

CARACTERIZACION DE GEOMATERIALES Y EVALUACION DE SU USO EN LA  
PREPARACION DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCION DE VIVIENDA  
SUSTENTABLE EN BUCARAMANGA.

ELIANA ROCIO JARAMILLO PEREZ

JOSUE MAURICIO PLATA CHAVES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGIA  
BUCARAMANGA

2012

CARACTERIZACION DE GEOMATERIALES Y EVALUACION DE SU USO EN LA  
PREPARACION DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCION DE VIVIENDA  
SUSTENTABLE EN BUCARAMANGA.

ELIANA ROCIO JARAMILLO PEREZ

JOSUE MAURICIO PLATA CHAVES

Trabajo de grado presentado para obtener el título de GEÓLOGO

Director:

Carlos Alberto Ríos Reyes

Geólogo Ph. D

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGIA  
BUCARAMANGA

2012

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por estar siempre presente en todas las etapas de mi vida.

A mi querida familia, por su paciencia y apoyo incondicional, muy especialmente a mi mami, por sus tiernos consejos.

A mi querido amigo y compañero de proyecto, Mauri, por su esfuerzo y dedicación a la ciencia y al estudio, y de quien aprendí con paciencia y cariño grandes cosas.

A mis queridos amigos y amigas, por todos los momentos compartidos.

Eliana ☺

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios.

A mi familia, por la compañía, el apoyo y el ejemplo.

A Eliana, por su leal amistad, cariño, compañía y paciencia.

Amigos y compañeros, por los buenos momentos.

Mauricio ☺



## TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCION.....	22
1. OBJETIVOS .....	24
1.1 Objetivos Generales.....	24
1.2 Objetivos Específicos .....	24
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	25
2.1 JUSTIFICACION .....	26
3. MARCO TEORICO .....	28
3.1. Técnicas constructivas tradicionales: El Adobe. ....	28
3.1.1. El adobe en el mundo y en Colombia .....	28
3.2. Características de los suelos.....	33
3.2.1. El Suelo .....	33
3.2.2. La tierra .....	34
3.3. Minerales arcillosos.....	37
3.3.1. Estructura de los minerales arcillosos .....	37
3.3.2. Propiedades de los minerales arcillosos .....	40
3.3.3. Clasificación de los minerales arcillosos .....	41
3.4. Identificación de minerales arcillosos .....	45
3.4.1. Fluorescencia de rayos X (XRF) .....	45
3.4.2. Difracción de rayos X (XRD) .....	46
3.4.3. Espectroscopia infrarroja .....	48
3.5. Caracterización de suelos .....	50
3.5.1. Análisis granulométrico .....	50
3.5.2 Ensayos de plasticidad de fracciones finas.....	51
3.6. Generalidades de la construcción con adobe .....	54

3.7. Ensayos para determinar las propiedades de las unidades de adobes .....	56
3.7.1. Ensayos de Absorción de Agua .....	56
3.7.2. Ensayo de Resistencia a la Flexión .....	57
3.7.3. Resistencia a la Compresión .....	59
4. METODOLOGÍA .....	60
4.1. Fase de revisión y análisis bibliográfico.....	60
4. 2 Fase de campo .....	60
4.3 Fase de caracterización del material .....	61
4.3.1 Granulometría .....	63
4.3.2 Prueba de hidrometría .....	64
4.3.3 Descripción de muestras.....	70
4.3.2 Análisis instrumentales .....	71
4.4 Fase de elaboración de probetas experimentales .....	71
4.5. FASE DE ENSAYOS DE COMPORTAMIENTO.....	85
4.6. FASE DE INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	86
FASE DE ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL .....	86
5 GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	87
5.1. Localización del Sector Prados de Laurentia.....	87
5.2. Clima.....	87
5.3. Proyecto Prados de Laurentia .....	88
5.4. Geología general.....	90
5.4.1. Formación Bucaramanga.....	91
6. RESULTADOS .....	99
6.1. ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	99
6.1.1. Estación 1.....	100

6.1.2. Estación 2.....	102
6.1.3. Estación 3.....	103
6.1.6. Estación 6.....	107
6.2. Descripción de muestras.....	109
6.3. Visita al área de extracción del estabilizante.....	112
6.4 DESCRIPCION Y ENSAYOS INSTRUMENTALES DE MATERIALES.....	113
6.4.1. Difracción de rayos x (drx).....	113
6.4.2. Fluorescencia de rayos x.....	120
6.4.3. Espectroscopia infraroja por transformada de fourier (irtf).....	121
6.5. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.....	124
6.5.1. Análisis Granulométrico para el estabilizante.....	125
6.6. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR HIDROMETRÍA.....	126
6.7. LÍMITES DE ATTERBERG.....	127
6.7.1 Limite líquido.....	127
6.7.2. Limite plástico.....	128
6.7 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA ÓPTIMO (CAO) POR MEDIO DE LA PRUEBA PROCTOR.....	131
6.9. ENSAYOS DE COMPORTAMIENTO ANTE ESFUERZOS Y AGENTES EXTERNOS.....	132
6.9.1. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE.....	132
6.9.2. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.....	140
6.9.3. ENSAYO DE ABSORCIÓN DE HUMEDAD.....	147
CONCLUSIONES.....	154
RECOMENDACIONES.....	157
BIBLIOGRAFIA.....	158

## LISTA DE TABLAS

Pag.

<b>Tabla 1 .</b> Valores representativos de CIC para varios materiales.....	42
<b>Tabla 2.</b> Clasificación de los minerales arcillosos.....	44
<b>Tabla 3.</b> Análisis químicos de minerales arcillosos.....	45
<b>Tabla 4.</b> Valores d en Å de las reflexiones características de los minerales arcillosos más comunes.....	49
<b>Tabla 5 .</b> Sistema de clasificación universal de suelos, para fracciones gruesas..	53
<b>Tabla 6.</b> Sistema de clasificación universal de suelos, para fracciones Finas.....	53
<b>Tabla 7.</b> Diámetros de las mallas utilizadas en las pruebas de granulometría. ....	63
<b>Tabla 8.</b> Sistema unificado de clasificación de suelos.....	69
<b>Tabla 9.</b> Proporciones de los materiales constituyentes en la elaboración de las probetas experimentales.....	77
<b>Tabla 10.</b> Proporciones de los materiales utilizados en la elaboración de la mezcla 1.....	79
<b>Tabla 11.</b> Proporciones de los materiales utilizados en la elaboración de la mezcla 2.....	80
<b>Tabla 12.</b> Proporciones de los materiales utilizados en la elaboración de la mezcla 3.....	81
<b>Tabla 13.</b> Proporciones de los materiales utilizados en la elaboración de la mezcla 4.....	82
<b>Tabla 14.</b> Proporciones de los materiales utilizados en la elaboración de la mezcla 5.....	83
<b>Tabla 15.</b> Proporciones de los materiales utilizados en la elaboración de la mezcla 6.....	84
<b>Tabla 16.</b> Proporciones de los materiales utilizados en la elaboración de la mezcla 7.....	85
<b>Tabla 17.</b> .Análisis por DRX de la muestra arcillosa.....	114

<b>Tabla 18.</b> Análisis por DRX del Residuo minero.....	114
<b>Tabla 19.</b> Análisis por DRX del Bloque de la mezcla 3.....	114
<b>Tabla 20.</b> Analisis elemental por fluorescencia de Rayos X.....	120
<b>Tabla 21.</b> Datos obtenidos a partir de los cálculos de granulometría. ....	124
<b>Tabla 22.</b> Curva granulométrica del residuo minero triturado.....	125
<b>Tabla 23.</b> Análisis granulométrico por hidrometría.. ....	126
<b>Tabla 24.</b> Resultados obtenidos en la determinación del límite líquido para la muestra. ....	127
<b>Tabla 25.</b> Resultados obtenidos en la determinación del límite plástico para la muestra. ....	128
<b>Tabla 26.</b> Clasificación de la muestra en el sistema unificado de clasificación de suelos.....	130
<b>Tabla 27.</b> Resumen clasificación en el sistema unificado de suelos para la muestra de tierra.....	130
<b>Tabla 28.</b> Valores obtenidos en la prueba de Proctor.....	131
<b>Tabla 29.</b> Valores promedios obtenidos para los ensayos elaborados con los 5 especímenes para cada mezcla .....	132
<b>Tabla 30.</b> Resultados de ensayo de resistencia a la compresión para las 5 unidades de la mezcla 1. ....	133
<b>Tabla 31 .</b> Resultados de ensayo de resistencia a la compresión para las 5 unidades de la mezcla 2 .....	134
<b>Tabla 32.</b> Resultados de ensayo de resistencia a la compresión para las 5 unidades de la mezcla 3 .....	135
<b>Tabla 33.</b> Resultados de ensayo de resistencia a la compresión para las 5 unidades de la mezcla 4 .....	136
<b>Tabla 34.</b> Resultados de ensayo de resistencia a la compresión para las 5 unidades de la mezcla 5 .....	137
<b>Tabla 35.</b> Resultados del ensayo de resistencia a la compresión para las 5 unidades de la mezcla .....	138

<b>Tabla 36.</b> Resultados de ensayo de resistencia a la compresión para las 5 unidades de la mezcla 7 .....	139
<b>Tabla 37.</b> Resultados de ensayo de resistencia a la flexión para las 3 unidades de la mezcla 1.....	141
<b>Tabla 38.</b> Resultados de ensayo de resistencia a la flexión para las 3 unidades de la mezcla 2.....	142
<b>Tabla 39.</b> Resultados de ensayo de resistencia a la flexión para las 3 unidades de la mezcla 3.....	142
Tabla 40. Resultados de ensayo de resistencia a la flexión para las 3 unidades de la mezcla 4.....	143
<b>Tabla 41.</b> Resultados de ensayo de resistencia a la flexión para las 3 unidades de la mezcla 5.....	144
<b>Tabla 42.</b> Resultados de ensayo de resistencia a la flexión para las 3 unidades de la mezcla 6.....	145
<b>Tabla 43.</b> Resultados de ensayo de resistencia a la tensión para las 3 unidades de la mezcla.....	145
<b>Tabla 44.</b> Resultados de ensayo de absorción de humedad y resistencia a la compresión en exceso de humedad para las 5 unidades de la mezcla 3.....	149
<b>Tabla 45.</b> Resultados de ensayo de absorción de humedad y resistencia a la compresión en exceso de humedad para las 5 unidades de la mezcla 5.....	150
<b>Tabla 46.</b> Resultados de ensayo de absorción de humedad y resistencia a la compresión en exceso de humedad para las 5 unidades de la mezcla 7.....	152

## LISTA DE FIGURAS

	Pag.
<b>Figura 1.</b> (a). Ubicación de zonas donde se construye con tierra. (b). las zonas sísmicas.....	25
<b>Figura 2.</b> Proyecto de urbanización Casa Viva en Vegachí, Antioquia. ....	33
<b>Figura 3.</b> Bandas tetraédricas SiO <sub>4</sub> , octaédricas y ensamblaje estructural en minerales arcillosos. ....	39
<b>Figura 4.</b> Reflexiones de los rayos incidentes sobre superficies planas de minerales arcillosos. ....	48
<b>Figura 5.</b> Distribución granulométrica adecuada de la mezcla para la elaboración de ladrillos y bloques de tierra. ....	51
<b>Figura 6 .</b> Elaboración de bloques de adobe con la Prensa CINVA-Ram en Colombia.....	55
<b>Figura 7.</b> Diagrama de montaje de modulo de Rotura. ....	58
<b>Figura 8 .</b> Vibrador de Tamices. Tamizador Mecánico RO-TAP Testing Sieve Shaker, serial No. 21707. ....	63
<b>Figura 9.</b> Determinación de la granulometria por tamizado. Calculo del peso de la muestra retenida en cada uno de los tamices. ....	64
<b>Figura 10.</b> Prueba de determinación de materiales finos por Hidrometría. ....	65
<b>Figura 11.</b> Ensayo de determinación de límite líquido para la muestra de suelo...	67
<b>Figura 12.</b> Ensayo de determinación de limite plástico para la muestra de suelo.	68
<b>Figura 13.</b> Elaboración de la prueba Proctor.....	70
<b>Figura 14.</b> Lupa Microscópica NIKON Inc. High Intensity Illuminator, NI-150 empleada en la descripción textural de los materiales.....	71
<b>Figura 15.</b> Maquina adobera manual CINVA-RAM y dimensiones de un bloque de adobe.....	72
<b>Figura 16.</b> Material triturado en la trituradora de mandíbulas BB 200 RETSCH. ..	74
<b>Figura 17.</b> Molino de Bolas Denver. ....	75
<b>Figura 18.</b> Determinación de la granulometría del residuo minero triturado.....	75
<b>Figura 19.</b> Proceso de homogenización de las mezclas. ....	78

<b>Figura 20.</b> Elaboración y disposición de los bloques de tierra compactada.....	78
<b>Figura 21.</b> Unidades de adobes de la Mezcla 1. ....	79
<b>Figura 22.</b> Unidades de adobes de la Mezcla 2. ....	80
<b>Figura 23.</b> Unidades de adobes de la Mezcla 3. ....	81
<b>Figura 24.</b> Unidades de adobes de la Mezcla 4. ....	82
<b>Figura 25.</b> Unidades de adobes de la Mezcla 5. ....	83
<b>Figura 26.</b> Unidades de adobes de la Mezcla 6. ....	84
<b>Figura 27.</b> Unidades de adobes de la Mezcla 7. ....	85
<b>Figura 28.</b> Prensa digital marca Pinzua, modelo PC-160/116. Dispositivo empleado para el ensayo de flexión. ....	86
<b>Figura 29.</b> Esquema de Localización de la zona de estudio .....	88
<b>Figura 30.</b> Prados de Laurentia. Elaboración de las viviendas. ....	89
<b>Figura 31.</b> Mapa geológico regional del área de estudio.....	96
<b>Figura 32.</b> Leyenda del mapa geológico de Bucaramanga. ....	97
<b>Figura 33.</b> Mapa de zonificación geotécnica, donde se resaltan las principales fallas. ....	98
<b>Figura 34.</b> Estaciones en la etapa de cartografía y límites estratigráficos en superficie. ....	99
<b>Figura 35.</b> Fotomosaico estación 1. ....	101
<b>Figura 36.</b> Fotomosaico estación 2. ....	102
<b>Figura 37.</b> Fotomosaico estación 3. ....	104
<b>Figura 38.</b> Fotomosaico estación 4. ....	106
<b>Figura 39.</b> Fotomosaico estación 5 .....	107
<b>Figura 40.</b> Fotomosaico estación 6 .....	108
<b>Figura 41.</b> Fotomosaico estación 7 .....	109
<b>Figura 42.</b> Registro fotográfico de muestras de mano.. ....	110
<b>Figura 43.</b> Columna estratigráfica .....	111
<b>Figura 44 .</b> Disposición del residuo minero de la Mesa de los Santos. Centros de acopio. ....	113

<b>Figura 45.</b> Difractograma de la muestra de arcilla de la tierra usada como materia prima.....	115
<b>Figura 46.</b> Difractograma de la muestra de residuo minero .....	116
<b>Figura 47.</b> Difractograma para un bloque de la mezcla M3.....	117
<b>Figura 48.</b> Análisis de IR-ATR para la arcilla. ....	121
<b>Figura 49.</b> Análisis de IR-ATR para la arcilla. ....	122
<b>Figura 50.</b> Análisis de IR-ATR para la arcilla.....	122
<b>Figura 51.</b> Análisis de IR-ATR para la arcilla. ....	123
<b>Figura 52.</b> Análisis de IR-ATR para el residuo minero. ....	123
<b>Figura 53.</b> Análisis de IR-ATR para el residuo minero .....	124
<b>Figura 54 .</b> Curva de granulometría de la muestra.....	125
<b>Figura 55.</b> Curva granulométrica del residuo minero triturado .....	126
<b>Figura 56.</b> Grafica de granulometría para partículas de limo y arcillas. ....	127
<b>Figura 57.</b> Determinación del límite liquido.. ....	128
<b>Figura 58.</b> Datos obtenidos en la prueba de compactación Proctor modificada. ....	131
<b>Figura 59.</b> Ensayos de compresión para las 5 unidades de adobes de la mezcla 1.....	133
<b>Figura 60.</b> Ensayos de compresión para las 5 unidades de adobes de la mezcla 2.....	134
<b>Figura 61.</b> Ensayos de compresión para las 5 unidades de adobes de la mezcla 3.....	135
<b>Figura 62.</b> Ensayos de compresión para las 5 unidades de adobes de la mezcla 4.....	136
<b>Figura 63.</b> Ensayos de compresión para las 5 unidades de adobes de la mezcla 5.....	137
<b>Figura 64.</b> Ensayos de compresión para las 5 unidades de adobes de la mezcla 6.....	138
<b>Figura 65.</b> Ensayos de compresión para las 5 unidades de adobes de la mezcla 7.....	139
<b>Figura 66.</b> Resultados promedio de resistencia a la compresión .....	139

<b>Figura 67.</b> Ensayo de Flexión para la mezcla 1. ....	141
<b>Figura 68.</b> Ensayo de Flexión para la mezcla 2. ....	141
<b>Figura 69.</b> Ensayo de Flexión para la mezcla 3. ....	142
<b>Figura 70.</b> Ensayo de Flexión para la mezcla 4. ....	143
<b>Figura 71.</b> Ensayo de Flexión para la mezcla 5. ....	144
<b>Figura 72 .</b> Ensayo de Flexión para la mezcla 6. ....	144
<b>Figura 73.</b> Ensayo de Flexión para la mezcla 7. ....	145
<b>Figura 74.</b> Resultados promedio del módulo de Rotura .....	146
<b>Figura 75.</b> Ensayo de absorción de humedad para la mezcla 2.....	147
<b>Figura 76.</b> Ensayo de absorción de humedad para la mezcla 3 .....	148
<b>Figura 77.</b> Resistencia a la compresión en exceso de humedad para la mezcla 3.....	148
<b>Figura 78.</b> Ensayo de absorción de humedad para la mezcla 4 .....	149
<b>Figura 79.</b> Ensayo de absorción de humedad para la mezcla 5.....	150
<b>Figura 80.</b> Resistencia a la compresión en exceso de humedad para la mezcla 5.....	150
<b>Figura 81.</b> Ensayo de absorción de humedad para la mezcla 6 .....	151
<b>Figura 82.</b> Ensayo de absorción de humedad para la mezcla 7 .....	152
<b>Figura 83 .</b> Resultados promedio obtenidos en la prueba de absorción de humedad.....	152

## RESUMEN

### TITULO

CARACTERIZACION DE GEOMATERIALES Y EVALUACION DE SU USO EN LA PREPARACION DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCION DE VIVIENDA SUSTENTABLE EN BUCARAMANGA<sup>1</sup>.

