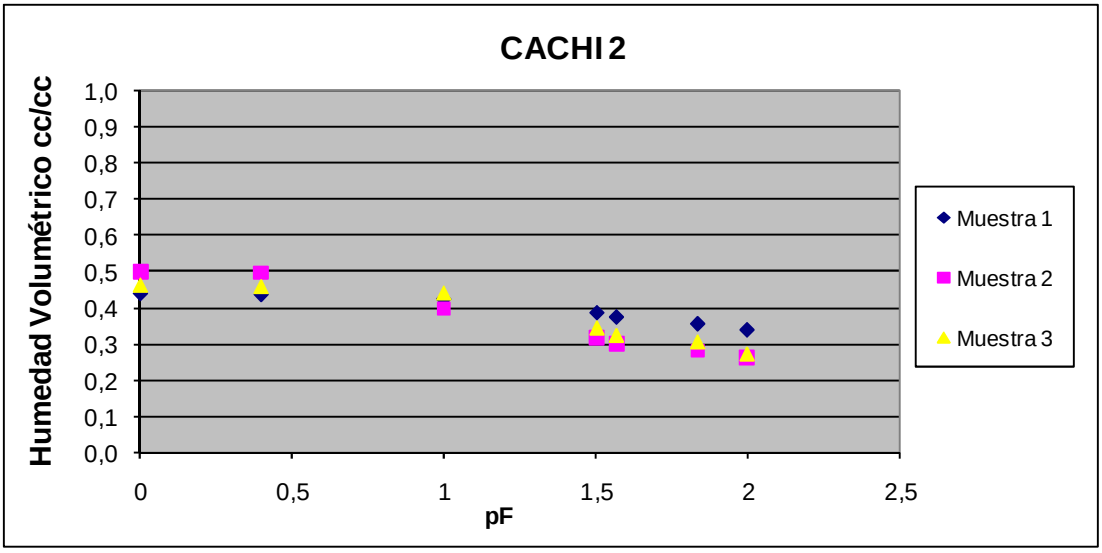


Gráfica 4.17 Curva de retención de agua, Cachi 1

Cachi 2

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
0	0,4381	0,4995	0,4620
0,4	0,4352	0,4956	0,4580
1,000	0,4226	0,3981	0,4400
1,51	0,3858	0,3202	0,3420
1,57	0,3741	0,3025	0,3210
1,84	0,3557	0,2828	0,3030
2	0,3392	0,2631	0,2690

Tabla 4.36 Humedad Volumétrica "Cachi 2"

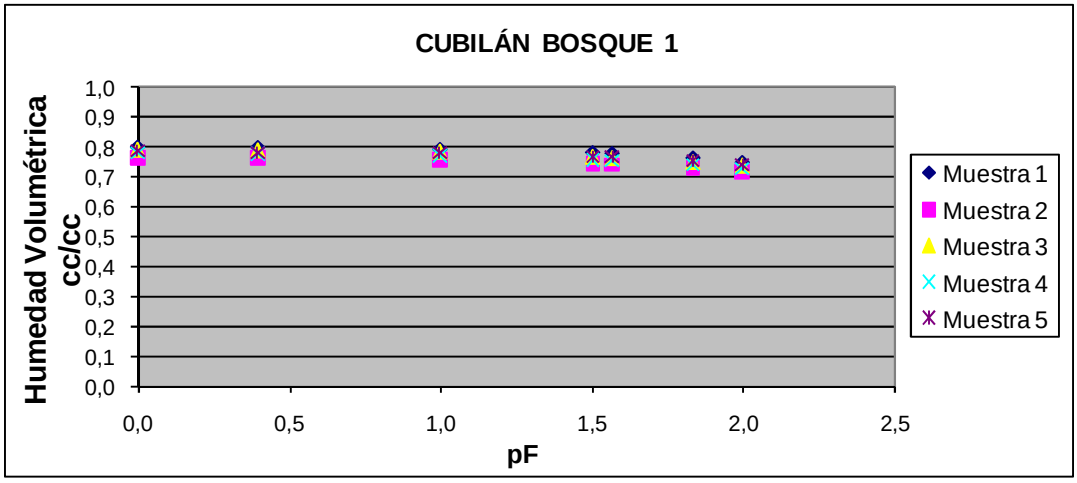


Gráfica 4.18 Curva de retención de agua, Cachi 2

Cubilán Bosque 1

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
0	0,8030	0,7637	0,7899	0,7793	0,7894
0,4	0,8020	0,7618	0,7878	0,7763	0,7844
1	0,7950	0,7578	0,7837	0,7712	0,7824
1,51	0,7840	0,7438	0,7674	0,7580	0,7714
1,57	0,7810	0,7398	0,7633	0,7539	0,7674
1,84	0,7650	0,7279	0,7510	0,7407	0,7554
2	0,7490	0,7159	0,7397	0,7275	0,7413

Tabla 4.37 Humedad Volumétrica "Cubilán Bosque 1"

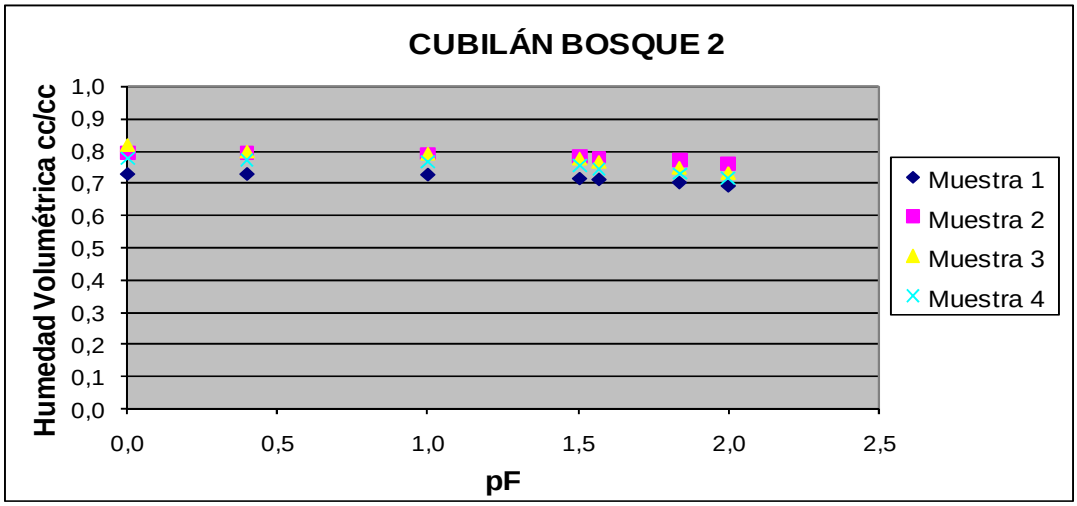


Gráfica 4.19 Curva de retención de agua, Cubilán Bosque 1

Cubilán Bosque 2

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
0	0,7268	0,7915	0,8187	0,7767
0,4	0,7268	0,7894	0,7980	0,7688
1	0,7249	0,7884	0,7917	0,7658
1,51	0,7124	0,7803	0,7762	0,7519
1,57	0,7095	0,7773	0,7658	0,7440
1,84	0,6999	0,7682	0,7471	0,7281
2	0,6893	0,7571	0,7305	0,7142

Tabla 4.38 Humedad Volumétrica "Cubilán Boque 2"

