

**DISEÑO DE UN MODELO DE LABORATORIO PARA ANALIZAR EL  
COMPORTAMIENTO DE LAS ARCILLAS EXPANSIVAS**

**KATIA LORENA ALDANA CAMPOS  
MARIA FERNANDA TARAZONA ROJAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2010**

**DISEÑO DE UN MODELO DE LABORATORIO PARA ANALIZAR EL  
COMPORTAMIENTO DE LAS ARCILLAS EXPANSIVAS**

**KATIA LORENA ALDANA CAMPOS  
MARIA FERNANDA TARAZONA ROJAS**

**Trabajo de grado modalidad Investigativa  
Para optar al título de:  
Ingeniero Civil**

**Director:  
HEBENLY CELIS LEGUÍZAMO  
Ingeniero Civil, M. Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2010**

*A Dios por darme vida, fortaleza y continuidad en mis proyectos; a mis padres, Martín y Stella, por su constante apoyo y por creer en mí; a mis hermanos, Martín y Carolina, por su compañía y amistad; a mis demás familiares, amigos y compañeros por acompañarme en cada etapa de mi vida.*

*Katia Lorena Aldana Campos*

*A Dios porque me ilumina y acompaña constantemente,  
A mis papas Fernando y Alcira, por su apoyo y confianza en mí,  
especialmente a mi mami por todo el esfuerzo y dedicación de su vida,  
A mi Hermano Carlos Orlando, quien me aconseja y cuida,  
A mi Hermana Silvia Natalia, quien siempre se preocupa por mí,  
A mi sobrino Juan Sebastián que adoro y amo con todo mi corazón,  
A mis amigos del Movimiento Jornadas de Vida Cristiana, por su  
amistad sincera e incondicional, a mis amigos de la Universidad  
Industrial de Santander, Eduardo Rueda, Luis Díaz, Gonzalo  
Mayorga, Oscar Aponte, y todos aquellos que me regalaron su  
compañía en el diario vivir,  
A Sergio Ramírez, por su amor, consejo y colaboración constante.*

*María Fernanda Tarazona Rojas*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Ingeniera Hebenly Celis Leguizamo por contribuir con su conocimiento en nuestro proceso de formación, como personas y profesionales, y por brindarnos su tiempo en la consecución de esta meta.

A los Ingenieros Álvaro Rey Soto, Alexis Vega, Jaime Suarez, Wilfredo del Toro y su auxiliar Nancy García por compartir sus conocimientos y experiencia.

A los laboratoristas de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, Jairo Hernández y Germán Hernández, por su servicio y disposición en todo momento.

A nuestros compañeros por compartir sus vivencias y conocimientos durante esta etapa de formación.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	20
OBJETIVOS.....	21
OBJETIVO GENERAL.....	21
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	21
1 REFERENCIAS SOBRE ARCILLAS EXPANSIVAS .....	22
1.1 LAS ARCILLAS: PROPIEDADES Y USOS .....	22
1.2 PANORAMA GENERAL DE LAS ARCILLAS EXPANSIVAS Y SU EFECTO SOBRE EDIFICACIONES.....	23
1.3 EL SUELO DE BARRANQUILLA, CLASIFICACIÓN, ZONAS DE RIESGO, ARCILLAS EXPANSIVAS.....	26
1.4 EVALUACIÓN DE ADITIVOS USADOS EN EL TRATAMIENTO DE ARCILLAS EXPANSIVAS.....	28
1.5 PATOLOGÍAS POR ARCILLAS EXPANSIVAS .....	29
1.6 PRINCIPIOS DE INGENIERÍA DE CIMENTACIÓN (PRINCIPLES OF FOUNDATION ENGINEERING), 5TA EDICIÓN (CAPÍTULO 13.8-13.10).....	30
1.6.1 Naturaleza General de suelos expansivos: .....	30
1.6.2 Mediciones en Laboratorio del hinchamiento: .....	31
1.6.3 Clasificación de Suelos Expansivos en base a pruebas de Índice: ....	34
1.7 VARIOS ASPECTOS DE SUELOS EXPANSIVOS (VARIOUS ASPECTS OF EXPANSIVE SOILS).....	36
1.7.1 Correlaciones simples entre la plasticidad del suelo y el potencial de expansión. ....	36

1.7.2	Ensayos de identificación.....	37
1.7.3	Agua y Suelos Expansivos.....	37
1.7.4	Coeficiente de Extensibilidad Lineal (COLE).....	38
1.7.5	Estimación del cambio de Volumen. ....	39
1.8	CIMENTOS EN SUELOS EXPANSIVOS (FOUNDATIONS ON EXPANSIVE SOILS).....	39
1.8.1	Pruebas de laboratorio para evaluar arcillas expansivas. ....	39
1.8.2	Prevención del daño estructural causado por suelos expansivos. ....	40
1.9	LABORATORIOS EMPLEADOS EN LA CARACTERIZACIÓN DE ARCILLAS .....	41
1.10	RESUMEN.....	44
2	LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ARCILLAS EXPANSIVAS.....	47
2.1	LOCALIZACIÓN .....	47
2.2	DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS .....	51
2.3	DESCRIPCIÓN DE TOMA DE LA MUESTRA.....	52
2.4	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	53
2.4.1	Análisis granulométrico de suelos por tamizado (I.N.V. E – 123 – 07). 53	
2.4.2	Análisis granulométrico por medio del hidrómetro (I.N.V. E – 124 – 07). 54	
2.4.3	Determinación del Límite Líquido de los suelos (I.N.V. E – 125 – 07). 56	
2.4.4	Límite Plástico e Índice de Plasticidad de los suelos (I.N.V. E – 126 – 07). 58	
2.4.5	Determinación de los factores de contracción de los suelos (I.N.V. E – 127 – 07). ....	59

2.4.6	Expansión en Consolidómetro y Consolidación Unidimensional de los suelos (I.N.V. E – 151 – 07).	62
2.4.7	Expansión Libre (I.N.V. E – 132 – 07).	63
2.4.8	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.	64
2.4.9	CLASIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS	65
3	DISEÑO DEL MODELO DE LABORATORIO	70
3.1	TIPOS DE CIMENTACIÓN	70
3.1.1	Cimentaciones especiales.	70
3.1.2	Cimentaciones por losa.	72
	Espesores Mínimos según la Norma Tecnológica de la Edificación, Cimentaciones Superficiales, Losas, NTE-CSL de España.	73
3.1.3	Cimentación con pilotes.	75
3.2	PROYECTOS	78
3.2.1	Cimentación Especial Tipo Waffle.	78
3.2.2	CIMENTACION POR LOSA	79
3.2.3	CIMENTACION CON PILOTES	81
3.3	PLANTEAMIENTO DE VARIABLES.	82
3.3.1	Preparación de la muestra.	82
3.3.2	Carga.	83
3.3.3	Deformación.	84
3.3.4	Humedad.	87
3.3.5	Saturación.	89
3.3.6	Material.	90
3.4	MODELO DEFINITIVO	92
3.4.1	Modelo A.	92

3.4.2	Modelo B.....	93
3.5	COSTOS DEL MODELO .....	93
3.5.1	MODELO A .....	94
3.5.2	MODELO B .....	94
4	CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES .....	95
5	BIBLIOGRAFÍA .....	97
6	ANEXOS .....	80

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1. Psicómetro.....	25
Figura 1-2. Expresión de Brackley .....	26
Figura 1-3. Cálculo del área libre de expansión.....	32
Figura 1-4. Criterio comúnmente usado para determinar el potencial de hinchamiento.....	34
Figura 2-1. Posibles localizaciones de arcillas expansivas en Colombia.....	47
Figura 2-2. Mapa locación Muestra 1 en Bucaramanga, Santander.....	48
Figura 2-3. Mapa locación Muestra 2 en San Gil, Santander. ....	49
Figura 2-4. Mapa locación Muestra 3 en Pinchote, Santander. ....	49
Figura 2-5. Mapa locación Muestra 4 en Barranquilla, Atlántico.....	50
Figura 2-6. Tamices escogidos para la granulometría.....	54
Figura 2-7. Cilindro de sedimentación con dos muestras diferentes.....	55
Figura 2-8. Preparación y disposición de la muestra en la cazuela para el ensayo de Límite Líquido. ....	58
Figura 2-9. Formación de los rollos en el ensayo de Límite Plástico. ....	59
Figura 2-10. Implementos necesarios para realizar el laboratorio de Factores de Contracción.....	61
Figura 2-11. Muestra preparada y dispuesta en el Consolidómetro.....	63
Figura 2-12. Consolidómetro en el ensayo de Expansión Libre.....	64
Figura 2-13. Carta de Plasticidad de Casagrande. ....	68
Figura 3-1. Cimentación Tipo Waffle.....	72
Figura 3-2. Losa fungiforme o con capiteles. ....	73
Figura 3-3. Cimentación tipo pilote. ....	76
Figura 3-4. Medidas reales de cimentación tipo waffle. ....	78
Figura 3-5. Escala 1:1/50 de cimentación tipo waffle.....	79
Figura 3-6. Escala 1:1/20 de cimentación tipo waffle.....	79

Figura 3-7. Medidas reales de cimentación por losa.....	80
Figura 3-8. Escala 1/70 de cimentación por losa. ....	80
Figura 3-9. Escala 1/30 de cimentación por losa. ....	80
Figura 3-10. Medidas reales de cimentación por pilotes.....	81
Figura 3-11. Escala 1/50 de cimentación por pilotes. ....	81
Figura 3-12. Escala 1/20 de cimentación por pilotes. ....	82
Figura 3-13. Juego de pesas de metal propuestas. ....	83
Figura 3-14. Tipos de pesas de metal.....	84
Figura 3-15. Sensor de fibra óptica.....	86
Figura 3-16. Deflectómetro de Múltiples Profundidades. ....	86
Figura 3-17. Extensómetro multifunción con sistema de medida extensométrico .	86
Figura 3-18. Componentes detallados de un MDD.....	87
Figura 3-19. Sensor 5TE.....	88
Figura 3-20. SENSOR EC-20 .....	88
Figura 3-21. Sensor EC-5. ....	88
Figura 3-22. Kit de riego balcones. ....	90
Figura 3-23. Imagen 3D del Modelo A propuesto. ....	92
Figura 3-24. Imagen 3D del modelo B propuesto. ....	93

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1-1. Laboratorios aplicados para identificar una arcilla expansiva. ....	24
Tabla 1-2. Resumen de algunos Criterios para la identificación del potencial de Expansión. ....	35
Tabla 1-3. Valores de actividades en grupos arcillosos sobresalientes. ....	37
Tabla 1-4. Relación entre LE y contenido en las arcillas. ....	38
Tabla 1-5. Recopilación de Laboratorios empleados para caracterizar arcillas. ....	41
Tabla 1-6. Resumen de las referencias utilizadas. ....	44
Tabla 2-1. Descripción general de las muestras escogidas. ....	51
Tabla 2-2. Descripción de la toma de las muestras. ....	52
Tabla 2-3. Resultados de Granulometría aplicados a las muestras en estudio. ....	64
Tabla 2-4. Resultados de laboratorios restantes aplicados a las muestras en estudio. ....	65
Tabla 2-5. Simbología. ....	65
Tabla 2-6. Potencial Expansivo de los suelos. ....	66
Tabla 2-7. Clasificación de las muestras de acuerdo a la tabla 2-6. ....	66
Tabla 2-8. Limite de Consistencia y potencial de cambio volumétrico PCV. ....	66
Tabla 2-9. Clasificación de las muestras de acuerdo a la tabla 2-8. ....	66
Tabla 2-10. Potencial de Hinchamiento por medio de los límites de Atterberg. ....	67
Tabla 2-11. Clasificación de las muestras de acuerdo a la tabla 2-10. ....	67
Tabla 2-12. Clasificación de las muestras según la carta de plasticidad de Casagrande y el Potencial de Hinchamiento. ....	69
Tabla 3-1. Medidores de la deformación del suelo. ....	85
Tabla 3-2. Tipos de sensores de humedad propuestos. ....	87
Tabla 3-3. Dispositivos de riego propuestos. ....	89
Tabla 3-4. Tipo de materiales propuestos para realizar el modelo. ....	91
Tabla 3-5. Costos Modelo A. ....	94
Tabla 3-6. Costos Modelo B. ....	94

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: LABORATORIOS DE CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS.....	100
ANEXO B: MANUAL DE OPERACIÓN DEL SENSOR EC-5.....	124
ANEXO C: DETALLES DEL KIT RIEGO BALCÓN.....	152
ANEXO D: DETALLES DE LOS MODELOS PROPUESTOS.....	154

## RESUMEN

**TÍTULO: DISEÑO DE UN MODELO DE LABORATORIO PARA ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO DE LAS ARCILLAS EXPANSIVAS\*.**

**AUTORES:**

KATIA LORENA ALDANA CAMPOS

MARIA FERNANDA TARAZONA ROJAS\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Modelo, arcilla expansiva, suelo plástico, laboratorio, muestras, expansión, comportamiento, cimentación.

**DESCRIPCIÓN:**

Los suelos plásticos, compuestos en su mayoría por arcillas expansivas, son susceptibles de presentar grandes cambios de volumen, en directa relación con los cambios en la humedad del suelo, se hinchan por hidratación y se agrietan durante la retracción de las épocas de sequía o baja pluviosidad. La mitigación de los efectos de una arcilla expansiva en las estructuras realizadas en las áreas que contienen estos suelos es el mayor desafío en la ingeniería geotécnica. Por esto, en la mayoría de los estudios no se investiga acerca de la descripción de lo que ocurre en el suelo por la carga que transmiten las edificaciones debido a que se presenta mayor interés en buscar la estabilización de los suelos de cimentación, mas no el conocimiento de su comportamiento.

En este proyecto se pretende diseñar un modelo para laboratorio que recree las condiciones que se presentan en campo, adaptando estas para su control y medición, y así plantear una herramienta para analizar el comportamiento de lo que ocurre en los suelos expansivos. Con base en las características geométricas de estructuras construidas, con el estudio de dispositivos de medición de cambio volumétrico y humedad, y controlando la saturación del suelo, se plantean las variables y características del modelo.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de ingenierías físico-mecánicas, escuela de ingeniería civil, directora del proyecto Ing. Hebenly Celis Leguizamo.

## ABSTRACT

**TITLE: DESIGN OF A LABORATORY METHOD TO ANALIZE THE BEHAVIOR OF EXPANSIVE CLAYS\*.\***

**AUTHORS:**

KATIA LORENA ALDANA CAMPOS  
MARIA FERNANDA TARAZONA ROJAS\*\*

**KEYWORDS:** Model, expansive clay, plastic soil, laboratory, samples, expansion, behavior, foundation.

**DESCRIPTION:**

Plastic soils, composed mainly by expansive clays, are sensitive to changes in their volume. This is directly associated with changes in humidity, which provokes swelling by hydration or shrinkage during retraction periods of drought or low rainfall. The mitigation of the effects expansive clays have on structures built on these kinds of soils is one of the main challenges in geotechnical engineering. It is because of this that many papers are focused on studying how to stabilize these soils and not the inner happening of them when the weight of the structure is transmitted to them.

The focus of this project is to design a laboratory model that recreates field conditions, adapting them to control and measure them to establish an appliance that will analyze the behavior of expansive soils. The variables and characteristics of the model are then established with geometrical properties of real life structures, the study of volumetric change and moisture devices, and the control of saturation.

---

\* Project of grade

\*\* Faculty of engineerings physicist - mechanics, school of civil engineering, director of the project Ing. Hebenly Celis Leguizamo

## INTRODUCCIÓN

En el territorio Colombiano se encuentran una gran variedad de suelos, entre estos las arcillas expansivas, suelos que cambian su volumen según la presencia o ausencia de agua en su composición interna.

Debido a esto se han generado innumerables problemas en la construcción, ya que este cambio volumétrico representa esfuerzos sobre los cimientos de las estructuras y éstos los transmiten a la edificación, presentándose grietas y roturas en las paredes, columnas y vigas y hasta desplazamientos verticales de la edificación misma.

Esto representa un peligro para la comunidad ya que los cambios volumétricos a lo largo de los años a los que son sometidas las estructuras hacen que estos sectores sean no aptos para su ocupación; lamentablemente la mayoría de estos sectores son poblados por gente de estratos bajos que no tienen la manera de adecuar el terreno para la construcción sobre el mismo (a causa del desconocimiento de él), poniendo en riesgo sus vidas al construir sobre un suelo inestable.

Este proyecto busca recopilar la mayor cantidad de información posible de estos suelos para crear una base conceptual sólida acerca de las arcillas expansivas para lograr un mejor entendimiento de ellas.

Una vez hecho esto, se consideran diferentes lugares donde se encontraron arcillas expansivas en el país para analizarlas con un modelo de laboratorio propuesto donde se asemejarán las condiciones de terreno para saber si es apta o no la construcción sobre ese lugar.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un modelo de laboratorio que permita evaluar los cambios de volúmenes que ocurren en suelos arcillosos de alta plasticidad.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recolección de referencias.
- Identificar los posibles sitios donde se encuentra este tipo de suelo.
- Establecer el valor de los parámetros que caracterizan el comportamiento del material.
- Estudiar y definir las variables que afectarían el modelo de laboratorio a proponer.
- Proponer los instrumentos de medición y diseño del modelo.

## 1 REFERENCIAS SOBRE ARCILLAS EXPANSIVAS

Antes de analizar por medio de ensayos el suelo en estudio, Arcillas expansivas, se ve necesario una recopilación de las precedentes investigaciones que se han realizado en este tema, las cuales llevarán a tener claridad con respecto a los distintos aspectos relacionados con la estructura, composición y comportamiento de las arcillas, permitiendo también lograr un compendio de los diferentes estudios ya realizados. A continuación, se mencionan aportes de algunas de las publicaciones nacionales y extranjeras, con mayor relevancia en el tema, después se encontrará una tabla resumen con estudios anteriores a esta tesis.

### 1.1 LAS ARCILLAS: PROPIEDADES Y USOS

Las arcillas son minerales de rocas sedimentarias de origen detrítico, pertenecientes en su mayoría a los filosilicatos, productos de la meteorización de los silicatos, cuyo tamaño de partícula es menor a los  $2\mu\text{m}$  (micrómetros).

Los filosilicatos tienen una estructura química compuesta por capas conformadas por grupos tetraédricos  $\text{SiO}_4^{4-}$  que, al juntarse tres de sus cuatro oxígenos, forman su unidad fundamental  $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$  Pentóxido de Silicio, que se distribuyen espacialmente en forma de hexágonos.

Las fuerzas interlaminares son más débiles que las fuerzas entre iones de una misma lámina, por lo que la dirección de exfoliación de los filosilicatos son paralelas a las láminas.

Debido a su tamaño menor de  $2\mu\text{m}$ , sus fuerzas interlaminares débiles, la aparición de carga y su morfología laminar, las arcillas presentan las siguientes propiedades:

- Elevada superficie específica.
- Gran capacidad de intercambio de iones interlaminar, en el interior de la estructura o en el exterior de la misma.

- Gran capacidad de absorción de agua, (más del 100% con respecto a su peso).
- Alta capacidad de hidratación e hinchamiento.
- Alta plasticidad ya que el agua envuelve las láminas y a modo de lubricante permite que se deslicen las partículas sobre otras al verse sometidas a un esfuerzo.
- Presenta tixotropía: Pérdida de resistencia de un coloide al amasarlo y su posterior recuperación con el tiempo.

Las arcillas son utilizadas en la construcción en un 90%; el 10% restante se utiliza para pinturas de moldeo, decolorantes, absorbentes, entre otros.

El proceso de extracción se compone de su explotación, normalmente es a cielo abierto, con métodos mecánicos y a profundidades de recubrimiento a remover no mayores de 15m.

El procesado industrial de lo extraído durante la explotación depende del uso que se le vaya a dar. Generalmente primero se tritura, se elimina la humedad y se pulveriza hasta obtener los tamaños de partícula deseados. La temperatura de secado también depende del uso que se le vaya a dar a la arcilla.

## **1.2 PANORAMA GENERAL DE LAS ARCILLAS EXPANSIVAS Y SU EFECTO SOBRE EDIFICACIONES**

En el primer encuentro Nacional de Ingenieros de Suelos y Estructuras, dado en Bogotá, Colombia, los días del 4 al 6 de septiembre de 1991, se toma como base el congreso de suelos en “Colorado School of Mines”, donde se trabajaron las siguientes hipótesis sobre Arcillas Expansivas presentadas por Lambe y Whitman:

- No se conoce el mecanismo de esfuerzos dentro de las arcillas que se expanden.
- La expresión  $\sigma' = \sigma_{Total} - \mu$ , no correlaciona bien el comportamiento de las arcillas expansivas.

Donde,

$\sigma'$ : Esfuerzo efectivo.

$\sigma_{Total}$ : Esfuerzo total.

$\mu$ : Presión de poros.

A pesar de estas dificultades, para este tiempo el esfuerzo efectivo era la mejor herramienta disponible para predecir cambios en resistencia al esfuerzo cortante y cambios de volumen en las arcillas expansivas.

Estas hipótesis llevan al uso de diferentes sistemas para evaluar las deformaciones presentes en este especial tipo de suelo, entre las que se encuentran:

**Tabla 1-1. Laboratorios aplicados para identificar una arcilla expansiva.**

<b>ENSAYO DE LABORATORIO</b>	<b>DESCRIPCION DE RESULTADOS</b>
Límite Líquido	Valores mayores al 70% indican posibilidad de arcillas expansivas, lo que indica mayor retención de humedad y gran actividad eléctrica e iónica.
Límite Plástico	Cuando se encuentra un alto índice de plasticidad, como es el caso de estas arcillas, existe un gran cambio de humedad, lo que lleva a una alta variación volumétrica.
Límite de Contracción	Humedad que corresponde al punto en que el suelo deja de contraerse al reducir su humedad en el horno, en este tipo de suelo se encuentran valores bajos (12% e inferiores), lo que significa altos cambios en la humedad.
Granulometría y Coloides	Con un análisis granulométrico por hidrómetro que arroje tamaño de suelo, similar al tamaño de las arcillas, habrá mayor posibilidad de que el suelo sea expansivo.
Los ensayos anteriormente descritos, permitirán realizar una preselección para encontrar un suelo con grandes posibilidades de ser expansivo, para después realizar pruebas que permitan hacer una cuantificación de las potencialidades de expansión, entre las cuales se podría tener:	
Expansiones en el Aparato de Lambe	Determina el grado de expansividad dentro de un sistema bastante cualitativo.
Expansiones en	Incluye variables de ensayo como la determinación de la presión de

Consolidómetro	expansión a volumen constante.
----------------	--------------------------------

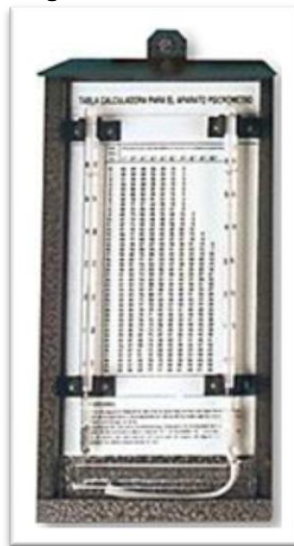
Fuente: **Panorama general de las arcillas expansivas y su efecto sobre edificaciones**

Otros métodos que serían de gran ayuda en la interpretación de las arcillas expansivas son:

- Determinación de la succión: O presión de poros negativa, comprende la relación entre la retentividad de agua y el suelo, para obtener curvas características de humedad del suelo.

Su medición la realiza un aparato denominado “Psicómetro”, el cual cubre toda la gama de succiones posibles. Este equipo mide por medio de termocuplas la caída de la temperatura al enfriar el vapor de agua que está en equilibrio con el potencial de agua del suelo.

**Figura 1-1. Psicómetro.**



Fuente: [http://www.depositohidrografico.com/b2c/index.php?page=pp\\_producto.php&md=0&ref=MD12](http://www.depositohidrografico.com/b2c/index.php?page=pp_producto.php&md=0&ref=MD12)

- Cálculo de expansiones.

En 1980 Brackley propone la expresión de la Figura 1-1 para evaluar la expansión que produce una arcilla desecada al humedecerse.

Con tal expansión se podría predecir la expansión que se produciría en una arcilla a la que se le ha quitado una cantidad determinada de sobrecarga y para la cual se provee un humedecimiento hasta llegar al equilibrio. El efecto total de

expansión se podrá determinar haciendo una integración por capas, determinando las succiones en cada una de ellas, lo mismo que las presiones intergranulares, los límites, etc.

**Figura 1-2. Expresión de Brackley**

$$\text{HINCHAMIENTO \%} = \frac{PI - 10}{10} \text{Log}_{10} \frac{S}{P}$$

PI = Índice de Plasticidad

S = succión en el momento de la construcción en cada capa.

P= presión resultante en cada capa teniendo en cuenta las presiones intergranulares más las sobre presiones por cimentación.

**Fuente: Panorama general de las arcillas expansivas y su efecto sobre edificaciones.**

El afán de realizar la identificación de las Arcillas expansivas se debe al impacto que tiene este tipo de suelo sobre las edificaciones. El hinchamiento producido sobre las estructuras cimentadas sobre arcillas expansivas se traduce generalmente en movimientos diferenciales; estos pueden producirse en conexión con descargas del suelo expansivo por excavación y condiciones de humedad bajas iniciales.

Es importante entonces conocer las características del suelo expansivo para evaluar acertadamente las variables tanto de suelo como de estructura a usar y así garantizar que las cimentaciones puedan soportar las deformaciones diferenciales.

### **1.3 EL SUELO DE BARRANQUILLA, CLASIFICACIÓN, ZONAS DE RIESGO, ARCILLAS EXPANSIVAS**

Un estudio realizado por el Instituto Agustín Codazzi en 1981 encontró que Barranquilla tiene tres tipos de suelo:

1. Tierras de la clase IV: Pueden producir cultivos bajo un buen manejo de las mismas. Se clasifican en: Subclase s.c. y Subclase sce.

2. Tierras de la clase VI: Para el uso de plantas nativas adaptables y producción de cultivos especializados y ornamentales. Subclase sc (Asociación Salgar, DU).
3. Tierras de la clase VII: Para el uso de plantas nativas adaptables y producción de cultivos especializados y ornamentales. Subclase sc (Suelos limitados en sus actividades agropecuarias debido a los cambios climáticos).

Los suelos con más alta resistencia están ubicados hacia el centro, norte y noroccidente de la ciudad, ocupados de forma residencial, comercial e institucional que no han requerido ningún tratamiento especial de cimentación (por ejemplo: pilotajes).

Los suelos de baja resistencia se encuentran al occidente del Río Magdalena y requieren tratamientos especiales para su uso. Por esto sus usos son industriales y por inversionistas que puedan tratar el terreno.

En el suroccidente se encuentran los suelos arcillosos (expansivos) que fueron ocupados por los estratos más bajos para vivienda. Aquí se presentan comúnmente problemas de construcción, declarándolas zonas de riesgo.

Es en esta zona que se presentan los mayores problemas de deslizamiento por su suelo altamente erosivo; esto, combinado con la morfología del terreno y la influencia humana, influyen directamente en las inundaciones.

La presencia de las arcillas expansivas se destaca en el sector occidental, El Bosque, las Terrazas, Mequejo, y algunas partes de la circunvalar y en algunas zonas periféricas de Barranquilla.

El más afectado es el barrio El Bosque, donde el 75% del suelo es clasificado arcilla de alta plasticidad (CH), mientras que el 25% restante fue CL, SM-SC y SM. La arcilla es impermeable, de actividad media-alta y no recomendable para trazado vial.

## **1.4 EVALUACIÓN DE ADITIVOS USADOS EN EL TRATAMIENTO DE ARCILLAS EXPANSIVAS**

Las arcillas expansivas, debido a sus cambios de volumen debido a las variaciones de humedad, han sido un problema constructivo a través de los años que genera pérdidas económicas grandes. Es por esto que se busca la manera de estabilizarlas con agentes como la cal, las cenizas volantes y el aceite sulfonado bajo altos grados de expansividad.

La cal reduce los límites líquido y plástico en la arcilla expansiva, haciendo que se reduzca el cambio volumétrico. También mejora la permeabilidad y manejabilidad, permite el intercambio catiónico, las reacciones puzolánicas y aumenta el índice de contracción.

Las cenizas volantes (CV) se obtienen de la combustión en centrales termoeléctricas. Su composición y la cantidad de carbón presente dependen de su tratamiento en la termoeléctrica de las que vienen. Su composición de silicatos, aluminios, cal libre y algunos óxidos permite la reducción del índice de expansión. Si se utiliza en un 25% con las arcillas, afecta su granulometría y disminuye su límite líquido y su índice plástico.

El aceite sulfonado se basa en la estabilización electroquímica, donde hay un intercambio de iones entre el agua ionizada con el aceite y el suelo. Su funcionalidad radica en que reduce el agua contenida en el suelo facilitando su compactación y disminuye la capacidad de hinchamiento. La dosificación del aceite depende de su origen y concentración, pero siempre debe haber un periodo de curado para que ocurra el intercambio de iones.

Se realizaron ensayos de caracterización física y mecánica de cada aditivo-suelo. La cal y la ceniza con peso de sólidos y el aceite se disolvió en agua para la mezcla. Para la preparación de las muestras se siguió la norma ASTM D 698 y el curado fue de 15 días para la cal y la ceniza y de 90 días para el aceite. Los ensayos físicos fueron Límite Líquido y Límite Plástico, y los de expansividad

fueron Ensayo de expansión de Lambe (ASTM D 4546) y Ensayo de Índice de Expansividad (ASTM D 4829-95).

Los resultados fueron: En el Límite Líquido, el aceite sulfonado reduce el LL de la bentonita de 385% a un rango entre 266%-285%; Las CV reducen el LL a 169% con una concentración de 50%; la cal reduce más la expansividad de la bentonita hasta un 98% con un porcentaje óptimo del 10%. Se determinó que la Presión de Expansión de la bentonita es de 0,69kg/m<sup>2</sup>. Las cenizas volantes inhiben las propiedades expansivas del material, pero toca usarlo en excesivas cantidades, por lo que no es recomendable. Con el aceite sulfonado no se pudo determinar una metodología de laboratorio adecuada, y el tiempo de curado no fue similar a las condiciones de campo para una reacción electroquímica.

## **1.5 PATOLOGÍAS POR ARCILLAS EXPANSIVAS**

Las arcillas se comportan como suelos plásticos (se deforman sin agrietarse y su consistencia varía con el contenido de agua que tengan). Según el contenido de humedad presente, se encuentran los límites de Atterberg, los cuales determinan la expansividad de un suelo.