### AUTORES

Jaramillo, E. Plata, M.<sup>2</sup>

### PALABRAS CLAVES

Vivienda sustentable, adobe, residuo minero, geomateriales, geología ambiental.

### DESCRIPCIÓN

Abundante, económico, ecológico y de fácil acceso son algunas de las características que presentan los suelos residuales al considerárseles como material de construcción. Las técnicas de elaboración de vivienda sustentable, se basan en fundamentos estéticos, sociales y de preservación ambiental, reconociendo los límites y las potencialidades de la naturaleza. Desde el punto de vista arquitectural, garantiza las condiciones favorables de habitabilidad, y un costo económico mesurado. En este estudio se realizó la caracterización fisicoquímica del suelo residual proveniente de la Formación Flujos de Escombros en el municipio de Floridablanca, Santander, y del residuo de las minas de Yeso de la Mesa de los Santos, Santander. Una vez identificada la composición de los materiales, se realizaron una serie de mezclas compuestas por tierra, residuo minero, agua y cal en diferentes proporciones, para elaborar adobes estabilizados. Posteriormente, se emplearon ensayos de resistencia a la compresión simple, flexión, absorción total y estabilidad dimensional, con el fin de evaluar su comportamiento y escoger la mezcla que presentara los mejores resultados. De esta manera, el uso de diferentes residuos estériles en la producción minera como materiales alternativos con aplicaciones cementantes, es un medio muy efectivo que contribuye a mitigar el problema de disposición de estos subproductos y por otro lado gracias al bajo consumo e impacto ambiental que requiere la síntesis de estos, se convierten en grandes alternativas frente a las ya conocidas en la industria cementera tradicional, las cuales, son responsables de grandes emisiones de gases contaminantes como el CO<sub>2</sub>.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado, modalidad investigación. Director: Ph. D Carlos A. Rios.

<sup>2</sup> Facultad de ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de geología.

## ABSTRACT

**TITLE: GEOMATERIALS CHARACTERIZATION AND EVALUATION OF THEIR USE IN THE PREPARATION OF MATERIALS FOR THE CONSTRUCTION OF SUSTAINABLE HOUSING IN BUCARAMANGA<sup>3</sup>.**

**AUTHORS:** Jaramillo, E. Plata, M<sup>4</sup>

Abundant, economic, ecological and easy access, are some of the characteristics shown by the residual soils considering them as building material. Techniques of sustainable housing development are based on aesthetic, social and environmental preservation fundamentals, recognizing the limits and potentialities of nature. From the architectural point of view, ensures the favorable conditions of habitability, and a moderate economic cost. This study was based on the physicochemical characterization of residual soil from the Flujos de Escombros Formation in Floridablanca, Santander, and the residue of gypsum mines from the Mesa de los Santos, Santander. Once the composition of materials was identified, a series of mixtures were prepared, composed of ground, mineral residue, water and lime in different proportions, to produce stabilized bricks. Subsequently, compressive and bending strength, total absorption and dimensional stability assays were used, in order to evaluate the behavior of the bricks and choose the mixture to produce the best results. Thus, the use of different sterile waste result of mining production as alternative materials with cementitious applications, is a very effective way which helps to mitigate the problem of disposal of these products and on the other hand, thanks to low consumption and environmental impact that requires the synthesis of these, they become great alternatives to those already known in the traditional cement industry, which are responsible for large emissions of polluting gases such as CO<sub>2</sub>.

---

<sup>3</sup> Degree project, research modality. Director: Ph. D Carlos a. Rios

<sup>4</sup> Faculty of Physicochemical Engineering, Geology School.

## INTRODUCCION

La participación del hombre dentro de un ecosistema lo involucra como parte activa de los ciclos presentes en el medio que lo rodea. La construcción de vivienda sustentable, se encuentra ligada a intereses ecológicos, estéticos y sociales, se funda en el reconocimiento de los límites y de las potencialidades de la naturaleza, así como una arquitectura con una complejidad ambiental, que debe garantizar condiciones favorables de habitabilidad, y un costo económico medido. Así, se ve la necesidad de generar ideas que estén orientadas hacia una vivienda de buena condición de manera sostenible. La arquitectura tradicional en adobe busca romper la idea que buena parte de la población y muchos de los constructores tienen al pensar que ahorro y sostenibilidad es sinónimo de privación, lo cual les lleva a adelantar proyectos alejados de algún principio ecológico. En este aspecto es importante la selección de materiales y técnicas. La tierra usada como materia prima para elaborar bloques o muros (adobes, tapia pisada), ha despertado interés gracias al aporte de la academia que busca validar su eficiencia siempre y cuando, como todo material, sea utilizada atendiendo a sus limitaciones y alcances

La técnica del adobe se basa en piezas macizas o unidades de barro sin cocer, que presentan dimensiones variables según la tradición y el criterio de construcción. Obtener un material de construcción a partir de un suelo arcilloso no siempre es sencillo y requiere experiencia. La mezcla adecuada depende del tipo de suelo, de su consistencia y de la aplicación que se le quiera dar. Los materiales finos de la mezcla, los cuales desarrollan el papel aglutinante del material, pueden ser caracterizados usando diferentes técnicas instrumentales, como la fluorescencia de rayos X (RXF), difracción de rayos X (XRD) o espectroscopia infrarroja. También se deben analizar desde el punto de vista ingenieril, el material extraído del suelo.

Después de la caracterización de las condiciones del suelo se adicionan otros materiales, proceso conocido como estabilización. Las pruebas de estabilización están orientadas a mejorar las debilidades que la tierra puede presentar ante diferentes factores, los ensayos establecidos por la norma NSR-10 D.3.8.1.3, son absorción total, estabilidad dimensional y resistencia a la compresión de por lo menos cinco (5) unidades.

La metodología consiste en la preparación de bloques de tierra compactada con varias proporciones del aditivo para después escoger aquella proporción que ofrezca el comportamiento más conveniente. Con la tierra así estabilizada se busca obtener una mayor resistencia a la compresión y tensión, y mejores condiciones de impermeabilización. El grado de complejidad en la elaboración de los bloques se mantiene sencillo y no se altera el método de construcción una vez estabilizada la tierra.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVOS GENERALES**

Caracterizar geomateriales, y evaluar su comportamiento como mezclas estabilizadas en la preparación de adobe para la elaboración de vivienda sustentable en Bucaramanga.

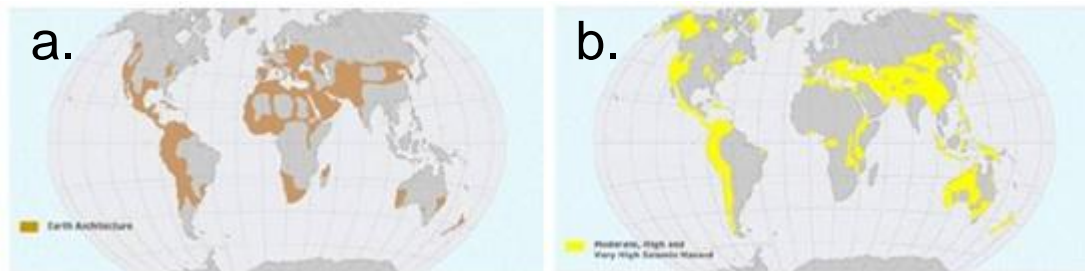
### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Efectuar la caracterización de los Geomateriales (suelos residuales – residuo minero La Mesa de Los Santos) utilizados en la preparación de adobes para la construcción de vivienda sustentable.
- Realizar la descripción geológica de la zona de suministro de la materia prima para la elaboración de adobes.
- Realizar mezclas del material en diferentes proporciones y elaborar bloques de tierra compactada.
- Analizar el comportamiento de los bloques elaborados y determinar el que presenta las mejores propiedades.
- Proponer una mezcla de elaboración, de acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas de comportamiento.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El creciente deterioro ambiental del planeta en las últimas décadas, con fenómenos como el cambio climático, la deforestación y la contaminación ambiental, son algunas de las señales de alarma que demandan una reconciliación con la naturaleza. Para el caso de las construcciones habitacionales de adobe, debe existir una reglamentación que tenga en cuenta las características del material. El hecho que éste no sea elástico hace que una vez alcanzados los límites de su resistencia, el material ceda y se fracture, y más aun si los bloques están sometidos bajo fuerzas externas, como en el caso de los sismos. Esta situación se complica si tenemos en cuenta que existe una lamentable coincidencia geográfica entre las áreas donde se construye viviendas de adobe con técnicas inapropiadas y las zonas sísmicas del planeta (Figura 1), esta circunstancia nos hace permanentemente vulnerables a desastres asociados a terremotos, que muchas veces ocasionan pérdidas humanas y daños en la economía de las poblaciones afectadas.

**Figura 1.** (a). Ubicación de zonas donde se construye con tierra. (b). las zonas sísmicas.



Fuente: Blondet & Brzev, 2003.

La construcción en adobe ha tenido poco desarrollo en los últimos años, justamente por la ausencia de una normatividad que la ampare y la respalde (la norma sismoresistente colombiana no tiene una reglamentación específica para la

construcción con Adobe y mucho menos acerca de las propiedades y composición de los materiales constituyentes). Ante estos escenarios conviene observar que la tierra estabilizada es un material de características diferentes a las de la tierra sola. Por tanto es necesario experimentar técnicas para la elaboración de materiales con tierra, donde se identifiquen las características químicas y físicas, y se determine la adición de elementos que optimicen las propiedades técnicas de las mezclas, que en muchos casos superan a las de los materiales convencionales.

## **2.1 JUSTIFICACION**

Dada la tendencia actual de las políticas de construcción, y ante el creciente interés de la sociedad por llevar una relación amistosa con el medio ambiente, en los últimos años se ha considerado retomar la investigación en materiales de construcción a partir de suelos residuales, buscando mejorar sus propiedades. Abundante, económico, ecológico y de fácil acceso son algunas de las características que presentan los suelos residuales al considerárseles como material de construcción. Es necesario conocer las propiedades de cada uno de los elementos que componen la mezcla con el fin de determinar la proporción adecuada de ellos, y la selección adecuada del estabilizante en caso de ser necesario, ya que el uso equivocado de algunos aditivos puede generar deficiencias. La norma NSR-10, la cual rige la construcción en Colombia no contiene una reglamentación específica para la construcción con Adobe y sus unidades, a pesar de su potencial aplicación. Estudios recientes demuestran que al aplicar una metodología de ensayos y caracterizar física y químicamente la tierra junto con una adecuada selección y adición de elementos o subproductos contribuye al mejoramiento de las propiedades tecnológicas. En este sentido, el uso de diferentes residuos estériles en la producción minera como materiales alternativos con aplicaciones cementantes se ha convertido en un medio muy

efectivo para alcanzar, en parte, un desarrollo sostenible que contribuye a mitigar el problema de disposición de estos subproductos y por otro lado gracias al bajo consumo e impacto ambiental que requiere la síntesis de estos residuos, se convierten en grandes alternativas frente a las ya conocidas en la industria cementera tradicional las cuales son responsables de grandes emisiones de gases contaminantes como CO<sub>2</sub>. Esta idea de construcción favorece el desarrollo de tecnologías austeras desde el punto de vista ecológico, además que ha demostrado en el ámbito arquitectural, estar muy acorde con un estilo de vivienda moderno y confortable. A esto se suma su bajo costo económico y al beneficio de ser socialmente viable en un contexto como el colombiano. No se pretende en ningún momento desacreditar o criticar el uso de los materiales de construcción, la idea es estudiar el uso de la tierra en situaciones y contextos donde aporten beneficio ambiental y social, por ejemplo proyectos unifamiliares o en zonas rurales, contribuyendo así en el perfil de sostenibilidad de la región.

### **3. MARCO TEORICO**

#### **3.1. TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS TRADICIONALES: EL ADOBE.**

El adobe es una técnica de construcción con tierra ampliamente distribuida a nivel mundial, que consiste en piezas macizas de barro sin cocer. Las dimensiones de estos son variables, según la tradición y criterios constructivos que en promedio pueden variar desde 30 cm de longitud, 15 cm de ancho y 7 cm de alto hasta 40 cm de longitud, 20 cm de ancho y 10 cm de alto.

##### **3.1.1. El adobe en el mundo y en Colombia**

Esta técnica primitiva apareció por primera vez en el octavo milenio a.c en las construcciones proto-neolíticas de Jericó (Palestina). Estos “adobes primitivos” tomaron la forma de bolas de arcilla agrupadas alrededor de cerros pequeños o montículos, los que sirvieron de base para construcciones ligeras.

- En la primera fase (alrededor de 6.800 a.c.) se construyeron casas redondas con adobes crudos, hechos a mano y llamados “adobes arqueados”. La base era llana, la parte superior bastante bien redondeada.
- En la segunda fase (alrededor de 6.250 a.c.) las casas eran rectangulares, sus paredes y pisos cubiertos por una capa gruesa de arcilla purificada, lisa y coloreada. Los adobes toman ahora la forma de un prisma cuadrangular con bordes irregulares. En la superficie se hallan huellas profundas de los pulgares que permitían una mejor adherencia del mortero.
- A fines del quinto milenio, apareció al norte de Mesopotamia el adobe moldeado, encajonado a mano en moldes abiertos. Antes de 2.800 a.c. el material de construcción común era el ladrillo moldeado, llano y de formas

geométricas más o menos regulares, difiriendo sólo en tamaño o dimensiones de un sitio a otro.