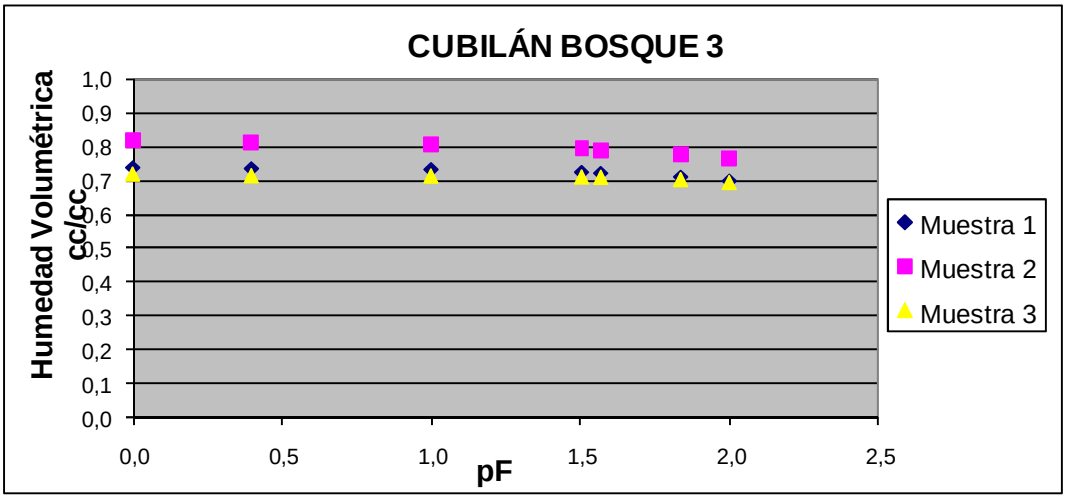


Gráfica 4.20 Curva de retención de agua, Cubilán Bosque 2

Cubilán Bosque 3

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
0	0,7396	0,8189	0,7207
0,4	0,7367	0,8126	0,7159
1	0,7338	0,8073	0,7150
1,51	0,7251	0,7936	0,7121
1,57	0,7222	0,7894	0,7112
1,84	0,7107	0,7799	0,7045
2	0,6981	0,7663	0,6959

Tabla 4.39 Humedad Volumétrica "Cubilán Bosque 3"

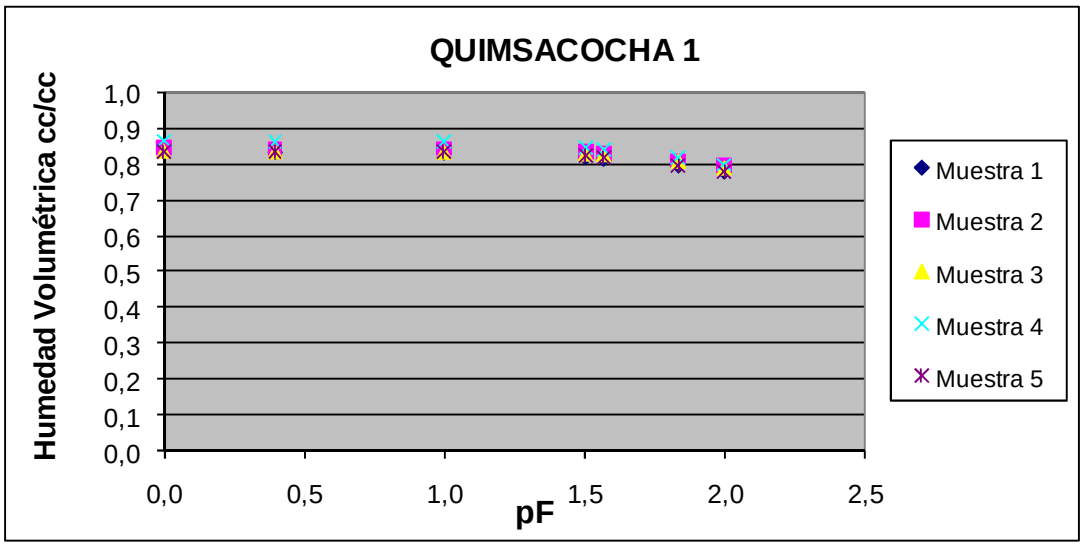


Gráfica 4.21 Curva de retención de agua, Cubilán Bosque 3

Quimsacocha 1

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
0	0,832	0,847	0,834	0,864	0,833
0,4	0,829	0,843	0,832	0,863	0,831
1	0,828	0,842	0,831	0,863	0,831
1,51	0,815	0,834	0,826	0,844	0,821
1,57	0,811	0,829	0,824	0,840	0,814
1,84	0,792	0,809	0,805	0,815	0,791
2	0,775	0,794	0,786	0,797	0,773

Tabla 4.40 Humedad volumétrica "Quimsacocha 1"

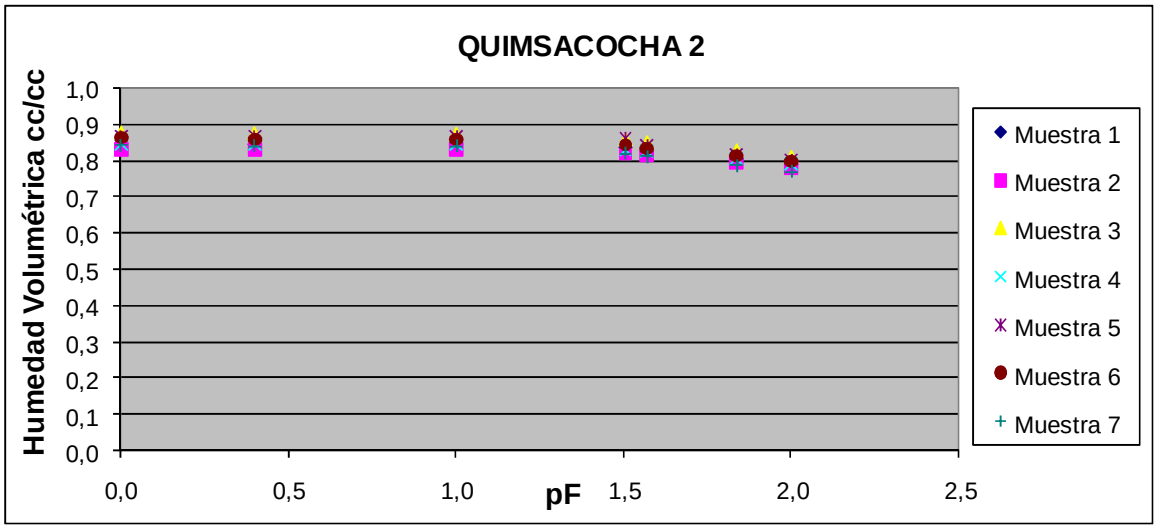


Gráfica 4.22 Curva de retención de agua, Quimsacocha 1

Quimsacocha 2

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)						
	Muestra 1	**Muestra 2**	**Muestra 3**	**Muestra 4**	**Muestra 5**	**Muestra 6**	**Muestra 7**
0	0,847	0,832	0,873	0,845	0,866	0,861	0,838
0,4	0,844	0,832	0,871	0,844	0,866	0,858	0,837
1	0,844	0,831	0,870	0,842	0,864	0,856	0,837
1,51	0,835	0,817	0,855	0,830	0,859	0,841	0,818
1,57	0,828	0,813	0,847	0,824	0,838	0,831	0,811
1,84	0,803	0,796	0,824	0,803	0,815	0,812	0,786
2	0,787	0,779	0,806	0,786	0,801	0,797	0,770