Las patologías que se presentan en las estructuras se deben a la aparición de cargas mayores a las de diseño, producto de asentamientos diferenciales en la cimentación debido a periodos de intensa humedad o sequedad sobre el suelo.

El origen de estas patologías se debe a los siguientes factores:

1. La naturaleza geológica y geotécnica del suelo y en concreto el porcentaje de finos para su caracterización.
2. El grado de expansividad en función de diferentes ensayos.
3. Cambios de humedad.

Para evitar estas patologías deben seguirse las siguientes recomendaciones:

1. Profundidad de apoyo adecuada donde los cambios de humedad no afecten el suelo ni los niveles freáticos, evitando zonas de capas activas.

2. Las cargas transmitidas por la cimentación al suelo deben ser regulares y deben compensar la tensión máxima admitida del suelo.
3. El sistema de cimentación debe estar arriostrado en ambas direcciones con vigas de amarre y debe estar separado del terreno en todas sus caras al menos 15cm para evitar los empujes que el suelo ejerce sobre el mismo.
4. Los saneamientos, las canalizaciones y las tuberías deben controlarse para evitar roturas de las mismas mediante tuberías flexibles y rellenos de hormigón con material granular fino bajo las tuberías.
5. Las aceras y pavimentaciones extensas deben estar propiamente impermeabilizadas, con buenos sistemas de drenaje.
6. Los sistemas de drenaje deben ser profundos, evitar su propia colmatación y evacuar efectivamente las aguas superficiales.
7. La excavación y hormigonado debe ser lo más rápida posible.

La reparación de los daños causados por estas patologías es muy costosa, pero entre estos se encuentra:

1. Recalces en la cimentación con micropilotaje o batches.
2. Zunchados horizontales y refuerzos en la estructura.

## **1.6 PRINCIPIOS DE INGENIERÍA DE CIMENTACIÓN (PRINCIPLES OF FOUNDATION ENGINEERING), 5TA EDICIÓN (CAPÍTULO 13.8-13.10)**

### **1.6.1 Naturaleza General de suelos expansivos:**

Las arcillas plásticas se hinchan considerablemente cuando se les agrega agua y luego se encogen debido a la pérdida de la misma.

La profundidad a la cual un suelo tiene cambios periódicos de humedad se denomina la zona activa. Su profundidad varía dependiendo de la locación del lugar. La profundidad de la zona activa puede ser fácilmente determinada graficando los índices de liquidez contra la profundidad del perfil del suelo en las diferentes estaciones climáticas.

### 1.6.2 Mediciones en Laboratorio del hinchamiento:

Las mediciones en laboratorio se pueden realizar con pruebas edométricas (pruebas donde se desarrollan esfuerzos y deformaciones tangenciales, compresiones y cambios de volúmenes, pero se impiden fallas por corte) en especímenes inalterados. Dos pruebas comunes son la prueba de expansión libre y la prueba de presión de poros.

1. Prueba de expansión libre: La muestra se pone en un edómetro debajo de una pequeña subcarga de 6.9KN/m<sup>2</sup>, se le añade agua y la expansión de volumen del espécimen (su altura, el área es constante) se mide hasta lograr el equilibrio. El porcentaje de expansión libre se obtiene con la siguiente relación:

$$s_{w(free)}(\%) = \frac{\Delta H}{H} (100) \quad (1)$$

Donde,

$s_{w(free)}$ : Expansión libre, en porcentaje.

$\Delta H$ : Altura de expansión debido a la saturación.

$H$ : Altura inicial del espécimen

O'Neill y Poormoayed (1980) desarrollaron una relación,

$$\Delta s_f = 0.0033Z \cdot s_{w(free)} \quad (2)$$

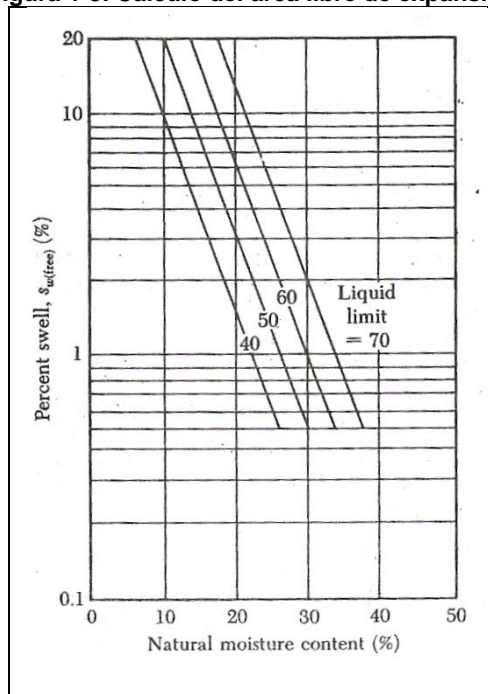
$\Delta s_f$ : Área de expansión libre.

$Z$ : Profundidad de la zona activa (m).

$s_{w(free)}$ : Expansión libre, en porcentaje.

Para calcular el área libre de expansión a partir de la siguiente gráfica:

Figura 1-3. Cálculo del área libre de expansión.



Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentación.

- Prueba de presión de Expansión: Se pone la muestra en un anillo de consolidación y se aplica una presión igual a la presión de sobrecarga efectiva,  $\sigma'_o$ , más la aproximada presión excedente anticipada causada por la cimentación,  $\sigma'_s$ . Se le agrega agua a la muestra. Cuando ésta empieza a hincharse, se le va aplicando presión en pequeños incrementos para prevenir el hinchamiento. La presión se mantiene hasta que se obtiene la presión de expansión total en la muestra, y esta es:

$$\sigma'_T = \sigma'_o + \sigma'_s + \sigma'_1 \quad (3)$$

Donde,

$\sigma'_T$ : Presión total aplicada para prevenir el hinchamiento, o presión de expansión cero (KN/m<sup>2</sup>).

$\sigma'_1$ : Presión de más aplicada para prevenir el hinchamiento después de la adición de agua (KN/m<sup>2</sup>).

Cuando se obtiene la presión cero, se le puede ir quitando la carga a la muestra de suelo hasta alcanzar la presión de sobrecarga efectiva  $\sigma'_o$ . Esta

descarga hará que la muestra se hinche. El hinchamiento de equilibrio se toma para cada nivel de presión.

La prueba de Presión de Expansión se puede usar para obtener la superficie de empuje,  $\Delta S$ , para una cimentación, con la siguiente fórmula:

$$\Delta S = \sum_{i=1}^n [s_w(\%)](H_i)(0.01) \quad (4)$$

Donde,

$s_w(\%)$ : Expansión, en porcentaje, de la capa  $i$  bajo la presión  $\sigma'_o + \sigma'_s$

$H_i$ : Grosor de la capa  $i$ .

3. Prueba del Índice de Expansión Libre Modificado: En 1987 Sivapullaiah et al. Sugirieron una nueva prueba para obtener el índice de expansión libre modificado para arcillas que al parecer da una mejor indicación del potencial de hinchamiento de suelos arcillosos. La prueba consiste en una cantidad de 10g de suelo secado al horno que se pulveriza y se transfiere a una jarra graduada de 100ml que contiene agua destilada. Después de 24 horas, el volumen sedimentado expandido se mide. El índice de expansión libre modificado se calcula:

$$\text{Modified free swell index} = \frac{V - V_s}{V_s} \quad (5)$$

Donde,

$V$ : Volumen del suelo luego de expandido.

$V_s$ : Volumen del sólido del suelo =  $\frac{M_s}{G_s \cdot \rho_w}$

$M_s$ : Masa de suelo secado en el horno.

$G_s$ : Gravedad específica de sólidos del suelo.

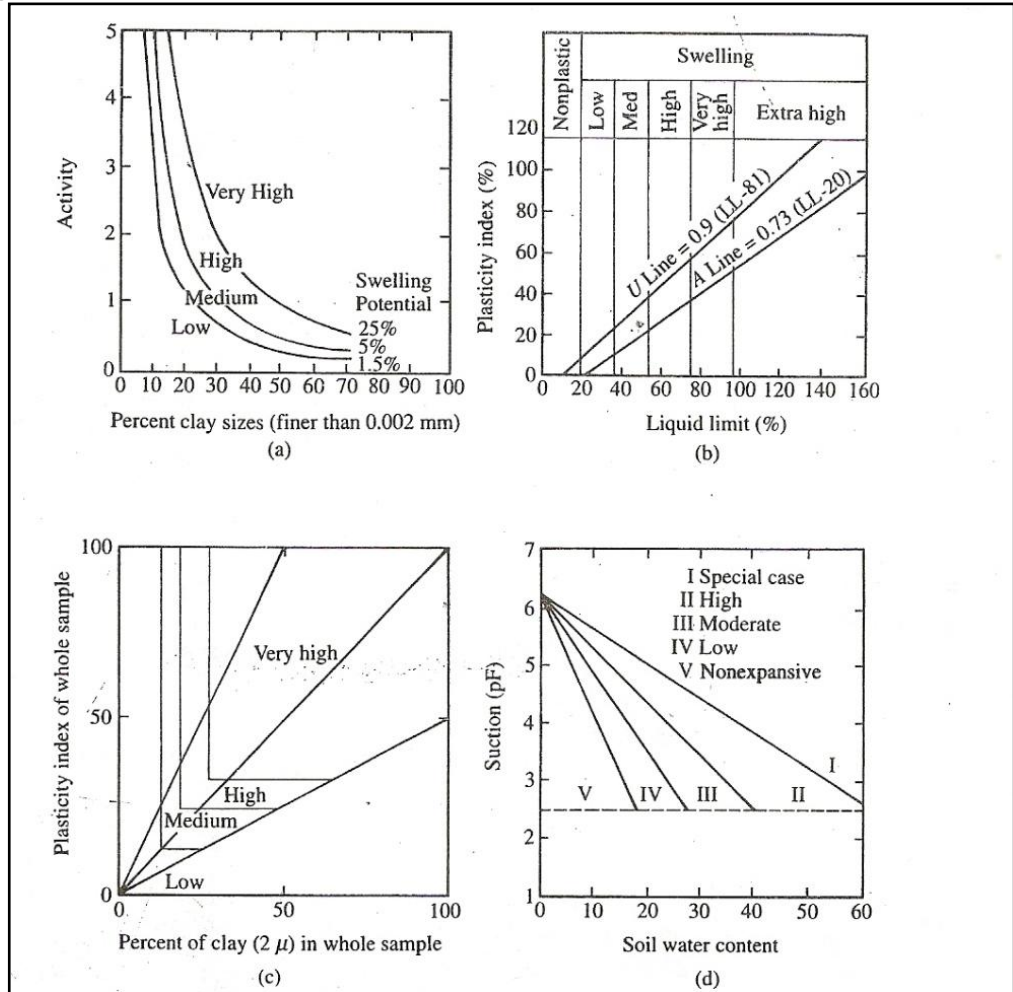
$\rho_w$ : Densidad del agua.

### 1.6.3 Clasificación de Suelos Expansivos en base a pruebas de Índice:

La clasificación de los suelos expansivos depende del potencial de hinchamiento.

La mayoría de estas clasificaciones están resumidas en la figura a continuación:

Figura 1-4. Criterio comúnmente usado para determinar el potencial de hinchamiento.



Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentación.

Y en la siguiente tabla, donde las figuras nombradas, 13.13a, 13.13b, 13.13c y 13.13d se encuentran en la figura 1-4:

**Tabla 1-2. Resumen de algunos Criterios para la identificación del potencial de Expansión.**

Reference	Criteria	Remarks
Holtz (1959)	CC > 28, PI > 35, and SL < 11 (very high) 20 ≤ CC ≤ 31, 25 ≤ PI ≤ 41, and 7 ≤ SL ≤ 12 (high) 13 ≤ CC ≤ 23, 15 ≤ PI ≤ 28, and 10 ≤ SL ≤ 16 (medium) CC ≤ 15, PI ≤ 18, and SL ≥ 15 (low)	Based on CC, PI, and SL
Seed et al. (1962)	See Figure 13.13a	Based on oedometer test using compacted specimen, percentage of clay < 2 μm, and activity
Altmeyer (1955)	LS < 5, SI > 12, and PS < 0.5 (noncritical) 5 ≤ LS ≤ 8, 10 ≤ SL ≤ 12, and 0.5 ≤ PS ≤ 1.5 (marginal) LS > 8, SL < 10, and PS > 1.5 (critical)	Based on LS, SL, and PS Remolded sample ( $\rho_{d(max)}$ and $w_{opt}$ ) soaked under 6.9 kPa surcharge
Dakshanamanthy and Raman (1973)	See Figure 13.13b	Based on plasticity chart
Raman (1967)	PI > 32 and SI > 40 (very high) 23 ≤ PI ≤ 32 and 30 ≤ SI ≤ 40 (high) 12 ≤ PI ≤ 23 and 15 ≤ SI ≤ 30 (medium) PI < 12 and SI < 15 (low)	Based on PI and SI
Sowers and Sowers (1970)	SL < 10 and PI > 30 (high) 10 ≤ SL ≤ 12 and 15 ≤ PI ≤ 30 (moderate) SL > 12 and PI < 15 (low)	Little swell will occur when $w_o$ results in LI of 0.25
Van Der Merwe (1964)	See Figure 13.13c	Based on PI, percentage of clay < 2 μm, and activity
Uniform Building Code, 1968	EI > 130 (very high) and 91 ≤ EI ≤ 130 (high) 51 ≤ EI ≤ 90 (medium) and 21 ≤ EI ≤ 50 (low) 0 ≤ EI ≤ 20 (very low)	Based on oedometer test on compacted specimen with degree of saturation close to 50% and surcharge of 6.9 kPa
Snethen (1984)	LL > 60, PI > 35, $\tau_{nat} > 4$ , and SP > 1.5 (high) 30 ≤ LL ≤ 60, 25 ≤ PI ≤ 35, 1.5 ≤ $\tau_{nat}$ ≤ 4, and 0.5 ≤ SP ≤ 1.5 (medium) LL < 30, PI < 25, $\tau_{nat} < 1.5$ , and SP < 0.5 (low)	PS is representative for field condition and can be used without $\tau_{nat}$ , but accuracy will be reduced
Chen (1988)	PI ≥ 35 (very high) and 20 ≤ PI ≤ 55 (high) 10 ≤ PI ≤ 35 (medium) and PI ≤ 15 (low)	Based on PI
McKeen (1992)	Figure 13.13d	Based on measurements of soil water content, suction, and change in volume on drying
Vijayvergiya and Ghazzaly (1973)	$\log SP = (1/12)(0.44 LL - w_o + 5.5)$	Empirical equations
Nayak and Christensen (1974)	$SP = (0.00229 PI)(1.45C)/w_o + 6.38$	Empirical equations
Wootton (1980)	$SP = 0.00411(LL_w)^{4.17}q^{-3.86}w_o^{-2.33}$	Empirical equations

<i>Note:</i> C = clay, %	$q$ = surcharge
CC = colloidal content, %	SI = shrinkage index = LL - SL, %
EI = Expansion index = $100 \times$ percent swell $\times$ fraction passing no. 4 sieve	SL = shrinkage limit, %
LI = liquidity index, %	SP = swell potential, %
LL = liquid limit, %	$w_o$ = natural soil moisture
LL <sub>w</sub> = weighted liquid limit, %	$w_{opt}$ = optimum moisture content, %
LS = linear shrinkage, %	$\tau_{nat}$ = natural soil suction in tsf
PI = plasticity index, %	$\rho_{d(max)}$ = max dry density
PS = probable swell, %	

Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentación.

## 1.7 VARIOS ASPECTOS DE SUELOS EXPANSIVOS (VARIOUS ASPECTS OF EXPANSIVE SOILS)

### 1.7.1 Correlaciones simples entre la plasticidad del suelo y el potencial de expansión.

- Potencial de Expansión del suelo (ASTM D-4829)

El material de suelo se desagrega, se pasa por un tamiz # 4 y se le agrega el contenido de humedad óptimo (ASTM D-1557). Este contenido de humedad óptima es aproximadamente del 75% al 80% de saturación. La muestra se deja de 6 a 30 horas reposando y luego se compacta en un molde de 4in de diámetro. Se ajusta la humedad de la muestra a 50% de saturación. Se aplica una carga de 144psf y la muestra se humedece y se monitorea por 24 horas, midiendo el volumen de expansión. El índice de expansión se calcula:

$$EI = 100 \times \Delta h \times F \quad (6)$$

$\Delta h$ : Porcentaje de expansión

F: Fracción del pasa # 4.

- Estimación empírica de las presiones de elevación:

A mediados de los 60, la firma Lowney-Kaldeveer Asociados desarrolló la siguiente relación empírica:

$$\text{Presión de elevación del suelo} = 100(\text{Índice de plasticidad}) - 100 \text{ in psf} \quad (7)$$

### 1.7.2 Ensayos de identificación.

Los Límites de Atterberg y el contenido de arcilla pueden mezclarse en un solo parámetro llamado Actividad. Skempton (1953) lo definió como sigue:

$$Activity_{(AC)} = \frac{\text{Índice de Plasticidad}}{\% \text{ más fino que } 2\mu\text{m}} \quad (8)$$

De acuerdo a la actividad, hay tres tipos de arcilla:

1. Inactivas con actividad de 0.75
2. Normales con actividad entre 0.25 y 1.25
3. Activas con actividades mayores a 1.25

Las arcillas activas tienen mayor potencial de expansión. La siguiente tabla muestra la actividad de los grupos mineralógicos arcillosos más importantes:

**Tabla 1-3. Valores de actividades en grupos arcillosos sobresalientes.**

Mineral	Exchange-able Ion	LL (%)	PL (%)	PI (%)	SL (%)	Activity
Montmorillonite	Na <sup>+1</sup>	710	54	656	9.9	7.2
	K <sup>+1</sup>	660	98	562	9.3	-
	Ca <sup>+2</sup>	510	81	429	10.5	1.5
Illite	Na <sup>+1</sup>	120	53	67	15.4	0.9
	K <sup>+1</sup>	120	60	42	17.5	-
	Ca <sup>+2</sup>	100	45	55	16.8	-
Kaolinite	Na <sup>+1</sup>	53	32	21	26.8	0.33-0.46
	K <sup>+1</sup>	49	29	20	-	-
	Ca <sup>+2</sup>	38	27	11	24.5	-

Fuente: Varios Aspectos de Suelos Expansivos.

### 1.7.3 Agua y Suelos Expansivos.

El agua en el suelo se encuentra de tres maneras:

1. Agua gravitacional: El agua se mueve libremente en el suelo hacia abajo por acción de la gravedad.
2. Agua capilar: El agua es retenida en los vasos capilares del suelo.

3. Agua higroscópica: Capa delgada de humedad retenida por las partículas del suelo. Tiene una afinidad química con la partícula de suelo y con su partícula vecina, manteniéndolas unidas.

#### 1.7.4 Coeficiente de Extensibilidad Lineal (COLE).

Este ensayo determina la presión lineal de una muestra no confinada e inalterada secándose de una succión de 5psi a una succión seca en el horno.

COLE es la medida del cambio de dimensión de un terrón de muestra inalterado de un estado húmedo a un estado seco y se estima por las densidades de la masa del terrón a una succión de 5psi y a condiciones de humedad seca. Su valor se calcula de la siguiente forma:

$$COLE = \frac{\Delta L}{\Delta L_D} = (\gamma_{db}/\gamma_{dM})^{0.33} - 1 \quad (9)$$

Donde:

$\Delta L$ : Cambio de presión lineal a una succión de 5psi.

$\Delta L_D$ : Cambio de presión lineal a una succión seca al horno.

$\frac{\Delta L}{\Delta L_D}$ : Presión lineal relacionada a dimensiones secas.

$\gamma_{db}$ : Densidad seca de muestra secada en el horno.

$\gamma_{dM}$ : Densidad seca de muestra a 5psi de succión.

La relación entre LE y el contenido en las arcillas se muestra a continuación:

Tabla 1-4. Relación entre LE y contenido en las arcillas.

<u>LE/Percent Clay</u>	<u>Mineralogy</u>
>0.15	Smectites
0.05-0.15	Illites
<0.05	Kaolinites

Fuente: Varios Aspectos de Suelos Expansivos.

### 1.7.5 Estimación del cambio de Volumen.

El cambio de volumen de un suelo no saturado está relacionado a los estados de las variables de tensión. La superficie constitutiva puede representarse con la siguiente ecuación:

$$\Delta e = C_t^* \Delta \log (\sigma - u_a) + C_m^* \Delta \log (u_a - u_w) \quad (10)$$

Donde,

$e$  = Proporción de vacíos

$C_t$  = Índice de compresión

$(\sigma - u_a)$  = Estado de la variable en tensión saturado efectivo

$C_m$  = Índice de succión en términos de proporción de vacíos y succión matricial.

$(u_a - u_w)$  = Succión matricial.

La relación entre las fases de agua se representa por:

$$\Delta w = D_t^* \Delta \log (\sigma - u_a) + D_m^* \Delta \log (u_a - u_w) \quad (11)$$

Donde:

$D_t$  = Índice de contenido de agua debido al Estado de la variable en tensión saturado efectivo.

$D_m$  = Índice de contenido de agua debido a la succión matricial.

## 1.8 CIMIENTOS EN SUELOS EXPANSIVOS (FOUNDATIONS ON EXPANSIVE SOILS).

### 1.8.1 Pruebas de laboratorio para evaluar arcillas expansivas.

1. Límites de Atterberg.

2. Ensayo de Expansión Libre: En este ensayo se pone una muestra de suelo en un odómetro con  $\sigma'_{v_0} = 1\text{psi}$ . Luego la muestra se inunda con agua y se observa el hinchamiento. En el experimento,

$$S_{w\ free}(\%) = \frac{\Delta H}{H_0} \cdot 100\% \quad (12)$$

Para estimar la elevación en un suelo superficial al ocurrir el hinchamiento, se usa la siguiente fórmula:

$$\Delta S_F = 0.0033ZS_{w\ free}(\%) \quad (13)$$

$\Delta S_F$ : El levantamiento de la superficie libre y Z es la profundidad de la zona activa.

3. Ensayo de Presión de Expansión: Este ensayo también requiere una muestra natural de suelo en un odómetro. La tensión efectiva vertical inicial  $p'_o$  puesta en el espécimen se toma como un valor representativo de la tensión actual que soporta un cimiento. La muestra de suelo se inunda con agua, pero se impide su expansión con el aumento gradual de la carga vertical que se le aplica. La tensión aplicada para detener la expansión se mide, y esto se llama presión de expansión. Una vez se haya medido la presión de expansión, se retira la carga y se mide la expansión del suelo en porcentaje.

### **1.8.2 Prevención del daño estructural causado por suelos expansivos.**

Las medidas de prevención son:

- a. Controlar el acceso de agua al suelo con pendientes hacia afuera y sistemas de drenaje.
- b. Excavación y reemplazo del suelo activo, tratamientos químicos del suelo activo y mojando de antemano el suelo para construir el cimiento en el suelo ya expandido.

Los sótanos construirlos rodeados de suelo no expansivo y bien compactado, cimentaciones profundas, cimientos tipo “waffle”.

## 1.9 LABORATORIOS EMPLEADOS EN LA CARACTERIZACIÓN DE ARCILLAS

De acuerdo a las normas colombianas y a los encontrados en los anteriores escritos, se recopilan a continuación todos los laboratorios que se pueden aplicar a un suelo expansivo.

**Tabla 1-5. Recopilación de Laboratorios empleados para caracterizar arcillas.**

LABORATORIO	NORMA	DESCRIPCIÓN
DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE EXPANSIVIDAD DE UN SUELO EN EL APARATO DE LAMBE (PRESION DE EXPANSION)	I.N.V. E – 120 – 07	Se emplea un método que valora la expansión de una probeta de suelo de arcilla expansiva compactado, en condiciones de humedades establecidas, utilizando el expansómetro de Lambe.
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO (I.N.V. s.f.)	I.N.V. E – 123 – 07	Se determina el porcentaje de gravas, arenas y finos pasando el material por una serie de tamices de diferentes aberturas.
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR MEDIO DEL HIDRÓMETRO	I.N.V. E – 124 – 07	Se aplica un método para determinar la distribución de tamaño de partículas de las fracciones finas de los suelos, es decir, aquellas que pasan del tamiz No 200.
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS	I.N.V. E – 125 – 07	Se determina el límite líquido de un suelo expresando en porcentaje la humedad del suelo secado en el horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico.
LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS	I.N.V. E – 126 – 07	Se determina el límite plástico de un suelo, que es el contenido más bajo de agua, determinado por este procedimiento, en el cual el suelo permanece en estado plástico. El Índice de Plasticidad es el tamaño del intervalo de contenido de agua, expresado como un porcentaje de la masa seca de suelo, dentro del cual el material está en un estado

LABORATORIO	NORMA	DESCRIPCIÓN
		plástico (LL-LP).
DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE CONTRACCIÓN DE LOS SUELOS	I.N.V. E – 127 – 07	Se determina el Límite de Contracción de un suelo fino en porcentaje, que representa el contenido de agua necesario para llenar los vacíos de un suelo cohesivo dado (secado al horno), cuando su relación de vacíos es la más baja.
DETERMINACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS (EXPANSION LIBRE)	I.N.V. E – 132 – 07	Se mide el potencial de expansión de un suelo y la magnitud de hinchamiento que se pueda producir, y los resultados se comparan con tablas específicas.
CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS	I.N.V. E – 151 – 07	Se determina la rata y la magnitud de la consolidación de muestras de suelos cuando se confinan lateralmente y se drenan axialmente mientras se someten a incrementos controlados de esfuerzo vertical.
DISPERSABILIDAD POR TUBIFICACIÓN	NLT-207/91	Se utiliza para obtener una medida directa de la dispersabilidad de suelos arcillosos compactados, altamente erosionables.
ENSAYOS PARA LA OBTENCIÓN DE LA CURVA DE RETENCIÓN	TESIS DOCTORAL UNIVERSIDAD DE CATALUÑA	Evolución y distribución del contenido de agua en una barrera de arcilla.
ENSAYOS EDOMETRICOS CON CONTROL DE SUCCIÓN		Análisis de los cambios de humedad y el estado de tensiones.
ENSAYOS DE MEDIDA DE DILATACION TÉRMICA		Fundamento del movimiento del agua líquida después del sellado.
ENSAYOS PARA LA OBTENCIÓN DE LA PERMEABILIDAD SATURADA		Parámetro que regula la capacidad de transporte en un medio saturado.
ENSAYOS DE LA MEDIDA DE LA PERMEABILIDAD NO SATURADA		Fundamento del movimiento del agua líquida después del sellado.
ENSAYOS CON FLUJO DE CALOR		Medidas del coeficiente de deformación volumétrica térmica a varias temperaturas y con presiones de confinamiento distintas

LABORATORIO	NORMA	DESCRIPCIÓN
ESPECTROFOTOMETRIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA (AA)	ANÁLISIS QUÍMICOS	Medición de las especies atómicas por su absorción a una longitud de onda particular, siendo capaz de determinar y detectar cuantitativamente los elementos del Sistema Periódico.
DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)		Se basa en la respuesta que dan cada uno de los compuestos cristalinos de un material pulverizado al impacto de un haz de rayos X. Se obtiene un espectro gráfico que debe interpretar un experto. Esta técnica nos permite obtener el tipo de conglomerantes, las fases carbonatadas, los tipos de áridos, las fases cristalinas peligrosas, etc.
CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (CIC)		Capacidad que tiene un suelo para retener y liberar iones positivos, merced a su contenido en arcillas.
ANÁLISIS TERMOGRAVIMETRICO (TGA)		Se compone de una serie de técnicas instrumentales en las cuales se determinan parámetros físicos o químicos en función de la temperatura. En la técnica de TGA, se registran los cambios de peso de una muestra por efecto del cambio de temperatura, mediante rangos controlados de energía en una atmósfera específica.
ESPECTROSCOPIA DE INFRAROJO (IR)		Prácticamente TODOS los compuestos moleculares pueden manifestar una serie de bandas de absorción (eficacia en espectroscopia). Cada banda corresponde con un movimiento de vibración de un enlace en concreto dentro de la molécula: el conjunto constituye la huella dactilar del compuesto.

Fuente: Elaboración propia.

## 1.10 RESUMEN

Se presenta una tabla resumen de las referencias con mayor relevancia en este proyecto.

Tabla 1-6. Resumen de las referencias utilizadas.

ÍTEM	NOMBRE	AUTOR	AÑO DE PUBLICACIÓN	RECURSO		UBICACIÓN	DESCRIPCIÓN
				IMPR	DIGIT.		
1.1	Las Arcillas: Propiedades y Usos	Emilia García Romero: Universidad Complutense (Madrid) Mercedes Suárez Barrios: Universidad de Salamanca	-		X	<a href="http://campus.usal.es/~delcien//doc/GA.PDF">http://campus.usal.es/~delcien//doc/GA.PDF</a>	Estructura química; clasificación según bilaminares o trilaminares y dioctaédricos o trioctaédricos; PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS: Superficie específica, capacidad de intercambio catiónico, Capacidad de absorción, hidratación e hinchamiento, Tixotropía, plasticidad; arcillas industriales y sus usos.
1.2	Panorama general de las Arcillas Expansivas y su efecto sobre Edificaciones	Ing. Roberto Maldona G.	1991		X	<a href="http://www.escuelaing.edu.co/encuentro_nacional/2009/documentos/1_encuentro/panorama_general_arcillas_expansivas_efecto_sobre_edificaciones.pdf">http://www.escuelaing.edu.co/encuentro_nacional/2009/documentos/1_encuentro/panorama_general_arcillas_expansivas_efecto_sobre_edificaciones.pdf</a>	Identificación, variables, herramientas para investigarlas, cálculo de expansiones, efectos de la expansión sobre estructuras, sistemas de cimentación aptos, conclusiones.
1.3	El Suelo de Barranquilla, clasificación, zonas de riesgo, arcillas expansivas	-	-		X	<a href="http://www.arroyosdebaranquilla.org/barranquilla/135-el-suelo-de-barranquilla.pdf">http://www.arroyosdebaranquilla.org/barranquilla/135-el-suelo-de-barranquilla.pdf</a>	Descripción del suelo en B/quilla, ubicación de arcillas en esta ciudad y una pequeña descripción de sus características.