- En Tépé Gawra, a mediados del cuarto milenio, los adobes crudos eran de excelente calidad, y se obtenían con un mortero de tierra y ceniza. Sus dimensiones eran 36 x 18 x 9 cm., 48 x 28 x 10 cm. ó 56 x 28 x 14 cm.
- En Mesopotamia se utilizó, durante toda su historia y con regularidad, el “asfalto sólido”, aplicado a casi todos los campos técnicos. Pero, sobre todo, era utilizado como adhesivo o cemento; como impermeabilizante, el asfalto ha sido utilizado extensamente a lo largo de siglos.
- En el Oriente la arquitectura logró los mayores progresos, en regiones donde, paradójicamente, los materiales de construcción por excelencia, la piedra y la madera, faltaban casi por completo. El material crudo, consistía de la tierra aluvial y el sedimento arcilloso depositado en las llanuras de Mesopotamia por el Tigris y el Éufrates , su uso casi exclusivo condicionó el desarrollo posterior de la construcción. El adobe impuso su forma característica en la edificación en Mesopotamia, conformado por grandes masas con muros gruesos y algunas ventanas angostas.
- El adobe era un material que imponía al constructor ciertas exigencias. El uso de ladrillos, especialmente el ladrillo crudo o adobe utilizado en grandes proyectos, tenía ciertas desventajas. La construcción debía ser resistente al deterioro y a la presión de techos arqueados. Los constructores colocaban minuciosamente, tubos de desagüe, canaletas, camas de paja o caña, juntas de asfalto, abrazaderas en los muros, etc., mostrando un sentido preciso de precaución.
- Los ladrillos, cocidos o simplemente secados al sol, habitualmente se unían con un mortero de arcilla; solo ocasionalmente con un mortero de cal o de tierra mezclada con cenizas. También se podía poner el ladrillo crudo

(adobe) antes de estar completamente seco, sin utilizar mortero. Las capas se adherían unas con otras formando un bloque sólido. Para proteger el revestimiento de estos muros, habitualmente se les cubría con tierra mezclada con paja molida o con cal.

- El estilo de la construcción de adobe migró hace muchos siglos de Marruecos, en el norte de África, a territorio español, desde donde se difundió a sus dominios, popularizándose el uso de moldes de madera para sistematizar la construcción con adobes.
- En las Américas, el uso de material equivalente al adobe aparece por primera vez en el Valle de Chicama, en el Perú, hacia el año 3000 antes de Cristo. Durante la conquista y colonización americana, el adobe constituyó muchas veces la única solución para construir edificaciones en zonas remotas.
- Las construcciones de adobe representan las estructuras más antiguas del sud-oeste de los EE.UU. que todavía están en pie. Existen aún edificaciones de misiones religiosas y casas privadas que datan de siglos atrás. Los colonizadores de la región, construyeron sus casas con adobe porque el material era abundante. No había bosques o grandes cantidades de rocas, de manera que construyeron con lo que tenían a mano. Resulta que hoy día hemos "descubierto" que ésta es la manera de elegir los materiales de construcción. Casi seguro que el material más abundante en una región es, asimismo, el que mejor se adapta al clima y al medio ambiente.

La arquitectura de tierra en Colombia presenta especial importancia por su desarrollo específico, por el significado y lugar que ocupan dentro del país los centros históricos, la arquitectura monumental y la contextual construidas con esta técnica.

A comienzos del siglo XX, los materiales locales artesanales marcaban la pauta en la construcción, aunque bien se presentaba discriminación en la técnica desarrollada, de tal manera que el bahareque precolombino, era de uso propio para los integrantes de la sociedad que tenían bajo poder adquisitivo. Técnicas como el adobe, el tapial, la mampostería de ladrillo, piedras y mortero, eran exclusivas para familias pudientes, edificios de importancia civil e iglesias. Durante los años 1920 a 1940, para dar paso al urbanismo y a las nuevas tecnologías que se estaban implementando a nivel global, la tierra como material de construcción pasa a desuso, debido a que fue asociada por el sistema con la pobreza y el atraso tecnológico. A partir de 1930, la mayoría de los desarrollos habitacionales estaban relacionados con el uso del cemento y el acero. Las culturas constructivas tradicionales, desarrollaron variantes regionales en cuya evolución tenemos excelentes apropiaciones locales. En la actualidad, las técnicas de construcción con tierra en Colombia se han configurado y evolucionado de acuerdo con las propias condiciones locales, dando lugar a una expresión particular y especial de la arquitectura colombiana. En los altiplanos se encuentra predominio de la tecnología del adobe y la tapia pisada; en el altiplano de los Santanderes predomina la tapia pisada, al igual que en el macizo antioqueño; en los altiplanos Cundiboyacense, payanense y nariñense el adobe predomina. A lo largo de las riberas de los ríos Magdalena y Cauca se desarrolla el bahareque, al igual que en la región Caribe.

En general, los procesos de extracción se realizan a cielo abierto. Se realizan operaciones básicas como el descapote del terreno para llegar a los estratos donde se encuentra el material de tierra apto, todo mediante maquinaria sencilla, sin necesidad de recurrir a explosivos como se requiere en otro tipo de explotaciones. Este sistema de explotación resulta sencillo y económico; sin embargo, inconvenientes de orden técnico que dificulten las operaciones se pueden presentar en temporada de lluvia.

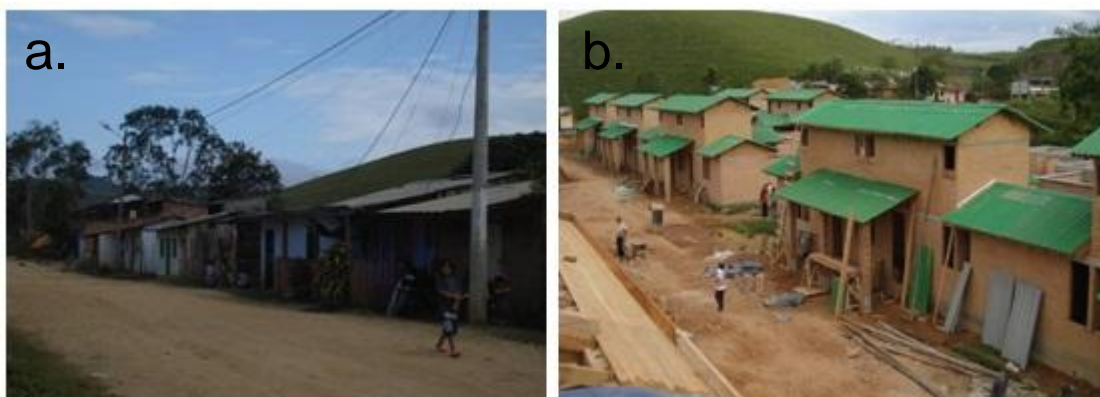
El proceso de elaboración del material, está conformado por la zona de extracción del material, que generalmente es una pendiente en un corte de terreno, que ha sido explotado durante un periodo continuado de tiempo; el sitio de pulverización y la zona en que se hace la mezcla con arena, otras arcillas y agua.

Dentro de los proyectos internacionales de gran escala, desarrollados con tierra como material de construcción, podemos indicar los siguientes:

- Museo Nacional de Malí (Africa), cuyos muros fueron construidos con bloques de suelo estabilizado, elaborados con una prensa manual, revocados con cemento. Está compuesto por varias edificaciones que ocupan un área de 1400 m<sup>2</sup>.
- El instituto Panafricano, en Burkina Faso, con un área de 5000 m<sup>2</sup>, elaborado por completo con bloques estabilizados de tierra del mismo lugar donde está asentado. Funciona como centro de investigación, biblioteca, restaurante y residencia para 72 estudiantes. Las superficies exteriores fueron revocadas con tierra estabilizada con cal.
- Centro educativo de Segou, Malí, provee alojamiento para 50 personas, posee un centro de conferencias, un restaurante y una pequeña capilla. Todos sus muros fueron realizados con tierra estabilizada, con un 4% de Cal, 2% de cemento portland y fueron producidos mediante una prensa motorizada.
- Centro de Salud de Vöhl, Alemania, con más de 5000 m<sup>2</sup> de bóvedas y cúpulas, elaboradas con bloques de tierra alivianados. Aun se encuentra en desarrollo.
- En Colombia se está llevando a cabo el proyecto de urbanización Casa Viva en el municipio de Vegachí, Antioquia; consiste en la elaboración de

104 casas construidas con bloques de tierra compactadas. La mano de obra es aportada por los mismos habitantes del municipio, quienes fueron capacitados por la fundación Tierra Viva. La mezcla de los bloques se compone de arcilla, arena y un 8% de cemento (figura 2).

**Figura 2.** Proyecto de urbanización Casa Viva en Vegachí, Antioquia. (a.) viviendas anteriores. (b.) nueva urbanización.



Fuente: Fundación Tierra viva, 2007.

## **3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS.**

### **3.2.1. El Suelo**

El suelo es la delgada capa residual desarrollada sobre roca sólida y sedimentos no consolidados, como resultado de la acción de procesos fisicoquímicos y biológicos (pedogénesis). El tipo de suelo formado depende de múltiples factores, entre los que se encuentra: el clima, la topografía, la vegetación, el tiempo durante el cual actúan los procesos de alteración y el tipo de roca sobre el cual actúan dichos procesos. (Dorrik & Stow, 2009).

Consiste en capas u horizontes de constituyentes minerales y orgánicos de diferentes espesores, que difieren del material parental en su morfología, y propiedades físicas, químicas y mineralógicas, (Birkeland 1999). Al estar en la

zona superficial de la corteza terrestre, constituye la fase de transición entre la litosfera y la atmósfera, y es en su mayoría producto de la meteorización e intemperización de las rocas in situ, la adición de sedimentos depositados y la descomposición de tipo orgánico. La erosión ocurre fundamentalmente a través de la pulverización de las rocas, provocadas por movimientos glaciales, por el agua, el viento, por la expansión y la contracción térmica de las rocas o por la expansión del agua congelada en la grietas de las rocas.

### **3.2.2. La tierra**

Desde el punto de vista textural, la tierra es una mezcla de arcilla, limo, arena y gravas. Las partículas se definen dependiendo de su diámetro: partículas con diámetros menores a 0.002 mm se denominan arcillas, entre 0.002 y 0.06 mm limo, y entre 0.06 y 2 mm arena. Partículas mayores se denominan gravas. La arcilla actúa como aglomerante para pegar las partículas mayores en la tierra como lo hace en el hormigón el cemento. Dependiendo de cual de estos tres componentes sea el predominante se puede hablar de un suelo arcilloso, limoso o arenoso (Minke, 2001).

En comparación con otros materiales de construcción la tierra posee tanto ventajas como desventajas.

#### **3.2.2.1 Desventajas de la tierra**

- **La tierra no es un material de construcción estandarizado.**

Su composición depende del lugar de donde se extrae, puede contener diferentes cantidades y tipos de arcilla, limo, arena y agregados. Por eso sus características pueden variar de lugar a lugar y la preparación de la mezcla correcta para una aplicación puede variar también. Resulta necesario conocer la composición específica de la tierra, para poder juzgar sus características y modificarlas con los aditivos que sean necesarios.

- **La tierra se contrae al secarse**

A través de la evaporación del agua de amasado (necesaria para activar la capacidad aglomerante de la arcilla y para poder ser manipulado) pueden aparecer fisuras. La retracción lineal durante el secado oscila entre 3-12 % en técnicas de tierra húmeda, y entre 0.4-2% en técnicas con mezclas secas.

La retracción se puede disminuir reduciendo la cantidad de agua y arcilla, optimizando la composición granulométrica o mediante el empleo de aditivos.

- **La tierra no es impermeable**

La tierra como material de construcción debe ser protegida contra la lluvia y de las heladas especialmente en estado húmedo. Las paredes de tierra pueden protegerse con aleros, barreras impermeabilizantes, tratamientos de superficies, etc.

### **3.2.2.2 Ventajas de la tierra**

- **La tierra regula la humedad ambiental**

La tierra tiene la capacidad de absorber y desorber humedad más rápido y en mayor cantidad que los demás materiales de construcción. Por eso regula el clima interior. Experimentos llevados a cabo en el Laboratorio de construcciones experimentales de la Universidad de Kassel, Alemania, demostraron que cuando la humedad relativa en un interior, aumenta súbitamente de 50% a 80%, los bloques de barro pueden absorber 30 veces más humedad que los ladrillos cocidos en un lapso de dos días. Aun cuando se colocan en una cámara climática a 95% de humedad relativa durante 6 meses, los adobes se humedecen pero no se ablandan. Mediciones hechas durante un lapso de 8 años, en una vivienda recientemente construida en Alemania donde todos los muros interiores y exteriores son de tierra, mostraron que la humedad relativa en esa vivienda es de

50 % durante todo el año. Esta fluctúa solamente entre 5% y 10%, ofreciendo así condiciones de vida saludables (Minke, 2001).

- **La tierra almacena calor**

En zonas climáticas donde las diferencias de temperaturas son amplias, o donde es necesario almacenar la ganancia térmica por vías pasivas, el barro puede balancear el clima interior.

- **La tierra ahorra energía y disminuye la contaminación ambiental.**

La tierra prácticamente no produce contaminación ambiental en relación a los otros materiales de uso frecuente. Para preparar, transportar y trabajar el barro en el sitio se necesita solo 1 % de la energía requerida para la preparación, transporte y elaboración de hormigón o ladrillos cocidos.

- **La tierra es reutilizable y económico.**

La tierra cruda se puede volver a utilizar ilimitadamente. Solo necesita ser triturado y humedecido con agua para ser reutilizado. En comparación con otros materiales no será nunca un escombros que contamine el medio ambiente. Además economiza materiales de construcción y costos de transporte. Generalmente la tierra que se encuentra en la mayoría de las obras producto de la excavación de cimientos puede ser utilizada para la construcción. Si esta no contiene suficiente arcilla, le será añadida y si contiene mucha, deberá mezclarse con arena lo que significa modificar su composición. En comparación con otros materiales de construcción se pueden disminuir considerablemente los costos si se utiliza el suelo excavado; aún cuando éste deba ser transportado de otros lugares, resulta usualmente más económico que los materiales industriales.

- **La tierra preserva la madera y otros materiales orgánicos**

La tierra mantiene secos los elementos de madera y los preserva cuando están en directo contacto con él, debido a su bajo equilibrio de humedad de 0.4%- 6 % en peso y a su alta capilaridad. Los insectos no pueden destruir la madera en esas condiciones ya que necesitan un porcentaje mínimo de humedad de 14% -18% y los hongos más de 20% de humedad para vivir (Minke, 2001).

### **3.3. MINERALES ARCILLOSOS**

Los minerales arcillosos provienen de la alteración de minerales primarios, cuyos residuos se reorganizan para conformar un cuerpo mineralógico cristalino, con características coloidales y tamaño menor a 2 $\mu$ m. (Malagón, 1979). Los minerales arcillosos se definen como alumino-silicatos hidratados que son clasificados como filosilicatos o silicatos laminares, dentro de los cuales existe una variabilidad considerable de propiedades físicas y químicas, pero que mantienen en común su morfología laminar y un clivaje perfecto (001), consecuencia de sus estructuras atómicas laminares (Moore & Reynolds 1989). La clasificación granulométrica de Wentworth sugiere el límite de tamaño de la fracción arcillosa en 4  $\mu$ m. Las arcillas son constituyentes esenciales de los suelos y sedimentos debido a que son productos finales de la meteorización. Actualmente se conoce que los minerales arcillosos son numerosos y difieren entre sí por su forma, estructura, apilamiento de capas, composición química y por la simetría que presenta su red cristalina. (Muñoz et al 2007).