Tabla 4.41 Humedad Volumétrica “Quimsacocha 2”

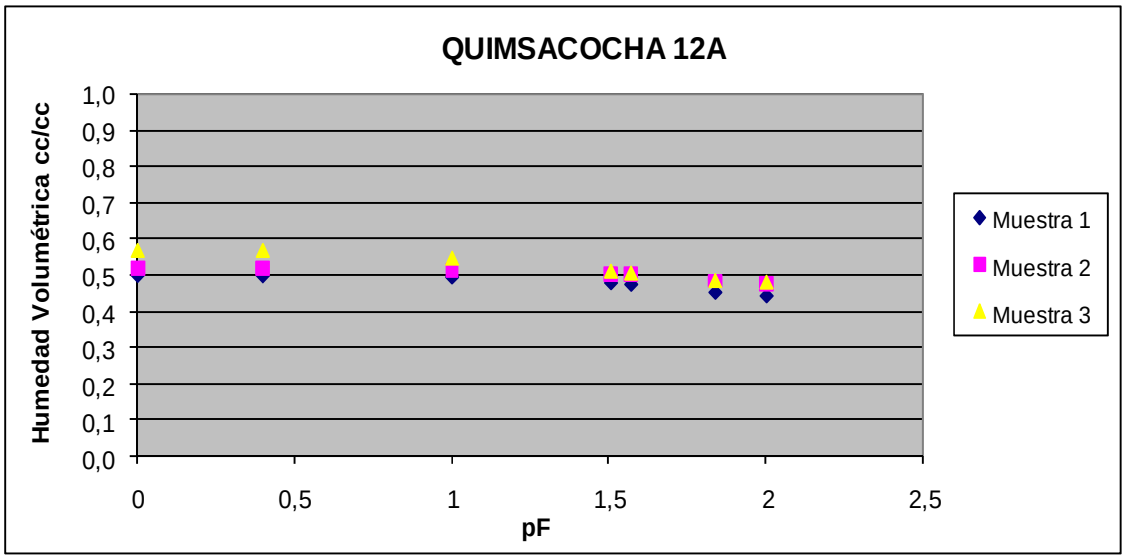


Gráfica 4.23 Curva de retención de agua, Quimsacocha 2

Quimsacocha 12 A

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
0	0,500	0,521	0,566
0,4	0,499	0,519	0,566
1	0,496	0,516	0,545
1,51	0,479	0,503	0,510
1,57	0,475	0,502	0,504
1,84	0,453	0,486	0,484
2	0,443	0,476	0,480

Tabla 4.42 Humedad Volumétrica “Quimsacocha 12 A”

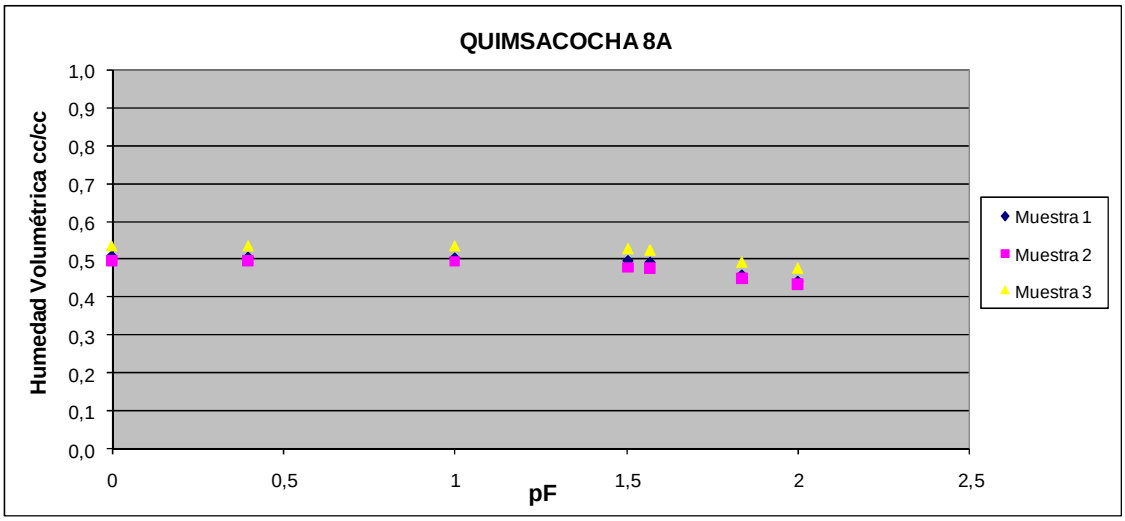


Gráfica 4.24 Curva de retención de agua, Quimsacocha 12 A

Quimsacocha 8 A

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
0	0,507	0,496	0,534
0,4	0,504	0,496	0,534
1	0,502	0,494	0,534
1,51	0,495	0,479	0,527
1,57	0,491	0,477	0,523
1,84	0,457	0,448	0,491
2	0,440	0,432	0,475

Tabla 4.43 Humedad Volumétrica "Quimsacocha 8 A"

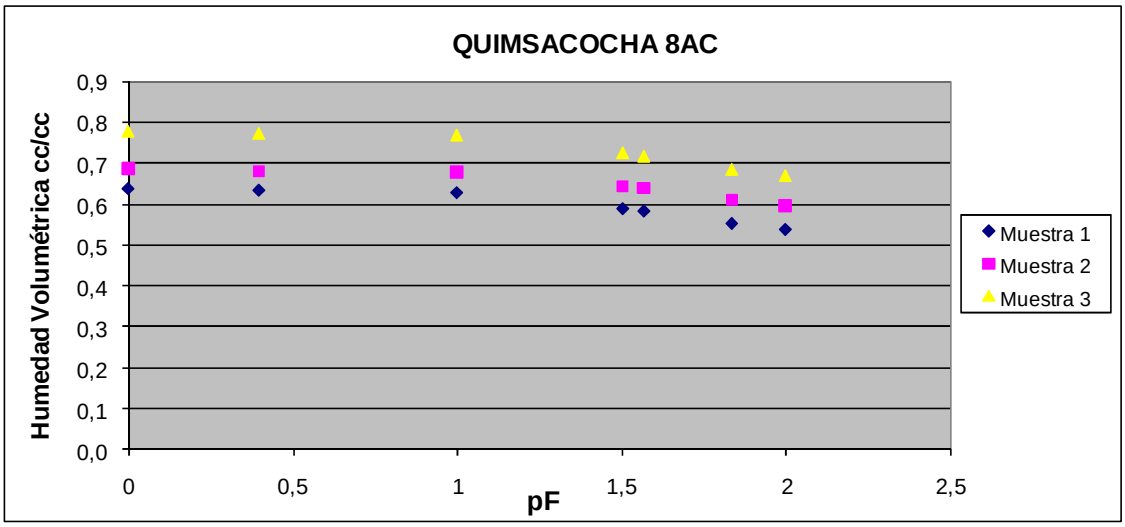


Gráfica 4.25 Curva de retención de agua, Quimsacocha 8 A

Quimsacocha 8 AC

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
0	0,6374	0,6876	0,7782
0,4	0,6336	0,6796	0,7730
1	0,6278	0,6786	0,7688
1,51	0,5893	0,6425	0,7253
1,57	0,5835	0,6375	0,7170
1,84	0,5536	0,6084	0,6848
2	0,5392	0,5934	0,6692

Tabla 4.44 Humedad Volumétrica "Quimsacocha 8 AC"