1.4	Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas	Ciencia e Ingeniería Neogranadina (Vol. 16 N° 2) Universidad Militar Nueva Granada	2006		X	<a href="http://www.umng.edu.co/www/resources/16-2_4.pdf">http://www.umng.edu.co/www/resources/16-2_4.pdf</a>	Características físico-químicas; estudio de estabilización con cal, cenizas volantes y aceite sulfonado; ensayo de compactación normal (ASTM D 698), Ensayo de expansión Lambe (PE) (ASTM D 4546) y el ensayo de índice de expansividad (IE) (ASTM D 4829). Evaluación del potencial de expansión de acuerdo con NSR-98.
1.5	Patologías por arcillas expansivas	-	-		X	<a href="http://campus.educar.org/file.php/1/moddata/forum/71/12305/patologia18.pdf">http://campus.educar.org/file.php/1/moddata/forum/71/12305/patologia18.pdf</a>	Naturaleza y comportamiento, ensayos para la determinación de la expansividad, Descripción y origen de los daños, prevención y reparación de daños, análisis y conclusiones.
1.6	Principios de Ingeniería de Cimentación (Principles of Foundation Engineering), 5ta edición (Capitulo 13.8-13.10)	Braja M. Das / California State University, Sacramento	-		x	-	Naturaleza general de las arcillas expansivas, Laboratorios para la medida de la hinchamiento: Prueba de hinchamiento desenfrenado, Prueba de la Presión de Hinchamiento y Prueba del índice de hinchamiento libre modificado; Clasificación de suelos expansivos basado en pruebas de índices en E.E.U.U., Consideraciones para la cimentación.

1.7	Various Aspects of Expansive Soils	-	2004		x	<a href="http://web.mst.edu/~rogersda/expansive_soils/Various%20Aspects%20of%20Expansive%20Soils.pdf">http://web.mst.edu/~rogersda/expansive_soils/Various%20Aspects%20of%20Expansive%20Soils.pdf</a>	Correlaciones simples entre la plasticidad del suelo y el potencial de expansión, ensayos de identificación, comportamiento del agua en suelos expansivos, Coeficiente de Extensibilidad Lineal, Cambio de Volumen.
1.8	Foundations on Expansive Soils	University of Iowa	2002		x		Naturaleza de los suelos expansivos, laboratorios para evaluarlos, prevención del daño estructural causado por suelos expansivos.
1.9	Laboratorios empleados en la caracterización de arcillas.	-	2010		x	-	Recopilación de todos los laboratorios encontrados en todos los libros/documentos anteriores que se pueden aplicar a las arcillas expansivas.

Fuente: Elaboración propia.

## 2 LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ARCILLAS EXPANSIVAS

Se ha visto en anteriores proyectos la dificultad de encontrar suelos de características expansivas, es por esto que un paso en este proyecto es buscar diferentes suelos que podrían tener características expansivas y ensayarlas para obtener sus propiedades, y así, recomendar un suelo para el modelo.

### 2.1 LOCALIZACIÓN

En el territorio nacional se encontraron cuatro posibles muestras de suelos plásticos en los departamentos de Santander y Atlántico:

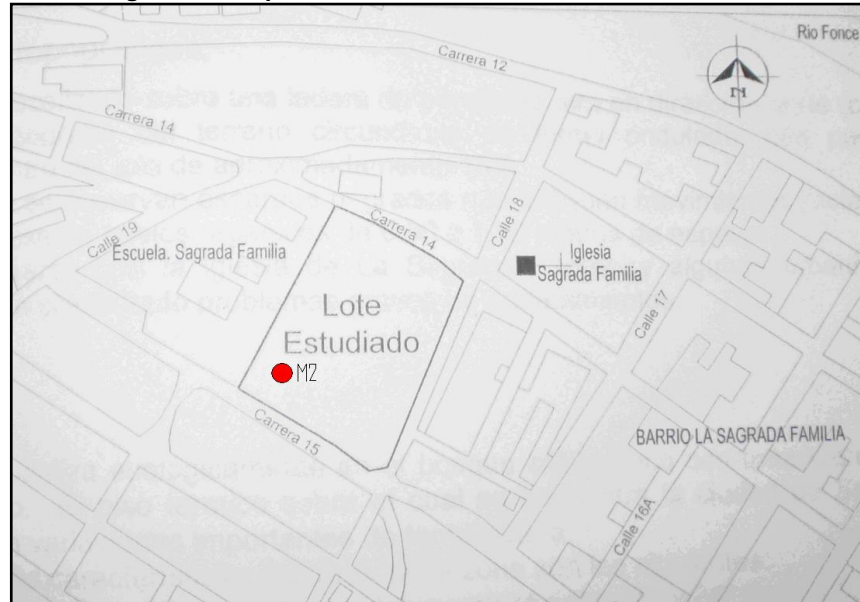
Figura 2-1. Posibles localizaciones de arcillas expansivas en Colombia.



Fuente: <http://www.aikidoaikido.com.ar/?q=node/1529>



**Figura 2-3. Mapa locación Muestra 2 en San Gil, Santander.**



Fuente: Proyecto Sagrada Familia San Gil.

### **Muestra 3**

Santander, Pinchote.

Barrio Bicentenario.

**Figura 2-4. Mapa locación Muestra 3 en Pinchote, Santander.**



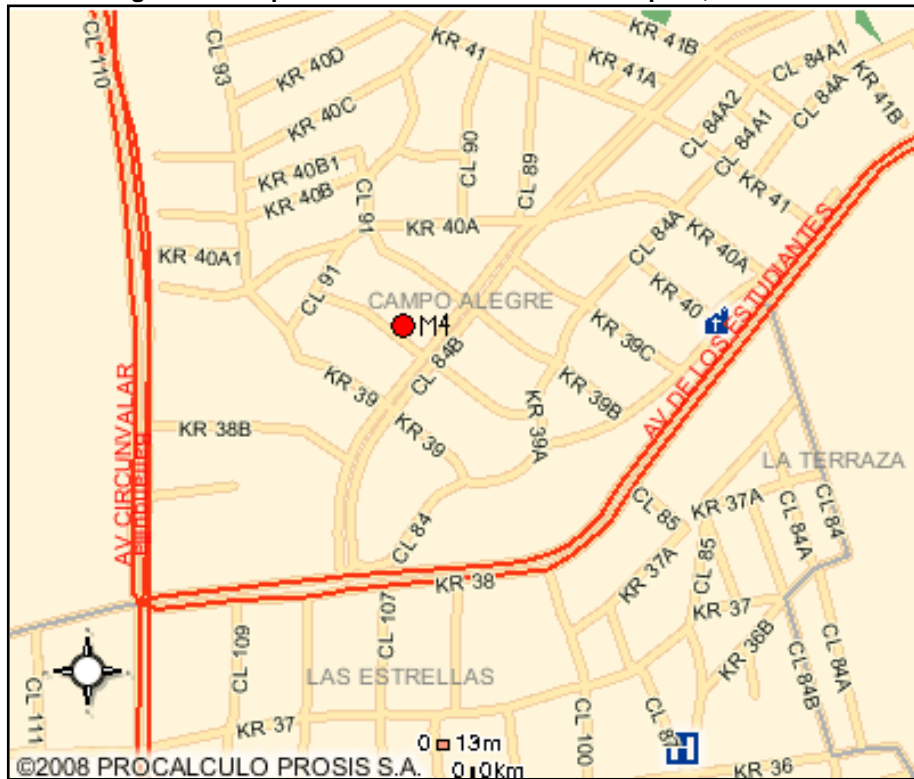
Fuente: Google Earth.

## Muestra 4

Atlántico, Barranquilla, Sector Campo Alegre.

Conjunto Residencial Altos del Campo.

Figura 2-5. Mapa locación Muestra 4 en Barranquilla, Atlántico.







Fuente:

<http://www.mapas.com.co/VisorMPC2008/colombia.visor/visor.jsp?mapaction=centerEnv&cuadroMayorX=-73.0705884893464&cuadroMayorY=7.1744479027982&cuadroMenorX=-73.1998429275595&cuadroMenorY=7.0547678674157>

## 2.2 DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS

Tabla 2-1. Descripción general de las muestras escogidas.

MUESTRA	IMAGEN	COLOR	DESCRIPCIÓN GEOLOGICA GENERAL
1 Bucaramanga		Amarillo	Depósitos de ladera, abanicos aluviales, compuestos por limos plásticos, quebradizos.
2 San Gil		Marrón amarillento	Suelos coluviales compuestos por arcillas plásticas, firmes, húmedas, poco permeables, resistentes.
3 Pinchote		Negro	Depósitos aluviales compuestos por arcillas arenosas, duras.

<p>4 Barranquilla</p>		<p>Amarillo verdoso</p>	<p>Calizas arenosas, margosas y margas (roca caliza — arcillosa — caliche), arcilla con materia orgánica oscura y partículas calcáreas blancas</p>
---------------------------	---	-----------------------------	--

Fuente: Elaboración propia.

### 2.3 DESCRIPCIÓN DE TOMA DE LA MUESTRA

A continuación se presenta una breve descripción del cómo se realizó la toma de las distintas muestras usadas en esta tesis.

Tabla 2-2. Descripción de la toma de las muestras.

MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN
<p>1 Bucaramanga</p>	<p>1,50</p>	<p>En el sitio de toma de la muestra se realizaban los trabajos de construcción del túnel del lado Oriente de la estación de Transferencia Provenza, para el Sistema de Transporte Masivo para Bucaramanga y su Área Metropolitana. Aprovechando las excavaciones iniciales del proyecto mencionado, se tomaron aproximadamente 150kg de suelo alterado.</p>
<p>2 San Gil</p>	<p>2,00</p>	<p>En el municipio de San Gil, Barrio La Sagrada Familia, se estaba realizando la construcción de la Urbanización Sagrada Familia. En el sector para los parqueaderos se cumplían los trabajos de construcción de un muro pantalla, por lo cual de este sitio se tomaron aproximadamente 100kg de muestra alterada.</p>
<p>3 Pinchote</p>	<p>0,50</p>	<p>Debido a los problemas presentados en las viviendas del Barrio Bicentenario, Municipio de Pinchote, el estudiante de ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander, Juan Carlos</p>

MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN
		Ruiz Carreño, proporcionó 10kg aproximadamente de suelo alterado de este sector.
4 Barranquilla	7,50-8,50	La Universidad Industrial de Santander realiza el estudio del suelo en el Sector Campo Alegre, Conjunto Residencial Altos del Campo, para diagnosticar si este suelo es apto para la construcción de vivienda. Se efectuó entonces, por medio de SPT, la extracción de muestras inalteradas para la realización de los distintos ensayos.

Fuente: Elaboración propia.

## 2.4 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

De las técnicas de laboratorio mencionadas en la tabla 1.9, a las muestras del numeral 2.1 se les realizaron las disponibles en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Industrial de Santander.

### 2.4.1 Análisis granulométrico de suelos por tamizado (I.N.V. E – 123 – 07).

Se realiza el lavado de la muestra en el tamiz de 75µm (No. 200), posteriormente se deja secar por completo en el horno, y en la tamizadora mecánica se sacuden los tamices con un movimiento lateral y vertical acompañado de vibración y recorriendo circunferencias de forma que la muestra se mantenga en movimiento continuo sobre la malla durante cinco minutos, cuando quedan partículas atrapadas en la malla, se separan con un cepillo y se reúnen con lo retenido en el respectivo tamiz.

Figura 2-6. Tamices escogidos para la granulometría.



Fuente: Registro fotográfico propio.

$$\% \text{ pasa tamiz } No = \frac{\text{Masa Total} - \text{Masa retenida en tamiz } No}{\text{Masa Total}} \times 100\%$$

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{Masa retenida en el tamiz}}{\text{Masa Total}} \times 100\%$$

El porcentaje más fino se calcula con:

$$\% \text{ Pasa} = 100\% - \% \text{ Retenido Acumulado}$$

#### 2.4.2 Análisis granulométrico por medio del hidrómetro (I.N.V. E – 124 – 07).

El tamaño aproximado de muestra requerida por la norma para limos y arcillas es de 50g (Masa seca). Se tomaron entonces 60g de muestra seca que pasa el tamiz de 75µm (No. 200). A continuación, se coloca la muestra en una cápsula donde se agrega agua destilada hasta que la muestra queda totalmente sumergida. En este momento, se agrega el agente dispersante: 25ml de solución de hexametáfosfato de sodio, dejando la muestra en remojo por una noche para que los terrones de suelo se desintegren.

Se transfiere la muestra con agua de la cápsula a un vaso de dispersión, lavando los residuos que quedaron en la cápsula con agua destilada y se agita durante el tiempo de un minuto. Se traslada la suspensión a un cilindro de sedimentación de

1000 ml y, tapándolo con la mano, se agita la suspensión vigorosamente durante varios segundos, con el objeto de remover los sedimentos del fondo y lograr una suspensión uniforme. Se continúa la agitación hasta completar un minuto, volteando el cilindro hacia arriba y hacia abajo alternativamente. Al terminar el minuto de agitación, se coloca el cilindro sobre una mesa.

Se pone en marcha el cronómetro y se introduce lentamente el hidrómetro en la suspensión. Se observan y anotan las dos primeras lecturas de hidrómetro, al minuto y a los dos minutos después de haber colocado el cilindro sobre la mesa, realizando las lecturas en el tope del menisco. Inmediatamente después de realizar la lectura de los 2 minutos, se extrae cuidadosamente el hidrómetro de la suspensión y se coloca en un cilindro con agua limpia. Luego se introduce nuevamente el hidrómetro y se realizan lecturas a los 5, 15, 30, 60, 120, 250 y 1440 minutos del inicio de la sedimentación, también se coloca un termómetro en la suspensión para la medición de la temperatura.

**Figura 2-7. Cilindro de sedimentación con dos muestras diferentes.**



Fuente: Registro fotográfico propio.

Los cálculos que se realizan son:

$$R = R' + C_m$$

R: Lectura de hidrómetro corregida por menisco.

R': Lectura de hidrómetro no corregida.

$C_m$ : Corrección por menisco.

$$D = \sqrt{\left[ \frac{30\eta}{981(G_s - 1)\gamma_w} \right]} \times \frac{L}{T}$$

D: Diámetro máximo del grano [mm].

$\eta$ : Coeficiente de viscosidad de medio de suspensión [Pa .s]

L: Profundidad efectiva, distancia desde la superficie de la suspensión hasta el nivel al cual la densidad de la suspensión está siendo medida.

T: Tiempo transcurrido desde el comienzo de la sedimentación hasta la toma de la lectura [mm].

$G_s$ : Gravedad específica de las partículas del suelo.

$\gamma_w$ : Gravedad específica del agente en suspensión (1.0 para el agua).

$$K = \sqrt{\left[ \frac{30\eta}{981(G_s - 1)\gamma_w} \right]}$$

K: Constante para facilitar el cálculo, tabulada.

### 2.4.3 Determinación del Límite Líquido de los suelos (I.N.V. E – 125 – 07).

Se toma una muestra de 100g de una porción de material completamente mezclado que pasa el tamiz de 0.425mm (No. 40), se coloca la muestra de suelo en la vasija de evaporación y se mezcla completamente con 15 a 20ml de agua destilada, agitándola, amasándola y tajándola con una espátula en forma alternada y repetida. Se realizan más adiciones de agua en incrementos de 1 a 3ml. Cuando el agua suficiente es mezclada perfectamente con el suelo hasta formar una pasta uniforme de consistencia dura, se coloca una cantidad adecuada de esta mezcla en la cazuela encima del punto donde ésta descansa en la base y

se comprime y extiende con la espátula para nivelarla y a la vez, dejarla con una profundidad de 10mm en el punto de su máximo espesor.

Se divide el suelo en la cazuela de bronce con una firme pasada del ranurador a lo largo del diámetro y a través de la línea central de la masa del suelo, de modo que se forma una ranura limpia.

Se levanta y golpea la cazuela girando la manija, a una velocidad de dos (2) revoluciones por segundo, hasta que las dos mitades de la pasta de suelo se pongan en contacto en el fondo de la ranura a lo largo de una distancia de cerca de 13mm. Se anota el número de golpes requeridos para cerrar la ranura.

Se transfiere el suelo sobrante en la cazuela de bronce a la cazuela de porcelana. La cazuela y el ranurador se lavan y se secan para prepararlas para el tanteo siguiente y se repite la operación anterior por lo menos en dos ensayos adicionales con el suelo restante en la vasija de porcelana, a la cual se le agrega agua suficiente para ponerlo en un estado de mayor fluidez.

El objeto de este procedimiento es obtener muestras de tal consistencia que al menos una de las determinaciones del número de golpes requeridos para cerrar la ranura del suelo se halle en cada uno de los siguientes intervalos: 25-35; 20-30; 15-25, de manera que la oscilación entre las 3 determinaciones sea de, por lo menos, 10 golpes.

**Figura 2-8. Preparación y disposición de la muestra en la cazuela para el ensayo de Límite Líquido.**



Fuente: Registro fotográfico propio.

$$\text{Contenido de Humedad} = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa del suelo secado al horno}} \times 100\%$$

El porcentaje de humedad se debe calcular con aproximación al entero más próximo.

#### **2.4.4 Límite Plástico e Índice de Plasticidad de los suelos (I.N.V. E – 126 – 07).**

Se toman aproximadamente 20g de la muestra que pase por el tamiz de 425µm (No.40), se amasa con agua destilada hasta que pueda formarse con facilidad una esfera con la masa de suelo. Se toma una porción de unos 6g de dicha esfera como muestra para el ensayo.

Para formar los rollos de masa de suelo de 3mm de diámetro, a razón de 80 a 90 rotaciones por minuto, contando como rotación un movimiento completo de la mano hacia adelante y hacia atrás, regresando así, a la posición inicial, se rueda la masa de suelo entre la palma de la mano o los dedos y un pedazo de papel que esta sobre una superficie horizontal y lisa, y solo con la presión necesaria para formar un rollo del diámetro uniforme en toda su longitud. El rollo se debe

adelgazar más con cada rotación, hasta que su diámetro alcance los 3mm, tomándose para ello no más de dos minutos.

**Figura 2-9. Formación de los rollos en el ensayo de Límite Plástico.**



Fuente: Registro fotográfico propio.

$$LP = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa del suelo secado al horno}} \times 100\%$$

Se realiza el mismo procedimiento para tres muestras del mismo suelo, se calcula el LP de cada una y se promedia para obtener el LP del suelo.

Y con el límite líquido hallado anteriormente, se procede a calcular el índice de plasticidad del suelo.

$$IP = LL - LP$$

IP = Índice de plasticidad

LL = Límite Líquido

LP = Límite Plástico

#### **2.4.5 Determinación de los factores de contracción de los suelos (I.N.V. E – 127 – 07).**

Se toma una muestra que pese aproximadamente 30g de una porción de material completamente mezclado, que pase el tamiz de 0.425mm (No.40). La muestra se

coloca en la vasija de evaporación de 115mm de diámetro (4 ½") y se mezcla completamente con agua destilada suficiente para llenar completamente los vacíos del suelo y para hacerla lo suficientemente pastosa, de manera que sea fácilmente manejable en la cápsula, evitando la formación de burbujas de aire.

El interior del recipiente para contracción se reviste con una capa delgada de grasa, para evitar la adhesión del suelo al recipiente.

Se coloca una cantidad de suelo húmedo igual o cercana a la tercera parte del volumen del recipiente de contracción en el centro de éste y se fuerza para que fluya hacia los bordes golpeándolo suavemente sobre una superficie firme y acolchonada. A continuación, se agrega una cantidad de suelo aproximadamente igual a la primera porción y se golpea el recipiente hasta que el suelo esté completamente compactado y todo el aire incluido haya sido expulsado. Se agrega más suelo y se continúan los golpes del recipiente hasta que éste se llene completamente y rebose por los lados. El exceso de suelo se quita con la regla metálica y el suelo adherido a la superficie externa del recipiente deberá ser limpiado. Cuando se haya llenado el recipiente, se engrasa, se limpia, y se pesa inmediatamente, se anota como masa del recipiente y del suelo húmedo (W1).

La masa de suelo se deja secar en el horno a temperatura de  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$  ( $230^{\circ} \pm 9^{\circ} \text{F}$ ), hasta alcanzar masa constante; se pesará anotándose como masa del recipiente y del suelo seco (W2).

La capacidad del recipiente de contracción ( $\text{cm}^3$ ), también volumen de la masa de suelo húmedo, se determina llenando el recipiente con mercurio hasta rebosar eliminando el exceso, haciendo presión con la placa de vidrio sobre la parte superior del recipiente y midiendo el volumen de mercurio retenido en éste con la probeta graduada. Se anotará como volumen de la masa de suelo húmedo (V).

El volumen de la masa de suelo seco se determina de la siguiente manera: El recipiente de vidrio se llena de mercurio hasta rebosar y el exceso de mercurio deberá removerse presionando firmemente la placa de vidrio con tres salientes sobre la parte superior del recipiente.

Cualquier porción de mercurio que se derrame, la cual puede quedar adherida a la parte externa del recipiente se deberá limpiar cuidadosamente. El recipiente lleno de mercurio se coloca en la vasija de evaporación de 150mm (6") y la pastilla de suelo seco se coloca sobre la superficie del mercurio. Esta será forzada cuidadosamente para sumergirla en el mercurio por medio de la placa de vidrio con las tres salientes, presionándola firmemente sobre el recipiente.

El volumen de mercurio que sea desplazado se mide en la probeta graduada y se anota como el volumen de suelo seco ( $V_0$ ).

**Figura 2-10. Implementos necesarios para realizar el laboratorio de Factores de Contracción.**



Fuente: Registro fotográfico propio.

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_3} \times 100$$

$W$ : Contenido de agua del suelo (%)

$W_1$ : Masa de suelo húmedo y recipiente (g).

$W_2$ : Masa de suelo seco y recipiente (g).

$W_3$ : Masa del recipiente (g).

$$LC = w - \frac{(V - V_0)\gamma_w}{W_0} \times 100$$

$LC$ : Límite de contracción [%].

$w$ : Contenido de agua del suelo [%].

V: Volumen de pastilla de suelo húmedo [cm<sup>3</sup>].

$V_0$ : Volumen de la pastilla de suelo secada al horno [cm<sup>3</sup>].

$W_0$ : Masa de la pastilla de suelo seco ( $W_0 = W_2 - W_3$ ) [g].

$\gamma_w$ : Masa unitaria del agua [g/cm<sup>3</sup>]. Aproximadamente 1 g/cm<sup>3</sup>.

#### **2.4.6 Expansión en Consolidómetro y Consolidación Unidimensional de los suelos (I.N.V. E – 151 – 07).**

Se moldea la muestra alterada, de acuerdo con el interior del diámetro del consolidómetro, forzándola directamente dentro del mismo.

Se arma el anillo, la muestra y las piedras porosas, con el conjunto del consolidómetro ensamblado se realiza la inundación y el humedecimiento constante de la muestra, se coloca este en el dispositivo de carga y se aplica una carga de asentamiento de 5kPa (0.05kg/cm<sup>2</sup>). Dentro de los cinco minutos siguientes a la aplicación de ésta, se ajusta el deformímetro para la lectura inicial o para la lectura de cero.

Se emplea un programa de carga, descarga y recarga, que reproduzca los cambios de esfuerzos. Para el proceso de cargue, se colocan cargas sobre el consolidómetro para obtener presiones sobre el suelo de 25, 50, 100, 200, 400 y 800kPa, o de 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 y 8.0kg/cm<sup>2</sup>, con cada carga mantenida constante durante dos horas, donde se anota el espesor de la muestra o el cambio de ésta antes de aplicar cada incremento de carga.

El proceso de rebote, se realiza descargando el suelo mediante reducciones de la carga en orden inverso 400 y 200kPa. Y luego se procede a su recarga en 200, 400 y 800kPa.

Figura 2-11. Muestra preparada y dispuesta en el Consolidómetro.



Fuente: Registro fotográfico propio.

Porcentaje de compresión, [%]:

$$\%compresión = \frac{Altura\ del\ anillo}{Altura\ del\ anillo - Altura\ final\ de\ compresión} \times 100\%$$

Porcentaje de recuperación, [%]:

$$\%recuperación = \frac{Altura\ del\ anillo - Altura\ final\ de\ compresión}{Altura\ final\ de\ compresión - Altura\ final\ de\ descarga} \times 100\%$$

#### 2.4.7 Expansión Libre (I.N.V. E – 132 – 07).

Se prepara la muestra alterada de igual forma que para el ensayo de consolidación. Después de colocada la muestra en el consolidómetro, se le aplica una carga que haga que el anillo flotante toque la piedra porosa superior de una forma muy superficial, casi como si no tuviera ningún peso al dial del extensómetro, y éste indique la expansión libre de la muestra a las 24 horas. Este procedimiento de carga hace retornar la muestra, en cuanto es posible, a la relación de vacíos de campo real, ya que la extrusión permite que las muestras reboten inmediatamente en forma elástica.

Figura 2-12. Consolidómetro en el ensayo de Expansión Libre.



Fuente: Registro fotográfico propio.

$$EL = \frac{Lectura - H_{ANILLO}}{H_{ANILLO}} \times 100$$

EL = Expansión libre

H<sub>ANILLO</sub> = Altura del anillo de consolidación

## 2.4.8 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

En el anexo A, se presentan los formatos de laboratorio de cada una de las muestras, y a continuación se relacionan los resultados obtenidos:

Tabla 2-3. Resultados de Granulometría aplicados a las muestras en estudio.

LOCALIZACIÓN	MUESTRA	Prof. (m)	Granulometría por Tamizado			Granulometría por Hidrómetro		
			% Gravas	% Arenas	% Finos	% Arena fina	% Limo	% Arcillas
Bucaramanga	1	1,50	0,00	49,94	50,06	53,33	23,34	23,33
San Gil	2	2,00	0,00	35,88	64,12	63,33	10,00	26,67
Pinchote	3	0,50	0,00	23,40	76,60	51,67	3,33	45,00
Barranquilla	4	7.50 - 8.50	MATERIAL FINO			24,00	2,00	74,00

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 2-4. Resultados de laboratorios restantes aplicados a las muestras en estudio.**

MUESTRA	Límites de Atterberg			Factores de contracción				Consolidación		% Expansión Libre
	%LL	%LP	%IP	%LC	RC	CV	CL	% Compresión	% Recuperación	
1	59	37	21	11,46	1,89	27,12	7,69	3,00	0,36	2,18
2	51	23	28	14,21	2,03	50,00	12,64	13,35	0,52	4,86
3	77	29	48	13,79	1,93	50,00	12,64	6,95	0,54	4,48
4	85	19	66	7,82	1,7	32,38	8,93	26,9	64,22	-

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

**Tabla 2-5. Simbología.**

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
LL	Límite Líquido
LP	Límite Plástico
IP	Índice de Plasticidad
LC	Límite de Contracción
RC	Relación de Contracción
CV	Cambio Volumétrico
CL	Contracción Lineal

Fuente: Elaboración propia.

#### **2.4.9 CLASIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS**

Existen diversos autores que proponen tablas y graficas para determinar factores como el potencial expansivo de los suelos, el hinchamiento o el potencial de cambio volumétrico, en este trabajo se presentan los siguientes:

- ✓ Según la norma INV. E – 132- 07: Tabla 01. Potencial expansivo de los suelos

Tabla 2-6. Potencial Expansivo de los suelos.

Grado de Expansión	LL	IP	$\tau_{nat}^{tsf}$ (KPa)
Elevado	> 60	> 35	> 383
Marginal	50-60	25-35	144 - 383
Bajo	< 50	< 25	< 144

Fuente: Norma INV. E – 132- 07

Las muestras estudiadas tendrían:

Tabla 2-7. Clasificación de las muestras de acuerdo a la tabla 2-6.

MUESTRA	GRADO DE EXPANSIÓN
1	MARGINAL
2	MARGINAL
3	ELEVADO
4	ELEVADO

Fuente: Elaboración propia.

- ✓ Según la norma INV. E – 132- 07: Tabla 03. Límite de consistencia y potencial de cambio volumétrico (PCV),

Tabla 2-8. Límite de Consistencia y potencial de cambio volumétrico PCV.

PCV	IP		Límite de Contracción
	Zona Seca	Zona Húmeda	
Bajo	0-15	0-30	>12
Moderado	15-30	30-50	10-12
Alto	> 30	> 50	< 10

Fuente: Norma INV. E – 132- 07

Tabla 2-9. Clasificación de las muestras de acuerdo a la tabla 2-8.

MUESTRA	PCV
1	BAJO

2	BAJO
3	BAJO
4	ALTO

Fuente: Elaboración propia.

- ✓ Para hallar el potencial de hinchamiento por medio de los límites de Atterberg, O'Neill y Poormoayed (1980) proponen la siguiente tabla.

**Tabla 2-10. Potencial de Hinchamiento por medio de los límites de Atterberg.**

<b>Límite líquido</b>	<b>Índice de Plasticidad</b>	<b>Potencial de hinchamiento (%)</b>	<b>Clasificación del potencial de Hinchamiento</b>
< 50	< 25	<0.5	Bajo
50-60	25-35	0.5-1.5	Marginal
> 60	> 35	> 1.5	Alto

Fuente: Principios en la Ingeniería de Cimentación.

Donde,

Potencial de Hinchamiento: Hinchamiento vertical bajo la presión de sobrecarga.