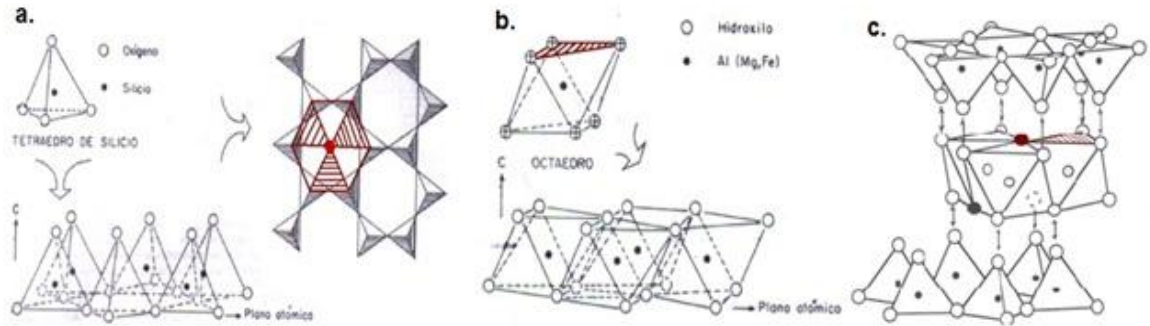
#### **3.3.1. Estructura de los minerales arcillosos**

Los minerales arcillosos pertenecen a la familia de los filosilicatos (AIPEA 1972). A continuación se presentará la descripción de esta amplia familia de silicatos. Como lo indica su nombre, derivado del griego phillon que significa hoja, todos los miembros de este importante grupo de silicatos tienen hábito hojoso o escamoso,

y una dirección de exfoliación predominante. Generalmente son blandos, de peso específico relativamente bajo. (Hurlbut, & Klein 1985). Su estructura consiste en el apilamiento de bandas tetraédricas y bandas octaédricas, de extensión variable. En las bandas tetraédricas tres de los cuatro oxígenos de cada tetraedro están compartidos con tetraedros vecinos, resultando la relación  $T : O = 2 : 5$ ; con  $T = \text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  y ocasionalmente  $\text{Fe}^{3+}$ . Las hojas, cuando no están distorsionadas presentan simetría senaria (Fig. 3.a). Una banda octaédrica está conformada por dos planos de iones O empaquetados compactamente con cationes ocupando el lugar octaédrico resultante entre los dos planos. Cuando se conecta el centro de los seis oxígenos alrededor de un sitio catiónico octaédrico, se está formando un octaedro. Al compartirse oxígenos vecinos se genera una banda de octaedros unidos por una cara (Fig. 3.b). Los cationes son usualmente  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , ó  $\text{Fe}^{3+}$ , aunque se han reportado todos los demás elementos de transición. Dependiendo si las bandas son coordinadas por cationes metálicos divalentes o trivalentes, se generan dos amplias familias: tipo gibsita ( $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ ) donde el catión es trivalente, llamada también dioctaédrica y tipo Brucita ( $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$ ) ó trioctaédrica, donde el catión es divalente. Los aniones son  $\text{O}^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$  y  $\text{F}^-$ .

El enlace de bandas tetraédricas con bandas de octaedros, se realiza intercambiando dos de cada tres OH en la banda octaédrica por oxígenos apicales de las bandas tetraédricas, donde cada octaedro está inclinado sobre uno de sus lados triangulares (Fig. 3.c). A cada combinación de bandas T y O se le llama lámina, y se extiende por varias distancias a través de los ejes cristalográficos a y b, generando los diferentes tipos de filosilicatos, conocidos como 1:1, 2:1, ó 2:1:1.

**Figura 3.** (a). Bandas tetraédricas SiO<sub>4</sub>. (b). Bandas octaédricas. (c). Ensamblaje estructural entre bandas tetraédricas y octaédricas.



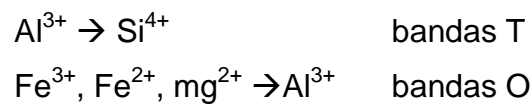
Fuente: Moore & Reynolds, 1997.

La unión de las láminas a través del eje cristalográfico c, se realiza por diferentes mecanismos, dependiendo del tipo de lámina que será ligado:

a). Puente de hidrogeno.

b). Moléculas polares de agua formando un enlace de hidrogeno entre las dos bandas de la siguiente manera: ion OH (una banda) a ion H (polo positivo de agua) a ion OH (polo negativo de agua) a ion H (banda adyacente).

c). Generación de cargas por sustituciones isomórficas en la red cristalina de las arcillas (reemplazo de cationes de tamaños similares y diferentes cargas).



Cationes y cationes hidratados entre las capas pueden neutralizar estas cargas y mantener las láminas unidas. El tipo de enlace interlamina varía entre las especies de minerales arcillosos y pueden relacionarse con algunas propiedades del mineral.

### **3.3.2. Propiedades de los minerales arcillosos**

Las propiedades fundamentales de los minerales arcillosos involucran aquellas que tienen que ver con su interacción con otras sustancias, especialmente agua. Dependen de la naturaleza del agua, los iones existentes en el agua (tamaño, valencia, electronegatividad) y la distribución de la carga en la superficie del mineral, (Moore & Reynolds 1997). Las más interesantes se resumen a continuación:

#### **3.3.2.1. Carga superficial**

Los minerales arcillosos tienen cargas en su superficie, las cuales determinan la capacidad de intercambio catiónico, los comportamientos dispersivos y floculantes, el transporte y destino de solutos y las tasas de meteorización y erosión de la superficie terrestre. Dos tipos de carga pueden ser reconocidas según el origen y comportamiento de las mismas, así: 1) El primer tipo de carga llamada carga permanente proviene de las sustituciones isomórficas en la estructura del mineral, y puede ser negativa o eléctricamente neutra. Fuera de los minerales del grupo de la caolinita, la neutralidad eléctrica es poco común en los minerales arcillosos. De manera frecuente se presentan desviaciones de las condiciones ideales de la red cristalina, tanto para las bandas T como para las O generando cargas netas en la superficie. El balance de carga se mantiene por la presencia, en el espacio interlaminar de cationes, cationes hidratados (como en las vermiculitas y esmectitas) o grupos hidroxilo coordinados octaédricamente por cationes hidratados (cloritas). Los cationes más comunes son K, Na, Ca, Fe, Mg. 2) Un tipo de carga conocido como carga variable que se presenta en los bordes de la partícula donde se han roto enlaces. Aquí la composición química y estructural no se puede mantener sin iones adicionales que satisfagan estas cargas, principalmente H y OH. Para los minerales con carga permanente, la carga variable representa un pequeño porcentaje (<1%) de la carga total, pero se hace

más importante a medida que el cristal se hace más pequeño. Esta carga es variable debido a que es una función del pH del medio en el cual los minerales arcillosos están inmersos.

### **3.3.2.2. Capacidad de intercambio catiónico CIC.**

Es la capacidad que tiene un material para retener y liberar iones positivos e intercambiables. Una de las consecuencias de una alta área superficial en los minerales arcillosos es la carga superficial, la mayoría distribuida sobre la (001) con algunos rezagos en las pequeñas superficies de rotura y enlaces incompletos en los bordes. La carga negativa está asociada a la capacidad de intercambio catiónico del material. La mayoría de iones y moléculas, comúnmente agua, atraídos a estos sitios y mantenidos por las cargas son intercambiables. La CIC es interesante durante el proceso de estabilización del material y es expresada en miliequivalentes (meq) ó miligramos equivalentes de  $H^+$  (o el correspondiente catión) absorbidos que neutralizan la carga negativa por cada 100 g de material seco. En la tabla 1 se representan los valores de CIC para varios materiales (Birkeland, 1999):

La capacidad de intercambio catiónico está fuertemente relacionada con la superficie específica del material. En el suelo esta es la suma de superficies de todas las partículas. La arena gruesa tiene una superficie específica de aproximadamente  $23 \text{ g/cm}^2$ , el limo aproximadamente 450, la arcilla desde  $10 \text{ m}^2$  (caolinita) hasta  $1000 \text{ m}^2$ . La superficie específica de las arcillas es un factor importante en la capacidad aglutinante y la resistencia a la compresión y tensión.

### **3.3.3. Clasificación de los minerales arcillosos**

La clasificación de los minerales arcillosos más usada se basa en el tipo estructural (tipo de lámina) y la carga por unidad fórmula (déficit de carga).

**Tabla 1 .** Valores representativos de CIC para varios materiales.

Material	CIC aproximada (meq/100 g material seco)
Materia Orgánica	150 - 500
Caolinita	1 - 10
Halloysita	5 - 10
Halloysita hidratada	40 - 50
Illita	10 - 30
Clorita	10 - 40
Esmectita	80 - 150
Vermiculita	100 - 200
Palygorskita	5 - 30
Sepiolita	20 - 45
Alofana	20 - 50
Hidroxidos de Al y Fe	4
Feldespatos	1 - 2
Cuarzo	1 - 2
Basalto	1 - 3
Zeolitas	230 - 620

Fuente: Birkeland, 1999.

### 3.3.3.1. Estructura 1:1

La Caolinita y Halloysita son los representantes comunes de las arcillas tipo 1:1, en las cuales la sustitución isomórfica es muy baja o limitada. La caolinita tiene forma laminar, la halloysita comúnmente posee una capa de agua entre capas sucesivas que conlleva a una estructura única de hoja enrollada, debido a un leve debilitamiento que se produce en los enlaces interlaminares por la presencia de esta agua. Puentes de hidrogeno sin agua intercapa (7 Å Caolinita) o con agua intercapa (10 Å Halloysita) mantienen unidas las laminas. Especies polimórficas reconocidas son Dickita y Nacrita (apilamiento de 2 y 6 laminas respectivamente).

### 3.3.3.2. Estructura 2:1

#### ESMECTITAS

El grupo de las esmectitas es variado en arcillas 2:1. La sustitución isomorfica es común. Se pueden presentar sustituciones de  $\text{Al}^{3+}$  por  $\text{Si}^{4+}$  en las bandas T (hasta un 15 % según Grim 1968), aunque las sustituciones de  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en las bandas O son mas comunes. La carga neta negativa generada es parcialmente nivelada por cationes hidratados intercapa, que mantienen unidas las diferentes láminas. Debido a que la sustitución se produce principalmente en las capas O internas, los enlaces pueden presentar un ligera perdida de fuerza, produciéndose un intercambio de cationes y agua intercapa fácilmente. De ahí que presenten una gran expansión y contracción según el agua sea agregada o removida. Tres tipos de esmectitas se presentan comúnmente en suelos basados en su composición:

Variedad Mg → Montmorillonita → Al y Mg en Bandas O (Al > Mg)

Ca Montmorillonita → Ca hidratado como catión interlaminaar → 14,2 Å

Na Montmorillonita → Na hidratado como catión interlaminaar → 12,2 Å

Variedad Al → Beidelita → Al en laminas O, Al en algunas bandas T

Variedad Fe → Nontronita → Fe en bandas O Al en algunas bandas T

#### VERMICULITAS

La vermiculita, al igual que las esmectitas presenta generalmente láminas de agua y cationes hidratados ocupando los espacios interlaminaares, pero contrario a estas, presentan enlaces más fuertes debido a que las sustituciones isomorficas se presentan principalmente en las bandas T exteriores. De esta manera la expansión de la estructura es un poco limitada.

## ILLITA

La illita es un mineral arcilloso 2:1 de composición muy cercana a la moscovita, pero composicionalmente con menos K. La mayoría de las sustituciones isomorficas se presentan en las bandas T. El catión intercapa es K<sup>+</sup>, y debido a que se ubica próximo a los lugares de carga neta negativa (bandas T exteriores) el enlace es fuerte y la expansión de la red no tiene lugar.

### 3.3.3.3. Estructura 2:1:1

## CLORITAS

La clorita consiste en alternancia estructuras 2:1 y bandas octaédricas. Generalmente son trioctaédricas. Las láminas 2:1 comúnmente presentan sustitución isomorfica en las bandas T. La banda O alternante presentan sustituciones que generan cargas positivas. El enlace es fuerte y la expansión no se produce. La tabla 2 muestra la clasificación de los minerales arcillosos.

**Tabla 2.** Clasificación de los minerales arcillosos.

Estructura	Carga	Nombre	Catión en banda Octaédrica	Catión en banda Tetraédrica	Cationes Interlámina	H <sub>2</sub> O interlaminar
Amorfa		Alofana				
1:1	X ~ 0	Caolinita	Al	Si	x	x
		Dickita	Al	Si	x	x
		Nacrita	Al	Si	x	x
		Halloisita 10A	Al	Si	x	H <sub>2</sub> O
2:1	X ~ 0,2 - 0,6	Montmorillonita	Al, Mg	Si	Ca, Na	H <sub>2</sub> O 2 y 1 láminas
		Beidellita	Al	Si, Al	Ca, Na	H <sub>2</sub> O
		Nontronita	Fe	Si, Al	Ca, Na	
	X ~ 0,6 - 0,9	Saponita	Mg	Si, Al	Ca, Na	H <sub>2</sub> O
		Vermiculitas	Al, Fe <sup>3+</sup> , Mg	Si, Al	Mg, Ca	H <sub>2</sub> O
X ~ 1	Illita	Al	Si, Al	K	H <sub>2</sub> O	
2:1:1	X ~ variable	Cloritas	Mg, Al, Fe <sup>2+</sup>	Si, Al	x	H <sub>2</sub> O
		Sepiolita	Mg	Si	x	H <sub>2</sub> O
Fibrosos		Paligorsquita (Atapulgita)	Mg, Al	Si	x	H <sub>2</sub> O

Fuente: Instituto Agustín Codazzi, 1995; Birkeland, 1991.

### 3.4. IDENTIFICACIÓN DE MINERALES ARCILLOSOS

Debido a su pequeño tamaño, el análisis preciso de los minerales arcillosos tanto para su identificación como para su cuantificación se realiza por medio de técnicas analíticas que se basan en sus propiedades estructurales, químicas y físicas.

#### 3.4.1. Fluorescencia de rayos X (XRF)

La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica analítica que consiste en irradiar la muestra con radiación X, provocando la expulsión de un electrón interno de los átomos presentes en la red cristalográfica. El electrón expulsado es sustituido por otro de una capa superior, lo que genera la emisión de fotones de rayos X que puede ser detectada. Este tipo de radiación es característica para cada elemento presente en la muestra. Una de las características interesantes del análisis por FRX es la rapidez con la que se puede obtener un resultado y la determinación simultánea hasta 30 elementos, con una alta sensibilidad. El material arcilloso se caracteriza utilizando fluorescencia de rayos X, para conocer los elementos que, como óxidos, existen en las muestras y el porcentaje del mismo en el sólido. La tabla 3 muestra el contenido químico promedio para un gran grupo de minerales arcillosos.

**Tabla 3.** Análisis químicos de minerales arcillosos.

Oxido	Caolinita	Illita	Esmeclita	Vermiculita	Clorita Al	Clorita Mg	Paligorsquita	Sepiolita
SiO <sub>2</sub>	45.44	49.78	59.49	43.21	39.85	30.89	55.86	52.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35.22	26.35	21.93	17.21	33.52	18.55	10.54	0.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.8	4.3	3.77	8.3	4.56	1.69	3.23	2.9
FeO		0.61	0.2	0.6		1.42		0.7
MnO				0.21		33.74		
MgO	0.08	2.75	3.55	25.71	4.58	33.74	9.2	21.31
CaO	0.08	0.32	1.18	5.1	0.15		1.56	0.47
K <sub>2</sub> O	0.14	7.02	0.34	0.32	1.61		0.02	
Na <sub>2</sub> O	0.66	0.25	0.82	0.05			0.68	
TiO <sub>2</sub>	0.16	0.42	0.25	0.06	1.03	0.05	0.47	
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.6	1.48				1.08	8.71	12.06
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	13.6	7.12	8.38		13.18	12.97	9.13	9.21
(SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2.02	3.22	4.61	4.26	2.02	2.83	9.04	148.31

Fuente: Instituto Agustín Codazzi, 1991; Birkeland, 1991.

Con base en la tabla anterior, podemos tomar algunas aproximaciones, entre ellas:

- a) La caolinita es relativamente un aluminosilicato puro.
- b) El contenido de K en la Illita es alto debido a que el K es el ion interlamilar, y se encuentra fuertemente ligado.
- c) Montmorillonita ideal es aquella en que el Mg sustituye el Al en uno de cada cuatro sitios octaédricos. El contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  es  $\pm 20\%$  y de MgO es 3 – 5%.
- d) Beidelita, en la cual Al sustituye el Si en una de cada ocho posiciones tetraédricas.  $\text{Al}_2\text{O}_3 \pm 30\%$  y MgO 2 – 3%.
- e) La vermiculita tiene alto grado de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que es  $\pm 8\%$  y alto grado de MgO, 25.71%.
- f) La clorita se presenta comúnmente como dos especies, una alta en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y una alta en MgO.
- g) Las arcillas fibrosas (palygorskita – sepiolita) se caracterizan por tener bajos contenidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y relativamente bajo MgO.

### **3.4.2. Difracción de rayos X (XRD)**

El análisis de difracción de rayos X es el principal método utilizado en la determinación de la mineralogía arcillosa, (Instituto Agustín Codazzi, 1995). El fenómeno de difracción es dependiente de las propiedades de la luz: longitud de onda, amplitud y fase. La propiedad fundamental de la difracción de ondas es que la distancia entre los centros de dispersión es cercana a la longitud de onda de la onda que está siendo dispersada. La longitud de onda de los rayos X y los espacios estructurales de los cristales tienen dimensiones cercanas a 1 Å. Los rayos X son dispersados por los electrones de los átomos que conforman la celda unidad. Cada uno de ellos aporta un haz dispersado. El electrón absorbe parte de la energía del haz incidente y la irradia nuevamente en todas las direcciones a la misma longitud de onda que fue recibida. Este fenómeno es conocido como

dispersión coherente. Durante el análisis difractométrico se considera cada átomo de la celda unidad como un punto fuente de dispersión.