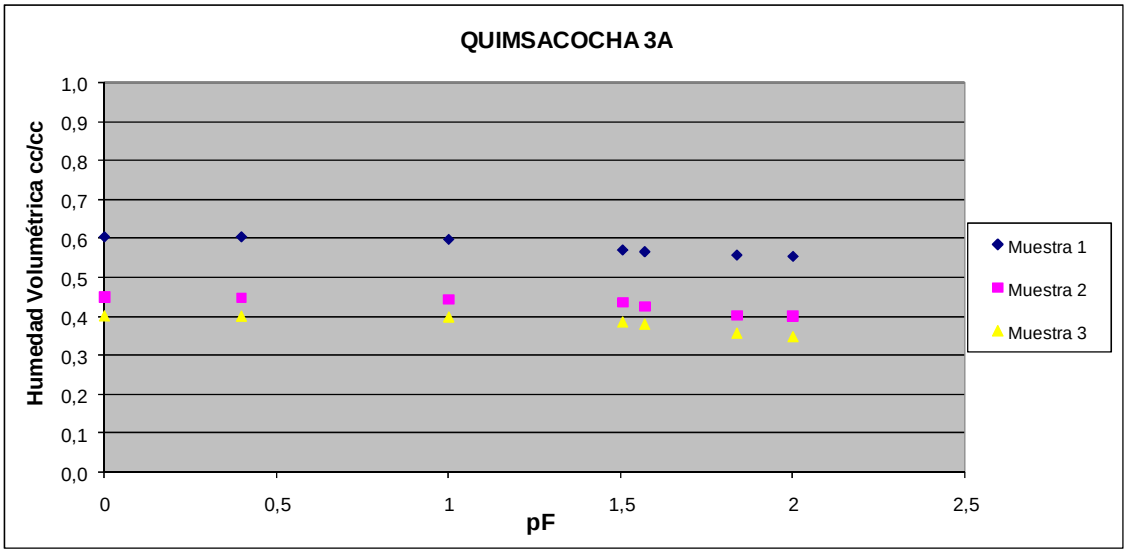


Gráfica 4.26 Curva de retención de agua, Quimsacocha 8 AC

Quimsacocha 3 A

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
0	0,604	0,451	0,401
0,4	0,604	0,448	0,400
1	0,598	0,446	0,398
1,51	0,570	0,438	0,385
1,57	0,565	0,427	0,380
1,84	0,556	0,404	0,357
2	0,553	0,401	0,347

Tabla 4.45 Humedad Volumétrica "Quimsacocha 3 A"

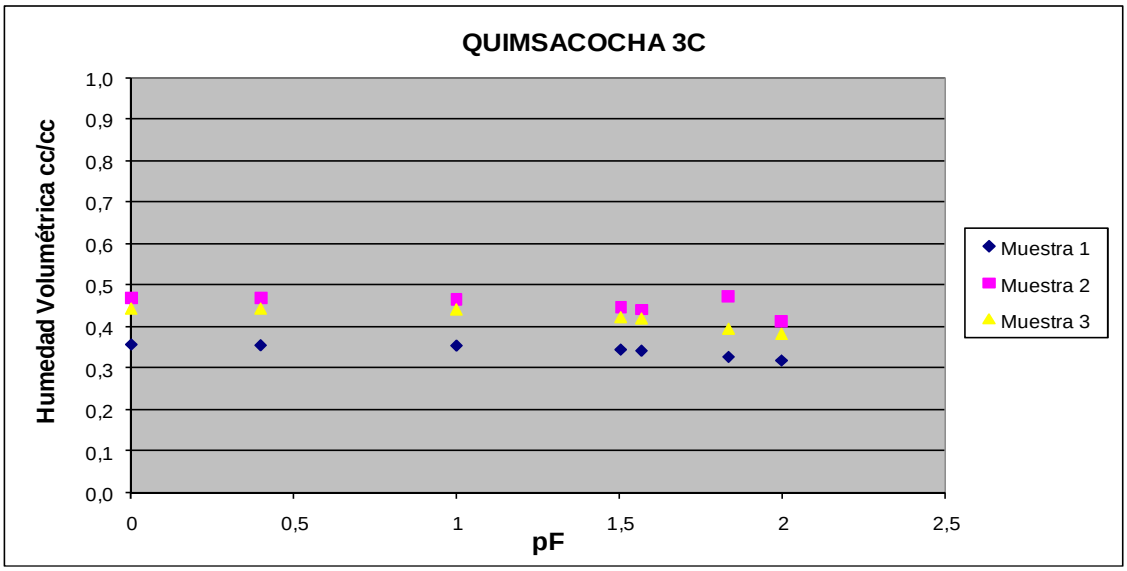


Gráfica 4.27 Curva de retención de agua, Quimsacocha 3 A

Quimsacocha 3 C

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)		
	Muestra 1	**Muestra 2**	**Muestra 3**
0	0,357	0,471	0,443
0,4	0,356	0,471	0,443
1	0,355	0,468	0,441
1,51	0,345	0,448	0,423
1,57	0,343	0,443	0,420
1,84	0,328	0,475	0,396
2	0,319	0,414	0,384

Tabla 4.46 Humedad Volumétrica “Quimsacocha 3 C”

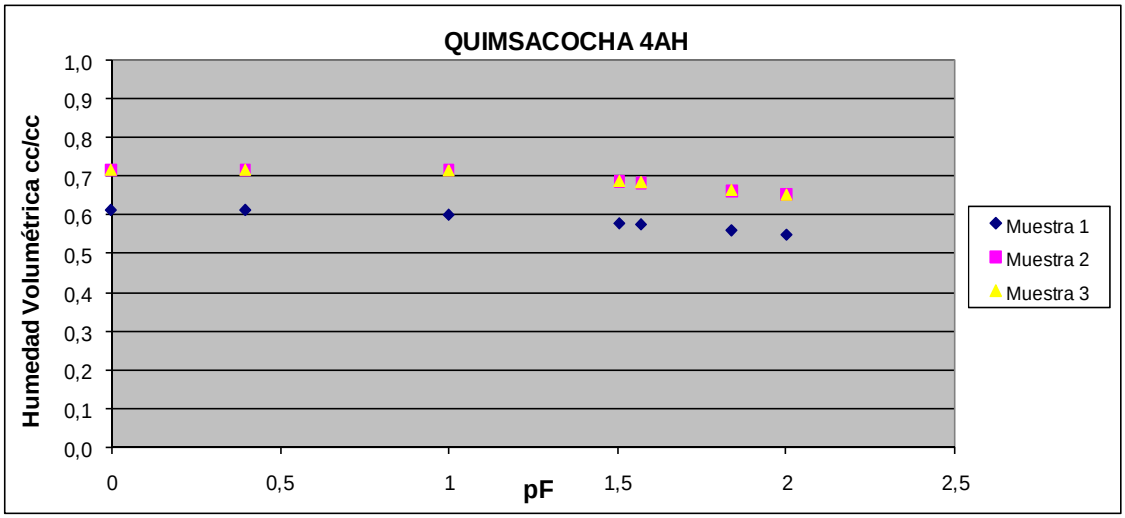


Gráfica 4.28 Curva de retención de agua, Quimsacocha 3 C

Quimsacocha 4 AH

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)		
	Muestra 1	**Muestra 2**	**Muestra 3**
0	0,6153	0,7164	0,7191
0,4	0,6153	0,7154	0,7191
1	0,6029	0,7144	0,7170
1,51	0,5809	0,6860	0,6891
1,57	0,5780	0,6830	0,6860
1,84	0,5627	0,6637	0,6654
2	0,5513	0,6535	0,6530