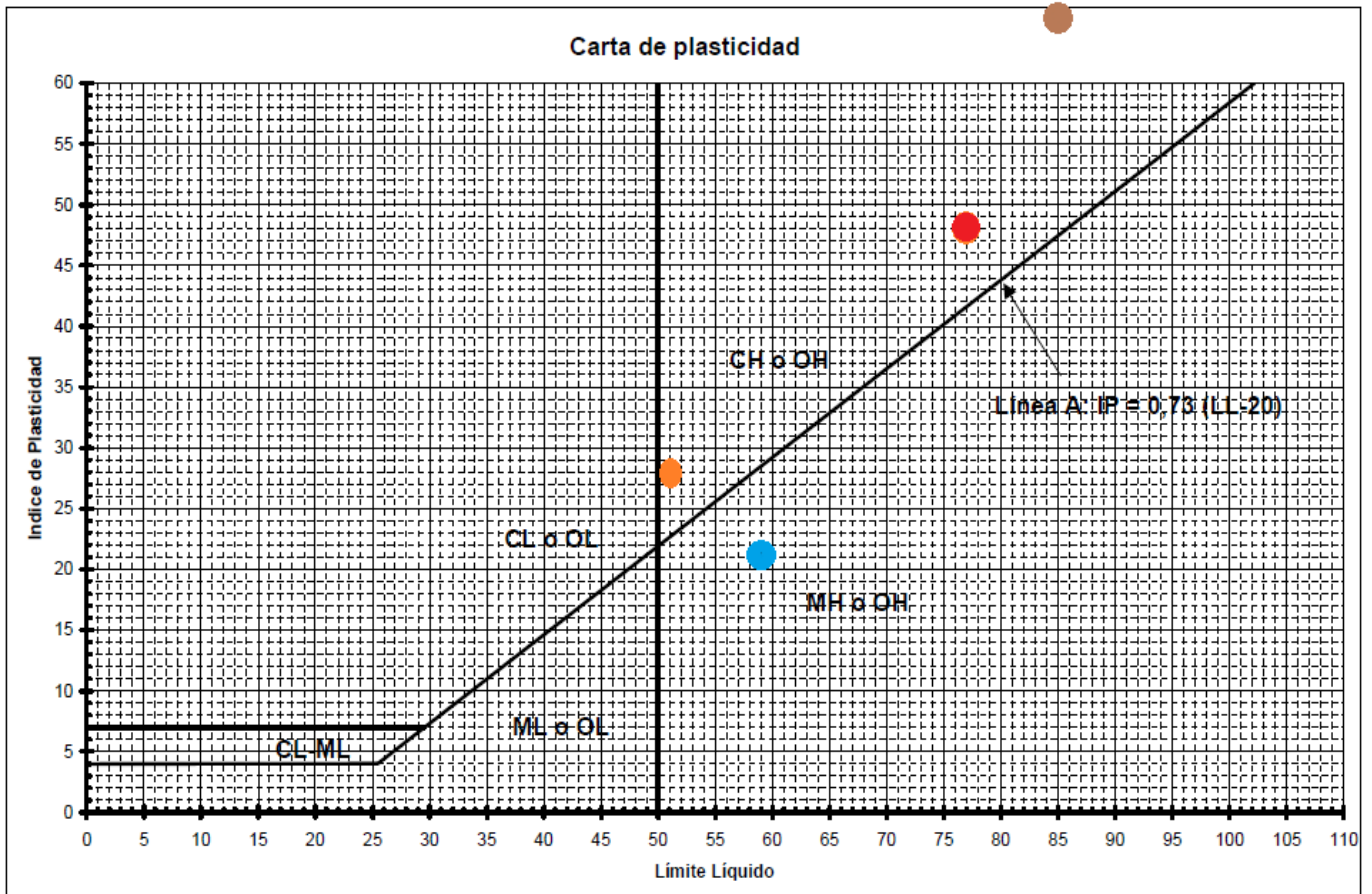
**Tabla 2-11. Clasificación de las muestras de acuerdo a la tabla 2-10.**

<b>MUESTRA</b>	<b>% POTENCIAL DE HINCHAMIENTO</b>	<b>POTENCIAL DE HINCHAMIENTO</b>
1	0,5 – 1,5	MARGINAL
2	0,5 – 1,5	MARGINAL
3	> 1.5	ALTO
4	> 1.5	ALTO

Fuente: Elaboración propia.

- ✓ Al realizar el análisis granulométrico, se puede ver que los suelos están compuestos principalmente por material fino. Con estos datos y el uso de la Carta de plasticidad de Casagrande,

Figura 2-13. Carta de Plasticidad de Casagrande.



Fuente: <http://fiselect2.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Carta%20de%20Plasticidad.pdf>

Finalmente se tiene:

**Tabla 2-12. Clasificación de las muestras según la carta de plasticidad de Casagrande y el Potencial de Hinchamiento.**

LOCALIZ.	MUESTRA	CARTA DE PLASTICIDAD	Prof. (m)	DESCRIPCIÓN	CLASIFICACION	PCV	POTENCIAL DE HINCHAMIENTO
B/manga	1		1,50	Limo de alta plasticidad	MH	BAJO	MARGINAL
San Gil	2		2,00	Arcilla de media plasticidad	CH	BAJO	MARGINAL
Pinchote	3		0,50	Arcilla de alta plasticidad	CH	BAJO	ALTO
B/quilla	4		7.50 - 8.50	Arcilla de alta plasticidad	CH	ALTO	ALTO

Fuente: Elaboración propia.

### **3 DISEÑO DEL MODELO DE LABORATORIO**

En este capítulo se desea realizar un modelo de laboratorio que represente el comportamiento en campo, de diferentes tipos de cimentación sobre un suelo plástico, para observar los cambios volumétricos y el comportamiento del suelo en general. Para esto, se procederá a plantear los aspectos que permitan en el diseño del modelo la observación de lo que se puede presentar en campo.

#### **3.1 TIPOS DE CIMENTACIÓN**

Como orientación para el planteamiento del modelo se estudiaron las cimentaciones generalmente utilizadas en este tipo de suelos.

##### **3.1.1 Cimentaciones especiales.**

###### **3.1.1.1 Pozos de cimentación.**

Un pozo de cimentación, o caisson (su nombre en francés), es una cimentación semiprofunda utilizada en suelos superficiales blandos. A medida que se va hundiendo el terreno, se va construyendo el pozo.

Estos tienen normalmente una sección transversal circular, pero también los hay de forma cuadrada, rectangular o elíptica. El diámetro de las secciones circulares varía desde 0.6m a 2m.

Según el tipo de sollicitación, los pozos pueden ser de hormigón armado o de hormigón en masa. Los pozos deben arriostrarse en dos direcciones mediante vigas de atado.

Se describe a continuación, el proceso de construcción de un pozo de cimentación:

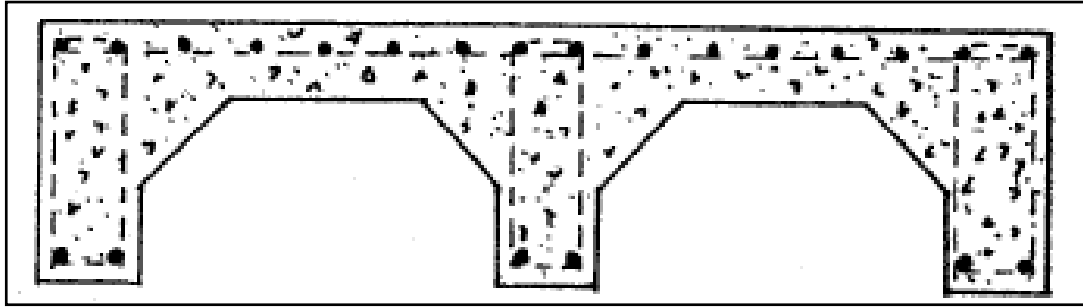
1. Se construye un cabezal, generalmente de hormigón armado, con una generatriz externa provista de una cuchilla vertical y una lámina de acero anclada

2. Se posiciona el cabezal sobre el punto donde se hundirá en el suelo.
3. Se comienza la construcción de los primeros metros del cuerpo del pozo de cimentación. Éste mide de 5 a 10 centímetros menos que el contorno externo del cabezal para que la fricción de la pared con el suelo sea menor.
4. Se empieza la excavación de la tierra al interior del pozo, y su propio peso hará que empiece a hundirse.
5. A medida que se va hundiendo, se sigue construyendo la pared y se baja unos metros hasta situarse en la profundidad deseada.
6. Una vez se llega a esa profundidad, se construye un tapón hecho de hormigón en la base, para que el peso de la estructura que se construirá encima de esta cimentación se reparta uniformemente en toda la sección del pozo. Si la sección es circular, su longitud está entre 12 - 15 metros, si la sección es rectangular, su longitud es de 20 metros.
7. Una vez sellado el pozo, se puede rellenar con algún material inerte o incluso se puede dejar vacío. En el caso de dejar sin relleno, el nivel freático es más elevado que el fondo, al paso del tiempo el agua estará equilibrada fuera y dentro. Esto ayuda también a que el peso de la estructura sea menor.
8. Para pozos de cimentación en agua, el pozo se construye en el borde del río o lago y luego se traslada al lugar permanente y se hunde hasta la profundidad deseada. Si la profundidad es prudente, se dispone de una cámara cerrada donde trabajan los obreros encargados del hundimiento al pozo.

#### **3.1.1.2 Cimentación waffle.**

Conocida como “waffle” en EU, o llamado losa de cimentación con contratrabes, donde los contratrabes soportan la construcción y las cavidades permiten la expansión del suelo.

Figura 3-1. Cimentación Tipo Waffle.



Fuente: <http://www.biblioteca.uson.mx/digital/tesis/docs/7550/Capitulo2.pdf>

### 3.1.2 Cimentaciones por losa.

Las Cimentaciones por Losa (Cimentaciones por Placa o Plateas de Fundación) son cimentaciones superficiales que se disponen en plataforma, las cuales transmiten las cargas del edificio al terreno distribuyendo los esfuerzos uniformemente.

Estas losas llevan dos armaduras, una en la parte superior para contrarrestar la contrapresión del terreno y el empuje del agua subterránea y una inferior debajo de las paredes portantes y pilares, para excluir en lo posible la producción de flechas desiguales.

Es apropiado utilizar la cimentación por losa cuando:

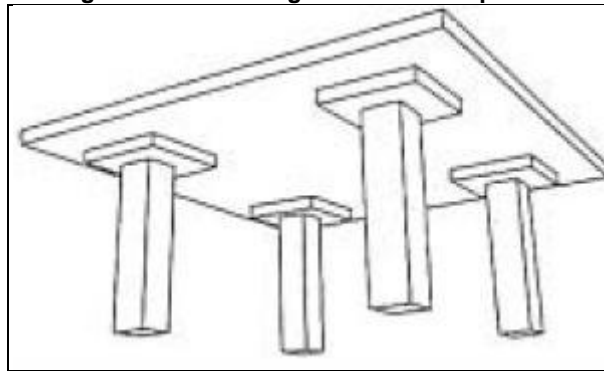
- La superficie de la construcción es pequeña en relación al volumen (rascacielos, depósitos, silos).
- La base de cimientos calculada resulta tal que la transmisión de carga a 45° representa una profundidad excesiva.
- Estratificación desigual en el terreno y son previsibles asientos irregulares.
- El terreno de asiento es flojo y de gran espesor, resultando en pilotes muy largos.
- Se quiere construir un sótano en seco en una obra asentada sobre una capa freática (*excavación en forma de cubeta*). Por lo tanto, conviene construir una losa general de apoyo de toda la estructura del edificio. Esta forma tiene la ventaja de que ofrece una buena disminución en el riesgo de

asiento de la estructura. Así la cimentación transmite las cargas del edificio al terreno mediante una superficie igual o superior a la de la obra.

### 3.1.2.1 Diseño de la losa de cimentación.

La losa puede diseñarse con un mismo espesor y de sección constante en toda su longitud, o como una losa más delgada con refuerzos en los apoyos de los pilares mediante capiteles en forma de setas invertidas; de allí viene la denominación de fungiformes (losa de construcción que emplea capiteles y ábacos en los apoyos). Pueden ser también vigas longitudinales y transversales que enlazan los apoyos portantes que soportan una losa más delgada.

Figura 3-2. Losa fungiforme o con capiteles.



Fuente: [http://www.construmatica.com/construpedia/Archivo:QuadernsEstructures\\_22Fig5.jpg](http://www.construmatica.com/construpedia/Archivo:QuadernsEstructures_22Fig5.jpg)

Espesores Mínimos según la Norma Tecnológica de la Edificación, Cimentaciones Superficiales, Losas, NTE-CSL de España.

La cimentación en losa debe tener un canto mínimo de 30cm sobre una base de hormigón pobre o de limpieza. El rango normal es de 50 a 120cm, según el tipo de edificio que soportan.

Este tipo de cimentación se construye como una superficie de apoyo continua para igualar las presiones y formar un arriostamiento en todos los puntos de apoyo.

### 3.1.2.2 Estructura.

La estructura en hormigón armado permite reducir los posibles asentos y responde en forma óptima en suelos con estratos sensiblemente homogéneos y cuando el edificio reparte los esfuerzos sobre la losa con una retícula que guarda simetría geométrica.

Puede conseguirse máxima rigidez con poco consumo de material envolviendo en hormigón un sistema de piezas huecas o de relleno.

Las losas son muy caras ya que cargan el suelo con una tensión inferior a la tensión máxima de hinchamiento del mismo. Si el hinchamiento es uniforme bajo la edificación, la losa contribuye a igualar las deformaciones verticales, compensando la distorsión angular y evita daños a la estructura. Una forma de mejorar este tipo de cimentación es con encachados, que consisten en gravas debajo de la losa sin finos.

Las gravas distribuyen la tensión bajo la losa en el terreno de forma que las cargas bajas se reparten. El hinchamiento puede resolverse entre las gravas y la ascensión del suelo no vence la carga puntual del apoyo del elemento de grava.

La presión máxima que puede soportar el suelo en la base de una losa en un depósito profundo de arcilla es dada por la ecuación:

$$q_d = 2.85q_u \left( 1 + 0.3 \frac{B}{L} \right)$$

De acuerdo a esta ecuación, la carga que produce falla es prácticamente independiente del ancho de la losa. La carga compresiva no confinada requerida para soportar, sin margen de seguridad, una presión de suelo de 1 ton/sq ft es de 0.3 ton/sq ft. Para proveer un factor de seguridad de 3, es requerida una carga compresiva no confinada de 1 ton/sq ft. Esto sugiere que el factor de seguridad en losas largas en depósitos de arcilla es relativamente pequeño.

$q_d$ , en la ecuación 15.7 es la presión de elevación de la base de la losa en exceso que ejerce la subcarga circundante.

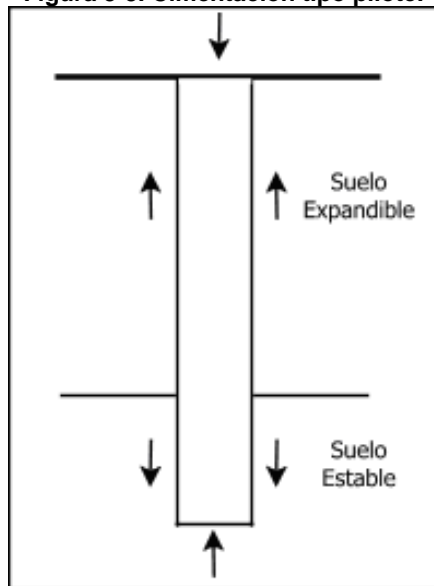
Al incrementar la profundidad de excavación, la presión que puede ejercer el edificio aumenta. Esto se logra incrementando el número o la profundidad de los sótanos. Por otro lado, el área de una losa no puede alargarse apreciativamente en un intento de reducir la presión del suelo porque no es factible extender la losa más de unos pies más allá del edificio propiamente. Por lo tanto, si una cimentación en losa se va a construir en un sitio donde la arcilla es demasiado suave para brindar soporte en un nivel normal de sótano, el único método seguro es bajar la elevación de la base de la losa.

Para la Presión admisible del suelo en las losas, el factor de seguridad contra falla en el suelo debajo de la losa en arcilla no debería ser menor de 3 bajo cargas normales, o menor de 2 bajo cargas extremas especificadas por el código del edificio. Incluso con este requerimiento, el peligro de romper el suelo es mucho mayor que en una estructura similar en arena. En varios casos la falla ha ocurrido por sobrecargar el subsuelo arcilloso en estructuras rígidas muy largas.

### **3.1.3 Cimentación con pilotes.**

Cuando el suelo situado al nivel en que se desplantaría normalmente una zapata o una losa de cimentación, es demasiado débil o compresible para proporcionar un soporte adecuado, las cargas se transmiten a material más adecuado a mayor profundidad por medio de pilotes. Los pilotes son miembros estructurales con un área de sección transversal pequeña, comparada con su longitud, y usualmente se instalan usando una piloteadora que tiene un martinete o un vibrador, hechos de acero, concreto y/o madera. A pesar del costo, el uso de pilotes es a menudo necesario para garantizar la seguridad estructural.

Figura 3-3. Cimentación tipo pilote.



Fuente: <http://www.mypfundaciones.com/index.php?s=preexcavado&ss=01>

En casos de suelos expansivos y colapsables que están presentes por debajo de la superficie del terreno. Los suelos expansivos se hinchan y se contraen conforme al contenido de agua crece y decrece y su presión de expansión es considerable. Si se usan cimentaciones superficiales en tales circunstancias, la estructura sufrirá daños considerables. Sin embargo, las cimentaciones con pilotes se consideran como una alternativa cuando éstos se extienden más allá de la zona activa de expansión y contracción.

### 3.1.3.1 Partes de una cimentación por pilotaje.

- Soporte o pilar: Elemento estructural vertical, que arranca del encepado.-  
Encepado: Pieza prismática de hormigón armado similar a una zapata aislada, encargado de recibir las cargas del soporte y repartirlas a los pilotes.
- Vigas riostras: Elementos de atado entre encepados. Son obligatorias en las dos direcciones si el encepado es de un solo pilote. En encepados de dos pilotes es obligatorio el arrojamiento en al menos una dirección, la perpendicular a la dirección de su eje de menor inercia.

- Fuste del pilote: Cuerpo vertical longitudinal del pilote. Las cargas son transmitidas al terreno a través de las paredes del fuste por efecto de rozamiento con el terreno colindante.
- Punta del pilote: Extremo inferior del pilote. Transmite las cargas por apoyo en el terreno o estrato resistente.

Los pilotes pueden alcanzar profundidades superiores a los 40m teniendo un diámetro de 2-4m, pudiendo gravitar sobre ellos una carga de 2000 ton.

### **3.1.3.2 Procedimiento de instalación en las condiciones del suelo.**

Se distinguen dos categorías referentes a diferencias básicas en las acciones sobre el suelo vecino al pilote durante la instalación y, por consiguiente, al comportamiento de los pilotes bajo carga.

1. Pilotes de desplazamiento: En este sistema el suelo es desplazado del espacio que va a ocupar el pilote, por acción de los esfuerzos de penetración. Pueden generarse una densificación, posiblemente benéfica, en los suelos granulares sueltos. En otros medios tiene lugar levantamientos del terreno, empujes sobre elementos vecinos y otras consecuencias casi siempre nocivas para estructuras y servicios aledaños al sitio de instalación. Dentro de esta categoría los más importante son:
  - a. Pilotes prefabricados, hincados por el impacto de martillos
  - b. Pilotes hincados por impacto y fundidos en el sitio
  - c. Pilotes atornillados
  - d. Pilotes penetrados mediante presión continua, como la producida por gatos
2. Pilotes preexcavados (o perforados): En este sistema de pilotaje, se remueve el suelo del espacio que va ocupar el pilote, al aplicar varias posibles técnicas de excavación o perforación, formando así una cavidad que en caso necesario se protege del derrumbe de sus paredes, en cuyo interior se funde el concreto integrante de cuerpo del pilote.

Después de conocer las características de las distintas cimentaciones, se decide trabajar por su uso en campo con:

- ✓ Pilotes
- ✓ Placas
- ✓ Cimentación tipo waffle

### 3.2 PROYECTOS

Para establecer un posible rango en las dimensiones destinadas para cimentación en el modelo, se busca con la ayuda de proyectos que contienen las cimentaciones escogidas anteriormente, proceder a proponer a partir de las medidas reales, dos esquemas a distintas escalas.

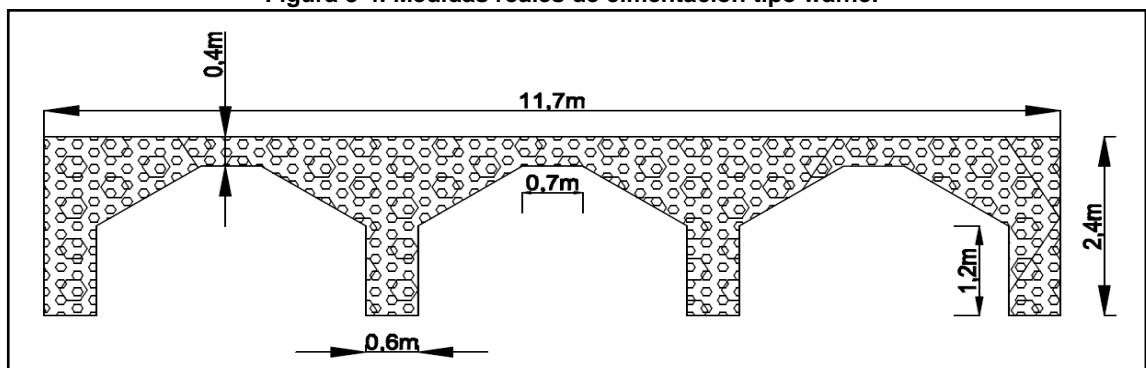
#### 3.2.1 Cimentación Especial Tipo Waffle.

Usando como guía una estructura construida en sistema de muros, con un peso de 79,54ton, de dos (2) pisos, destinado el primero como bodega y el segundo para oficinas, con cimentación tipo waffle, se procede a proponer dos esquemas a escala.

- ✓ ESQUEMA Y MEDIDAS DEL PROYECTO REAL

Área de cimentación 11,70m x 5,60m

Figura 3-4. Medidas reales de cimentación tipo waffle.

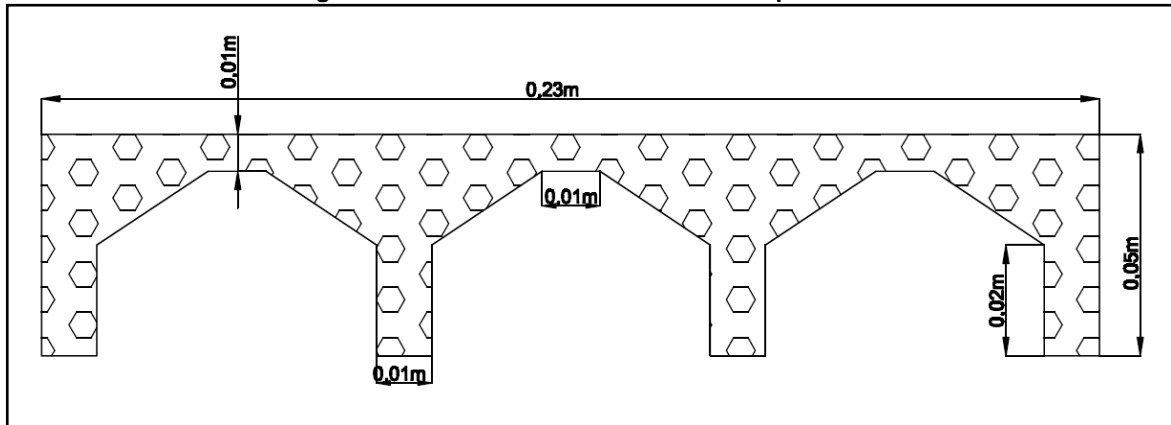


Fuente: Elaboración propia.

- ✓ ESQUEMA Y MEDIDAS DEL PROYECTO A ESCALA 1:  $\frac{1}{50}$

Área a escala 0,23m x 0,11m

Figura 3-5. Escala 1:1/50 de cimentación tipo waffle.

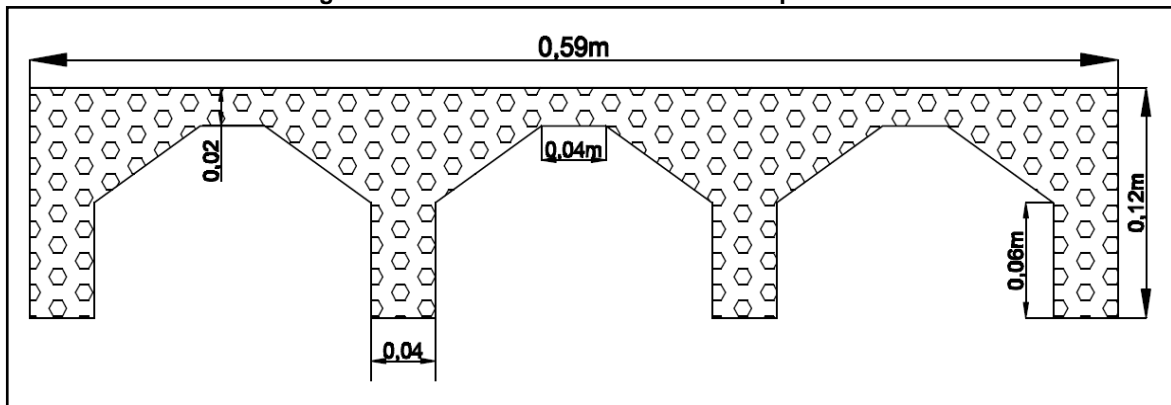


Fuente: Elaboración propia.

- ✓ ESQUEMA Y MEDIDAS DEL PROYECTO A ESCALA 1:  $\frac{1}{20}$

Área a escala 0,59m x 0,28m

Figura 3-6. Escala 1:1/20 de cimentación tipo waffle.



Fuente: Elaboración propia.

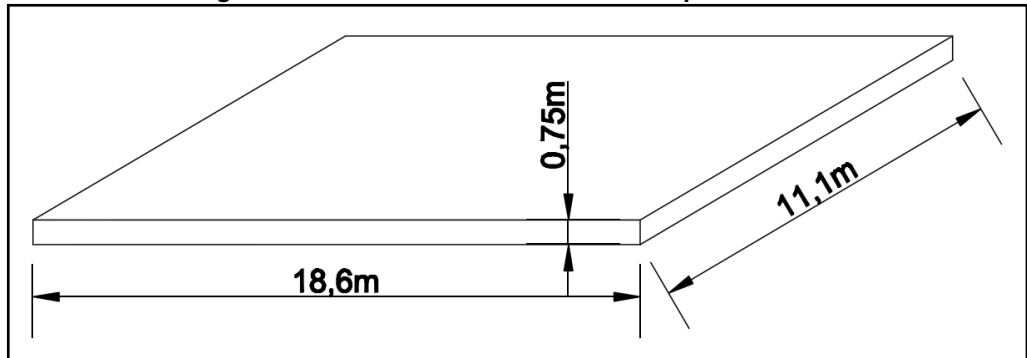
### 3.2.2 CIMENTACION POR LOSA

Orientados por una estructura construida en sistema pórtico, con un peso de 4784ton, de veinte (20) pisos para vivienda y con cimentación en losa, se procede a proponer dos esquemas a escala.

- ✓ ESQUEMA Y MEDIDAS DEL PROYECTO REAL

Área de cimentación 18,60m x 11,10m

Figura 3-7. Medidas reales de cimentación por losa.

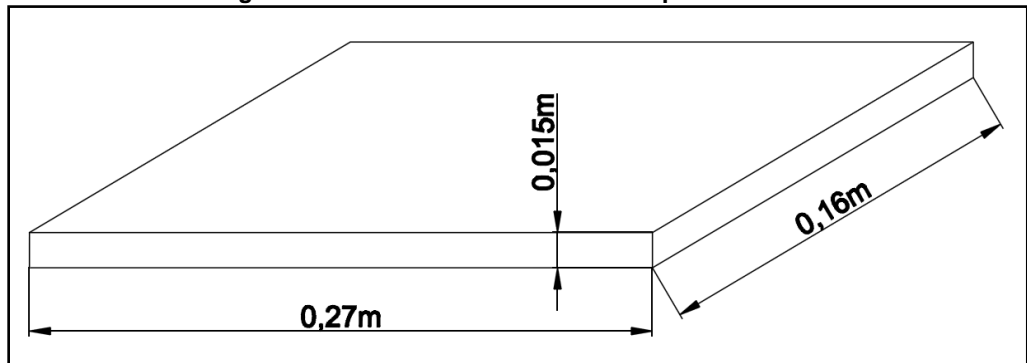


Fuente: Elaboración propia.

✓ ESQUEMA Y MEDIDAS DEL PROYECTO A ESCALA 1:  $\frac{1}{70}$

Área a escala 0,27m x 0,16m

Figura 3-8. Escala 1/70 de cimentación por losa.

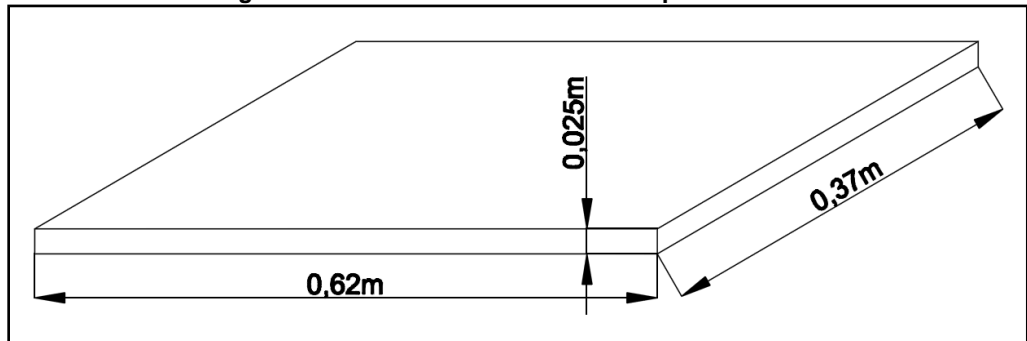


Fuente: Elaboración propia.

✓ ESQUEMA Y MEDIDAS DEL PROYECTO A ESCALA 1:  $\frac{1}{30}$

Área a escala 0,62m x 0,37m

Figura 3-9. Escala 1/30 de cimentación por losa.



Fuente: Elaboración propia.

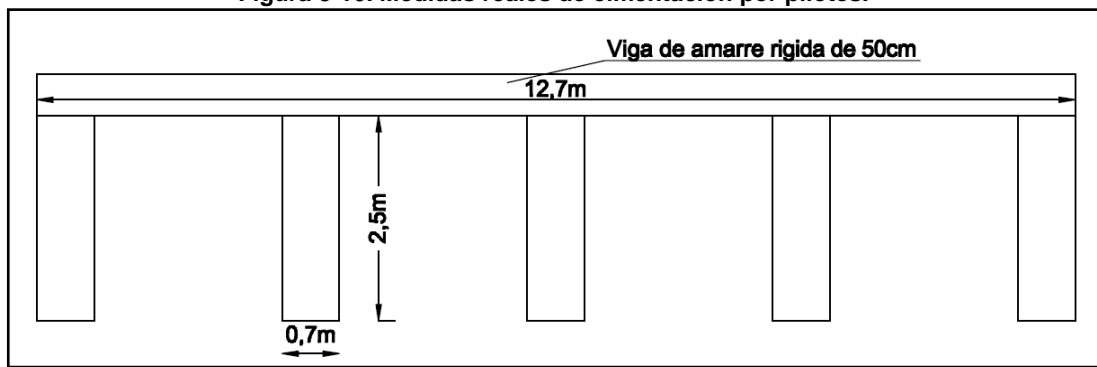
### 3.2.3 CIMENTACION CON PILOTES

Con la ayuda del proyecto en sistema p3rtico, con un peso de 796,99ton destinado para vivienda de cinco (5) pisos con dos apartamentos por piso y con una cimentaci3n en pilotes de concreto ciclópeo, se procede a proponer dos esquemas a escala.