La interferencia constructiva se genera cuando dos rayos se encuentran en fase, es decir, cuando la diferencia de recorridos es un número entero de  $\lambda$ , de igual manera cuando los rayos están fuera de fase se genera interferencia destructiva. Un haz difractado que pueda ser medido está compuesto por una cantidad de rayos de interferencia constructiva los cuales se refuerzan unos a otros. Partiendo de que en la red cristalina los átomos se ubican en planos discretos, se puede implementar el uso de los rayos X en la determinación de la estructura mineral. Todos los haces incidentes deben llegar al frente de onda cumpliendo con la condición anterior (Figura 4). La distancia  $d$  entre cada plano o fila de átomos puede ser determinada por medio de la siguiente relación llamada Ley de Bragg, la cual cumple con las observaciones planteadas anteriormente.

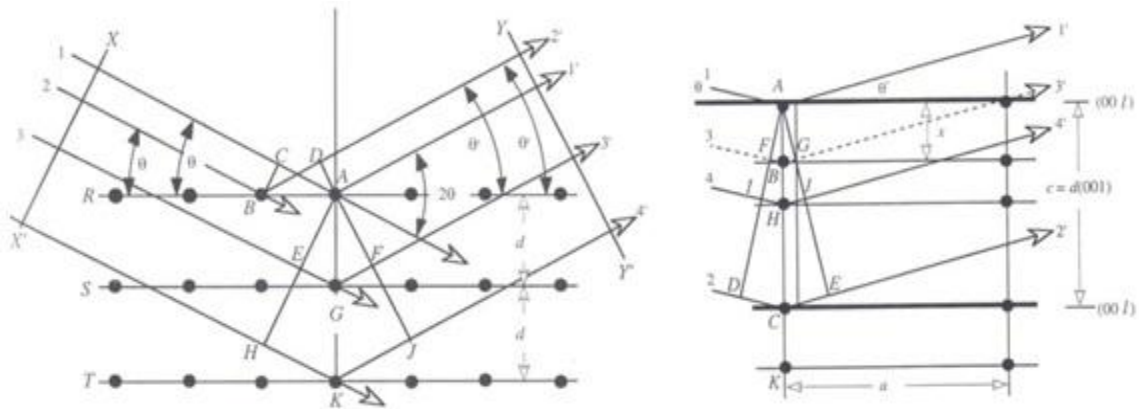
$$2d\text{sen}\theta = n\lambda$$

$$d = \frac{n\lambda}{2\text{sen}\theta}$$

Donde:

- $n$  es un número entero,
- $\lambda$  es la longitud de onda de los rayos X,
- $d$  es la distancia entre los planos de la red cristalina y,
- $\theta$  es el ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión.

**Figura 4.** Reflexiones de los rayos incidentes sobre superficies planas de minerales arcillosos.



Fuente: Moore & Reynolds 1997.

El resultado final es una grafica de intensidades de rayos X difractados según el ángulo de reflexión del haz de rayos difractados. Esta gráfica es comúnmente denominada difractograma. A partir de estos, se realiza la identificación de minerales arcillosos a las bases de datos y literatura disponible. Algunos post-tratamientos como la glicolación de arcillas expansibles, y tratamientos térmicos ayudan a distinguir entre minerales arcillosos que en sus estados inalterados podrían confundirse. La tabla 4 resume los valores de algunas reflexiones características para los minerales arcillosos más comunes, después de varios tratamientos diagnósticos.

### 3.4.3. Espectroscopia infrarroja

Los métodos espectroscópicos son un conjunto de técnicas analíticas que se basan en la medición de la absorción o emisión de radiaciones electromagnéticas por resonancia, en un sistema constituido por un conjunto de átomos o núcleos. La espectrofotometría del infrarrojo analiza selectivamente la absorción de radiación infrarroja por una sustancia. La absorción absorbida es transformada en movimientos de los átomos dentro de las moléculas.

La red espacial de las sustancias cristalinas está conformada por un conjunto de poliedros de coordinación que son tratados como moléculas. El análisis de los espectros de absorción en infrarrojo produce información sobre la estructura de las moléculas. La espectrometría permite la distinción de minerales dentro de una serie isomórfica, lo cual no es posible mediante XRD. (Prost 1970).

**Tabla 4.** Valores d en Å de las reflexiones características (00l) de los minerales arcillosos más comunes, después de varios tratamientos diagnósticos. N= natural, EG= etilen-glicol, 500 y 550 = tratamientos térmicos.

MINERAL	TRATAMIENTO	(001)	(002)	(003)	(004)	(005)
Caolinita	N	7,1	3,58	2,33		
	EG			Sin cambios		
	500	Desaparecen todas las reflexiones				
Clorita	N	14	7	4,7	3,5	2,83
	EG			Sin cambios		
	500	Sin cambios o ligeros cambios en algunos ordenes				
	550	14		4,7		2,83
(desaparecen los de algunos ordenes)						
Clorita Expansible	N	14	7 - 7,2	4,7	3,5	2,83
	EG	17	8,85	5,85		
	500	Reaccionan igual que las cloritas normales				
	550					
Illita	N	10	5	3,3	2,5	
	EG			Sin cambios		
	500					
Esmectitas (Montmorillonitas)	N	15,4		5,1		3,05
	EG	17	8,5	5,7	4,2	3,4
	550	10		5		
Vermiculita	N	14				
	EG	14		Sin cambios		
	550	14				

Fuente: Instituto Agustín Codazzi, 1991.

Las moléculas no son estructuras rígidas, por el contrario oscilan o vibran alrededor de sus posiciones de equilibrio. Cuando la frecuencia de vibración de la radiación incidente sobre la materia coincide con la frecuencia de vibración propia de los grupos de átomos del cristal se produce la absorción por resonancia. El método de preparación de muestras más comúnmente utilizado consiste en

someter a radiación infrarroja una muestra uniformemente dispersa en un medio óptico continuo. El uso del KBr (plástico a altas presiones) mezclado con la muestra como una pastilla transparente reduce los problemas de dispersión de la luz en las interfases partícula aire. El registro que se obtiene al someter la muestra a la técnica es un espectro de absorción, el cual constituye una curva de porcentaje de absorción contra el número de ondas en  $\text{cm}^{-1}$ . Para su análisis se procede de forma similar al análisis de DRX, se determinan los números de onda en que se encuentran cada una de las bandas, picos y hombros y luego se compara con patrones o tablas para su identificación respectiva.

### **3.5. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS**

Una vez tomadas muestras representativas del suelo, se someten a una serie de ensayos de laboratorio con el fin de determinar su naturaleza.

#### **3.5.1. Análisis granulométrico**

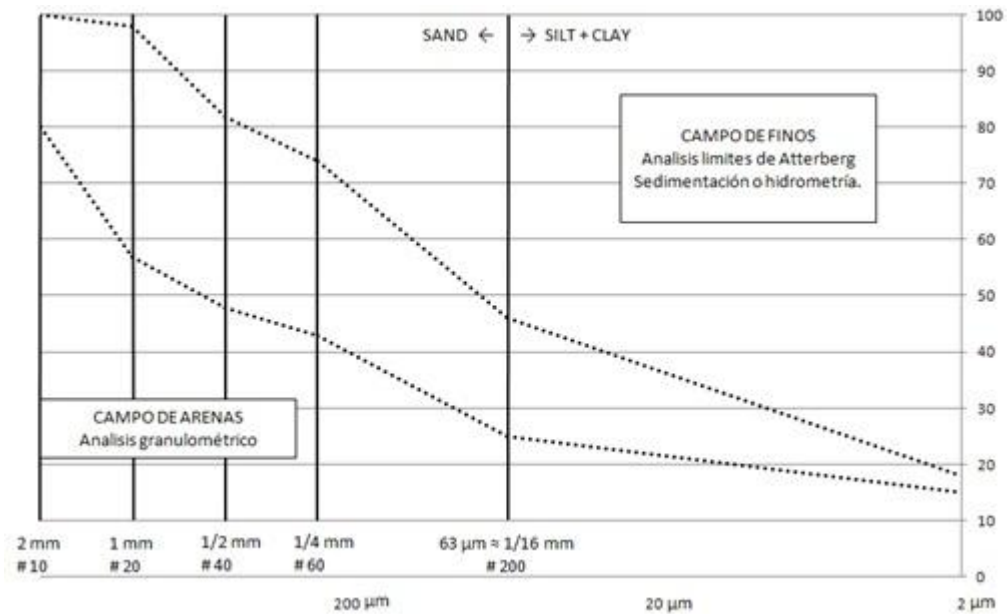
Es el proceso de cuantificación de los porcentajes en los cuales se encuentran los diferentes materiales constituyentes del suelo dentro de la respectiva muestra y es un factor influyente en el comportamiento de los materiales elaborados con la tierra. Para obtener un buen ladrillo de adobe, la distribución granulométrica debe aproximarse a unos límites recomendados: finos 20 – 45% y arena 55 – 75%. Un mínimo de 10% de arcilla es necesario para la cohesión en los bloques, (Plagiolico et al 2010). El material debe ser triturado y secado para eliminar el contenido de agua.

El tamizado es el método más adecuado para clasificar por tamaños las partículas gruesas. Los tamices tienen una dimensión de abertura determinada según una escala establecida. El material se pasa por la serie de tamices acoplados uno sobre el otro, en orden descendente por tamaño de partícula. Se calcula el porcentaje de material que pasa cada malla. Para el suelo de grano fino (aquél

que en un primer tamizado pasa por el tamiz No. 200) es preciso recurrir a procesos de separación por sedimentación (vía húmeda).

Con los datos obtenidos para los dos tipos de suelos se elabora la curva de distribución granulométrica del suelo (Figura 5).

**Figura 5.** Distribución granulométrica adecuada de la mezcla para la elaboración de ladrillos y bloques de tierra.



Fuente: Elaborada a partir de varios autores.

### 3.5.2 Ensayos de plasticidad de fracciones finas

La distribución de tamaños de granos es muy precisa en la clasificación de suelos gruesos, pero menos eficiente en suelos finos, por esto las clasificaciones de los suelos finos en ingeniería no solo tienen en cuenta la granulometría, además es importante el cálculo de parámetros llamados límites de Atterberg, con los cuales se determina las características de plasticidad y consistencia de las fracciones finas de los suelos en función del contenido de humedad.

### **3.5.2.1. Límites de atterberg**

La tierra puede tener cuatro estados de consistencia: líquido, plástico, semisólido y sólido. Los límites de estos estados se definen con los límites de Atterberg. A través de estos ensayos podemos clasificar nuestro material dentro del sistema de clasificación internacional de suelos y conocer el comportamiento de la fracción fina de los suelos en presencia de agua. El límite líquido se define como el contenido de humedad en porcentaje respecto al peso de la muestra, con el cual el suelo cambia del estado plástico al estado líquido, es decir el contenido de agua en el límite entre el estado líquido y el plástico. El límite plástico es la humedad para la cual el suelo pasa de un estado semisólido a sólido. Una vez determinados los límites líquido y plástico se calcula el índice plástico como la resta del límite líquido (máximo % Humedad en estado plástico) y el límite plástico (mínimo % Humedad en estado plástico).

$$I_p = LI - L_p$$

#### **3.5.2.1.1. Sistema universal de clasificación de suelos**

A partir de los datos obtenidos en los ensayos de granulometría y límites de Atterberg se clasifican los suelos mediante el Sistema de Clasificación Universal de Suelos. La clasificación unificada permite ubicar cada uno de los suelos existentes dentro de alguno de los 15 grupos designados y que presentan propiedades ingenieriles similares. (Tablas 5 y 6).

Cada una de las combinaciones de letras se interpreta de la siguiente manera:

G: Gravel (Grava); S: Sand (Arena); M: Mud (Limo); C: Clay (Arcilla); W: Well Graded (Bien calibrada); P: Poor Graded (Mal calibrada); L: Low LI (Baja Plasticidad); H: High LI (Alta plasticidad); O: Organic (Orgánico); Pt: Peat (Turba).

**Tabla 5 . Sistema de clasificación universal de suelos, para fracciones gruesas.**

TIPOS		PROCEDIMIENTOS DE IDENTIFICACIÓN EN EL CAMPO (Se excluyen las partículas mayores de 7.6 cm (3 pulg) y se basan en las fracciones en pesos estimados)	SÍMBOLOS DEL GRUPO (*)	NOMBRES TÍPICOS	INFORMACIÓN NECESARIA PARA LA DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS
(Para clasificación visual puede usarse 1/2 cm como equivalente a la abertura de la malla N° 4)	GRAVAS LIMPAS (pocas partículas finas o ninguna)	Amplia gama en los tamaños de las partículas y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios.	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena, con pocos finos o ninguno	Dese el nombre típico, indiquense los porcentajes aproximados de grava y arena, tamaño máximo, angulosidad, características de la superficie y dureza de las partículas gruesas; nombre local y geológico; cualquier otra información descriptiva pertinente y el símbolo entre paréntesis.  Para los suelos inalterados, agréguese información sobre estratificación, compactación, cementación, condiciones de humedad y características de drenaje.  EJEMPLO: Arena limosa con grava; con 20 % de grava de partículas duras angulosas y de 1.5 cm de tamaño máximo; arena gruesa o fina de partículas redondas o subangulosas; alrededor de 15 % de finos no plásticos de baja resistencia en estado seco, compacta y húmeda en el lugar, arena aluvial (SM)
		Predominio de un tamaño o intervalo de tamaños con ausencia de algunos tamaños intermedios	GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena, con pocos finos o ninguno	
	GRAVAS CON FINOS (cantidad apreciable de partículas finas)	Fración fina poco o nada plástica (para identificarla véase grupo ML)	GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo	
		Fración fina plástica (para identificarla véase grupo CL)	GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla	
	ARENAS LIMPAS (pocas partículas finas o ninguna)	Amplia gama en los tamaños de las partículas y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, con pocos finos o ninguno	
		Predominio de un tamaño o intervalo de tamaños, con ausencia de algunos tamaños intermedios.	SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava, con pocos finos o ninguno	
	ARENAS CON FINOS (cantidad apreciable de partículas finas)	Fración fina poco o nada plástica (para identificarla véase grupo ML)	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo	
		Fración fina plástica (para identificarla véase grupo CL)	SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla	

Fuente: Gonzales de Vallejo, 2006.

**Tabla 6. Sistema de clasificación universal de suelos, para fracciones Finas.**

	PROCEDIMIENTOS DE IDENTIFICACIÓN EN LA FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA N° 40					
	RESISTENCIA EN ESTADO SECO (característica al rompimiento)	MOVILIDAD DEL AGUA (reacción al agitado)	TENACIDAD (consistencia cerca del límite plástico)			
Límite líquido menor de 50	Nula a ligera	Rápida a lenta	Nula	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos	Dese el nombre típico, indiquense el grado y carácter de la plasticidad; cantidad y tamaño máximo de las partículas gruesas; color del suelo húmedo; olor; nombre local y geológico; cualquier otra información descriptiva pertinente y el símbolo entre paréntesis. Para los suelos inalterados agréguese información sobre la estructura, estratificación, consistencia tanto en estado inalterado como remoldado, condiciones de humedad y drenaje.  EJEMPLO: Limo arcilloso café, ligeramente plástico; porcentaje reducido de arena fina; numerosos agujeros verticales de túneles, firme y seco en el lugar; (ML)
	Meda a alta	Nula a muy lenta	Meda	CL	Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres	
	Ligera a meda	Lenta	Ligera	OL	Limos inorgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	
Límite líquido mayor de 50	Ligera a meda	Lenta a nula	Ligera a meda	MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatameáceos, limos elásticos	
	Alta a muy alta	Nula	Alta	CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad arcillas francas	
	Meda a alta	Nula a muy lenta	Ligera a meda	OH	Arcillas orgánicas de meda a alta plasticidad, limos orgánicos de plasticidad meda	
Suelos altamente orgánicos	Fácilmente identificables por su color, olor, sensación esponjosa y, frecuentemente, por su textura fibrosa			Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos	

Fuente: Gonzales de Vallejo, 2006.