Tabla 4.47 Humedad Volumétrica "Quimsacocha 4 AH"

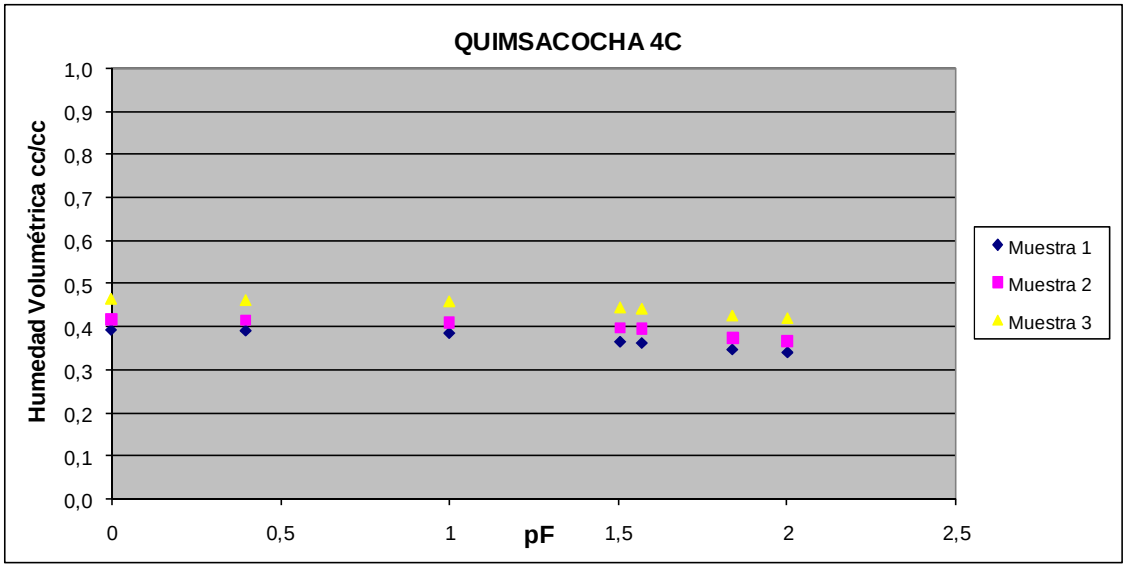


Gráfica 4.29 Curva de retención de agua, Quimsacocha 4 AH

Quimsacocha 4 C

pF	Humedad Volumétrica (cm³/ cm³)		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
0	0,3933	0,4172	0,4658
0,4	0,3913	0,4152	0,4628
1	0,3854	0,4092	0,4597
1,51	0,3647	0,3973	0,4454
1,57	0,3617	0,3943	0,4424
1,84	0,3460	0,3744	0,4261
2	0,3391	0,3654	0,4199

Tabla 4.48 Humedad Volumétrica "Quimsacocha 4 C"



Gráfica 4.30 Curva de retención de agua, Quimsacocha 4C

CAPÍTULO 5

5.1 CONCLUSIONES

Todos los métodos empleados en el laboratorio para la determinación de la curva de retención de humedad en el suelo, son útiles y viables.

El motivo de la elaboración de este trabajo es averiguar la veracidad y confiabilidad de los equipos que dispone el laboratorio de hidrofísica de suelos PROMAS para el análisis de la curva de retención de humedad en el suelo.

Existen diversas técnicas y equipos para la determinación de la curva de retención de humedad, siendo los principales el método de Etapas Múltiples y la Caja de Arena.

El presente estudio se basa en verificar que los resultados de los métodos antes mencionados sean similares, debido a que siempre buscamos obtener resultados precisos con equipos que no pueden ser muy costosos.

Con este trabajo se ha logrado aportar con métodos y procedimientos que permitan una caracterización adecuada y coherente de los suelos de la región, permitiéndonos revisar y actualizar los métodos y procedimientos usados en el laboratorio para la determinación de la capacidad de retención de humedad en los suelos.

Se ha validado y comparado los procesos del laboratorio en la determinación de la capacidad de retención de humedad en los suelos analizados en este trabajo.

En la comparación de los métodos para la determinación de retención de humedad en los suelos entre el multistep y la caja de arena se obtiene que los datos presentados por estos dos métodos tienen un error mínimo del 1.5%,

siendo posible sustituir el multistep por la caja de arena ya que este último método puede ser construido a un costo más bajo, también puede ser elaborado dentro de un campamento donde se necesite conocer la capacidad de retención de humedad en los suelos de una manera más fácil económica, aunque su análisis necesite de más tiempo.

Otra de las ventajas de la caja de arena es que con mayor facilidad se pueden cargar las muestras y al variar la presión el riesgo de que estas se estropeen es mínimo.

En la caja de arena se pueden obtener resultados a presiones intermedias, donde en el multistep no se puede lograr.

Concluyendo que tanto el multistep como la caja de arena son métodos confiables siempre y cuando los análisis en ambos métodos vayan acompañados de un análisis adicional en el aparato de membrana a presión, ya que este es otro método que permite presentar los resultados para la obtención de la curva de retención de humedad, así como el punto de marchitez permanente de los suelos; pudiendo dar resultados más completos al incluir este método en el análisis en el laboratorio.

5.2 RECOMENDACIONES

Para el desarrollo de este trabajo, como se ha explicado anteriormente se ha podido hacer la comparación de estos dos métodos de una manera exitosa; como recomendación podríamos decir que es necesario realizar más salidas a la toma de muestras, ya que es la única forma de saber que las muestras lleguen como es debido al laboratorio, además, de un mejoramiento en las instalaciones del laboratorio, recomendación que en el transcurso de este trabajo se fue logrando ya que el laboratorio pasó a un nuevo local mucho más amplio y apto para la utilización de los equipos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Gavande. Física de suelos: Principios y aplicaciones. 1972.

INIAP. Curso sobre analisis de las propiedades físicas del suelo y su aplicación en análisis del uso de la tierra. Quito, 1998.

Kutilek, Miroslav, y Donald Nielsen. Soil Hydrology. Germany, 1994.

Mejía, Sandra, y María Minchala. Manual de Laboratorio de hidrofísica de suelos. Cuenca, 2003.

Sentis, Pla. Efectos de la labranza en las propiedades físicas de los suelos. 1994.

Streeter, Victor. Mecánica de Fluidos. 2000.

Pedro Emilio Alfaro, Pedro Martínez Santos, Silvio Castaño Castaño. Fundamentos de hidrología. 2005.

William A. Jury, Robert Horton. Soil physics.1959

Harte, K, y A Ellies. Changes in soil structure as caused by land use after clearin virgin forest. Virginia, 1990.

Green, y Ampt. Studies of soil physics, part I: The flow of air and water through soils. 1911.