#### ✓ ESQUEMA Y MEDIDAS DEL PROYECTO REAL

Área de cimentaci3n 12,70m x 8,95m

Figura 3-10. Medidas reales de cimentaci3n por pilotes.

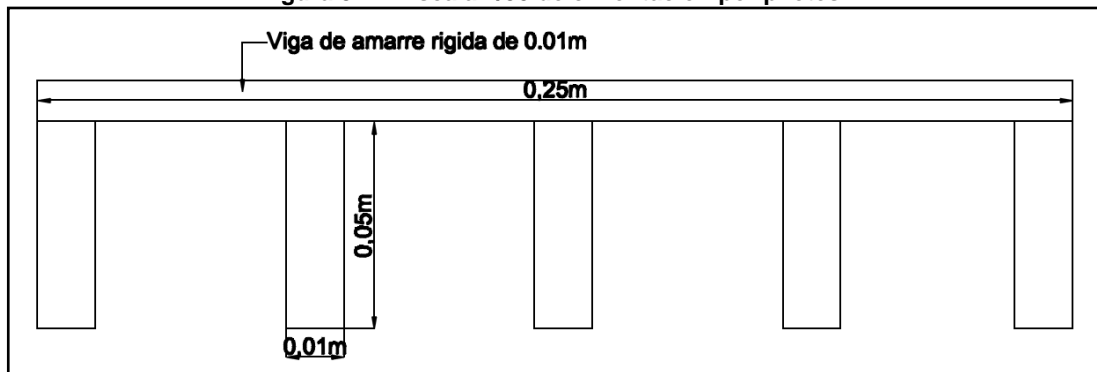


Fuente: Elaboraci3n propia.

#### ✓ ESQUEMA Y MEDIDAS DEL PROYECTO A ESCALA 1: $\frac{1}{50}$

Área a escala 0,25m x 0,18m

Figura 3-11. Escala 1/50 de cimentaci3n por pilotes.

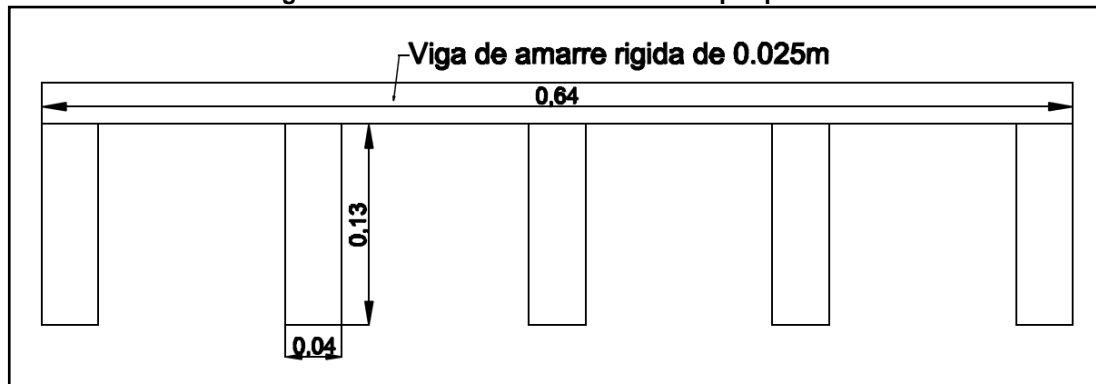


Fuente: Elaboraci3n propia.

#### ✓ ESQUEMA Y MEDIDAS DEL PROYECTO A ESCALA 1: $\frac{1}{20}$

Área a escala 0,64m x 0,45m

Figura 3-12. Escala 1/20 de cimentación por pilotes.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 PLANTEAMIENTO DE VARIABLES

En este numeral se procede a proponer y argumentar la utilización de las variables que representaran lo más fielmente posible las condiciones de campo y los métodos de medición a usar, para conocer el comportamiento del material.

#### 3.3.1 Preparación de la muestra.

La primera característica a definir en el modelo es la de precisar el cómo se realizará la disposición del material en el molde utilizado para el modelo. Se decide que la muestra será alterada debido a la dificultad del manejo del molde para la obtención de muestra inalterada; entonces, para describir la forma en que esta se compactará, se tomó como base lo descrito en la norma I.N.V.E. – 141 – 07, con las modificaciones pertinentes para este proyecto.

Para este caso, debido a que menos del 40% del material es retenido en el tamiz No. 4 (por ser arcillas expansivas), se proponen los métodos A y B de la norma mencionada.

##### 3.3.1.1 Método A

Si la muestra está húmeda al sustraerla del terreno, se deja secar al aire libre o se introduce al horno a una temperatura que no pase de 60°C. Una vez seca, se

rompen los terrones teniendo cuidado de no dañar el tamaño natural de las partículas.

Posteriormente se procede a pasar la cantidad suficiente del material que llene el recipiente por el tamiz No. 4 y se trabaja con todo aquello que pase de este tamiz. Se humedece con agua de hasta un 4% por debajo de la humedad óptima y se reparte en tres capas aproximadamente iguales, compactándolas con 25 golpes cada una con el martillo con una caída libre de 305 mm (12") por encima de la altura aproximada del suelo compactado.

### **3.3.1.2 Método B**

Se sigue el procedimiento descrito en el Método A, cambiando los golpes a 56 para la compactación de las tres capas.

### **3.3.2 Carga.**

Para cargar el suelo con el peso de la estructura que vaya a ser representada en el modelo se propone el uso de pesas de metal como las usadas para la realización de los laboratorios de suelos de la Universidad Industrial de Santander.

**Figura 3-13. Juego de pesas de metal propuestas.**



Fuente: <http://www.chicagodeportes.com/californiaol/Productos.php?categoria=20>

Figura 3-14. Tipos de pesas de metal.



Fuente: <http://www.fdsrl.com.ar/sitio/productos.php>

Y como factor de conversión del peso real, al que será aplicado en los modelos a escala, se propone el uso de la relación de presión.

$$Presion = \frac{Fuerza}{Area} \quad (14)$$

Si por ejemplo se realizara este procedimiento para la cimentación tipo waffle del numeral 3.2.1, se tendría:

$$\text{Con datos reales: } Presion = \frac{79,54}{65,52} \approx 1,20 \text{ tn/m}^2$$

Con los datos a escala  $1: \frac{1}{50}$ , y con el factor de presión hallado antes, se procede a encontrar la carga a representar en laboratorio:

$$Fuerza = Presion \times Area \rightarrow$$

$$Fuerza = 1,2 \text{ tn/m}^2 \times 0,0253 \text{ m}^2$$

$$Fuerza = 0,030 \text{ ton}$$

### 3.3.3 Deformación.

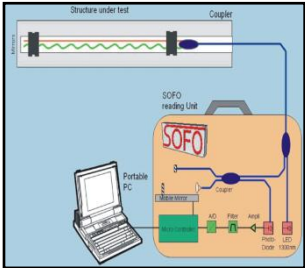


Para realizar la medición del cambio volumétrico que sufre el suelo expansivo, se propone el uso de un sensor, dispositivo que mide magnitudes físicas o químicas y las transforma en magnitudes eléctricas que se puedan cuantificar y manipular. Su función se resume en adaptar la señal que recibe para que la pueda interpretar otro dispositivo.

El sensor puede ser de indicación directa (como un termómetro) o indirecta (se conecta a un convertidor analógico o digital, computador o display y con éste se interpretan las medidas tomadas por el sensor).

Las magnitudes que mide un sensor son: temperatura, pH, humedad, fuerza, desplazamiento, presión, aceleración, distancia, posición, deformación, etc. La magnitud de interés en este proyecto es la de deformación del suelo bajo un efecto de carga, por lo cual se presentan las siguientes alternativas de sensores para su medición:

**Tabla 3-1. Medidores de la deformación del suelo.**

<b>MEDIDOR</b>	<b>SENSORES DE FIBRA ÓPTICA</b>	<b>DEFLECTÓMETRO DE MÚLTIPLES PROFUNDIDADES (MDD)</b>	<b>EXTENSÓMETRO MULTIFUNCIÓN CON SISTEMA DE MEDIDA EXTENSOMÉTRICO</b>
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<p>Detecta la alteración de la transmisión de luz cuando, al atravesar una fibra óptica estándar, esta ha sufrido alargamientos, constricciones, entre otras. Un diodo emisor (LED) lanza una luz en una fibra monomodo y la dirige hacia el sensor, el cual se divide en dos fibras, una activa en la estructura donde se medirá la magnitud, y otra pasiva que sirve de referencia. Al final de cada fibra hay dos espejos, los cuales reflejan los haces de luz, y se pasan a un espejo móvil que ajusta las diferencias entre ambas fibras y así comparándolas con las emitidas en la señal origen.</p>	<p>Consta de una serie de módulos de Transductores de Diferencial Lineal Variable (LVDT) que están montados en una barra enterrada en un hoyo de 39 mm. de diámetro en la sección de ensayo. Pueden montarse hasta seis módulos LVDT a varias profundidades en el mismo hoyo. Los módulos se anclan al suelo por medio de pequeñas bolas de acero que son forzadas dentro de las paredes del hoyo. La parte superior del hoyo se sella con una tapa que se conecta al sistema para adquirir los datos. La barra de referencia está conectada a la barra de anclaje por medio de un conector de casquillo, de manera tal de que los</p>	<p>El dispositivo básico es un transductor de desplazamiento que convierte el movimiento de la punta de una lengüeta en una señal eléctrica. La conversión se realiza con la ayuda de bandas extensométricas dentro del dispositivo, montadas en un circuito de puente completo sobre la lengüeta de medición. Las bandas especialmente desarrolladas, así como la tecnología de aplicación, el circuito de compensación y la selección de materiales garantizan una alta precisión y una larga duración de vida del dispositivo.</p>

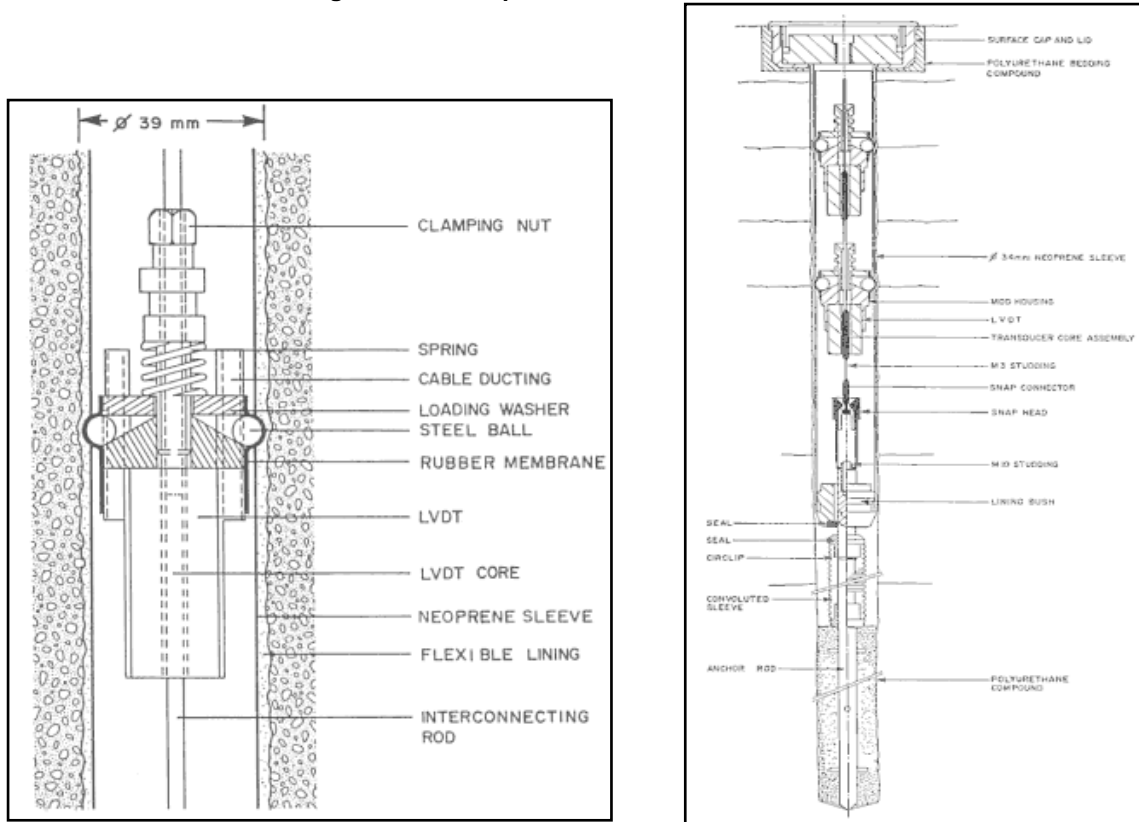
		módulos MDD puedan ser removidos y re-usados.	
<b>RESOLUCIÓN</b>	2µm		
<b>PRECISIÓN</b>	Superior al 2% de su deformación media.	± 10 micrones	+/- 0.05%
<b>RANGO DE MEDIDA</b>	Superior al 1% de la longitud del sensor en tracción.		+/-2.5 mm
<b>IMAGEN</b>	<p><b>Figura 3-15. Sensor de fibra óptica.</b></p>  <p><b>Fuente: los sensores de fibra óptica y la medida de deformaciones.</b></p>	<p><b>Figura 3-16. Deflectómetro de Múltiples Profundidades.</b></p>  <p><b>Fuente: <a href="http://www.dynatest.com/research-mdd.php">http://www.dynatest.com/research-mdd.php</a></b></p>	<p><b>Figura 3-17. Extensómetro multifunción con sistema de medida extensométrico</b></p>  <p><b>Fuente: <a href="http://www.hbm.com/es/menu/productos/transductores-y-sensores/deformacion/singlcategoria/strain-transducers/product/dd1/backPID/strain/">http://www.hbm.com/es/menu/productos/transductores-y-sensores/deformacion/singlcategoria/strain-transducers/product/dd1/backPID/strain/</a></b></p>

**Fuente: Elaboración propia.**

Una vez analizadas las opciones presentes en la tabla anterior, se escoge el Deflectómetro de Múltiples Profundidades, ya que un solo aparato logra medir a varias profundidades, y todo está conectado a un solo cable que manda la información a un sistema que recopila e interpreta los datos.

En las siguientes imágenes, se visualizan los componentes de un Deflectómetro de Múltiples Profundidades:

Figura 3-18. Componentes detallados de un MDD.






Fuente: Prueba no destructiva de Pavimentos y retrocálculo de módulos.

### 3.3.4 Humedad.

Debido a la facilidad y eficiencia de su uso, se procede a buscar varias alternativas de sensores que realicen la medición de la humedad en el suelo.

Tabla 3-2. Tipos de sensores de humedad propuestos.

MEDIDOR	SENSOR 5TE	SENSOR EC-20	SENSOR EC-5
DESCRIPCIÓN	El 5TE mide humedad de suelo, temperatura y conductividad eléctrica del mismo, tres parámetros fundamentales para gran variedad de estudios. La humedad de suelo es obtenida a través de la lectura de la constante dieléctrica del	El sensor de humedad EC-20 es el sensor clásico de la línea ECH2O (20 cm). A causa de la lectura de menor frecuencia de este sensor, es recomendado solo para texturas medias de suelo y a bajas conductividades eléctricas.	El sensor EC-5 nace con la necesidad de aquellos que necesitaban un sensor versátil, para el uso en cualquier tipo de suelo y sustrato. El EC-5 obtiene el % de agua en el suelo a partir

MEDIDOR	SENSOR 5TE	SENSOR EC-20	SENSOR EC-5
	medio con la tecnología FDR, mientras que la conductividad eléctrica es medida a partir de 2 tornillos de acero inoxidable.	Sin embargo, dado su mayor tamaño permite un amplio bulbo de muestreo.	de la relación de esta con la constante dieléctrica del medio, utilizando el concepto capacitancia y la tecnología FDR (Reflectometría de dominio de frecuencia).
RANGOS DE MEDICIÓN	1-50 Permitividad Dieléctrica	0-40% VWC	0-100% VWC
TIEMPO DE MEDICIÓN	10 ms	10 ms	10 ms
TEMPERATURA	-40°C a +50°C	-40°C to +50°C	-40°C a +50°C
PRECISIÓN	±1 Dieléctrica	±4 % VWC, texturas medias a bajas CE de 1 ds/m	<b>Suelo Mineral:</b> ±3 % VWC para suelos minerales, hasta 8 dS/m ±1 % VWC calibración específica del suelo, hasta 8 dS/m <b>Rockwool:</b> ±3% VWC, 0.5 to 8 dS/m <b>Encapsulamiento del suelo:</b> ±3% VWC, 3 hasta 14 dS/m
DIMENSIONES	14.5cm x 3.3cm x 0.7cm		8.9cm x 1.8cm x 0.7cm
RESOLUCIÓN	0.1% VWC (Suelo mineral) 0.25% VWC (rockwool)	0.1% VWC	
IMAGEN	<p><b>Figura 3-19. Sensor 5TE</b></p>  <p><b>Fuente:</b> <a href="http://www.morph2ola.com/productos/decagon/humedad-suelo/sensores/5te-.html">http://www.morph2ola.com/productos/decagon/humedad-suelo/sensores/5te-.html</a></p>	<p><b>Figura 3-20. SENSOR EC-20</b></p> 	<p><b>Figura 3-21. Sensor EC-5.</b></p>  <p><b>Fuente:</b> <a href="http://www.morph2ola.com/productos/decagon/humedad-suelo/sensores/ec-5.html">http://www.morph2ola.com/productos/decagon/humedad-suelo/sensores/ec-5.html</a></p>

MEDIDOR	SENSOR 5TE	SENSOR EC-20	SENSOR EC-5
		Fuente: <a href="http://www.morph2ola.com/productos/decagon/humedad-suelo/sensores/ec-20-.html">http://www.morph2ola.com/productos/decagon/humedad-suelo/sensores/ec-20-.html</a>	

Fuente: Elaboración propia.

Se procede a escoger de los sensores anteriormente descritos el EC-5 porque el tamaño pequeño del sensor permite la utilización de éste en laboratorios e invernaderos, su diseño robusto permite su instalación directa en el suelo sin disturbar el medio y además incorpora una frecuencia de oscilación alta que le permite medir con precisión la humedad en cualquier suelo o sustrato independizándose de la textura y conductividad eléctrica del medio.

### 3.3.5 Saturación.

Para establecer una técnica de humedecimiento continuo al suelo de estudio se plantea la opción de un sistema de riego localizado y programado; está la micro aspersión, que se basa en pequeños emisores que expulsan el agua en forma de lluvia muy fina en el sector donde se coloque. Luego se tiene los sistemas de riego por goteo y el programador de riego individualizado, que se fundan en la colocación de goteadores, los cuales están controlados por un programador de riego, el cual se encarga de suministrar las cantidades de agua solicitadas para que regule el riego y el tiempo en el cual debe efectuar el mismo.

De acuerdo a este sistema, se proponen los siguientes dispositivos:

Tabla 3-3. Dispositivos de riego propuestos.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	COSTO
KIT RIEGO BALCONES  Ref.: 0101001 Marca: Fuente Jardín	Gracias a sus goteros autocompensantes de alta fiabilidad se garantiza el mismo caudal para todos los puntos de riego. El micro tubo que conduce el agua, compuesto por materiales que le confieren gran flexibilidad, resulta muy fácil de instalar y se adapta perfectamente a paredes y balustradas.	\$45.000
SISTEMA CATETER	Usando el sistema que se emplea en el sector de la salud, un	\$5.000

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	COSTO
	catéter conectado a bolsas de suero, que para nuestro caso tendrían agua común, controla la salida del líquido a una rata constante.	
KIT MICROIRRIGACION  Ref.: 0101002 Marca: Fuente Jardín	Sencillo de instalar, tiene 20 puntos de riego donde sitúa 15 goteros autocompensantes de alta fiabilidad y 5 micro difusores de gran eficiencia.	\$140.850

Fuente: Elaboración propia.

De los sistemas anteriormente propuestos, se aplica el Kit riego balcones, debido a que garantiza igual caudal en cada uno de los puntos de riego. Este sistema se basa, en la colocación de goteadores, los cuales están controlados por un programador de riego, el cual se encarga de suministrar las cantidades de agua que se han marcado para que regule el riego y los horarios en los cuales se deben efectuar los mismos. A continuación se presenta su imagen.

Figura 3-22. Kit de riego balcones.



Fuente:

[http://www.fuentejardin.com/index.php?subcategoria=productos&subcategoria2=producto\\_detalle&cat=3&subcat=8&que\\_producto=10](http://www.fuentejardin.com/index.php?subcategoria=productos&subcategoria2=producto_detalle&cat=3&subcat=8&que_producto=10)

### 3.3.6 Material.

Para detallar el material con el cual se realizará el modelo, se evaluarán las ventajas, desventajas y costos de las siguientes alternativas:

**Tabla 3-4. Tipo de materiales propuestos para realizar el modelo.**

MATERIAL	COSTOS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
MADERA	\$ 16.000 m <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Adaptabilidad.</li> <li>✓ Facilidad de trabajarse.</li> <li>✓ Uniones eficientes: La madera se puede ensamblar y pegar con adhesivos apropiados, unir con clavos, tornillos, pernos y conectores especiales.</li> <li>✓ Buen aislante eléctrico, térmico y acústico: Como la madera es un material compuesto de fibras huecas, alineadas axialmente a la longitud del árbol, estos huecos o espacios contienen aire atrapado que le imparten excelente cualidades como aislante del sonido y del calor.</li> <li>✓ Alta resistencia y bajo costo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Mantenimiento.</li> <li>✗ Poca resistencia al sol.</li> <li>✗ Poca resistencia a la humedad.</li> <li>✗ Pueden ser atacado por insectos (colillas, termitas, moho, hongos).</li> </ul>
ACRÍLICO	\$ 40.000 m <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Buenas características mecánicas.</li> <li>✓ Facilidad para pulir.</li> <li>✓ Resistencia a los golpes.</li> <li>✓ Presentación traslucida o transparente.</li> <li>✓ Alta resistencia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Elevado precio.</li> <li>✗ Poca resistencia a la presión del agua.</li> </ul>
VIDRIO	\$ 28.000 m <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Resistencia al calor.</li> <li>✓ Es ideal para ser reutilizado pues resiste temperaturas de hasta 150°C.</li> <li>✓ No se raya.</li> <li>✓ No se oxida.</li> <li>✓ Facilidad para pulir.</li> <li>✓ Resistencia a los golpes.</li> <li>✓ Presentación traslucida o transparente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Frágil.</li> <li>✗ Costos mayores.</li> <li>✗ Mayor peso.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia.

Al evaluar los aspectos presentados en la tabla anterior, se establece que el material del modelo será la madera, y se propone que los factores que presenta en contra, se controlen de la siguiente manera:

- ✓ A finalizar cada ensayo, y antes de realizar el siguiente, se realizara la limpieza y mantenimiento del molde.
- ✓ Destinar la ubicación del molde en un lugar seco y a la sombra.

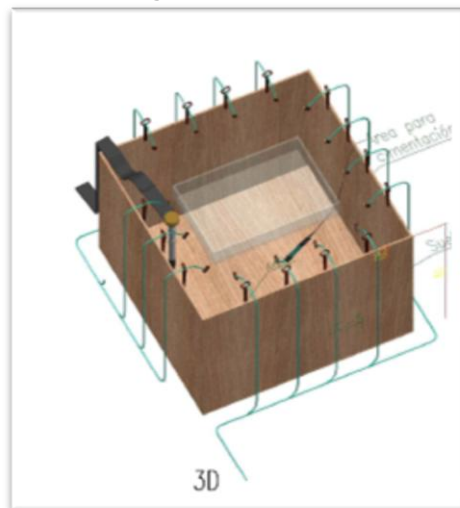
### 3.4 MODELO DEFINITIVO

Con la guía de los proyectos del numeral 3.2 y después de definir las variables y los distintos aspectos del modelo, se procede a plantear el boceto de dos propuestas, para tener diferentes escalas de modelos, encontrando como variación la cantidad de sensores puestos.

#### 3.4.1 Modelo A.

Diseñado para una cimentación a escala entre los veinte (20) y treinta (30) cm, el tamaño del molde se propone de 50x50cm y una profundidad de 40cm. Para este modelo, se utilizará un Deflectómetro de Múltiples Profundidades, quince goteros autocompensantes del Kit de Riego Balcones y un sensor EC-5.

Figura 3-23. Imagen 3D del Modelo A propuesto.

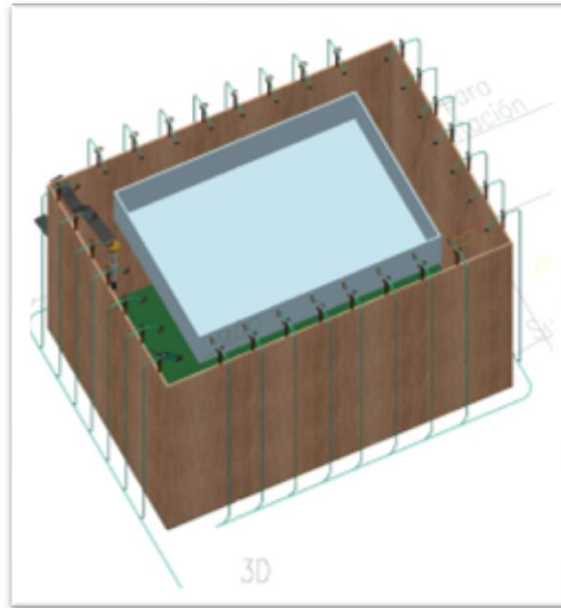


Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.2 Modelo B.

Diseñado para una cimentación a escala entre los sesenta (60) y setenta (70) cm, el tamaño del molde se propone de 1000x70cm y una profundidad de 70cm, requiere de doble sistemas de medición. Para este modelo, se utilizará un Deflectómetro de Múltiples Profundidades, treinta goteros autocompensantes del Kit de Riego Balcones y dos sensores EC-5.

Figura 3-24. Imagen 3D del modelo B propuesto.



Fuente: Elaboración propia.

Para una imagen ampliada y más detallada de los modelos A y B, observar el anexo D.

### 3.5 COSTOS DEL MODELO

A continuación se establecen los posibles presupuestos en la elaboración y puesta en marcha de los dos posibles modelos propuestos en el numeral 3.3.7. Dentro de estos no se presentan los gastos de obtención y transporte del suelo a ensayar, ni

la cantidad de pesas que representan el peso del suelo, debido a la variación que se presenta dependiendo del proyecto.

### 3.5.1 MODELO A

Tabla 3-5. Costos Modelo A.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UND	CANT	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	Caja de madera (,5mx0,5m)	M <sup>2</sup>	1,05	\$ 16.000	\$ 16.800
2	Deflectómetro de múltiples profundidades (MDD)	UND	1	\$ 12.000.000	\$ 12.000.000
3	Sensor EC-5		1	\$ 316.000	\$ 316.000
4	Kit riego balcones	UND	1	\$ 45.000	\$ 45.000
<b>COSTO DEL MODELO</b>					<b>\$ 12.377.800</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.2 MODELO B

Tabla 3-6. Costos Modelo B.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UND	CANT	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	Caja de madera (1mx0,7m)	M <sup>2</sup>	3,5	\$ 16.000	\$ 56.000
2	Deflectómetro de múltiples profundidades (MDD)	UND	1	\$ 12.000.000	\$ 12.000.000
3	Sensor EC-5		2	\$ 316.000	\$ 632.000
4	Kit riego balcones	UND	2	\$ 45.000	\$ 90.000
<b>COSTO DEL MODELO</b>					<b>\$ 12.778.000</b>

Fuente: Elaboración propia.

#### 4 CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- Los estudios anteriores a esta tesis acerca de las arcillas expansivas en Colombia son desactualizados y limitados, encontrándose más información en otros países, lo que lleva a pensar que en Colombia deben realizarse estudios más recientes acerca de este tipo de suelos que se encuentran en muchos lugares del territorio y que no son tratados de la manera adecuada debido al desconocimiento que de ellos hay.

- De los diferentes ensayos se puede concluir que la muestra de Bucaramanga es un limo inorgánico, mientras que las demás muestras resultaron ser arcillas de alta plasticidad.

La muestra de San Gil, aunque según la carta de Casagrande arrojó que era una arcilla de alta plasticidad, tuvo un comportamiento entre marginal y bajo como arcilla expansiva, según los demás ensayos realizados. Esto puede deberse a que la arcilla se encontró casi en el límite entre arcilla de alta y de baja plasticidad.

- Se recomienda la adquisición del Aparato de Lambe para la caracterización de suelos expansivos y el reemplazo del equipo para el Límite de contracción, pues el que se encuentra en el laboratorio de Ingeniería civil se encuentra ya desgastado y se recomienda la calibración de los equipos de laboratorio de suelos de la Universidad industrial de Santander.

- Para lograr un análisis más profundo de lo que sucede en el suelo sería de gran utilidad la simulación en un programa computacional que recree las condiciones a las que se somete el suelo y se analice por medio de comparación, los resultados del modelo y de la herramienta computacional.

- Para lograr una representación más exacta de las cimentaciones representadas se recomienda estudiar qué materiales pueden reemplazar los usados en la realidad para estas (concretos y refuerzo).
- Por la forma física del modelo y los dispositivos de medición propuestos se optó por el uso de muestras de suelo alterado, pero para un mejor análisis, y en futuras mejoras del modelo, cabría mirar la posibilidad de trabajar con suelo inalterado.
- Aunque el costo del sensor para la medición de cambio volumétrico es algo alto, se observa que este también tiene usos en el campo de la infraestructura vial (pavimentos), lo que hace que su adquisición pueda ser aprovechada en otras actividades.

## 5 BIBLIOGRAFÍA

ARQHYS Architects Site. <http://www.arqhys.com/construcciones/pozos-cimentacion.html> (último acceso: Enero de 2010).

«Biblioteca.» *Biblioteca.*  
<http://www.biblioteca.uson.mx/digital/tesis/docs/7550/Capitulo2.pdf> (último acceso: Enero de 2010).

Bush, Albert Jasper, y Gilbert Y Baladi. *Nondestructive testing of pavements and backcalculation of moduli*. Baltimore: Bush/Baladi Editors, 1988.

Camacho, Javier, Oscar Javier Reyes Ortiz, Catalina Mayorga Antolínez, y Dolly Fernanda Méndez G. «Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas.» 2006: 1-9.