La clasificación W o P (buena o pobre gradación de la curva) se obtiene gracias a los coeficientes de uniformidad  $C_u$  y el coeficiente de curvatura  $C_{cv}$ , de la siguiente manera:

$$C_u = D_{60}/D_{10} \qquad C_{cv} = (D_{30})^2/D_{60} \times D_{10}$$

Donde  $D_{60}$  = Diámetro o tamaño por debajo del cual se queda el 60% del suelo.

$D_{30}$  = Diámetro o tamaño por debajo del cual se queda el 30% del suelo.

$D_{10}$  = Diámetro o tamaño por debajo del cual se queda el 10% del suelo.

### **3.6. GENERALIDADES DE LA CONSTRUCCIÓN CON ADOBE**

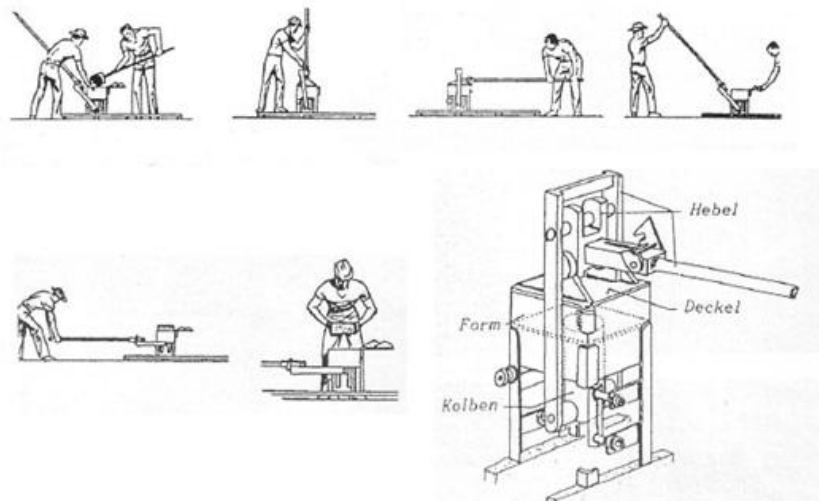
Los bloques de barro producidos a mano, relleno de tierra en moldes y secados al aire libre se denominan adobes, (Minke et al.1994). Cuando la tierra húmeda se compacta en una prensa manual o mecánica se denominan bloques de suelo. Los ladrillos producidos mediante un extrusor en una ladrillera, sin cocer se denominan ladrillos crudos. Los bloques más grandes compactados en un molde se denominan bloques compactados o adobones.

Las dimensiones de los bloques son variadas y responden tanto a criterios constructivos como a la tradición. Las dimensiones promedio pueden variar desde 30 cm. de largo x 15 cm. de ancho y 7 cm. de alto hasta dimensiones del orden de 40 cm. de largo x 20 cm de ancho x 10 cm. de alto. En general, según el Manual para la rehabilitación de Viviendas construidas en Adobe y tapia pisada, los ladrillos de adobe se elaboran manteniendo una proporción de 1: ½: ¼, entre el largo, el ancho y la altura de la pieza. Para la preparación de los adobes estabilizados y prensados, se remoja primero el suelo hasta formar una especie de barro y se retiran las gravas mayores de 5 mm u otros elementos extraños. Durante el mezclado, se agrega al material la cantidad de agua necesaria junto

con determinados aditivos que optimicen las propiedades resultantes de cada bloque, como estabilizantes tales como el cemento o la cal que permitan obtener una resistencia suficiente activando la capacidad aglomerante de la arcilla junto con el agua, en otros casos la mezcla se lleva a cabo con material orgánico en forma de agregado, con una longitud no mayor de 5cm, en una proporción 1:5 (material orgánico: suelo), con el fin de controlar la figuración por secado del suelo, y por último pero no menos importante, la fase de amasado y mezclado cuya función es activar la fuerzas aglutinantes de los minerales presentes en cada material.

La elaboración de adobes con prensas manuales es conocida en Europa desde el siglo XVIII. La primera prensa manual fue desarrollada en 1789 por el arquitecto francés François Cointeraux. Diferentes prensas manuales han sido construidas desde entonces. La mejor prensa conocida en el mundo es la CINVA-Ram, que fue desarrollada en Colombia por el ingeniero chileno Alberto Ramírez en 1952. (Figura 6).

**Figura 6** . Elaboración de bloques de adobe con la Prensa CINVA-Ram en Colombia.



Fuente: Minke, (1994).

Una vez elaborados los bloques prensados por medio de la CINVA – Ram, se cubren, hay que mantenerlos protegidos del sol y del viento. Después de 4 a 6 horas de fabricados, se inicia el proceso de curado. El periodo mínimo de curado recomendado para los bloques de construcción, es de 21 días, luego que ha ocurrido la mayor parte de la retracción del material. (Etchebarme et al. 2005).

### **3.7. ENSAYOS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES DE LAS UNIDADES DE ADOBES**

Las pruebas de estabilización están orientadas a mejorar las debilidades que la tierra puede presentar ante diferentes factores, los ensayos establecidos por la norma NSR-10 D.3.8.1.3, son absorción inicial, absorción total, estabilidad dimensional y resistencia a la compresión de por lo menos cinco (5) unidades.

#### **3.7.1. Ensayos de Absorción de Agua**

Se determina la cantidad de agua que es capaz de absorber una pieza expresada en % de su peso bajo condiciones de inmersión, según la norma NTC 4017, la cual se realizó a cinco unidades de adobes para cada una de las mezclas elaboradas, para estimar de manera promedio el porcentaje de absorción por cada dosificación. Partiendo del peso inicial de cada bloque, los adobes son sumergidos en agua por un periodo de 24 horas, terminado este tiempo cada unidad es retirada y antes de 300 segundos se procede a registrar su peso. Posteriormente se procede a realizar los cálculos respectivos para conocer el porcentaje de absorción de humedad presente en cada pieza, que se calcula de la siguiente forma:

$$\% \text{ absorción} = \frac{100 \times (W_{ss} - W_s)}{W_s}$$

En donde:

$W_s$  = Masa seca del espécimen antes de inmersión, en g.

$W_{ss}$  = Masa sumergida en agua del espécimen saturado luego de inmersión en agua.

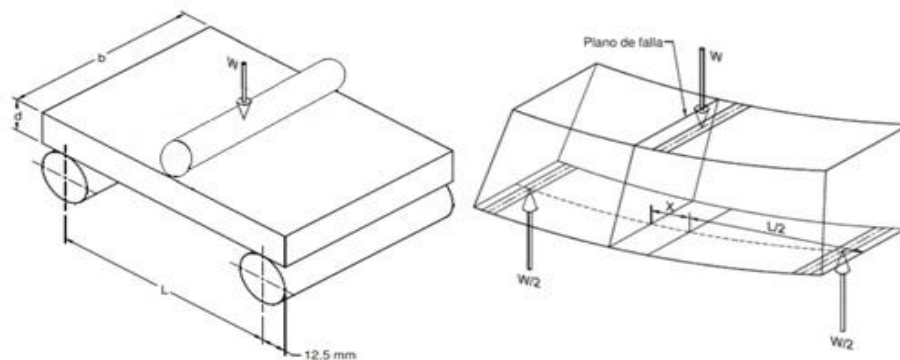
Los ensayos de estabilidad dimensional requieren determinar el incremento total de las dimensiones que sufren los bloques de adobe debido a la expansión por humedad. De igual forma las condiciones de estos bloques saturados, son semejantes a las que se presentan en situaciones relacionadas con inundaciones que cada vez son más frecuentes en nuestro contexto, siendo posible determinar en este estado, el comportamiento que presenta cada pieza frente a los esfuerzos y a la deformación, además del grado de resistencia que alcanzan los mismos. La magnitud de la expansión y la retracción de los bloques, al estar en contacto directo con el agua, depende del tipo y la cantidad de arcilla; la montmorillonita tiene un efecto mayor que la caolinita o la illita y también de la distribución granulométrico del limo y la arena; ensayos realizados demuestran que los suelos cuya distribución granulométrica presentan un mayor contenido de arena, como los suelos arenosos, no presentan mayores efectos de expansión o retracción.

### **3.7.2. Ensayo de Resistencia a la Flexión**

Se utiliza para de determinar la carga puntual máxima aplicada que puede soportar un adobe apoyado en los extremos, hasta su rotura (Minke, 1994). Estos esfuerzos pueden ser generados por variados factores: fenómenos en lo que se generen hundimientos de las bases o cimientos en los que reposan estructuras conformadas por adobes, o esfuerzos generados por la aparición de espacios vacios entre los bloques, ocasionados por la erosión del mortero de pega en muretes los cuales ocasionan la rotura por flexión. La resistencia a la flexión indica la rigidez de los bordes del adobe y depende principalmente del contenido de arcilla y del tipo de minerales de arcilla. La arcilla montmorillonita tiene una resistencia a la flexión mucho más alta que la caolinita.

El procedimiento consiste en ubicar el bloque de manera que la carga se aplique en la dirección de la profundidad de la unidad. Los soportes deben ser barras solidas de acero de diámetro 25.4mm +/- 1.0 mm, cuyo centro debe estar colocado a 12.5 mm +/- 2.0 mm de cada borde de la pieza. La carga se aplica en la cara superior, mediante una barra de acero que debe ser como mínimo igual al ancho de la unidad. (Figura 7.)

**Figura 7.** Diagrama de montaje de modulo de Rotura. Fuente: Norma NTC 4017.



Donde:

- $MR$  = módulo de rotura de la muestra en el plano de falla, en Pa.
- $W$  = carga máxima indicada por la máquina de prueba, en N.
- $L$  = distancia entre los soportes (medida centro a centro), en mm.
- $b$  = ancho neto (distancia de cara a cara) de la muestra en el plano de falla, en mm.
- $d$  = profundidad, (distancia desde la cara superior hasta el plano de apoyo) de la muestra en el plano de falla, en mm.
- $x$  = distancia promedio del plano de falla al centro de la pieza, medida en la dirección de la línea central de la superficie sometida a tensión, en mm.

El modulo de rotura se calcula de la siguiente manera.

$$MR = 3W \left( \frac{L}{2} - x \right) / bd^2$$

### **3.7.3. Resistencia a la Compresión**

Es la máxima resistencia medida que alcanza un bloque cuando es sometido a una carga axial. Este no solo depende de la cantidad y tipo de arcilla sino también de la distribución granulométrica del limo, arena y los agregados, así como del método de preparación y compactación. En este ensayo las unidades son sometidas a una carga en la misma posición que ocuparía en su aplicación. El cálculo de la resistencia a la compresión se determina por:

Resistencia a la compresión = Fuerza aplicada (Kg.) / Área (cm<sup>2</sup>).

## **4. METODOLOGÍA**

Para llevar a cabo los objetivos propuestos para este proyecto, es necesaria la ejecución de estudios basados en la aplicación de una metodología orientada, la cual se plantea en las siguientes etapas:

### **4.1. FASE DE REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO**

La creación y revisión del archivo bibliográfico, se desarrolló durante la fase preliminar del proceso de ejecución del proyecto. Como fuentes de documentos se consultó la base de datos en red sciencedirect, material bibliográfico recopilado en la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander, incluyendo libros, proyectos de grado y revistas especializadas, así como material certificado de circulación libre en internet. Estas fuentes bibliográficas proporcionaron valiosa información, con relación no solo al contexto geológico al que corresponde la zona de estudio, sino también la información acerca de los materiales (aditivos y estabilizantes) utilizados en la preparación de los bloques de adobes elaborados. Por otra parte, se obtuvo información respecto a los métodos de preparación de los bloques y los ensayos tecnológicos para determinar su resistencia y durabilidad.

### **4. 2 FASE DE CAMPO**

La fase de campo se compone por etapas, una inicial de reconocimiento del área localizada sobre la calle 200, paralela al anillo vial, entre las carreras 17 y 13 en el municipio de Floridablanca, departamento de Santander, donde se realizó el proyecto Prados de Laurentia. Preliminarmente se realizó una visita con el fin de documentar el proceso de extracción y preparación del material con el que se elaboran las casas. Una segunda visita consistió en el estudio geológico de campo alrededor del área de explotación de la materia prima, recopilando información y datos que nos permitieron identificar las unidades presentes en diferentes sectores por estaciones, y que junto con un análisis bibliográfico, contribuyeron

para determinar la variabilidad y la distribución vertical de los depósitos representados por medio de una columna estratigráfica. La siguiente etapa consistió en una visita a la mina de yeso ubicada en zonas aledañas al municipio de los Santos, 62 km al sur de Bucaramanga en el departamento de Santander, donde se observó el residuo minero resultante de la explotación de yeso, el cual corresponde a lodolitas calcáreas que se disponen en centros de acopio, donde el material es acumulado esperando algún potencial uso. Se observaron algunas diferencias en el aspecto físico del residuo debido a que algunos tenían aspecto fisil, otros macizos y en otros se observaron laminillas de yeso; de esta forma se recopiló información acerca de la selección del material más adecuado como estabilizante, que junto con la recolección de muestras y su posterior análisis, aplicando técnicas instrumentales, permitió establecer las características químicas y mineralógicas, y posteriormente se determinó que no todo el material disponible en el centro de acopio, se acomodaba a la especificaciones necesarias para su aplicación como estabilizante de suelos, así que se consideró tener en cuenta solo el material de aspecto macizo que no presentaba rastros visibles de yeso.

#### **4.3 FASE DE CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL**

El material se dispone a recogerse directamente en estado seco y se pasa por un primer tamizado para sustraer las partículas mayores de 2 cm. Una vez tomado suficiente de él, se procederá a realizar su caracterización en los laboratorios de las escuelas de Geología, Ingeniería química, Química, e Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander. Posteriormente, según las normas técnicas del Instituto Nacional de Vías I.N.V. y siguiendo los diferentes criterios establecidos por los técnicos de laboratorio, se llevaran a cabo los siguientes procedimientos:

- Descripción granulométrica del material, por medio de tamizado y vía húmeda, según la Norma I.N.V. E-123-07, 124-07, La muestra triturada y

cuarteada fue tamizada en un Tamizador Mecánico RO-TAP Testing Sieve Shaker, serial No. 21707, en el Laboratorio de Trituración, Molienda y Pulverización de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander.

- La descripción del comportamiento plástico del material, por medio del límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad (%), y el sistema de clasificación universal de suelos. Según la norma I.N.V. E- 125-126. Estos ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Acondicionamiento y Fabricación de Probetas de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.
- Determinación del contenido de agua óptimo (CAO), por medio de la prueba proctor modificada, según la norma I.N.V. E-142, que se elaboró de igual forma en el Laboratorio de Acondicionamiento y Fabricación de Probetas de la Escuela de Ingeniería Civil.
- Descripción de muestras.
- Caracterización de las fracciones finas del suelo, por fluorescencia de rayos X (XRF), difracción de rayos X (XRD) y espectroscopia infrarroja.

Los análisis por fluorescencia y espectroscopia infrarroja, se llevaron a cabo en el laboratorio C Color Ltda. en la ciudad de Bogotá. Los análisis de difracción se elaboraron en el laboratorio de Difracción de rayos X en la universidad Industrial de Santander.

Los datos obtenidos por los procedimientos planteados en este capítulo se encuentran en la sección de resultados.

### 4.3.1 Granulometría

Para la descripción granulométrica se organizaron de manera descendente en tamaño de partículas los tamices presentados en la tabla 7, según lo indica la Norma INV E-123-07. (Figura 9).