Valarezo, Carlos, Max Iñiguez, Luis Valarezo, y Pedro Guaya. Condiciones físiscas de los suelos de la región sur del Ecuador. Loja, 1998.

www.edafología.fcien.edu.uy/archivos/Agua

ANEXOS

CALCULOS PARA ETAPAS MULTIPLES

Número de bureta	1	2	4	6	7	8	9
Número de muestra	77	67	27	216	31	100	42
Zona	QUIMSACOCHA 2						
Horizonte	1	1	1	1	1	1	1
Densidad Aparente	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
qsat	0,77	0,72	0,81	0,74	0,80	0,82	0,71
Peso húmedo	208,30	209,80	212,40	204,20	210,20	211,10	210,10
Peso seco	134,00	137,00	136,70	131,10	134,50	132,70	135,30
Peso anillo	94,60	97,00	98,50	92,50	96,80	94,60	92,10
Primero nivel	22,70	22,20	25,20	19,80	20,10	23,10	23,90
Nivel punto ret. 1	22,70	21,80	25,20	19,80	20,10	23,10	23,60
Contenido de agua (37.1 cm H2O)	0,77	0,72	0,81	0,74	0,80	0,82	0,71
Nivel punto ret. 2	21,00	22,00	23,00	20,30	19,00	21,40	21,80
Contenido de agua(68.68 cm H2O)	0,76	0,72	0,80	0,75	0,80	0,81	0,70
Nivel punto ret. 3	18,10	20,80	20,40	20,20	16,90	21,30	18,60
Contenido de agua(110.79 cm H2O)	0,75	0,72	0,79	0,75	0,79	0,81	0,69
Nivel punto ret. 4	16,00	20,00	18,20	20,00	16,60	21,30	16,90
Contenido de agua(268.76 cm H2O)	0,74	0,72	0,78	0,74	0,79	0,81	0,68
Nivel final	15,30	20,00	18,10	19,90	16,60	21,20	16,80
Contenido final de agua(531.89 cm H2O)	0,74	0,72	0,78	0,74	0,79	0,81	0,68
Contenido de agua en peso (3249.6 cm H20) promedio	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
Contenido de agua en peso(14924.3 cm H20) promedio	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31

CALCULOS PARA ETAPAS MULTIPLES

Número de bureta	1	2	6	8	9
Número de muestra	102	11	98	43	71
Zona	BOSQUE DE SAGUIN "CUBILAN"				
Horizonte					
Densidad Aparente	0,50	0,58	0,58	0,58	0,58
qsat	0,76	0,71	0,74	0,72	0,76
Peso húmedo	218,40	232,60	223,90	224,70	229,20
Peso seco	145,80	160,30	155,60	154,60	154,60
Peso anillo	95,90	101,50	98,30	96,90	96,00
Primero nivel	24,30	22,60	26,20	24,10	24,80
Nivel punto ret. 1	24,30	22,60	20,40	23,70	23,90
Contenido de agua (37.1 cm H2O)	0,76	0,71	0,71	0,72	0,75
Nivel punto ret. 2	24,30	22,40	19,90	22,90	23,90
Contenido de agua(68.68 cm H2O)	0,76	0,71	0,71	0,71	0,75
Nivel punto ret. 3	24,10	22,10	17,10	21,30	22,10
Contenido de agua(110.79 cm H2O)	0,76	0,71	0,69	0,70	0,74
Nivel punto ret. 4	23,80	22,00	16,70	21,00	21,10
Contenido de agua(268.76 cm H2O)	0,76	0,71	0,69	0,70	0,74
Nivel final	17,40	22,00	15,90	20,50	20,40
Contenido final de agua(531.89 cm H2O)	0,73	0,71	0,69	0,70	0,73
Contenido de agua en peso (3249.6 cm H20) promedio	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Contenido de agua en peso(14924.3 cm H20) promedio	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84

CALCULOS PARA ETAPAS MULTIPLES

Número de bureta	1	2	6	7
Número de muestra	22	13	117	82
Zona	CACHI 1	BOSQUE PINO "EMAC"		
Horizonte	1	1	1	1
Densidad Aparente	1,41	1,14	1,37	1,30
qsat	0,37	0,50	0,40	0,57
Peso húmedo	271,70	243,00	265,50	261,10
Peso seco	237,90	210,20	231,70	225,90
Peso anillo	97,30	96,50	95,20	96,00
Primero nivel	24,90	22,20	20,90	24,40
Nivel punto ret. 1	23,20	12,60	18,40	21,20
Contenido de agua (37.1 cm H2O)	0,35	0,39	0,37	0,52
Nivel punto ret. 2	23,10	9,50	18,10	12,00
Contenido de agua(68.68 cm H2O)	0,35	0,35	0,37	0,41
Nivel punto ret. 3	23,10	9,30	18,00	11,80
Contenido de agua(110.79 cm H2O)	0,35	0,35	0,36	0,40
Nivel punto ret. 4	23,00	7,80	17,70	8,20
Contenido de agua(268.76 cm H2O)	0,35	0,33	0,36	0,36
Nivel final	22,40	7,20	16,10	7,90
Contenido final de agua(531.89 cm H2O)	0,34	0,33	0,34	0,35
Contenido de agua en peso (3249.6 cm H20) promedio	0,24	0,25	0,25	0,25
Contenido de agua en peso(14924.3 cm H20) promedio	0,22	0,19	0,19	0,19

CALCULOS PARA ETAPAS MULTIPLES

Número de bureta	1	2	3	6	7	8	9
Número de muestra	193	6	38	84	392	76	307
Zona	CACHI 2	MALL	CACHI 2	MALL "TURI"			
Horizonte	1	1	1	1	1	1	1
Densidad Aparente	1,28	1,27	1,28	1,32	1,32	1,22	1,27
qsat	0,46	0,55	0,48	0,46	0,32	0,51	0,29
Peso húmedo	254,00	256,60	249,90	268,60	248,80	259,20	252,20
Peso seco	220,60	221,00	221,50	230,90	221,60	218,80	224,90
Peso anillo	91,60	94,50	94,60	97,90	90,00	97,30	97,00
Primero nivel	22,30	22,50	24,30	24,50	24,60	26,00	25,50
Nivel punto ret. 1	20,00	20,40	16,80	23,60	21,60	24,90	24,60
Contenido de agua (37.1 cm H2O)	0,43	0,52	0,38	0,45	0,28	0,49	0,28
Nivel punto ret. 2	15,60	16,80	13,20	20,90	21,60	24,90	24,40
Contenido de agua(68.68 cm H2O)	0,37	0,48	0,34	0,41	0,28	0,49	0,28
Nivel punto ret. 3	14,20	13,10	11,30	18,80	21,40	18,00	24,20
Contenido de agua(110.79 cm H2O)	0,36	0,43	0,31	0,39	0,28	0,41	0,27
Nivel punto ret. 4	12,60	9,00	9,30	18,40	21,40	17,80	24,00
Contenido de agua(268.76 cm H2O)	0,34	0,38	0,29	0,38	0,28	0,41	0,27
Nivel final	12,30	7,30	9,10	18,00	21,20	17,60	24,00
Contenido final de agua(531.89 cm H2O)	0,33	0,36	0,29	0,38	0,27	0,40	0,27
Contenido de agua en peso (3249.6 cm H20) promedio	0,20	0,28	0,20	0,28	0,28	0,28	0,28
Contenido de agua en peso(14924.3 cm H20) promedio	0,12	0,20	0,12	0,20	0,20	0,20	0,20