*Construmatica.*

[http://www.construmatica.com/construpedia/Cimentaciones\\_por\\_Losa](http://www.construmatica.com/construpedia/Cimentaciones_por_Losa) (último acceso: 2010).

Das, Braja M. *Principles of foundation engineering*. Sacramento.

*Dynatest International.* <http://www.dynatest.com/index.php> (último acceso: 2010).

*El Suelo de Barranquilla, clasificación, zonas de riesgo, arcillas expansivas.*  
<http://www.arroyosdebarranquilla.org/barranquilla/135-el-suelo-de-barranquilla.pdf>  
(último acceso: Abril de 2010).

*Foundations on Expansive Soils.* Iowa, 2002.

*FuenteJardin.* 2005. <http://www.fuentejardin.com/> (último acceso: Julio de 2010).

García Romero, Emilia, y Mercedes Suárez Barrios. «Las Arcillas: Propiedades y Usos.» <http://campus.usal.es/~delcien//doc/GA.PDF>.

*HBM.* <http://www.hbm.com/es/menu-top/home/> (último acceso: 2010).

- I.N.V. E - 123 - 07. «Análisis Granulométrico de suelos por tamizado.»
- I.N.V. E - 124 - 07. «Análisis granulométrico por medio del hidrómetro .»
- I.N.V. E - 125 - 07. «Determinación del Límite Líquido de los suelos .»
- I.N.V. E - 126 - 07. «Límite Plástico e Índice de Plasticidad de los suelos.»
- I.N.V. E - 127 - 07. «Determinación de los factores de contracción de los suelos .»
- I.N.V. E - 132 - 07. «Expansión Libre .»
- I.N.V.E - 120 - 07. «Determinación del Potencial de Expansividad de un suelo en el Aparato de Lambe.»
- I.N.V.E - 141 - 07. «Relaciones De Humedad – Masa Unitaria Seca En Los Suelos.»
- I.N.V.E - 151 - 07. «Expansión en Consolidómetro y Consolidación Unidimensional de los suelos.»
- Maldona G, Roberto. *Panorama General de las Arcillas Expansivas y su efecto sobre Edificaciones.*  
[http://www.escuelaing.edu.co/encuentro\\_nacional/2009/documentos/1\\_encuentro/panorama\\_general\\_arcillas\\_expansivas\\_efecto\\_sobre\\_edificaciones.pdf](http://www.escuelaing.edu.co/encuentro_nacional/2009/documentos/1_encuentro/panorama_general_arcillas_expansivas_efecto_sobre_edificaciones.pdf).
- MorphH2O L.A.* <http://www.morph2ola.com/> (último acceso: 2010).
- MYP Fundaciones Especiales S.A.*  
<http://www.mypfundaciones.com/index.php?s=preexcavado&ss=02> (último acceso: 2010).
- NLT-207/91. «Dispersabilidad por Tubificación.»
- «Patologías por Arcillas Expansivas.»  
<http://campus.educar.org/file.php/1/moddata/forum/71/12305/patologia18.pdf>.

Pintado i Llurba, Xavier. «Caracterización del Comportamiento Termo-Hidro-Mecánico de Arcillas Expansivas.»  
[http://www.tdr.cesca.es/TESIS\\_UPC/AVAILABLE/TDX-0228103-101013//TESIS.pdf](http://www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0228103-101013//TESIS.pdf) (último acceso: Enero de 2010).

Posse, Francisco Javier Andreu. «Los Sensores de Fibra Óptica y la Medida de Deformaciones.» En *Operatividad de la Instrumentación en aguas subterráneas, suelos contaminados y riesgos geológicos*. Madrid, 2003.

*Various Aspects of Expansive Soils*. 2004.

## ANEXO A: LABORATORIOS DE CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS

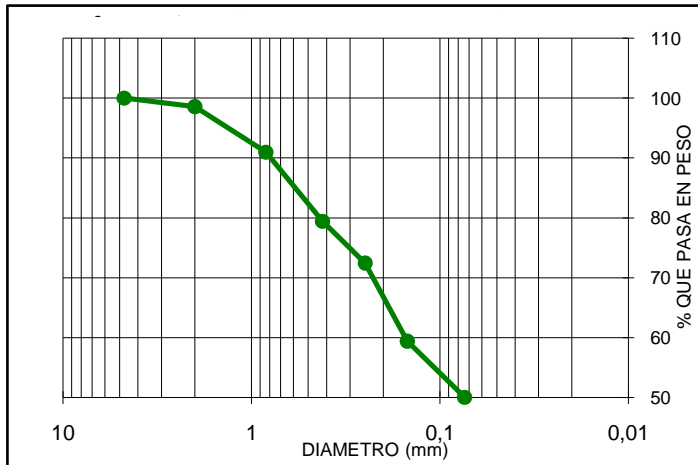


**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**  
**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO**  
**I.N.V. E - 123 - 07**

<b>FECHA</b>	Mayo de 2010	<b>SONDEO</b>	1
<b>PROYECTO</b>	Análisis del Comportamiento de Arcillas expansivas	<b>MUESTRA</b>	1
<b>LOCALIZACION</b>	Provenza, Bucaramanga	<b>PROFUNDIDAD</b>	1,50 m

PESO INICIAL HUMEDO (Kg)	500,00
% DE HUMEDAD	11,04%
PESO INICIAL SECO (Kg)	499,45
PESO SECO DESPUES DE LAVAR POR EL TAMIZ 200	304,00
PASA 200	195,45
PORCENTAJE DE ERROR %:	0,42%

MALLA No	ABERTURA	PESO SUELO RETENIDO	PORCIENTO RETENIDO PARCIAL	PORCIENTO RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA LA MALLA
****	mm	kg	%	%	%
No 4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
10	2	7,40	1,48	1,48	98,52
20	0,84	37,70	7,54	9,02	90,98
40	0,42	57,70	11,54	20,56	79,44
60	0,25	35,10	7,02	27,58	72,42
100	0,149	65,30	13,06	40,64	59,36
200	0,074	46,50	9,30	49,94	50,06
PASA 200	0	247,65	49,53	99,47	0,53
SUMA		497,35	99,47		



GRAVAS=	0,00	%
ARENAS =	49,94	%
FINOS=	50,06	%

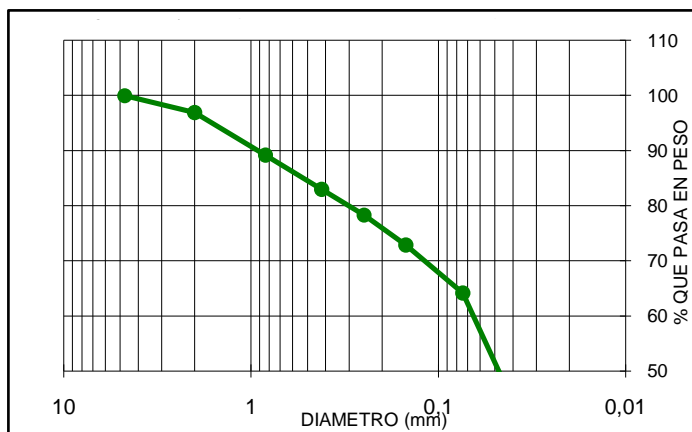


**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**  
**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO**  
**I.N.V. E - 123 - 07**

<b>FECHA</b>	Mayo de 2010	<b>SONDEO</b>	1
<b>PROYECTO</b>	Análisis del Comportamiento de Arcillas expansivas	<b>MUESTRA</b>	2
<b>LOCALIZACION</b>	Urbanización Sagrada Familia, San Gil	<b>PROFUNDIDAD</b>	2,0 m

PESO INICIAL HUMEDO (Kg)	500,00
% DE HUMEDAD	4,87%
PESO INICIAL SECO (Kg)	499,76
PESO SECO DESPUES DE LAVAR POR EL TAMIZ 200	230,80
PASA 200	268,96
PORCENTAJE DE ERROR %:	0,06%

MALLA No	ABERTURA	PESO SUELO RETENIDO	PORCIENTO RETENIDO PARCIAL	PORCIENTO RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA LA MALLA
****	mm	kg	%	%	%
No 4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
10	2	15,50	3,10	3,10	96,90
20	0,84	38,60	7,72	10,82	89,18
40	0,42	31,20	6,24	17,06	82,94
60	0,25	23,00	4,60	21,66	78,34
100	0,149	27,50	5,50	27,16	72,84
200	0,074	43,60	8,72	35,88	64,12
PASA 200	0	320,06	64,01	99,89	0,11
SUMA		499,46	99,89		



GRAVAS=	0,00	%
ARENAS =	35,88	%
FINOS=	64,12	%

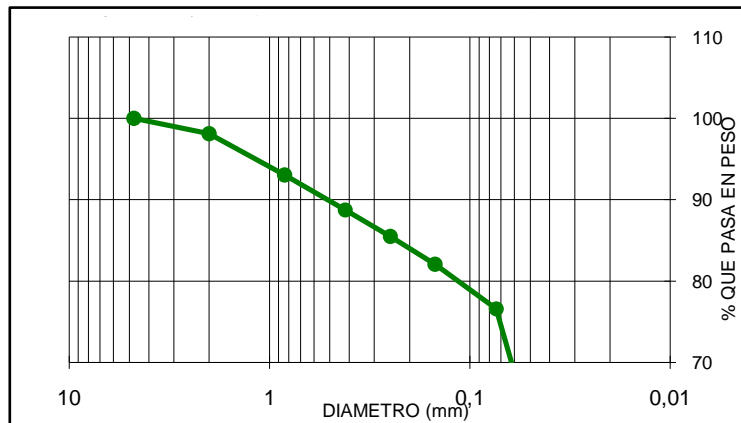


**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**  
**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO**  
**I.N.V. E - 123 - 07**

<b>FECHA</b>	Mayo de 2010	<b>SONDEO</b>	1
<b>PROYECTO</b>	Análisis del Comportamiento de Arcillas expansivas	<b>MUESTRA</b>	3
<b>LOCALIZACION</b>	Pinchote, Santander	<b>PROFUNDIDAD</b>	50 cm

PESO INICIAL HUMEDO (Kg)	500,00
% DE HUMEDAD	11,34%
PESO INICIAL SECO (Kg)	499,43
PESO SECO DESPUES DE LAVAR POR EL TAMIZ 200	159,70
PASA 200	339,73
PORCENTAJE DE ERROR %:	1,84%

MALLA No	ABERTURA	PESO SUELO RETENIDO	PORCIENTO RETENIDO PARCIAL	PORCIENTO RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA LA MALLA
****	mm	kg	%	%	%
No 4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
10	2	9,40	1,88	1,88	98,12
20	0,84	25,40	5,08	6,96	93,04
40	0,42	21,40	4,28	11,24	88,76
60	0,25	16,40	3,28	14,52	85,48
100	0,149	17,10	3,42	17,94	82,06
200	0,074	27,30	5,46	23,40	76,60
PASA 200	0	373,23	74,65	98,05	1,95
SUMA		490,23	98,05		



GRAVAS=	0,00	%
ARENAS =	23,40	%
FINOS=	76,60	%



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**  
**LIMITES DE ATTERBERG**  
**I.N.V. E – 125 – 07, I.N.V. E – 126 – 07**

**FECHA:** Mayo de 2010  
**PROYECTO:** Análisis del Comportamiento de Arcillas expansivas  
**LOCALIZACION:** Provenza, Bucaramanga

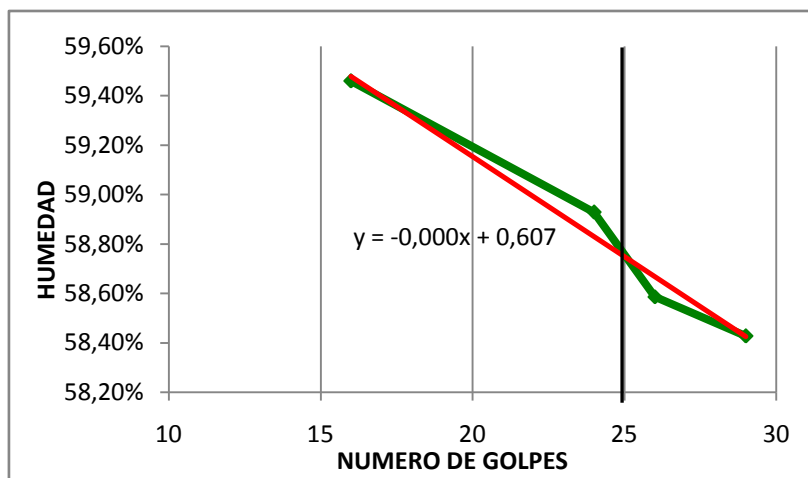
**SONDEO:** 1  
**MUESTRA:** 1  
**PROFUNDIDAD:** 1,50 m

**LIMITE LIQUIDO**

RANGO GOLPES	NUMERO DE GOLPES	PESO CAPSULA gr	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO gr	PESO CAPSULA + SUELO SECO gr	PESO DEL AGUA gr	PESO SUELO SECO gr	CONTENIDO DE AGUA %
25-30	29	8,90	23,00	17,80	5,20	8,90	58,43%
20-30	26	7,30	23,00	17,20	5,80	9,90	58,59%
20-30	24	8,10	17,00	13,70	3,30	5,60	58,93%
15-25	16	8,40	20,20	15,80	4,40	7,40	59,46%

**LIMITE PLASTICO**

DATO No.	PESO CAPSULA gr	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO gr	PESO CAPSULA + SUELO SECO gr	PESO DEL AGUA gr	PESO SUELO SECO gr	CONTENIDO DE AGUA %
1	7,00	20,10	16,50	3,60	9,50	37,89%
2	6,60	22,30	18,10	4,20	11,50	36,52%
3	7,70	21,60	17,80	3,80	10,10	37,62%



**LIMITE LIQUIDO :** 59%  
**LIM. PLASTICO :** 37%  
**INDICE DE PLASTICIDAD :** 21%  
**CLASIFICACION SUCS:** MH



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**  
**LIMITES DE ATTERBERG**  
**I.N.V. E – 125 – 07, I.N.V. E – 126 – 07**

**FECHA:** Mayo de 2010  
**PROYECTO:** Análisis del Comportamiento de Arcillas expansivas  
**LOCALIZACION:** Urbanización Sagrada Familia, San Gil

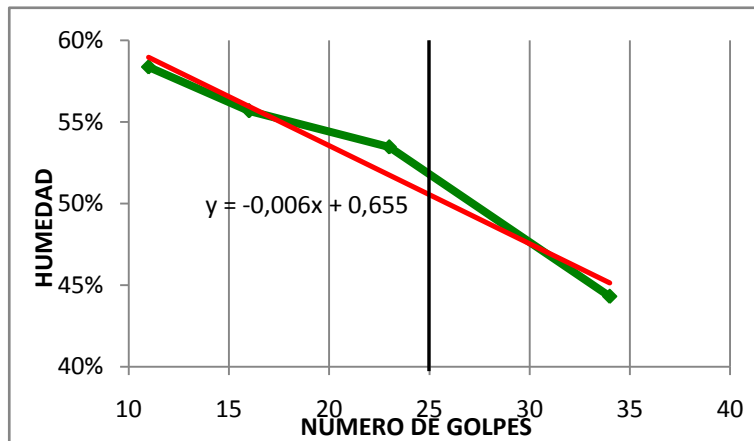
**SONDEO:** 1  
**MUESTRA:** 2  
**PROFUNDIDAD:** 2,0 m

**LIMITE LIQUIDO**

RANGO GOLPES	NUMERO DE GOLPES	PESO CAPSULA gr	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO gr	PESO CAPSULA + SUELO SECO gr	PESO DEL AGUA gr	PESO SUELO SECO gr	CONTENIDO DE AGUA %
25-30	34	8,20	15,30	13,12	2,18	4,92	44,31%
20-30	23	7,30	16,60	13,36	3,24	6,06	53,47%
15-25	16	6,90	15,40	12,36	3,04	5,46	55,68%
10-15	11	7,10	14,10	11,52	2,58	4,42	58,37%

**LIMITE PLASTICO**

DATO No.	PESO CAPSULA gr	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO gr	PESO CAPSULA + SUELO SECO gr	PESO DEL AGUA gr	PESO SUELO SECO gr	CONTENIDO DE AGUA %
1	6,90	11,40	10,64	0,76	3,74	20,32%
2	8,90	13,60	12,66	0,94	3,76	25,00%
3	8,60	12,90	12,08	0,82	3,48	23,56%



**LIMITE LIQUIDO :** 51%  
**LIM. PLASTICO :** 23%  
**INDICE DE PLASTICIDAD :** 28%  
**CLASIFICACION SUCS:** CH



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**  
**LIMITES DE ATTERBERG**  
**I.N.V. E – 125 – 07, I.N.V. E – 126 – 07**

**FECHA:** Mayo de 2010  
**PROYECTO:** Análisis del Comportamiento de Arcillas expansivas  
**LOCALIZACION:** Pinchote, Santander

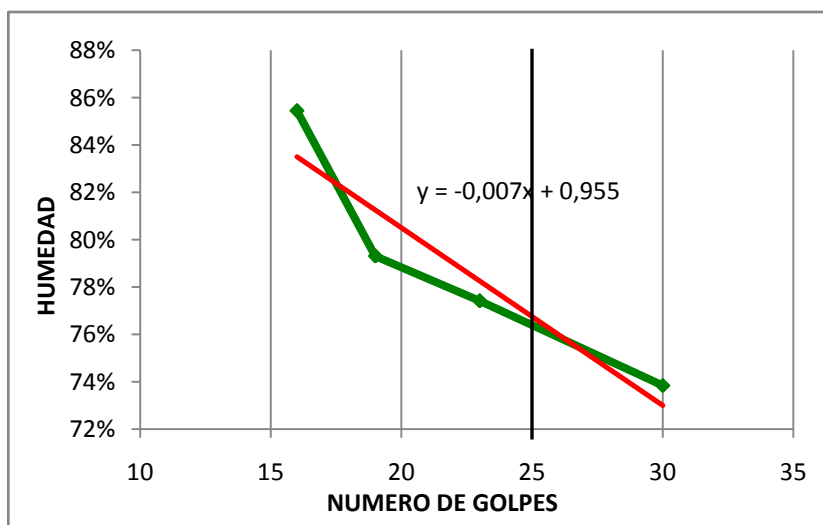
**SONDEO:** 1  
**MUESTRA:** 3  
**PROFUNDIDAD:** 50 cm

**LIMITE LIQUIDO**

RANGO GOLPES	NUMERO DE GOLPES	PESO O CAPSULA gr	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO gr	PESO CAPSULA + SUELO SECO gr	PESO DEL AGUA gr	PESO SUELO SECO gr	CONTENIDO DE AGUA %
25-30	30	7,60	18,90	14,10	4,80	6,50	73,85%
20-30	23	7,00	18,00	13,20	4,80	6,20	77,42%
15-25	19	8,20	18,60	14,00	4,60	5,80	79,31%
15-25	16	8,80	19,00	14,30	4,70	5,50	85,45%

**LIMITE PLASTICO**

DATO No.	PESO O CAPSULA gr	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO gr	PESO CAPSULA + SUELO SECO gr	PESO DEL AGUA gr	PESO SUELO SECO gr	CONTENIDO DE AGUA %
1	7,60	12,10	11,20	0,90	3,60	25,00%
2	7,00	13,00	11,60	1,40	4,60	30,43%
3	6,90	12,50	11,20	1,30	4,30	30,23%



**LIMITE LIQUIDO :** 77%  
**LIM. PLASTICO :** 29%  
**INDICE DE PLASTICIDAD :** 48%  
**CLASIFICACION SUCS:** CH



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**  
**LIMITES DE ATTERBERG**  
**I.N.V. E – 125 – 07, I.N.V. E – 126 – 07**

**FECHA:** Mayo 2010  
**PROYECTO:** Análisis del Comportamiento de Arcillas expansivas  
**LOCALIZACION:** Altos del Campo, Barranquilla

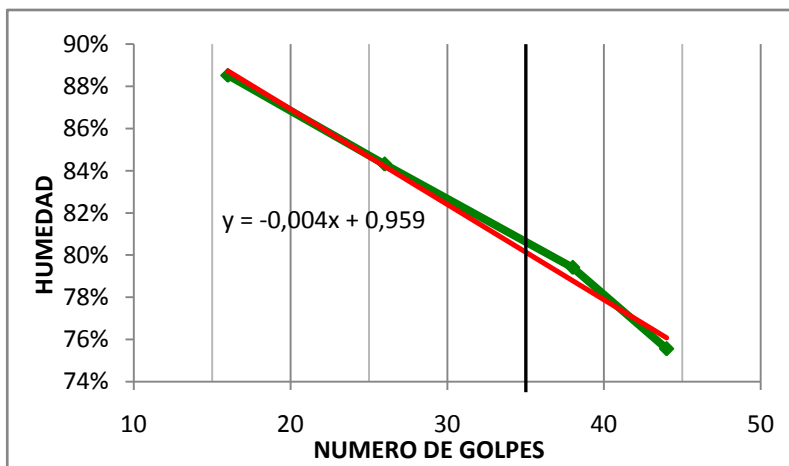
**SONDEO:** 1  
**MUESTRA:** 4  
**PROFUNDIDAD:** 7,50 - 8,50 m.

**LIMITE LIQUIDO**

RANGO GOLPES	NUMERO DE GOLPES	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO gr	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO gr	PESO CAPSULA + SUELO SECO gr	PESO DEL AGUA gr	PESO SUELO SECO gr	CONTENIDO DE AGUA %
35-45	44	6,60	14,50	11,10	3,40	4,50	75,56%
30-40	38	8,20	14,30	11,60	2,70	3,40	79,41%
20-30	26	7,00	16,40	12,10	4,30	5,10	84,31%
15-25	16	7,50	19,00	13,60	5,40	6,10	88,52%

**LIMITE PLASTICO**

DATO No.	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO gr	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO gr	PESO CAPSULA + SUELO SECO gr	PESO DEL AGUA gr	PESO SUELO SECO gr	CONTENIDO DE AGUA %
1	8,70	12,40	11,80	0,60	3,10	19,35%
2	7,40	16,80	15,30	1,50	7,90	18,99%



**LIMITE LIQUIDO :** 85%  
**LIM. PLASTICO :** 19%  
**INDICE DE PLASTICIDAD :** 66%  
**CLASIFICACION SUCS:** CH



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**  
**DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE CONTRACCIÓN DE LOS SUELOS**  
**I.N.V. E – 127 – 07**

<b>FECHA:</b>	Mayo de 2010	<b>SONDEO:</b>	1
<b>PROYECTO:</b>	Análisis del Comportamiento de Arcillas expansivas	<b>MUESTRA:</b>	1
<b>LOCALIZACION:</b>	Provenza, Bucaramanga	<b>PROFUNDIDAD:</b>	1,50 m

PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO gr	PESO CAPSULA + SUELO SECO gr	PESO CAPSULA gr	CONTENIDO DE AGUA (%)
148,90	120,10	8,40	25,78%

VOLUMEN SUELO HUMEDO ml	VOLUMEN SUELO SECO ml	MASA SUELO SECO gr
75,00	59,00	111,70

Limite de Contracción	11,46
Relación de Contracción	1,89
Cambio Volumétrico	27,12
Contracción Lineal	7,69



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**

**DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE CONTRACCIÓN DE LOS SUELOS**

I.N.V. E – 127 – 07

<b>FECHA:</b>	Mayo de 2010	<b>SONDEO:</b>	1
<b>PROYECTO:</b>	Análisis del Comportamiento de Arcillas expansivas	<b>MUESTRA:</b>	2
<b>LOCALIZACION:</b>	Urbanización Sagrada Familia, San Gil	<b>PROFUNDIDAD:</b>	2,00 m

PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO gr	PESO CAPSULA + SUELO SECO gr	PESO CAPSULA gr	CONTENIDO DE AGUA (%)
51,30	44,20	25,90	38,80%

VOLUMEN SUELO HUMEDO ml	VOLUMEN SUELO SECO ml	MASA SUELO SECO gr
13,50	9,00	18,30

Limite de Contracción	14,21
Relación de Contracción	2,03
Cambio Volumétrico	50,00
Contracción Lineal	12,64



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**  
**DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE CONTRACCIÓN DE LOS SUELOS**  
**I.N.V. E – 127 – 07**

<b>FECHA:</b>	Mayo de 2010	<b>SONDEO:</b>	1
<b>PROYECTO:</b>	Análisis del Comportamiento de Arcillas expansivas	<b>MUESTRA:</b>	3
<b>LOCALIZACION:</b>	Pinchote, Santander	<b>PROFUNDIDAD:</b>	50 cm

PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO CAPSULA + SUELO SECO	PESO CAPSULA	CONTENIDO DE AGUA (%)
gr	gr	gr	
49,90	43,00	25,60	39,66%

VOLUMEN SUELO HUMEDO	VOLUMEN SUELO SECO	MASA SUELO SECO
ml	ml	gr
13,50	9,00	17,40

Limite de Contracción	13,79
Relación de Contracción	1,93
Cambio Volumétrico	50,00
Contracción Lineal	12,64



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**

**DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE CONTRACCIÓN DE LOS SUELOS**

I.N.V. E – 127 – 07

<b>FECHA:</b>	Mayo 2010	<b>SONDEO:</b>	1
<b>PROYECTO:</b>	Análisis del Comportamiento de Arcillas expansivas	<b>MUESTRA:</b>	4
<b>LOCALIZACION:</b>	Altos del Campo, Barranquilla	<b>PROFUNDIDAD:</b>	7,50 - 8,50 m.

PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO gr	PESO CAPSULA + SUELO SECO gr	PESO CAPSULA gr	CONTENIDO DE AGUA (%)
45,60	40,80	22,90	26,82%

VOLUMEN SUELO HUMEDO ml	VOLUMEN SUELO SECO ml	MASA SUELO SECO gr
13,90	10,50	17,90

Limite de Contracción	7,82
Relación de Contracción	1,70
Cambio Volumétrico	32,38
Contracción Lineal	8,93



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**

**DETERMINACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS - EXPANSIÓN EN CONSOLIDÓMETRO**

**I.N.V. E - 123 - 07**

<b>FECHA:</b>	Mayo de 2010	<b>SONDEO:</b>	1
<b>PROYECTO:</b>	Análisis del Comportamiento de Arcillas expansivas	<b>MUESTRA:</b>	1
<b>LOCALIZACION:</b>	Provenza, Bucaramanga	<b>PROFUNDIDAD:</b>	1,50 m

Diámetro del anillo	6,29 cm
Área del anillo	31,07 cm <sup>2</sup>
Altura del anillo	2,00 cm
Volumen del anillo	62,15 cm <sup>3</sup>
Peso del anillo	58,64 g
Peso anillo+ muestra húmeda	168,10 g
Peso anillo+ muestra seca	142,58 g
Peso húmedo de la muestra:	109,46 g
Peso seco de la muestra	83,94
Humedad	30,40 %
Peso específico húmedo	1,76 g/cm <sup>3</sup>
Peso específico seco	1,35 g/cm <sup>3</sup>
Gravedad específica de los sólidos	2,76
Altura de los sólidos	0,98 cm
Altura de vacios	1,02
Relación de vacios	1,04
Factor de corrección de la carga	11,00

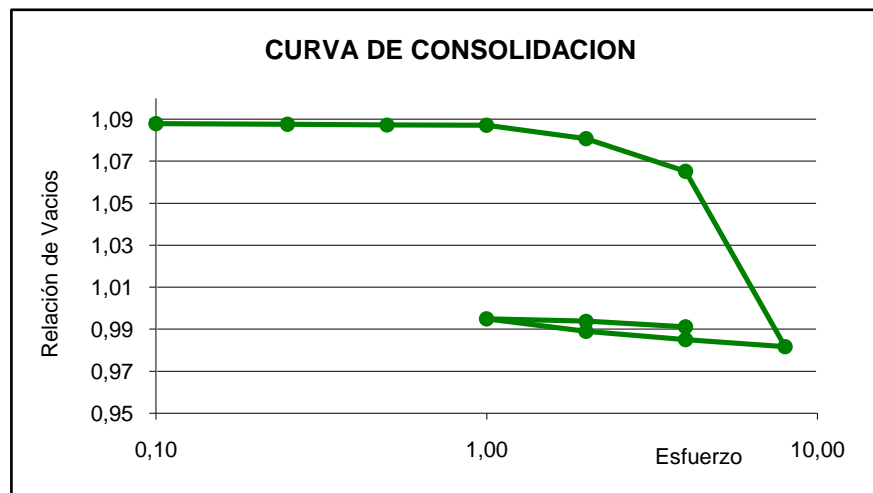
Esfuerzo [kg/cm <sup>2</sup> ]	Carga P [kg]	Carga corregida [Kg]	Lectura Deformímetro	Deformación acumulada [mm]	Deformación %
0,00	0,00	0,00	-174,00	-0,44	-2,18
0,25	7,77	0,71	-173,00	-0,43	-2,16
0,50	15,54	1,41	-172,00	-0,43	-2,15
1,00	31,07	2,82	-171,00	-0,43	-2,14

2,00	62,15	5,65	-146,00	-0,37	-1,83
4,00	124,29	11,30	-85,00	-0,21	-1,06
8,00	248,59	22,60	242,00	0,61	3,03
4,00	124,29	11,30	229,00	0,57	2,86
2,00	62,15	5,65	213,00	0,53	2,66
1,00	31,07	2,82	190,00	0,48	2,38
2,00	62,15	5,65	194,00	0,49	2,43
4,00	124,29	11,30	205,00	0,51	2,56

Esfuerzo [kg/cm <sup>2</sup> ]	Altura final probeta [mm]	Relación de vacios final [e]	Coefficiente Compresibilidad [av]	mv [cm <sup>2</sup> /kg]
0,00	20,44	1,0879	0,0000	0,0000
0,25	20,43	1,0876	0,0010	0,0005
0,50	20,43	1,0874	0,0010	0,0005
1,00	20,43	1,0871	0,0005	0,0002
2,00	20,37	1,0807	0,0064	0,0031
4,00	20,21	1,0651	0,0078	0,0037
8,00	19,40	0,9816	0,0209	0,0100
4,00	19,43	0,9849	0,0008	0,0004
2,00	19,47	0,9890	0,0020	0,0010
1,00	19,53	0,9949	0,0059	0,0028
2,00	19,52	0,9939	0,0010	0,0005
4,00	19,49	0,9911	0,0014	0,0007

La precisión del deformímetro es:

0.0001 pulgada





**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**

**DETERMINACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS - EXPANSIÓN EN CONSOLIDÓMETRO**  
**I.N.V. E - 123 - 07**

<b>FECHA:</b>	Mayo de 2010	<b>SONDEO:</b>	1
<b>PROYECTO:</b>	Análisis del Comportamiento de Arcillas expansivas	<b>MUESTRA:</b>	2
<b>LOCALIZACION:</b>	Urbanización Sagrada Familia, San Gil	<b>PROFUNDIDAD:</b>	2,00 m

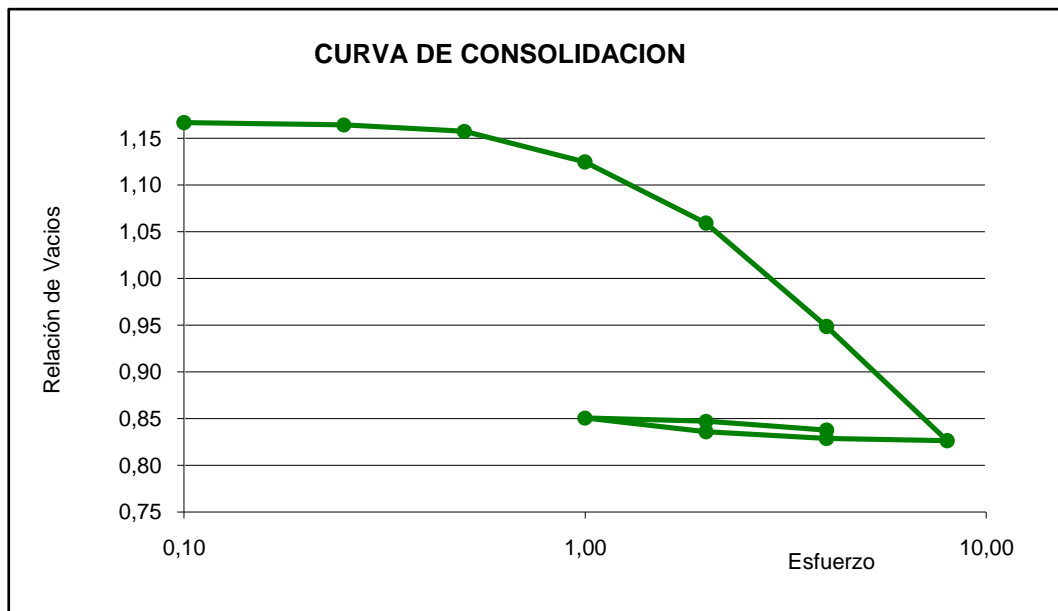
Diametro del anillo	6,29 cm
Área del anillo	31,07 cm <sup>2</sup>
Altura del anillo	2,00 cm
Volumen del anillo	62,15 cm <sup>3</sup>
Peso del anillo	58,64 g
Peso anillo+ muestra húmeda	144,70 g
Peso anillo+ muestra seca	140,30 g
Peso húmedo de la muestra:	86,06 g
Peso seco de la muestra	81,66
Humedad	5,39 %
Peso específico húmedo	1,38 g/cm <sup>3</sup>
Peso específico seco	1,31 g/cm <sup>3</sup>
Gravedad específica de los sólidos	2,77
Altura de los sólidos	0,95 cm
Altura de vacios	1,05
Relación de vacios	1,11
Factor de corrección de la carga	11,00

Esfuerzo [kg/cm <sup>2</sup> ]	Carga P [kg]	Carga corregida [Kg]	Lectura Deformímetro	Deformación acumulada [mm]	Deformación %
0,00	0,00	0,00	-223,00	-0,56	-2,79
0,25	7,77	0,71	-214,00	-0,54	-2,68
0,50	15,54	1,41	-188,00	-0,47	-2,35
1,00	31,07	2,82	-63,00	-0,16	-0,79
2,00	62,15	5,65	186,00	0,47	2,33
4,00	124,29	11,30	606,00	1,52	7,58
8,00	248,59	22,60	1070,00	2,68	13,38

4,00	124,29	11,30	1060,00	2,65	13,25
2,00	62,15	5,65	1033,00	2,58	12,91
1,00	31,07	2,82	977,00	2,44	12,21
2,00	62,15	5,65	990,00	2,48	12,38
4,00	124,29	11,30	1027,00	2,57	12,84

Esfuerzo [kg/cm <sup>2</sup> ]	Altura final probeta [mm]	Relación de vacios final [e]	Coficiente Compresibilidad [av]	mv [cm <sup>2</sup> /kg]
0,00	20,56	1,1669	0,0000	0,0000
0,25	20,54	1,1645	0,0095	0,0044
0,50	20,47	1,1576	0,0274	0,0127
1,00	20,16	1,1247	0,0659	0,0305
2,00	19,54	1,0591	0,0656	0,0304
4,00	18,49	0,9484	0,0553	0,0256
8,00	17,33	0,8261	0,0306	0,0142
4,00	17,35	0,8288	0,0007	0,0003
2,00	17,42	0,8359	0,0036	0,0016
1,00	17,56	0,8506	0,0148	0,0068
2,00	17,53	0,8472	0,0034	0,0016
4,00	17,43	0,8375	0,0049	0,0023

La precisión del deformímetro es: 0.0001 pulgada





**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**

**DETERMINACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS - EXPANSIÓN EN CONSOLIDÓMETRO**  
**I.N.V. E - 123 - 07**

<b>FECHA:</b>	Mayo de 2010	<b>SONDEO:</b>	1
<b>PROYECTO:</b>	Análisis del Comportamiento de Arcillas expansivas	<b>MUESTRA:</b>	3
<b>LOCALIZACION:</b>	Pinchote, Santander	<b>PROFUNDIDAD:</b>	50 cm

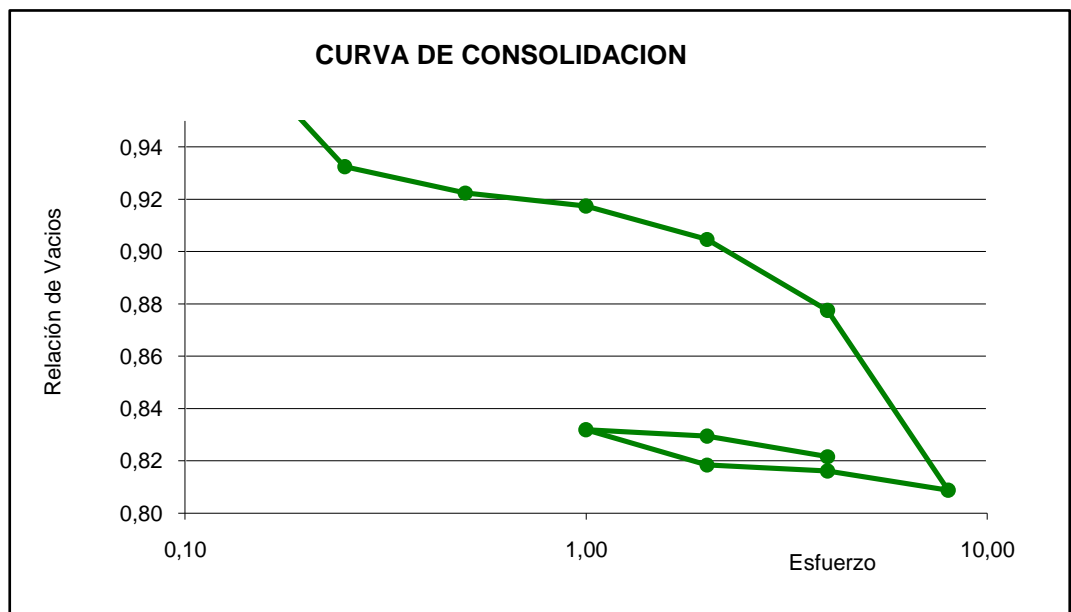
Diametro del anillo	6,29 cm
Área del anillo	31,07 cm <sup>2</sup>
Altura del anillo	2,00 cm
Volumen del anillo	62,15 cm <sup>3</sup>
Peso del anillo	58,64 g
Peso anillo+ muestra húmeda	158,10 g
Peso anillo+ muestra seca	147,20 g
Peso húmedo de la muestra:	99,46 g
Peso seco de la muestra	88,56
Humedad	12,31 %
Peso específico húmedo	1,60 g/cm <sup>3</sup>
Peso específico seco	1,43 g/cm <sup>3</sup>
Gravedad específica de los sólidos	2,77
Altura de los sólidos	1,03 cm
Altura de vacios	0,97
Relación de vacios	0,94
Factor de corrección de la carga	11,00

Esfuerzo [kg/cm <sup>2</sup> ]	Carga P [kg]	Carga corregida [Kg]	Lectura Deformímetro	Deformación acumulada [mm]	Deformación %
0,00	0,00	0,00	-224,00	-0,56	-2,80
0,25	7,77	0,71	47,00	0,12	0,59
0,50	15,54	1,41	88,00	0,22	1,10
1,00	31,07	2,82	109,00	0,27	1,36
2,00	62,15	5,65	161,00	0,40	2,01
4,00	124,29	11,30	273,00	0,68	3,41
8,00	248,59	22,60	556,00	1,39	6,95
4,00	124,29	11,30	526,00	1,32	6,58
2,00	62,15	5,65	516,00	1,29	6,45

1,00	31,07	2,82	461,00	1,15	5,76
2,00	62,15	5,65	471,00	1,18	5,89
4,00	124,29	11,30	503,00	1,26	6,29

Esfuerzo [kg/cm <sup>2</sup> ]	Altura final probeta [mm]	Relación de vacios final [e]	Coefficiente Compresibilidad [av]	mv [cm <sup>2</sup> /kg]
0,00	20,56	0,9983	0,0000	0,0000
0,25	19,88	0,9324	0,2634	0,1370
0,50	19,78	0,9225	0,0398	0,0207
1,00	19,73	0,9174	0,0102	0,0053
2,00	19,60	0,9047	0,0126	0,0066
4,00	19,32	0,8775	0,0136	0,0071
8,00	18,61	0,8088	0,0172	0,0089
4,00	18,69	0,8160	0,0018	0,0009
2,00	18,71	0,8185	0,0012	0,0006
1,00	18,85	0,8318	0,0134	0,0070
2,00	18,82	0,8294	0,0024	0,0013
4,00	18,74	0,8216	0,0039	0,0020

La precisión del deformímetro es: 0.0001 pulgada





**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**

**DETERMINACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS - EXPANSIÓN EN CONSOLIDÓMETRO**  
**I.N.V. E - 123 - 07**

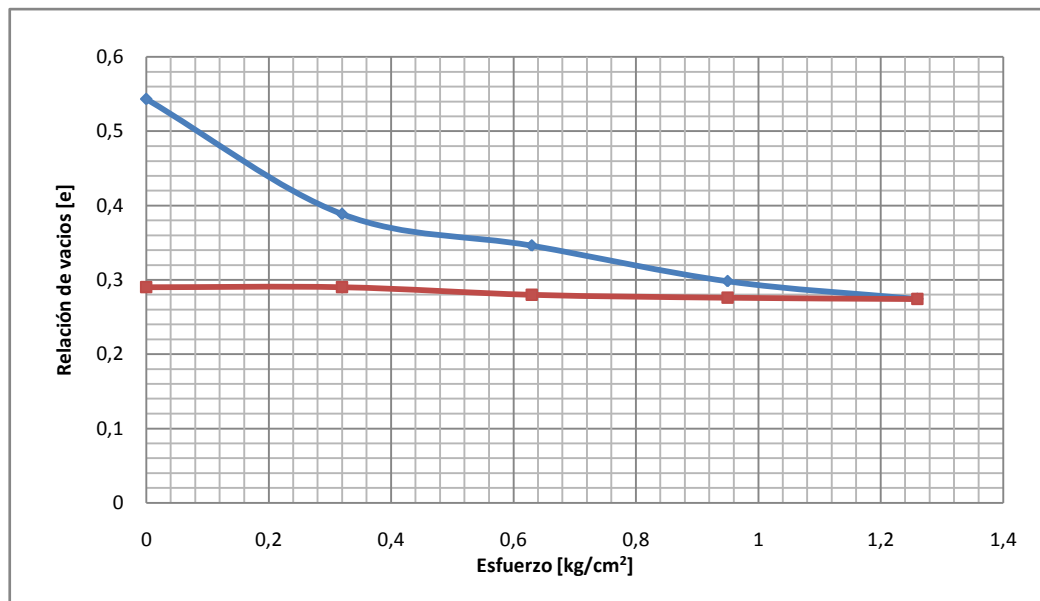
<b>FECHA:</b>	Mayo 2010	<b>SONDEO:</b>	1
<b>PROYECTO:</b>	Análisis del Comportamiento de Arcillas expansivas	<b>MUESTRA:</b>	4
<b>LOCALIZACION:</b>	Altos del Campo, Barranquilla	<b>PROFUNDIDAD:</b>	7,50 - 8,50 m.

Diámetro del anillo	6,35 cm
Área del anillo	31,67 cm <sup>2</sup>
Altura del anillo	2,13 cm
Volumen del anillo	67,46 cm <sup>3</sup>
Peso del anillo	62,60 g
Peso anillo+ muestra húmeda	203,60 g
Peso anillo+ muestra seca	173,47 g
Peso húmedo de la muestra:	141,00 g
Peso seco de la muestra	110,87
Humedad	27,18 %
Peso específico húmedo	2,09 g/cm <sup>3</sup>
Peso específico seco	1,64 g/cm <sup>3</sup>
Gravedad específica de los sólidos	2,77
Altura de los sólidos	1,26 cm
Altura de vacíos	0,87
Relación de vacíos	0,69
Factor de corrección de la carga	11,00

<b>Esfuerzo</b> [kg/cm <sup>2</sup> ]	<b>Carga P</b> [kg]	<b>Carga corregida</b> [Kg]	<b>Lectura Deformímetro</b>	<b>Deformación acumulada</b> [mm]	<b>Deformación</b> %
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,32	10,13	0,92	1317,60	3,29	15,46
0,63	19,95	1,81	1680,00	4,20	19,72
0,95	30,09	2,74	2088,00	5,22	24,51
1,26	39,90	3,63	2292,00	5,73	26,90
0,95	30,09	2,74	32,00	0,08	0,38
0,63	19,95	1,81	66,40	0,17	0,78
0,32	10,13	0,92	173,60	0,43	2,04
0	0	0	0,00	0,00	0,00

Esfuerzo [kg/cm <sup>2</sup> ]	Altura final probeta [mm]	Relación de vacíos final [e]	Coefficiente Compresibilidad [av]	mv [cm <sup>2</sup> /kg]
0,00	21,30	0,6853	0,0000	0,0000
0,32	18,01	0,4247	0,8145	0,6020
0,63	17,10	0,3530	0,2312	0,1709
0,95	16,08	0,2723	0,2522	0,1864
1,26	15,57	0,2319	0,1302	0,0962
0,95	21,22	0,6790	1,4421	1,0658
0,63	21,13	0,6722	-0,0213	-0,0157
0,32	20,87	0,6510	-0,0684	-0,0506
0	21,30	0,6853	0,1073	0,0793

La precisión del deformímetro es: 0.0001 pulgada



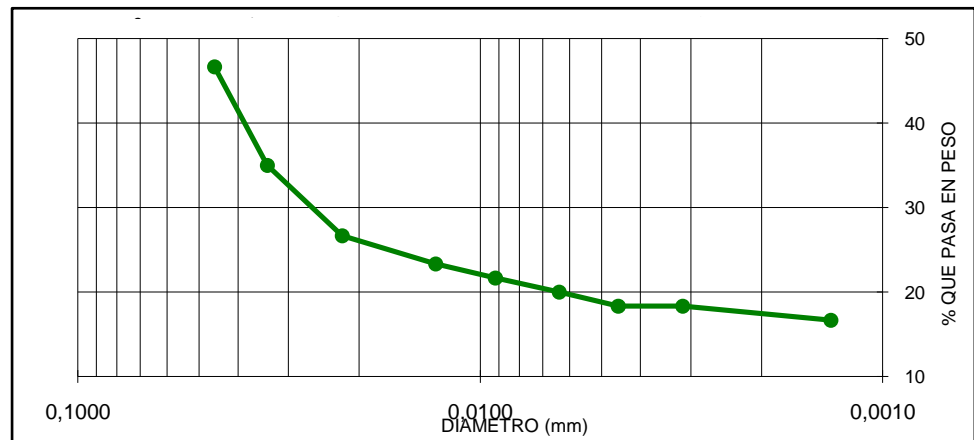


**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**  
**ANALISIS GRANULOMETRICO POR MEDIO DEL HIDROMETRO**  
**I.N.V. E - 124 - 07**

<b>FECHA</b>	Mayo de 2010	<b>SONDEO</b>	1
<b>PROYECTO</b>	Análisis del Comportamiento de Arcillas expansivas	<b>MUESTRA</b>	1
<b>LOCALIZACION</b>	Provenza, Bucaramanga	<b>PROFUNDIDAD</b>	1,50 m

HIDROMETRO N°	152H
CORRECCION POR MENISCO (Cm)	1,00 g/litro
FLOCULANTE USADO	Sodio Hexametafosfato
GRAVEDAD ESPECIFICA (Ss)	2,67
CANTIDAD DE MATERIAL	60 gramos
$\alpha$	1,00

t (min)	R'	Temp (°C)	L (mm)	Ct	R	K	D (mm)	% mas fino
1	27	21	119	0,3	28,00	0,0042	0,04582	46,6667
2	20	21	130	0,3	21,00	0,0042	0,03386	35,0000
5	15	21	138	0,3	16,00	0,0042	0,02206	26,6667
15	13	21	142	0,3	14,00	0,0042	0,01292	23,3333
30	12	21	143	0,3	13,00	0,0042	0,00917	21,6667
60	11	22	145	0,6	12,00	0,0041	0,00637	20,0000
120	10	22	147	0,6	11,00	0,0041	0,00454	18,3333
250	10	22	147	0,6	11,00	0,0041	0,00314	18,3333
1440	9	21	148	0,3	10,00	0,0042	0,00135	16,6667



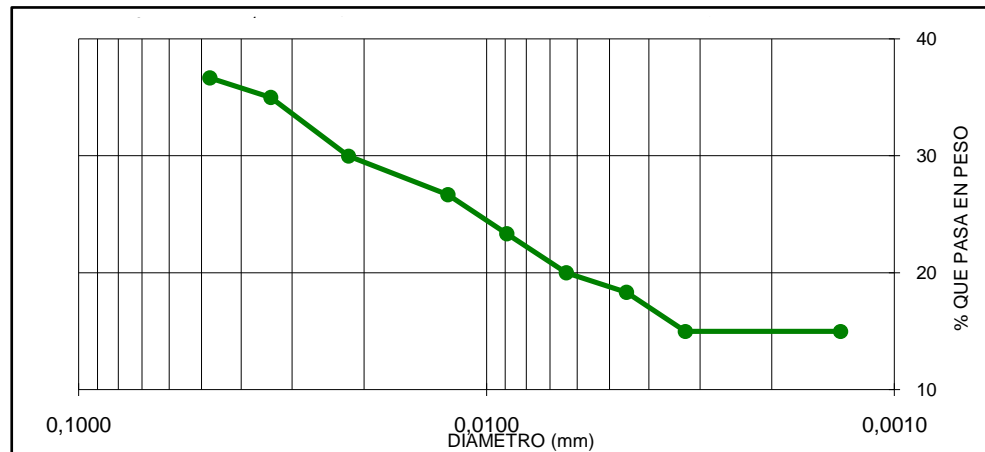


**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**  
**ANALISIS GRANULOMETRICO POR MEDIO DEL HIDROMETRO**  
**I.N.V. E - 124 - 07**

<b>FECHA</b>	Mayo de 2010	<b>SONDEO</b>	1
<b>PROYECTO</b>	Análisis del Comportamiento de Arcillas expansivas	<b>MUESTRA</b>	2
<b>LOCALIZACION</b>	Urbanización Sagrada Familia, San Gil	<b>PROFUNDIDAD</b>	2,00 m

HIDROMETRO N°	152H
CORRECCION POR MENISCO (Cm)	1,00 g/litro
FLOCULANTE USADO	Sodio Hexametafosfato
GRAVEDAD ESPECIFICA (Ss)	2,67
CANTIDAD DE MATERIAL	60 gramos
$\alpha$	1,00

t (min)	R'	Temp (°C)	L (mm)	Ct	R	K	D (mm)	% mas fino
1	21	21	129	0,3	22,00	0,0042	0,04770	36,6667
2	20	21	130	0,3	21,00	0,0042	0,03386	35,0000
5	17	21	135	0,3	18,00	0,0042	0,02182	30,0000
15	15	22	138	0,6	16,00	0,0041	0,01244	26,6667
30	13	22	142	0,6	14,00	0,0041	0,00892	23,3333
60	11	22	145	0,6	12,00	0,0041	0,00637	20,0000
120	10	22	147	0,6	11,00	0,0041	0,00454	18,3333
250	8	21	150	0,3	9,00	0,0042	0,00325	15,0000
1440	8	21	150	0,3	9,00	0,0042	0,00136	15,0000



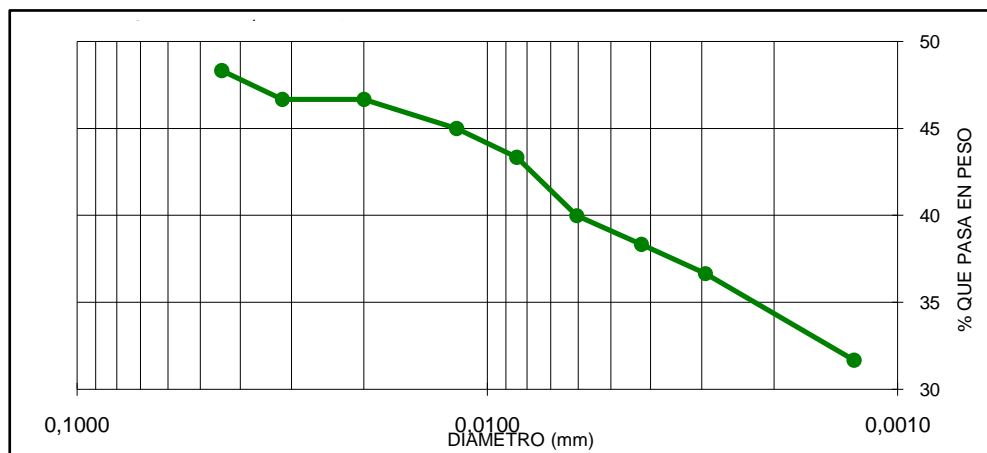


**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**  
**ANALISIS GRANULOMETRICO POR MEDIO DEL HIDROMETRO**  
**I.N.V. E - 124 - 07**

<b>FECHA</b>	Mayo de 2010	<b>SONDEO</b>	1
<b>PROYECTO</b>	Análisis del Comportamiento de Arcillas expansivas	<b>MUESTRA</b>	3
<b>LOCALIZACION</b>	Pinchote, Santander	<b>PROFUNDIDAD</b>	50 cm

HIDROMETRO N°	152H
CORRECCION POR MENISCO (Cm)	1,00 g/litro
FLOCULANTE USADO	Sodio Hexametrafosfato
GRAVEDAD ESPECIFICA (Ss)	2,77
CANTIDAD DE MATERIAL	60 gramos
$\alpha$	1,00

t (min)	R'	Temp (°C)	L (mm)	Ct	R	K	D (mm)	% mas fino
1	28	22	117	0,6	29,00	0,0041	0,04435	48,3333
2	27	22	119	0,6	28,00	0,0041	0,03163	46,6667
5	27	22	119	0,6	28,00	0,0041	0,02000	46,6667
15	26	21	120	0,3	27,00	0,0042	0,01188	45,0000
30	25	21	122	0,3	26,00	0,0042	0,00847	43,3333
60	23	21	125	0,3	24,00	0,0042	0,00606	40,0000
120	22	22	127	0,6	23,00	0,0041	0,00422	38,3333
250	21	22	129	0,6	22,00	0,0041	0,00295	36,6667
1440	18	21	133	0,3	19,00	0,0042	0,00128	31,6667



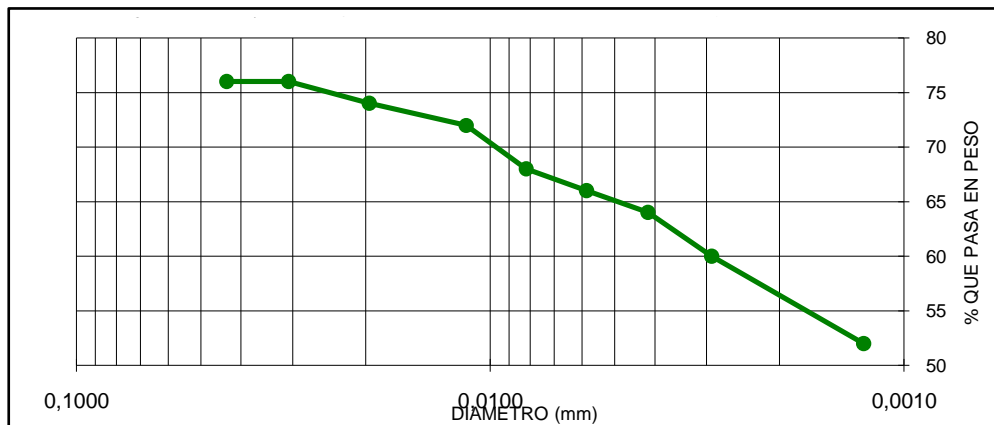


**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**  
**ANALISIS GRANULOMETRICO POR MEDIO DEL HIDROMETRO**  
**I.N.V. E - 124 - 07**

<b>FECHA</b>	Mayo de 2010	<b>SONDEO</b>	1
<b>PROYECTO</b>	Análisis del Comportamiento de Arcillas expansivas	<b>MUESTRA</b>	4
<b>LOCALIZACION</b>	Conjunto Residencial Altos del Campo, Barranquilla	<b>PROFUNDIDAD</b>	7,50 - 8,50 m

HIDROMETRO N°	152H
CORRECCION POR MENISCO (Cm)	1,00 g/litro
FLOCULANTE USADO	Sodio Hexametrafosfato
GRAVEDAD ESPECIFICA (Ss)	2,70
CANTIDAD DE MATERIAL	50 gramos
$\alpha$	1,00

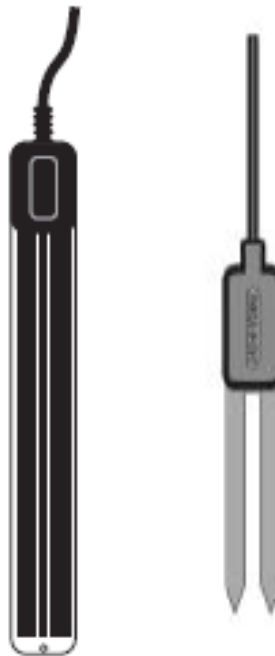
t (min)	R'	Temp (°C)	L (mm)	Ct	R	K	D (mm)	% mas fino
1	37	21	102	0,3	38,00	0,0043	0,04343	76,0000
2	37	21	102	0,3	38,00	0,0043	0,03071	76,0000
5	36	21	104	0,3	37,00	0,0043	0,01961	74,0000
15	35	21	106	0,3	36,00	0,0043	0,01143	72,0000
30	33	22	109	0,6	34,00	0,0043	0,00820	68,0000
60	32	22	111	0,6	33,00	0,0043	0,00585	66,0000
120	31	22	112	0,6	32,00	0,0043	0,00415	64,0000
250	29	22	115	0,6	30,00	0,0043	0,00292	60,0000
1440	25	21	122	0,3	26,00	0,0043	0,00125	52,0000



## **ANEXO B: MANUAL DE OPERACIÓN DEL SENSOR EC-5**

# ECH<sub>2</sub>O

Soil Moisture Sensor



## Operator's Manual

For Models EC-20, EC-10, and EC-5

**Version 5**



**Decagon Devices, Inc.**  
2365 NE Hopkins Court  
Pullman WA 99163 USA

Trademarks:  
"ECH<sub>2</sub>O" is a registered trademark  
of Decagon, Devices, Inc All rights reserved.

©2006 Decagon Devices, Inc.  
All rights reserved.

10371-05

---

## **Contents**

---

1. Introduction .....	1
Welcome .....	1
Specifications .....	1
Contact Information .....	2
Warranty Information .....	2
Seller's Liability .....	2
2. About the ECH <sub>2</sub> O Probes .....	4
The EC-10 and EC-20 .....	4
The EC-5 .....	4
Probe Features .....	5
Wiring Diagrams .....	5
3.5mm plug wiring .....	5
Wiring to Non-Decagon Dataloggers ...	6
Extension cables .....	7
3. Installing the Probes .....	8
Procedure .....	8
Orientation .....	10
Removing the Probe .....	10
4. Collecting Data .....	11
Datalogger Requirements .....	11
Connecting to a Datalogger .....	12
Sample Program .....	12
SCWin (Short Cut) Directions .....	14
Calibration .....	15
Probe calibration values .....	16

ECH<sub>2</sub>O Probe User's Manual  
*Contents*

---

Troubleshooting .....	19
Declaration of Conformity .....	20
Index .....	21

## 1. Introduction

---

### Welcome

Welcome to the ECH<sub>2</sub>O Dielectric Aquameter sensors for measuring soil water content. These innovative sensors will enable you to monitor soil moisture accurately and affordably.

### Specifications

**Measurement Time:** 10ms (milliseconds)

**Accuracy:**

*EC-10 and EC-20:*

$\pm .04 \text{ m}^3/\text{m}^3$  ( $\pm 4\%$ ) < 0.5 dS/m

With soil-specific calibration:  $\pm .02 \text{ m}^3/\text{m}^3$  ( $\pm 2\%$ )

*EC-5:*

at least  $0.003 \text{ m}^3/\text{m}^3$  all soils, up to 8 dS/m

With soil-specific calibration:  $\pm .02 \text{ m}^3/\text{m}^3$  ( $\pm 2\%$ )

**Resolution:**

*EC-10 and EC-20:*  $0.002 \text{ m}^3/\text{m}^3$

*EC-5:*  $0.001 \text{ m}^3/\text{m}^3$  VWC in mineral soils, 0.25% in growing media

**Power:**

*Requirements:*

EC-10 and EC-20: 2.5VDC @ 2mA to 5VDC @ 7mA

EC-5: 3VDC @ 10mA

*Output:* 10-40% of excitation voltage (250-1000mV at 2500mV excitation)

**Operating Environment:**

*EC-10 and EC-20:* 0 to 50°C

## ECH<sub>2</sub>O Probe User's Manual

### 1. Introduction

---

*EC-5*: -40 to +60 °C

**Range of Measurement:**

*EC-10 and EC-20*: 0 to saturated VWC

*EC-5*: 0 to 100% VWC

**Probe dimensions:**

*EC-20*: 25.4cm x 3.17cm x .15cm

*EC-10*: 14.5cm x 3.17cm x .15cm

*EC-5*: 8.9cm x 1.8cm x 0.7cm

**Cable length:** 5m standard, extension cable available

**Connector types:** 3.5 mm plug or stripped and tinned lead wires

**Datalogger Compatibility (not exclusive):**

*Decagon*: Em5, Em50 (and radio-enabled versions)

*Campbell Scientific*: CR10X, 21X, 23X, CR1000, CR3000, etc.