**Tabla 7.** Diámetros de las mallas utilizadas en las pruebas de granulometría.

Tamaño de Malla (mm)	Material retenido
2	Gravas Menores (granulos)
1	Arena muy gruesa
1/2	Arena gruesa
1/4	Arena media
1/16	Arena fina y muy fina

**Figura 8 .** Vibrador de Tamices. Tamizador Mecánico RO-TAP Testing Sieve Shaker, serial No. 21707.

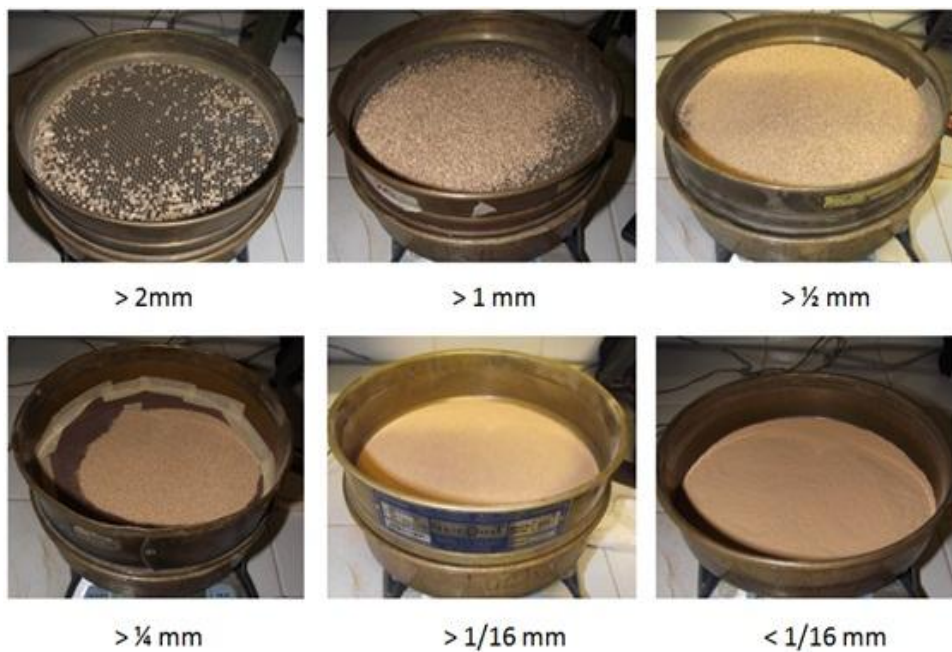


Fuente: Autores.

Para determinar los porcentajes presentes de cada tamaño de grano, primero se determinó de manera repetida el peso individual de cada una de las mallas usadas y el fondo sobre el cual quedarían los materiales finos. Las mallas fueron acopladas y colocadas en el vibrador de tamices (Figura 8). En el tamiz superior

se colocaron 486,3 gramos de la tierra que había sido seleccionada por el método de cuarteo (previamente secada en el horno) como una muestra representativa del material que vamos a utilizar en la elaboración de los ladrillos. Después de estar en movimiento por 15 minutos en el vibrador de tamices, las mallas fueron separadas cuidadosamente y fueron pesadas con el material retenido (Figura 9).

**Figura 9.** Determinación de la granulometría por tamizado. Cálculo del peso de la muestra retenida en cada uno de los tamices.



Fuente: Autores.

#### 4.3.2 Prueba de hidrometría

Este ensayo se llevó a cabo según la norma I.N.V. E.124-07, se tomaron 50 gramos del material que pasó por el tamiz 200, y se ubicó en un vaso de precipitado, agregándole 125 mililitros de agua destilada hasta que la muestra quedó totalmente sumergida, adicionalmente se agregó un agente dispersante, llamado hexametáfosfato de sodio, en una cantidad de 40 gramos.

Posteriormente, se dejó la muestra en esta solución durante 24 horas. Al cabo de este tiempo, se transfirió la muestra a una probeta graduada de 1000 mililitros, agregando agua hasta llenar la probeta, después se pasó la probeta graduada a un agitador durante un minuto. Al terminar, se colocó la probeta sobre la mesa. Se anotó una primera lectura del hidrómetro al minuto y otra a los dos minutos, después de haberse colocado la probeta sobre la mesa. Después de realizar las lecturas, se extrajo el hidrómetro de la suspensión y se colocó en una probeta graduada, con agua limpia, ya que si el hidrómetro se deja mucho tiempo en la suspensión, parte del material que se está asentando se puede adherir a él, causando errores en las lecturas. Luego se introdujo nuevamente el hidrómetro, realizándose lecturas a los 5, 15, 30, 60, 120, 250 y 1.440 minutos, del inicio de la sedimentación (Figura 10).

**Figura 10.** Prueba de determinación de materiales finos por Hidrometría. (a) 50 gramos pasa tamiz 200. (b) Dilución en agua destilada. (c) 40 gramos de Hexametáfosfato de sodio. (d) Mezcla de componentes y reactivos. (e) Probetas con soluciones: una con agua destilada (izq.) y otra con la mezcla de suelo y reactivo (der.). (f) Medición del Hidrómetro.



Fuente: Autores.

### **4.3.3 Ensayos de plasticidad de fracciones finas**

#### **4.3.3.1. Límites de Atterberg**

Son los límites de consistencia que se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos. Se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino solo pueden existir 4 estados de consistencia según su humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido, cuando está seco. Al agregársele agua poco a poco va pasando sucesivamente a los estados de semisólido, plástico, y finalmente líquido. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg.

##### **4.3.3.1.1. Determinación del límite líquido**

Se define como el contenido de humedad en porcentaje respecto al peso de la muestra, con el cual el suelo cambia del estado plástico al estado líquido. Para determinar el límite líquido se utiliza el dispositivo de Casagrande. Según la norma I.N.V. E .125, el ensayo se hace sobre la fracción de partículas de diámetro inferior a  $\frac{1}{2}$  mm, elaborando una pasta homogénea y colocándola en la capsula de Casagrande. En seguida se pasa el acanalador para dividir la pasta en dos partes, a través de un surco de aproximadamente 1 cm. Después la cuchara de Casagrande, recibirá dos golpes por segundo, de manera que se unan las dos paredes del surco por su parte inferior. Finalmente, se toman una muestra del material que se junta en el fondo del surco para determinar la humedad (Figura 11).

**Figura 11.** Ensayo de determinación de límite líquido para la muestra de suelo. (a). materia prima utilizada con diámetro inferior a 1/2 mm. (b). elaboración de pasta homogénea y colocación en la capsula. (c). se divide la pasta en dos partes por medio del acanalador. (d). unión de la pasta después de los golpes.



Fuente: Autores.

La pasta es nuevamente humedecida y se repite el proceso. Estos valores de la humedad, junto con el número de golpes necesarios para cada caso, se llevan a la grafica de curva de flujo, la cual relaciona el número de golpes correspondientes a cada contenido de agua. El porcentaje de agua para el cual la ranura se cierra con 25 golpes es el límite líquido. Debido a que consume mucho tiempo, cambiar el contenido de agua reiteradamente hasta que se cierre la ranura exactamente a los 25 golpes, se desarrolla el ensayo con al menos 3 contenidos de agua distintos, buscando que el número de golpes esté entre 15 y 40.

#### **4.3.3.1.2. Determinación del límite plástico**

Se define como la humedad para la cual el suelo pasa de un estado semisólido a solido. Según la norma I.N.V. E.126, este se determina tomando una pequeña muestra húmeda, con una consistencia tal, que no se adhiera a las manos, pero que pueda ser manipulada para formar pequeños bastoncillos de 3mm de

espesor, en proporciones de 1 a 2 cm de longitud, sin que se desmorone o desmenuce, haciendo rodar la pasta sobre una superficie plana. El procedimiento se realiza en forma repetitiva, con esto el suelo pierde humedad en forma gradual. En el momento en que el bastoncillo presenta agrietamiento, se mide el contenido de agua y este porcentaje sería el límite plástico. (Figura12).

#### 4.3.3.1.3. Determinación del índice plástico

Una vez determinados los límites líquido y plástico se calcula el índice plástico como la resta del límite líquido (máximo % Humedad en estado plástico) y el límite plástico (mínimo % Humedad en estado plástico).

$$I_p = LI - L_p$$

**Figura 12.** Ensayo de determinación de limite plástico para la muestra de suelo. (a y b). Elaboración de los bastoncillos de 3 mm de espesor, (c y d). Determinación del contenido de agua mediante el peso.



Fuente: Autores.

### 4.3.3.1.4 Sistema universal de clasificación de suelos

Se determinó el tipo de suelo a partir de la clasificación unificada de suelos (SUCS ASTM D 2487) (tabla 8). Este fue determinado teniendo en cuenta el porcentaje de partículas mayor a 1/16 mm, la relación de arenas y gravas, el porcentaje de finos presentes (menor a 1/16 mm) y el índice plástico.

**Tabla 8.** Sistema unificado de clasificación de suelos.

Criterios para la asignación de símbolos de grupo y nombre de grupo con el uso de ensayos de laboratorio			Clasificación de suelos				
			Símbolo de grupo	Nombre del grupo			
Suelos de partículas gruesas mas del 50% es retenido en la malla No. 200	Gravas Mas del 50% de la fracción gruesa es retenida en la malla No. 4	Gravas limpias Menos del 5% pasa la malla No. 200	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3$	GW	Grava bien graduada		
			$Cu < 4$ y $1 > Cc > 3$	GP	Grava mal graduada		
		Gravas con finos Mas del 12% pasa la malla No. 200		IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad	GM	Grava limosa	
				IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	GC	Grava arcillosa	
		Gravas limpias y con finos Entre el 5 y 12% pasa malla No.200		Cumple los criterios para GW y GM	GW-GM	Grava bien graduada con limo	
				Cumple los criterios para GW y GC	GW-GC	Grava bien graduada con arcilla	
				Cumple los criterios para GP y GM	GP-GM	Grava mal graduada con limo	
				Cumple los criterios para GP y GC	GP-GC	Grava mal graduada con arcilla	
	Arenas El 50% o mas de la fracción gruesa pasa la malla No. 4	Arenas limpias Menos del 5% pasa la malla No. 200		$Cu \geq 6$ y $1 \leq Cc \leq 3$	SW	Arena bien graduada	
				$Cu < 6$ y $1 > Cc > 3$	SP	Arena mal graduada	
		Arenas con finos Mas del 12% pasa la malla No. 200		IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad	SM	Arena limosa	
				IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	SC	Arena arcillosa	
			Arenas limpias y con finos Entre el 5 y 12% pasa malla No.200		Cumple los criterios para SW y SM	SW-SM	Arena bien graduada con limo
					Cumple los criterios para SW y SC	SW-SC	Arena bien graduada con arcilla
Suelos de partículas finas El 50% o mas pasa la malla No. 200	Limos y arcillas Limite Liquido menor que 50	Inorgánicos	IP > 7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	CL	Arcilla de baja plasticidad		
			IP < 4 y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"	ML	Limo de baja plasticidad		
		Orgánicos	Limite liquido - secado al horno < 0.75	OL	Arcilla orgánica		
			limite liquido - no secado		Limo orgánico		
	Limos y arcillas Limite Liquido mayor que 50	Inorgánicos	IP > 7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	CH	Arcilla de alta plasticidad		
			IP < 4 y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"	MH	Limo de alta plasticidad		
		Orgánicos	Limite liquido - secado al horno < 0.75	OH	Arcilla orgánica		
			limite liquido - no secado		Limo orgánica		
		Suelos altamente orgánicos	Principalmente materia orgánica de color oscuro		PT	Turba	

El sistema Unificado de clasificación de suelos, utiliza como identificación los siguientes símbolos:

Símbolo	G	S	M	C	O	P <sub>t</sub>	H	L	W	P
Descripción	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limos o arcillas orgánicas	Turba y suelos altamente orgánicos	Alta plasticidad	Baja plasticidad	Bien graduado	Mal graduado

Fuente: ASTM D 2487.

#### **4.3.3.1. Prueba de compactación de Proctor**

Permite determinar el valor de la humedad óptima, para la cual la presión ejercida sobre el bloque prensado de adobe, ejerce su mejor influencia. Este valor de humedad es importante en el proceso de elaboración de los bloques, ya que se busca un contenido de humedad, en el cual la presencia del líquido influya en la acomodación de las partículas, buscando una mayor densidad. La deficiencia de humedad, haría que gran parte de la presión ejercida, cuando se elabora el bloque, se pierda debido al rozamiento interno de las partículas, de igual manera, un exceso de humedad generaría dispersión por fuerzas de tensión. El procedimiento se realiza según la norma I.N.V. E-142. (Figura 13).

**Figura 13.** Elaboración de la prueba Proctor.



Fuente: Autores.

#### **4.3.3 Descripción de muestras.**

Se realizó una descripción macroscópica de las muestras en un estereomicroscopio binocular (NIKON inc. High Intensity Illuminator, NI-150); en el

salón de microscopios ubicado en la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander, (Figura 14).

**Figura 14.** Lupa Microscópica NIKON Inc. High Intensity Illuminator, NI-150 empleada en la descripción textural de los materiales.



Fuente: Autores.

Durante esta actividad se clasificaron texturalmente los materiales mediante una lupa binocular, donde fueron evaluados parámetros texturales tales como: composición mineralógica, redondez, calibración, y tamaño de granos.

#### **4.3.2 Análisis instrumentales**

Caracterización de las fracciones finas del suelo, por fluorescencia de rayos X (XRF), difracción de rayos X (XRD) y espectroscopia infrarroja.

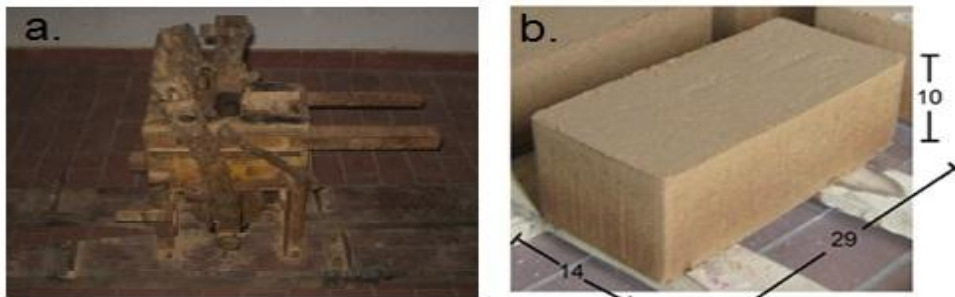
#### **4.4 FASE DE ELABORACIÓN DE PROBETAS EXPERIMENTALES**

El primer modo de estabilización de un adobe, consiste en compactar el material buscando un aumento en su densidad para evitar los espacios vacíos en su interior, y mejorar su comportamiento ante la deformación por compresión simple, flexión y la absorción de humedad. De igual manera, se busca fortalecer las reacciones químicas que se espera tengan lugar entre los materiales y que constituyen el principio del uso de estabilizantes químicos.

Las probetas experimentales que van a ser elaboradas, consisten en bloques de tierra compactada usando la máquina manual Cinva-Ram, la cual consiste en una caja metálica con un pistón sujeto a la superficie inferior que es desplazable (figura

15.a). La maquina se opera con una palanca de compresión manual que eleva la plataforma inferior y comprime el material que se introduce en su interior contra la tapa, de esta manera se obtienen bloques compactados, cuyas dimensiones son 29 cm de largo, 10 cm de alto y 14 cm de ancho (Figura 15.b). Para la elaboración de un bloque de tierra compactada se usan aproximadamente 8 kg de material.

**Figura 15.** (a). Maquina adobera manual CINVA-RAM. (b). Dimensiones de un bloque de adobe.



Fuente: Los autores.

#### 4.4.1 Preparación de Mezclas

Los materiales que se usan son: La tierra obtenida de los suelos residuales de Floridablanca, residuo minero de la Mesa de Los santos y cal viva comprada en una ferretería local. La idea es elaborar las probetas experimentales variando las proporciones de los materiales anteriormente nombrados, y elaborar ensayos de comportamiento para proponer la mezcla que presente los mejores resultados. Se pretende elaborar los primeros bloques sin estabilizarlos por medio del residuo minero y después se varían los porcentajes de los componentes, de la siguiente manera: Residuo minero en 2.5, 5 y 10% porcentaje en peso, unos usando un 3% de cal y sin hacer uso de ella.

##### 4.4.1.1 Estabilizante

Uno de los objetivos de este proyecto es buscar la estabilización de la mezcla para elaborar bloques de adobe, a partir de la propuesta de un subproducto minero.

Partiendo de la lectura de trabajos realizados anteriormente, se pueden obtener algunos puntos importantes para ser tenidos en cuenta. La mejora en el comportamiento ante agentes externos, podría ser explicado mediante las reacciones que se llevan a cabo entre los materiales de fracciones finas (arcillosas) de la tierra seleccionada, el agua, el residuo minero y aditivos de uso común como la cal o el cemento portland. El uso de la cal está ampliamente establecido en la estabilidad de suelos en construcciones civiles como vías. La cal y el cemento portland cumplen una función activante, al ser hidratados y estar en contacto con  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  presentes en las arcillas, y el material estabilizante, generándose la formación de geles C-S-H (Calcium – Silicates – Hidrates), los cuales actúan como agentes ligantes y como rellenos de poros, haciendo el material más denso y más resistente a la compresión y a los ataques de la humedad.