CALCULOS PARA ETAPAS MULTIPLES

Número de bureta	1	4	6	8	9
Número de muestra	22	6	21	50	13
Zona	Chica Despensa				
Horizonte	1	1	1	1	1
Densidad Aparente	0,57	0,50	0,50	0,50	0,50
qsat	0,70	0,71	0,76	0,76	0,74
Peso húmedo	221,10	213,20	217,90	215,40	217,80
Peso seco	153,10	149,90	145,30	145,00	144,50
Peso anillo	95,80	99,80	94,50	95,00	94,60
Primero nivel	24,40	24,50	22,00	23,00	25,60
Nivel punto ret. 1	23,20	23,80	21,40	22,70	25,00
Contenido de agua (37.1 cm H2O)	0,69	0,70	0,75	0,76	0,74
Nivel punto ret. 2	23,10	23,70	21,10	22,30	24,70
Contenido de agua(68.68 cm H2O)	0,69	0,70	0,75	0,76	0,74
Nivel punto ret. 3	21,20	23,00	20,70	12,60	24,70
Contenido de agua(110.79 cm H2O)	0,68	0,70	0,75	0,71	0,74
Nivel punto ret. 4	21,10	13,30	14,70	12,30	24,50
Contenido de agua(268.76 cm H2O)	0,68	0,65	0,72	0,71	0,74
Nivel final	20,70	10,10	14,10	12,00	24,30
Contenido final de agua(531.89 cm H2O)	0,68	0,63	0,72	0,71	0,74
Contenido de agua en peso (3249.6 cm H20) promedio	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Contenido de agua en peso(14924.3 cm H20) promedio	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59

CALCULOS PARA ETAPAS MULTIPLES

Número de bureta	5	6	7	8	9
Número de muestra	58	32	218	2	157
Zona	TUÑI				
Horizonte	1	1	1	1	1
Densidad Aparente	0,51	0,51	0,40	0,51	0,57
qsat	0,71	0,69	0,78	0,79	0,62
Peso húmedo	213,10	211,90	206,50	211,50	209,50
Peso seco	146,70	148,40	131,60	142,50	149,30
Peso anillo	97,10	96,70	91,60	95,30	92,30
Primero nivel	27,80	22,20	23,30	24,80	24,00
Nivel punto ret. 1	26,20	19,70	21,10	20,70	22,50
Contenido de agua (37.1 cm H2O)	0,70	0,68	0,77	0,77	0,61
Nivel punto ret. 2	24,20	17,70	20,00	20,40	22,50
Contenido de agua(68.68 cm H2O)	0,69	0,67	0,77	0,77	0,61
Nivel punto ret. 3	23,80	13,20	18,40	17,70	20,90
Contenido de agua(110.79 cm H2O)	0,69	0,65	0,76	0,75	0,60
Nivel punto ret. 4	23,60	11,90	17,00	17,50	20,50
Contenido de agua(268.76 cm H2O)	0,69	0,64	0,75	0,75	0,60
Nivel final	23,60	9,80	15,80	17,30	20,40
Contenido final de agua(531.89 cm H2O)	0,69	0,63	0,75	0,75	0,60
Contenido de agua en peso (3249.6 cm H20) promedio	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Contenido de agua en peso(14924.3 cm H20) promedio	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40

CALCULOS PARA ETAPAS MULTIPLES

Número de bureta	1	2	7	8	9
Número de muestra	68	17	207	83	87
Zona	SAGUIN TURBERA "CUBILÁN"				
Horizonte					
Densidad Aparente	0,63	0,63	0,39	0,63	0,39
qsat	0,46	0,53	0,64	0,68	0,75
Peso húmedo	210,30	216,00	196,00	210,00	207,10
Peso seco	166,00	163,80	132,00	152,20	136,00
Peso anillo	96,30	100,70	92,40	95,80	97,70
Primero nivel	24,50	22,70	24,60	18,30	31,00
Nivel punto ret. 1	23,60	21,10	21,90	17,00	29,80
Contenido de agua (37.1 cm H2O)	0,46	0,52	0,63	0,67	0,75
Nivel punto ret. 2	21,80	21,10	21,90	16,40	24,10
Contenido de agua(68.68 cm H2O)	0,45	0,52	0,63	0,66	0,73
Nivel punto ret. 3	18,30	20,90	21,40	16,00	23,70
Contenido de agua(110.79 cm H2O)	0,42	0,52	0,63	0,66	0,72
Nivel punto ret. 4	16,50	20,90	21,40	14,30	23,70
Contenido de agua(268.76 cm H2O)	0,41	0,52	0,63	0,65	0,72
Nivel final	14,60	20,70	21,40	13,70	23,50
Contenido final de agua(531.89 cm H2O)	0,40	0,52	0,63	0,65	0,72
Contenido de agua en peso (3249.6 cm H20) promedio	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19
Contenido de agua en peso(14924.3 cm H20) promedio	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03

CALCULOS PARA CAJA DE ARENA

Sitios	# anillos	Peso anillo (gr)	Peso seco (gr) (110ºC)	Presión (bar)	0	0,40	1	1,51	1,57	1,84	2
				Densidad A							
Turbera Saguín	142	91,8	144,2	0,524	1,44	1,44	1,39	1,31	1,27	1,22	1,15
	83	95,8	152,2	0,564	1,27	1,26	1,22	1,17	1,15	1,10	1,05
	87	97,7	136	0,383	2,14	2,12	2,02	1,86	1,80	1,69	1,56
	53	96,9	162,5	0,656	0,96	0,95	0,95	0,90	0,88	0,82	0,77
	116	95,5	160,5	0,65	0,97	0,97	0,97	0,91	0,88	0,82	0,77
	207	92,4	132	0,396	1,94	1,93	1,85	1,73	1,67	1,58	1,45
	17	100,7	163,8	0,631	0,97	0,97	0,93	0,87	0,85	0,81	0,76
	69	97,2	163	0,658	0,91	0,91	0,88	0,83	0,79	0,74	0,69
	78	95,6	154,2	0,586	1,17	1,17	1,12	1,06	1,03	0,97	0,91
	68	96,3	166	0,697	0,80	0,80	0,78	0,73	0,71	0,67	0,64
	5	99,9	170,3	0,704	0,81	0,80	0,78	0,73	0,72	0,67	0,62
	73	96,2	165,2	0,69	0,86	0,86	0,85	0,83	0,81	0,76	0,70
Tuñi	58	97,1	146,7	0,496	1,44	1,43	1,41	1,38	1,37	1,32	1,29
	218	91,6	131,6	0,4	2,04	2,04	2,01	1,96	1,93	1,87	1,82
	2	95,3	142,5	0,472	1,55	1,54	1,49	1,44	1,41	1,36	1,32
	32	96,7	148,4	0,517	1,38	1,37	1,33	1,28	1,25	1,20	1,17
	157	92,3	149,3	0,57	1,15	1,14	1,12	1,09	1,06	1,02	0,99
Chica Despensa	22	95,8	153,1	0,573	1,23	1,23	1,23	1,21	1,21	1,15	1,09
	6	99,8	149,9	0,501	1,47	1,46	1,44	1,41	1,39	1,29	1,22
	13	94,6	144,5	0,499	1,49	1,48	1,47	1,45	1,44	1,38	1,33
	21	94,5	145,3	0,508	1,46	1,46	1,45	1,44	1,42	1,33	1,27
	50	95	145	0,5	1,44	1,43	1,41	1,39	1,37	1,30	1,24