## Contact Information

To contact Decagon for customer support or questions:

**E-mail:**

[echo@decagon.com](mailto:echo@decagon.com)

**Fax:**

(509) 332-5158

**Telephone:**

(US and Canada only) 1-800-755-2751, or 509-332-2756.

## Warranty Information

The ECH<sub>2</sub>O probes have a 30-day satisfaction guarantee and a one-year warranty.

## Seller's Liability

Seller warrants new equipment of its own manufacture against defective workmanship and materials for a period

of one year from date of receipt of equipment (the results of ordinary wear and tear, neglect, misuse, accident and excessive deterioration due to corrosion from any cause are not to be considered a defect); but Seller's liability for defective parts shall in no event exceed the furnishing of replacement parts F.O.B. the factory where originally manufactured. Material and equipment covered hereby which is not manufactured by Seller shall be covered only by the warranty of its manufacturer. Seller shall not be liable to Buyer for loss, damage or injuries to persons (including death), or to property or things of whatsoever kind (including, but not without limitation, loss of anticipated profits), occasioned by or arising out of the installation, operation, use, misuse, nonuse, repair, or replacement of said material and equipment, or out of the use of any method or process for which the same may be employed. The use of this equipment constitutes Buyer's acceptance of the terms set forth in this warranty. There are no understandings, representations, or warranties of any kind, express, implied, statutory or otherwise (including, but without limitation, the implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose), not expressly set forth herein.

## **2. About the ECH<sub>2</sub>O Probes**

---

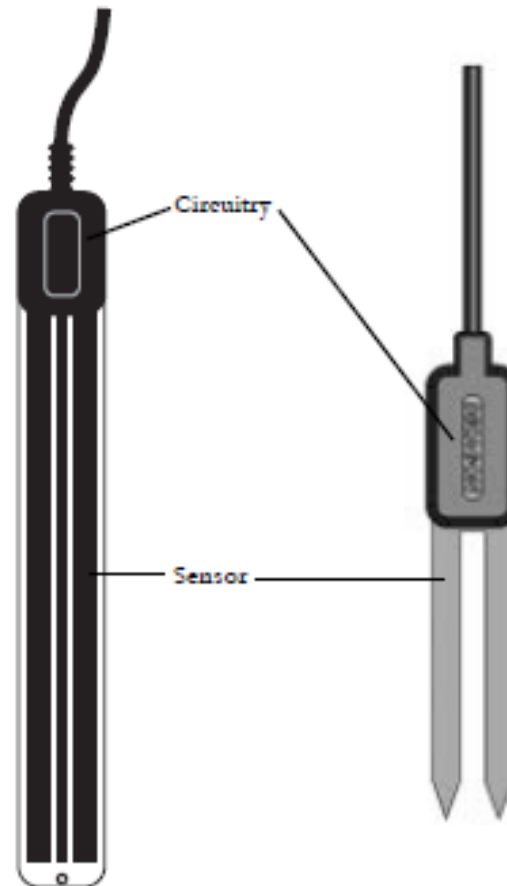
### **The EC-10 and EC-20**

The ECH<sub>2</sub>O probe measures the dielectric constant of the soil in order to find its volumetric water content. Since the dielectric constant of water is much higher than that of air or soil minerals, the dielectric constant of the soil is a sensitive measure of water content. The ECH<sub>2</sub>O probe has a very low power requirement and high resolution. This gives you the ability to make as many measurements as you want (even hourly) over a long period of time (like a growing season, for example), with minimal battery usage.

### **The EC-5**

The EC-5 varies from its EC-10 and EC-20 cousins. Although the principles of measurement are the same, its two-prong design and higher measurement frequency allows the EC-5 to measure VWC from 0 to 100%, and allows accurate measurement of all soil types and a much wider range of salinities.

## Probe Features



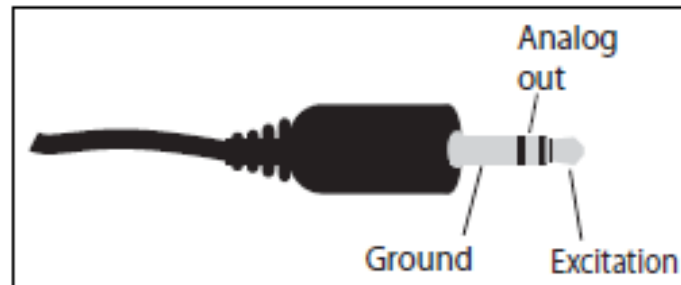
*Fig. 1: ECH<sub>2</sub>O probe diagram*     *Fig. 2: EC-5 probe diagram*

## Wiring Diagrams

### 3.5mm plug wiring

The ECH<sub>2</sub>O probe comes with a 3.5mm “stereo plug” connector. This allows for rapid connection directly to Decagon’s Em50 and Em5 logger to the ECH<sub>2</sub>O Check.

Below is a diagram showing the wiring configuration for this connector.



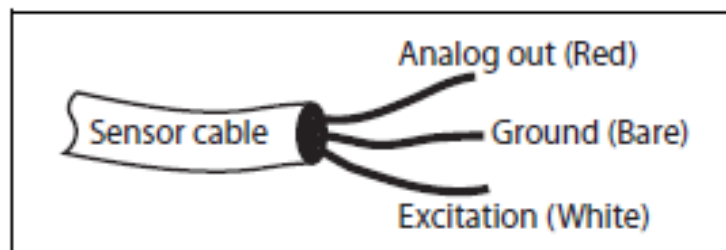
*Fig. 2: ECH<sub>2</sub>O plug wiring configuration*

### Wiring to Non-Decagon Dataloggers

Models with stripped and tinned leads are pre-configured for connecting to non-Decagon dataloggers. Simply wire the lead into the datalogger as described in “Connecting to a Datalogger” in Chapter 4.

If your model uses the standard 3.5mm plug, you have two choices when attaching ECH<sub>2</sub>O probes to non-Decagon dataloggers. First, you can clip off the plug on the probe cable, strip and tin the wires, and wire it directly into the datalogger. This has the advantage of creating a direct connection with no chance of the probe becoming un-plugged; however, it then cannot be used in the future with a Decagon Em50 or Em5 logger. The other choice is to obtain an ECH<sub>2</sub>O adapter cable from Decagon. The 3-wire probe adapter cable has a connector for the ECH<sub>2</sub>O probe jack on one end, and three wires on the other end for connection to a datalogger (this type of wire is often referred to as a “pigtail” adapter). Both the probe wire and adapter cable wire have the same wire output (shown in

Fig. 3); the white wire is excitation, red is output, and the bare wire is ground.



*Fig. 3: 3-wire cable wiring configuration*

## Extension cables

Decagon supplies 50-foot (15.25m) and 10-foot (3m) extension cables for use with the ECH<sub>2</sub>O probe. You can safely connect up to 4 of the 50-foot cables without signal attenuation. For most applications, you will want to seal the connections from the elements to maintain a good connection and to prevent corrosion.

## 3. Installing the Probes

When selecting a site for installation, it is important to remember that the soil adjacent to the probe surface has the strongest influence on the probe reading and that the probe measures the *volumetric* water content. Therefore any air gaps or excessive soil compaction around the probe can profoundly influence the readings. Also, do not install the probes adjacent to large metal objects such as metal poles or stakes. This can attenuate the probe's electromagnetic field and adversely affect output readings. Because the EC-5 has gaps between its prongs, it is also important to consider the size of the media you are inserting the probe into. It is possible to get sticks, bark, roots or other material stuck between the probe prongs, which will adversely affect readings. Finally, be careful when inserting the probes into dense soil, as the prongs will break if excessive sideways force is used when pushing them in.

### Procedure

When installing the ECH<sub>2</sub>O probe, it is best to maximize contact between the probe and the soil. There are two methods to accomplish this.

#### For the EC-10/EC-20:

1. **(Recommended)** Use Decagon's Probe Installation Kit to install the probe. This kit has a custom-shaped blade to make the insertion in the soil, then another tool to place the probe into the insertion. For deeper installations, use an augur to reach the desired depth,

then use the Installation kit with extension rods to install the probe.

2. Use a thin implement like a trenching shovel, gardening spade, or flat bar to make a pilot hole in the soil. Then insert the probe into the hole, making sure the entire length of the probe is covered. Finally, insert the shovel again into the soil a few inches away from the probe, and gently force soil toward the probe to provide good contact between the probe and the soil. For deeper installation, excavate down to the level you wish to measure, then install the probe as described.

**For the EC-5:**

1. Insert the probes into the soil, making sure that the prongs are buried completely up to the black overmolding, as shown below:



The tip of each prong has been sharpened to make it easier to push the probe in - *be careful with the sharp tips!*  
The probe may be difficult to insert into extremely

## ECH<sub>2</sub>O Probe User's Manual

### 3. Installing the Probes

---

compact or dry soil. If you have difficulty inserting the probe, try loosening the soil somewhat or wetting the soil. ***Never pound it in!***

#### Orientation

The probe can be oriented in any direction. However, orienting the flat side perpendicular to the surface of the soil will minimize effects on downward water movement.

#### Removing the Probe

When removing the probe from the soil, ***do not pull it out of the soil by the cable!*** Doing so may break internal connections and make the probe unusable.

## 4. Collecting Data

### Datalogger Requirements

The ECH<sub>2</sub>O sensors are designed to work most efficiently with Decagon's 5-channel Em5, Em50 or our ECH<sub>2</sub>O Check handheld readout. They can, however, be adapted for use with other dataloggers, such as those from Campbell Scientific, Inc., for example. The ECH<sub>2</sub>O requires an excitation voltage in the range of 2 to 5 volts. It produces an output voltage that depends on the dielectric constant of the medium surrounding the probe, and ranges between 10 and 50% of the excitation voltage. Any datalogger which can produce a 2.5 to 5V excitation with approximately 10 millisecond duration and read a volt-level signal with 12-bit or better resolution should be compatible with the ECH<sub>2</sub>O probes. For the EC-10 and EC-20 probes, the current requirement at 2.5V is around 2mA, and at 5V it is 7-8mA. For the EC-5, it is 10mA at 2.5V.

**NOTE:** ECH<sub>2</sub>O probes are intended only for use with dataloggers and readout devices which can provide short excitation pulses, leaving the probes turned off most of the time. Continuous excitation not only wastes battery power, but may, under certain circumstances, cause the probe to exceed government specified limits on electromagnetic emissions.

**NOTE:** All Decagon readout devices use either a 2.5V or 3V excitation, so the remainder of the discussion assumes this as the excitation. If other voltages are used, adjustments to the calibration equations provided will be needed.

## Connecting to a Datalogger

Connect the wires to the datalogger as shown, with the supply wire connected to the excitation, the analog out wire to an analog input, and the bare ground wire to ground:

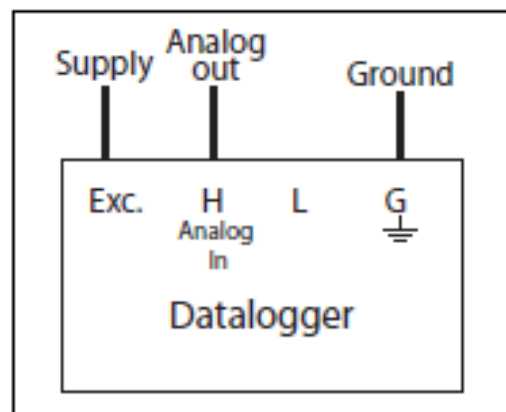


Fig. 5: Datalogger configuration

## Sample Program

The following program is an example that can be used with Campbell Scientific's CR10X datalogger and our ECH<sub>2</sub>O probes at a 2500mv excitation:

*Important Note:* Multiplier and offset in instruction 2 (P4) convert mV reading to % water content. Instruction 7 (P37) converts % volumetric water content to m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Also, "-" (such as the one in

*Instruction 4 (P89), line 1) increment the input location for the next time through the loop. A "-" is applied to the input location by clicking on the input location # and typing the letter "c".*

```
;(CR10X)
; Example ECH2O Datalogger Program for CR10X

; Wiring:

; White: Excitation Channel 1
; Red: Input Single Ended Channel 1
; Black: Ground

*Table 1 Program
01: 1      Execution Interval (seconds)

; Factory calibration equations for ECH2O
; probes convert mV output of ECH2O to
; volumetric water content (VWC, m3/m3)

; EC-20: VWC = 0.00069 * mV - 0.29
; EC-10: VWC = 0.00093 * mV - 0.376
; EC-5:  VWC = 0.00119 * mV - 0.400

; The multiplier and offset in this
; example are for the EC-5

1: Excite-Delay (SE) (P4)
1: 1      Repts
2: 5      2500 mV Slow Range
3: 1      SE Channel
4: 1      Excite all repts w/Exchan 1
5: 1      Delay (0.01 sec units)
6: 2500   mV Excitation
7: 1      Loc [ Probe_VWC ]
8: .00119 Multiplier
9: -.4    Offset

*Table 2 Program
02: 0.0000 Execution Interval (seconds)

*Table 3 Subroutines

End Program
```

```
1  [ Probe_VWC ] -M-- 0  1  -----
2  [ _____ ] ---- 0  0  -----
3  [ _____ ] ---- 0  0  -----
4  [ _____ ] ---- 0  0  -----
5  [ _____ ] ---- 0  0  -----
6  [ _____ ] ---- 0  0  -----
7  [ _____ ] ---- 0  0  -----
8  [ _____ ] ---- 0  0  -----
9  [ _____ ] ---- 0  0  -----
10 [ _____ ] ---- 0  0  -----
11 [ _____ ] ---- 0  0  -----
```

ECH<sub>2</sub>O Probe User's Manual  
4. Collecting Data

---

```
12 [ _____ ] ---- 0 0 -----  
13 [ _____ ] ---- 0 0 -----  
14 [ _____ ] ---- 0 0 -----  
15 [ _____ ] ---- 0 0 -----  
16 [ _____ ] ---- 0 0 -----  
17 [ _____ ] ---- 0 0 -----  
18 [ _____ ] ---- 0 0 -----  
19 [ _____ ] ---- 0 0 -----  
20 [ _____ ] ---- 0 0 -----  
21 [ _____ ] ---- 0 0 -----  
22 [ _____ ] ---- 0 0 -----  
23 [ _____ ] ---- 0 0 -----  
24 [ _____ ] ---- 0 0 -----  
25 [ _____ ] ---- 0 0 -----  
26 [ _____ ] ---- 0 0 -----  
27 [ _____ ] ---- 0 0 -----  
28 [ _____ ] ---- 0 0 -----
```

### SCWin (Short Cut) Directions

Following are instructions for using our SCWin (Short Cut) program to read EC-5, EC-10 and EC-20 ECH<sub>2</sub>O probes.

1. Download EchoCSI.zip from <http://www.deca-gon.com/appnotes/EchoCSIappnote.pdf>
2. Unzip the folder EchoCSI.zip.
3. Locate the file containing SCWin.exe. It should be in C:\Program Files\Campbellsci\SCWin. Place the following files from the unzipped EchoCSI.zip folder into the folder with SCWin.exe:

```
AM1632Z.MUX  
AM416Z.MUX  
EC10.SCS  
EC101632.SCS  
EC10416.SCS  
EC20.SCS  
EC201632.SCS  
EC20416.SCS  
EC5.SCS  
EC5632.SCS
```

EC5416.SCS  
SCWIN-DECAGON.CNT  
SCWIN-DECAGON.HLP

**Note:** If you are not able to find this directory path, search for the folder that contains SCWIN.exe and place the files into that folder.

4. Open up SCWin.exe (Short Cut). If you are using a V.3 copy of LoggerNet, there is a tab for SCWin (Short Cut) on the tool bar.
5. Select "New" to start a new program to read the ECH<sub>2</sub>O probes.
  - a. Select the datalogger you will be using to read the probes.
  - b. Select the measurement interval (a shorter measurement interval, i.e. 1 sec., is sometimes desirable when testing the probes).
6. Click on Sensors (this should open a new page with a file tree on it).
7. Under the "Sensors" file tree, double-click on "Meteorological" and then select "Soil Moisture."
8. ECH<sub>2</sub>O Probe EC-10 and ECH<sub>2</sub>O Probe EC-20 should appear on the tree along with other soil moisture probes.
  - a. If they don't appear, check to make sure you have pasted the files above into the correct location.

## Calibration

The ECH<sub>2</sub>O probes come pre-calibrated for most soil types. However, this general calibration may not be appli-

cable for all probes and all soil types. For example, the standard calibrations for the EC-20 and EC-10 probes do not perform in soils with high sand or salt content. Therefore, for added accuracy we encourage our customers to perform soil-specific calibrations.

The calibration equation that you will use depends on where you will be using it. If you will be using it with probes connected to a non-Decagon datalogger OR using the "SEN" value given from the ECH<sub>2</sub>O Check, you will need to use the 2500 mV calibration. If you use any Decagon software (DataTrac, ECH<sub>2</sub>O Utility, etc.) or the user calibration menu in the ECH<sub>2</sub>O Check, you will need to use the RAW calibration. The difference between the two is the slope constant. To increase the resolution of the sensor output, Decagon uses all available increments of the 12-bit number (value of 4096) where the measurement is stored. Thus, the output of the sensors read by the ECH<sub>2</sub>O Check and Decagon loggers must be multiplied by 0.61 AND the 2500 mV slope to give the right value.

#### Probe calibration values

Following is a list of the both the millivolt and RAW calibration values for the ECH<sub>2</sub>O probes, where  $\theta$  is the volumetric water content,  $mV$  is the millivolt output of the probe, and where  $x$  is the RAW probe output.

##### **EC-20**

$$2500mV: \theta (m^3/m^3) = 0.000695mV - 0.29$$

$$RAW: \theta (m^3/m^3) = 0.000424 x - 0.29$$

##### **EC-10:**

$$2500mV: \theta (m^3/m^3) = 0.000936mv - 0.376$$

$$\text{RAW: } \theta \text{ (m}^3/\text{m}^3) = 0.000571 x - 0.376$$

#### EC-5:

The EC-5 is much less sensitive to variation in texture and electrical conductivity because it runs at a much higher measurement frequency. Therefore, its general calibration equation should apply for all mineral soils up to 8 dS/m. Its calibration equations are shown below for mineral soil, potting soil, and rockwool growing media:

#### *Mineral Soils*

According to our tests, a single calibration equation will generally suffice for all mineral soil types with electrical conductivities from 0.1 dS/m to 10 dS/m. Volumetric water content ( $q$ ) is given by

$$q = 8.5 * 10^{-4} * \text{Raw} - 0.48 \quad (1)$$

where  $\text{Raw}$  is the output from the Decagon datalogger. If you are using a non-Decagon datalogger, VWC is given by

$$q = 11.9 * 10^{-4} * mV - 0.401 \quad (2)$$

where  $mV$  is the output of the probe when excited at 2500 mV. Please note that the equation will reach a maximum at ~60% volumetric water content (VWC) in pure water. To display data on a scale from 0 to 100%, VWC should be modeled with a quadratic equation (which would result in a 100% VWC in water), but a linear equation fits the mineral soil VWC range as well as the quadratic, and linear equations are easier to deal with, especially since mineral soil typically saturates at ~40 - 50% VWC.

***Potting soil***

The following equations can be used to convert EC-5 output to water content in potting soil. We tested several types of potting soil (Sunshine mix, Miracle Grow Potting Mix, and Custom Nursery soil) at several salinities and found that VWC is given by

$$q = 7.2 * 10^{-4} * R_{aw} - 0.393 \quad (3)$$

for a Decagon datalogger or

$$q = 10.3 * 10^{-4} * mV - 0.334 \quad (4)$$

for a datalogger with 2500mV excitation.

***Rockwool***

The EC-5 was calibrated in Grodan Master rockwool with solution electrical conductivities of 0.2, 1.0, 1.5, 2.0, and 4.5 dS/m. Volumetric water content can be calculated using

$$q = 6.28 * 10^{-7} * R_{aw}^2 + 1.37 * 10^{-4} * R_{aw} - 0.183 \quad (5)$$

for a Decagon datalogger or

$$q = 2.63 * 10^{-6} * mV^2 + 5.07 * 10^{-4} * mV - 0.0394 \quad (6)$$

for a datalogger with 2500 mV excitation.

**NOTE: These calibration constants only apply to 2500mV excitations; use of these numbers with any other excitation voltage will result in erroneous readings!**

## Troubleshooting

If you encounter problems with the ECH<sub>2</sub>O probes, they most likely will manifest themselves in the form of incorrect or erroneous readings. Before contacting Decagon about the sensor, do the following:

- Check to make sure the connections to the datalogger are both *correct* and *secure*.
- Ensure that your datalogger's batteries are not dead or weakened.

If you encounter problems that aren't due to the datalogger, please contact Decagon at (509) 332-2756 and at [echo@decagon.com](mailto:echo@decagon.com).

## **Declaration of Conformity**

**Application of Council Directive:** 89/336/EE6

**Standards to which conformity  
is declared:** EN61326 : 1998  
EN51022 : 1998

**Manufacturer's Name:** Decagon Devices, Inc.  
2365 NE Hopkins Court  
Pullman, WA 99163 USA

**Type of Equipment:** ECH<sub>2</sub>O dielectric soil  
moisture probe.

**Model Number:** EC-10, EC-20, EC-5

**Year of First Manufacture:** 2001

This is to certify that the ECH<sub>2</sub>O dielectric soil moisture probe, manufactured by Decagon Devices, Inc., a corporation based in Pullman, Washington, USA meets or exceeds the standards for CE compliance as per the Council Directives noted above. All instruments are built at the factory at Decagon and pertinent testing documentation is freely available for verification.

## **Index**

---

### **A**

accuracy 1

### **C**

calibration

for EC-10 16

for EC-20 16

for EC-5 17

for mineral soil 17

for potting soil 18

for rockwool 18

contact information 2

### **D**

datalogger 2

connecting to 12

requirements 11

sample program 12

declaration of conformity 20

### **E**

EC-10 4

EC-20 4

EC-5 4

calibration 17

email 2

e-mail address 2

extension cables 7

**I**

installation 8  
    procedure 8  
    tips 8

**M**

measurement range 2  
mineral soil  
    calibration 17

**O**

orientation of probe 10

**P**

plug  
    wiring configuration 5  
potting soil 18  
power  
    requirements 1  
probe  
    calibration 15  
    installation instructions 8  
    orientation 10  
    specifications 1  
probe orientation 10  
program 12

**R**

range 2  
removing the probe 10  
rockwool 18

**S**

seller's liability 2  
Short Cut directions 14  
specifications 1

**T**

troubleshooting 19

**W**

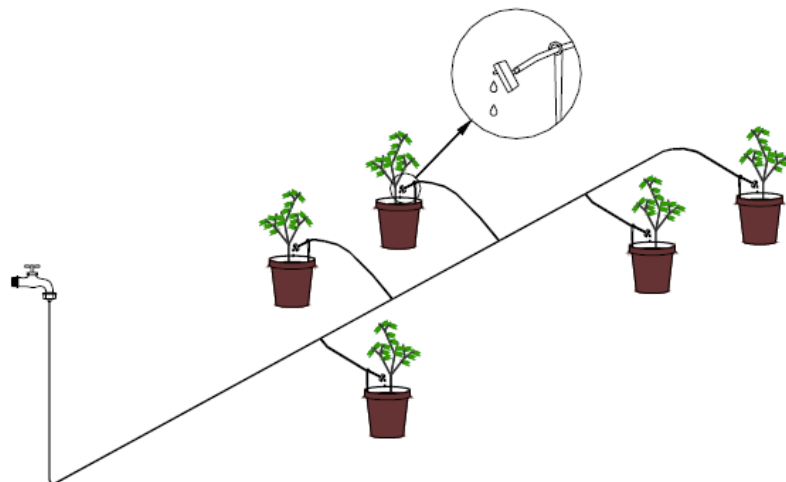
warranty 2  
wiring diagram 5  
wiring diagrams 5

## ANEXO C: DETALLES DEL KIT RIEGO BALCÓN

## KIT RIEGO BALCÓN

Goteo

**Fuente Jardín**  
BRICOLAJE DEL RIEGO Y LA JARDINERÍA  
[www.fuentejardin.com](http://www.fuentejardin.com)



## KIT RIEGO BALCONES

**Fuente Jardín**  
BRICOLAJE DEL RIEGO Y LA JARDINERÍA  
[www.fuentejardin.com](http://www.fuentejardin.com)



CONECTOR 3/4" a Microtubo . 1 UND.



TE microtubo 5x3. 15 UND.



Conexión Inicial microtubo. 1 UND.



GOTERO AUTOCOMPENSANTE. 15 UND.



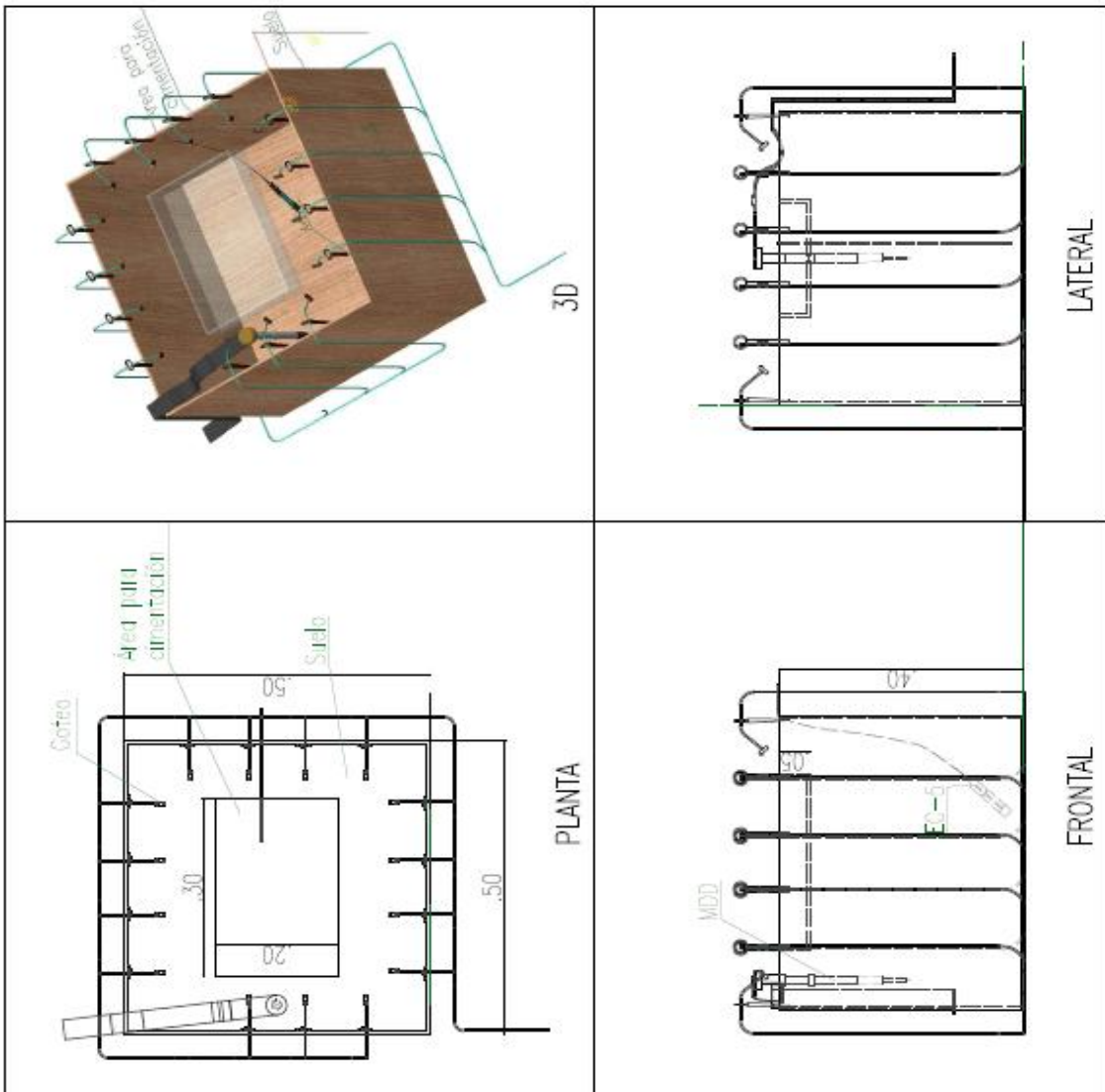
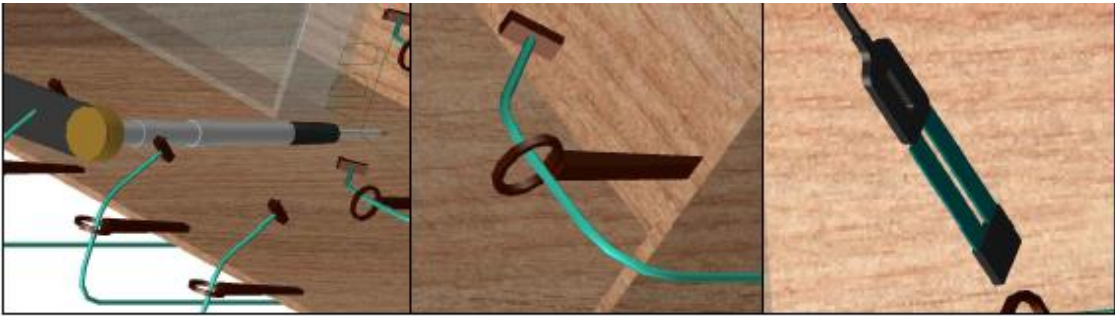
ESTACA SUECCION MICROTUBO. 15 UND.



Microtubo 5x3 mm. 15 m.

## ANEXO D: DETALLES DE LOS MODELOS PROPUESTOS

# MODELO A



# MODELO B