CALCULOS PARA CAJA DE ARENA

Sitios	# anillos	Peso anillo (gr)	Peso seco (gr) (110ºC)	Presión (bar)	0	0,40	1	1,51	1,57	1,84	2
				Densidad A							
Cachi 2	112	97,3	216,5	1,192	0,39	0,38	0,37	0,29	0,27	0,25	0,23
	38	94,6	221,5	1,269	0,40	0,40	0,32	0,26	0,24	0,23	0,21
	193	91,6	220,6	1,29	0,35	0,35	0,34	0,31	0,30	0,28	0,27
Cachi 1	22	97,3	237,9	1,406	0,32	0,32	0,31	0,29	0,28	0,28	0,26
Bosque de Pino	82	96	225,9	1,299	0,35	0,35	0,34	0,32	0,30	0,28	0,27
	13	96,5	210,2	1,137	0,41	0,40	0,37	0,32	0,31	0,30	0,28
	117	95,2	231,7	1,365	0,32	0,32	0,31	0,29	0,29	0,27	0,25
	95	94,5	231,7	1,372	0,32	0,31	0,29	0,29	0,28	0,25	0,24
Mall del Río	76	97,3	218,8	1,215	0,45	0,45	0,43	0,40	0,39	0,36	0,33
	84	97,9	230,9	1,33	0,37	0,36	0,36	0,34	0,33	0,31	0,28
	307	97	224,9	1,279	0,40	0,39	0,37	0,33	0,32	0,28	0,25
	392	90	221,6	1,316	0,34	0,33	0,30	0,28	0,27	0,25	0,23
	6	94,5	221	1,265	0,39	0,39	0,38	0,37	0,35	0,33	0,31

CALCULOS PARA CAJA DE ARENA

Sitios	# anillos	Peso anillo (gr)	Peso seco (gr) (110ºC)	Presión (bar)	0	0,40	1	1,51	1,57	1,84	2
				Densidad A							
QUIMSACOCHA 1-2	65	98,3	137,9	0,396	2,124	2,116	2,114	2,081	2,071	2,023	1,980
	104	96,8	135,9	0,391	2,164	2,153	2,151	2,130	2,118	2,066	2,028
	216	92,5	131,1	0,386	2,158	2,155	2,150	2,119	2,104	2,049	2,008
	21	101,4	139,4	0,38	2,205	2,203	2,203	2,155	2,145	2,082	2,034
	64	96,7	136,3	0,396	2,129	2,124	2,121	2,109	2,104	2,056	2,008
	42	92,1	135,3	0,432	1,940	1,938	1,938	1,894	1,877	1,819	1,782
	27	98,5	136,7	0,382	2,230	2,225	2,223	2,183	2,162	2,105	2,058
	77	94,6	134	0,394	2,162	2,155	2,155	2,132	2,114	2,051	2,010
	31	96,8	134,5	0,377	2,212	2,212	2,207	2,194	2,141	2,082	2,045
	4	95,8	135,1	0,393	2,127	2,122	2,122	2,097	2,079	2,020	1,975
	1	99,7	138	0,383	2,232	2,227	2,225	2,183	2,159	2,099	2,050
	67	97	137	0,4	2,125	2,125	2,123	2,088	2,075	2,033	1,990
	100	94,6	132,7	0,381	2,199	2,192	2,186	2,147	2,121	2,073	2,034
BOSQUE CUBILAN	43	96,9	154,6	0,577	1,329	1,324	1,315	1,293	1,286	1,263	1,241
	102	95,9	145,8	0,499	1,609	1,607	1,593	1,571	1,565	1,533	1,501
	92	95,8	156,7	0,609	1,240	1,240	1,236	1,215	1,210	1,194	1,176
	114	96	154	0,58	1,350	1,347	1,345	1,331	1,326	1,310	1,291
	115	96,1	152,6	0,565	1,396	1,361	1,350	1,324	1,306	1,274	1,246
	113	96,4	155,5	0,591	1,325	1,311	1,306	1,283	1,269	1,242	1,218
	71	96	154,6	0,586	1,346	1,338	1,334	1,316	1,309	1,288	1,265
	120	96,3	157,1	0,608	1,262	1,257	1,252	1,237	1,232	1,212	1,191
	98	98,3	155,6	0,573	1,347	1,344	1,337	1,309	1,302	1,281	1,262
	40	92,5	148,2	0,557	1,397	1,386	1,377	1,354	1,346	1,330	1,307
	11	101,5	160,3	0,588	1,303	1,299	1,293	1,269	1,262	1,241	1,221
	90	96,8	158,3	0,615	1,229	1,221	1,220	1,215	1,213	1,202	1,187

ANEXO 2

LISTA DE SÍMBOLOS

(ΔP)	Diferencia de presión
A_0	Área de corte transversal del plato de cerámica (cm^2)
A_1	Área de corte transversal de la bureta (cm^2)
CC	Capacidad de campo (%)
CRAD	Capacidad de retención de agua (%)
d	Grosor del plato de cerámica (cm)
Da	Densidad aparente (gr/cm^3)
Dr	Densidad real (gr/cm^3)
DB	Densidad aparente seca (gr/cm^3)
h	Carga de presión (cm)
Hg	Humedad gravimétrico (%)
h_L	Presión del agua debajo del plato de cerámica
Hv	Humedad volumétrica (%)
h_z	Presión neumática aplicada
k	Conductividad hidráulica
kp_1	Conductividad hidráulica del plato de cerámica
K_{pl}	Conductividad del plato de cerámica (cm/h)
k_s	Conductividad hidráulica saturada
L	Altura total (cm)
m y n	Parámetros empíricos, *m* valor dado por Mualem
ma	Masa de agua (gr)
m_d	Peso de la muestra de suelo secada en estufa (gr)
m_e	Peso de la muestra de suelo luego de retirar del equipo (gr)
m_r	Masa del recipiente
m_r	Peso del anillo de muestreo (gr)
ms	Masa de suelo seco (gr)
Ms	Masa de sólidos (gr)
m_{sh+r}	Masa de la muestra más recipiente.
m_{ss+r}	Masa de la muestra seca más recipiente

MVG	Modelo Mualem y Van Genuchten
Ms	Masa de sólidos (gr)
m_ψ	Peso de la muestra al potencial matricial (peso en cada presión)
n_f	Número total de mediciones de flujo
pF	p= potencial, F= energía libre
PM	Punto de marchitez permanente (%)
Psh	Peso de Suelo Húmedo.
Pss	Peso de Suelo Seco
PV	Peso volumétrico (gr/cm³)
PW	Contenido de Humedad.
S_e	Saturación relativa
t	Tiempo transcurrido después del incremento de presión (h)
V	Volumen total de la muestra (cm^3)
Va	Volumen de aire (cm^3)
Vag	Volumen de agua (cm^3)
V_n	Volumen de flujo de *n* medición de salida (ml)
V_r	Volumen del anillo de muestreo (cm^3)
Vp	Volumen de poros (cm³)
Vs	Volumen de sólidos (cm³)
Vss	Volumen total o aparente del suelo seco ($cm^{3)}$
Vt	Volumen total ($cm^{3)}$
Vw	Volumen de agua (cm^3)
Po	Porosidad total
w	Peso total del suelo (gr)
wl_0	Nivel del agua en la bureta antes de realizar el ensayo
wl_f	Nivel final del agua (ml)
wl_n	Nivel del agua de *n* medición de flujo (ml)
wl_x	Nivel del agua en la bureta (s)(ml).
Wm	Peso de muestra de material en estado seco (gr)
w_s	Peso seco (gr)
x	Incremento del nivel de la bureta (cm)
x_0	Nivel cero de la bureta (cm)

α	Inversa del valor de entrada de aire cm^{-1}
θ	Contenido volumétrico de agua
θ_e	Contenido volumétrico de agua luego del experimento (cm^3/cm^3)
θ_r	Contenido de agua residual
θ_s	Contenido de agua saturada
θ_x	Contenido volumétrico de agua (s)(cm/cm^3)
ρ	Densidad aparente del suelo
ρ_w	Densidad del agua (= $1gr/cm^3$)
Ψ	Potencial hídrico
Ψm	Potencial mátrico