Trabajos como el realizado por J. e. oti (2009), usando una escoria de alto horno, GGBS (grund granulated blastfurnace slag), que entre sus principales constituyentes incluye  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , junto con cemento portland ordinario, cal y la tierra arcillosa, producen acercamientos del tipo de trabajo que se desea realizar. Ellos realizaron dos tipos de mezclas, la primera con una adición de cal a la tierra y la segunda con una adición de cemento portland.

Algunos puntos a tener en cuenta de este trabajo realizado son:

1. Se producen reacciones de intercambio catiónico entre las fracciones arcillosas de la tierra y el estabilizante.
2. El cemento portland y la cal pueden actuar como activante durante la hidratación de los mismos. Estas reacciones producen la generación de geles C-S-H, los cuales funcionan como ligantes y como relleno de espacios vacíos, generando una mayor densidad y un mejor comportamiento ante la humedad,

disminuyendo la tasa de absorción de agua del bloque elaborado y una mayor resistencia a la compresión.

3. Con el uso de la cal se obtuvieron mejores resultados, en relación al uso del cemento portland.
4. La cal actúa durante el proceso de activación debido a su alto pH, (13.9 para la cal apagada) y a los altos niveles de calor liberado durante el proceso de hidratación, generando unas condiciones alcalinas e incrementando la solubilidad de la sílice y el aluminio.

#### **4.4.1.1.1. Preparación del Aditivo.**

El residuo minero debe ser triturado para su utilización. Para tal fin, se hizo uso de la trituradora de mandíbulas BB 200 RETSCH del laboratorio de trituración, molienda y pulverización de la escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander. Después de hacerlo pasar por la trituradora, el material alcanzó un tamaño inferior a 2 cm (Figura 16).

**Figura 16.** Material triturado en la trituradora de mandíbulas BB 200 RETSCH.



Fuente: Los autores.

Después este material se dejó a secar al aire libre durante dos días, para ser puesto en el molino de bolas Denver que se encuentra en la planta de aceros de la escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad industrial de Santander. Se colocaron 20 kg de material junto con 100 bolas de acero, y se pusieron a rodar

durante 2 horas, de esta manera el material alcanzó un tamaño de grano fino (Figura 17).

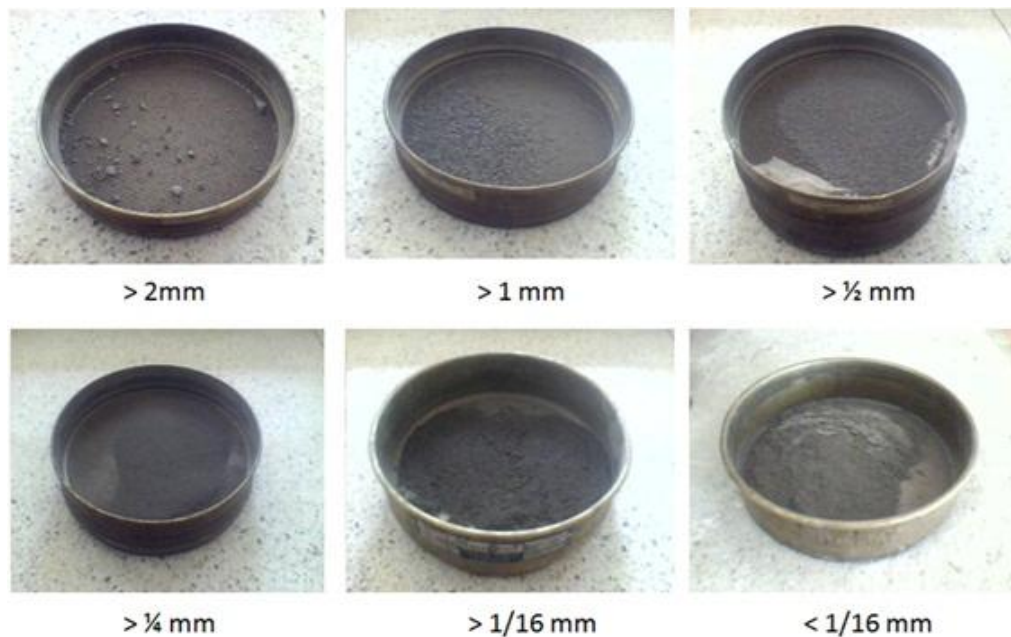
**Figura 17.** Molino de Bolas Denver.



Fuente: Los autores.

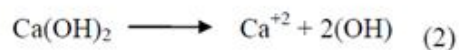
Una vez el Material fue pulverizado en el molino de bolas, se procedió a determinar su granulometría, siguiendo el mismo procedimiento que se desarrolló para la tierra (figura 18).

**Figura 18.** Determinación de la granulometría del residuo minero triturado.



Fuente: Los autores.

Las proporciones para la cal, se toman de acuerdo a los resultados obtenidos por proyectos realizados en la escuela de ingeniería Civil (Flores C & López J, 2010- Pérez & Pachon, 2003), en los que recomiendan utilizar la mínima proporción de cal, ya que puede generar una baja resistencia a la compresión en los bloques. La cal utilizada para este caso es la cal hidratada (hidróxido de calcio) que es la que reacciona con las partículas finas de los materiales y las transforma permanentemente en una fuerte matriz cementante; al agregar cal a la mezcla, se presenta una reacción entre los iones de calcio de la cal y la arcilla y el residuo minero, activando las propiedades cementantes de estos dos últimos, ya que se liberan la sílice y la alúmina debido a los intensos niveles de calor generados durante el proceso de hidratación de la cal, de esta forma estos compuestos reaccionan con el calcio de la cal para formar silicatos de calcio hidratados (SCH) y aluminatos de calcio hidratados (ACH) que son productos cementantes similares a aquellos formados en el cemento de Portland. Esta reacción es conocida como reacción puzolánica, que consiste en la solubilización de los compuestos de sílice y alúmina amorfos o débilmente cristalizados, en un medio altamente alcalino como el que se forma en una solución de hidróxido de calcio, formándose aluminosilicatos dicálcicos y tricálcicos similares a los obtenidos en el fraguado del cemento Portland. Es decir, que es un proceso natural de formación de cemento; esta reacción es irreversible. Las reacciones más comunes que ocurren cuando se estabiliza un material arcilloso con hidróxido de calcio se da por las siguientes reacciones:



La descomposición del hidróxido de calcio genera iones calcio e hidroxilos, como se muestra en la reacción (2); en la reacción (3), los iones de calcio e hidroxilos reaccionan con sílice para formar un gel de baja cristalinidad de silicato de calcio hidratado SCH. En la reacción (4), los iones de calcio e hidroxilos reaccionan con alúmina, formando aluminatos cálcicos hidratados ACH.

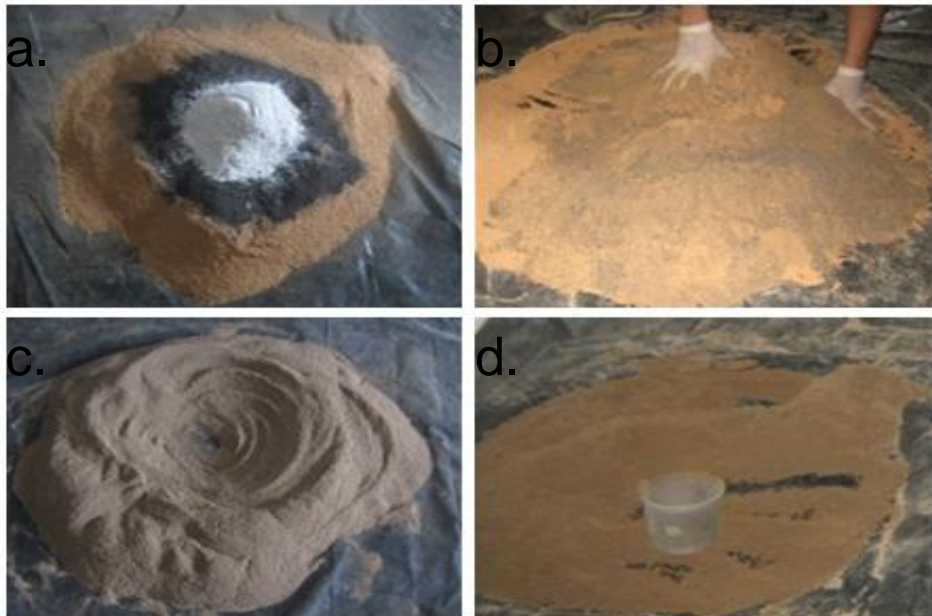
La tabla 9 resume las relaciones de las mezclas a elaborar.

**Tabla 9.** Proporciones de los materiales constituyentes en la elaboración de las probetas experimentales.

Codigo de Mezcla	Porcentaje en peso			
	Suelo	Residuo Minero	Cal	Agua
M1	88,5	0	0	11,5
M2	86	2,5	0	11,5
M3	81,5	2,5	3	13
M4	83,5	5	0	11,5
M5	79	5	3	13
M6	78,5	10	0	11,5
M7	74	10	3	13

El proceso de elaboración comienza pesando los materiales y realizando su mezcla en estado seco, hasta obtener un material que se vea homogéneo. En seguida se agrega la cantidad necesaria de agua y se realiza nuevamente la mezcla manual, cuidando que todo el material presente el mismo estado de humedad. Se toma la cantidad necesaria de tierra y se pone al interior de la maquina Cinva-Ram y se procede a ejercer la fuerza en la palanca. El bloque es retirado tratando de no deformar sus bordes, debido a que se hacen bastante vulnerables, disponiéndose para su curado en un salón a temperatura ambiente (JE Oti), protegiéndolo de la pérdida acelerada de agua que podría producir grietas. A los 7 días de haberse elaborado, los bloques fueron volteados de cara y se dejaron para que continuaran su proceso de curado hasta la realización de los ensayos de comportamiento (Figuras 19 y 20).

**Figura 19.** Proceso de homogenización de las mezclas. (a). materia prima, residuo y cal sin mezclar. (b, c y d). Homogenización de la mezcla.



Fuente: Autores.

**Figura 20.** (a y b). Elaboración de los bloques de tierra compactada. (c, d ,e y f). Disposición de los bloques recién elaborados.



Fuente: Autores.

#### 4.4.1.2. Mezcla 1 (EM1).

**Tabla 10.** Proporciones de los materiales utilizados en la elaboración de la mezcla 1.

EM1	% peso	Unidades elaboradas
Tierra	88,5	13
Agua	11,5	
Cal	0	
Residuo Minero	0	

Estos bloques fueron elaborados solo con tierra y agua, sin utilizar el estabilizante (tabla 10). El contenido de agua, se determinó de acuerdo con el porcentaje que resultó al realizar el Ensayo del contenido de agua óptimo (CAO) por medio de la prueba Proctor, el cual corresponde a 11.5%; para el caso de la tierra esta corresponde al 88. 5% restante. Estos bloques iniciales serán tenidos en cuenta como referencia para evaluar la modificación de las propiedades de los bloques estabilizados. Se elaboraron cinco unidades para pruebas de compresión simple, cinco para pruebas de estabilidad dimensional (absorción de humedad) y tres para pruebas de flexión (Figura 21).

**Figura 21.** Unidades de adobes de la Mezcla 1.



Fuente: Autores.

#### 4.4.1.3. Mezcla 2 (EM2).

**Tabla 11.** Proporciones de los materiales utilizados en la elaboración de la mezcla 2.

EM2	% peso	Unidades elaboradas
Tierra	86	13
Agua	11,5	
Cal	0	
Residuo Minero	2,5	

Estos bloques fueron elaborados agregando un 2,5% en peso del residuo minero, modificando así en un 86% en peso la proporción de la tierra. El contenido de agua se mantiene en 11,5 %. (Tabla 11). Se elaboraron cinco unidades para pruebas de compresión simple, cinco para pruebas de estabilidad dimensional (absorción de humedad) y tres para pruebas de flexión. (Figura 22).

**Figura 22.** Unidades de adobes de la Mezcla 2.



Fuente: Autores.

#### 4.4.1.4. Mezcla 3 (EM3)

**Tabla 12.** Proporciones de los materiales utilizados en la elaboración de la mezcla 3.

EM3	% peso	Unidades elaboradas
Tierra	81,5	13
Agua	13	
Cal	3	
Residuo Minero	2,5	

Estos bloques fueron elaborados agregándoles un 2,5% en peso del residuo minero y un 3% de cal, con el fin de evaluar la capacidad que posee la cal para activar las propiedades cementantes de las arcillas y el residuo, cuando ocurre el proceso de hidratación (tabla 12). El contenido de agua fue aumentado en un 1,5%, con respecto al 3% de cal, como es sugerido en Pérez & Pachón, 2003 y teniendo en cuenta la relación de reacción agua/cal la cual corresponde a 0,5:1. Se elaboraron cinco unidades para pruebas de compresión simple, cinco para pruebas de estabilidad dimensional (absorción de humedad) y tres para prueba de flexión (Figura 23).

**Figura 23.** Unidades de adobes de la Mezcla 3.



Fuente: Autores.

#### 4.4.1.5. Mezcla 4 (EM4)

**Tabla 13.** Proporciones de los materiales utilizados en la elaboración de la mezcla 4.

EM4	% peso	Unidades elaboradas
Tierra	83,5	13
Agua	11,5	
Cal	0	
Residuo Minero	5	

Estos bloques fueron elaborados agregándoles un 5% en peso del residuo minero. El contenido de agua se mantiene en 11,5 % (tabla 13). Se elaboraron cinco unidades para pruebas de compresión simple, cinco para pruebas de estabilidad dimensional (absorción de humedad) y tres para pruebas de flexión (Figura 24).

**Figura 24.** Unidades de adobes de la Mezcla 4.



Fuente: Autores.

#### 4.4.1.6. Mezcla 5 (EM5)

**Tabla 14.** Proporciones de los materiales utilizados en la elaboración de la mezcla 5.

EM5	% peso	Unidades elaboradas
Tierra	79	13
Agua	13	
Cal	3	
Residuo Minero	5	

Estos bloques fueron elaborados agregándoles un 5% en peso del residuo minero y un 3% de cal, el contenido de agua fue aumentado en un 1,5% (tabla 14). Se elaboraron cinco unidades para pruebas de compresión simple, cinco para pruebas de estabilidad dimensional (absorción de humedad) y tres para pruebas de flexión (figura 25).

**Figura 25.** Unidades de adobes de la Mezcla 5.



Fuente: Autores.

#### 4.4.1.7. Mezcla 6 (EM6)

**Tabla 15.** Proporciones de los materiales utilizados en la elaboración de la mezcla 6.

EM6	% peso	Unidades elaboradas
Tierra	78,5	13
Agua	11,5	
Cal	0	
Residuo Minero	10	

Estos bloques fueron elaborados agregándoles un 10% en peso del residuo minero. El contenido de agua se mantiene en 11,5 % (tabla 15). Se elaboraron cinco unidades para pruebas de compresión simple, cinco para pruebas de estabilidad dimensional (absorción de humedad) y tres para pruebas de flexión (Figura 26).

**Figura 26.** Unidades de adobes de la Mezcla 6.



Fuente: Autores.

#### 4.4.1.8. Mezcla 7 (EM7)

**Tabla 16.** Proporciones de los materiales utilizados en la elaboración de la mezcla 7.

EM7	% peso	Unidades elaboradas
Tierra	74	13
Agua	13	
Cal	3	
Residuo Minero	10	

Estos bloques fueron elaborados agregándoles un 10% en peso del residuo minero y un 3% de cal, el contenido de agua fue aumentado en un 1,5% (tabla 16). Se elaboraron cinco unidades para pruebas de compresión simple, cinco para pruebas de estabilidad dimensional (absorción de humedad) y tres para prueba de flexión (figura 27).

**Figura 27.** Unidades de adobes de la Mezcla 7.



Fuente: Autores.

#### 4.5. FASE DE ENSAYOS DE COMPORTAMIENTO.

Los ensayos establecidos por la norma NSR-10 D.3.8.1.3, fueron elaborados en el Laboratorio de suelos Andina Ingeniería Ltda. y corresponden a: Absorción total, estabilidad dimensional, resistencia a la compresión de cinco (5) unidades para cada mezcla y también se elaboró el ensayo de resistencia a la flexión, el cual se realizó para 3 unidades por mezcla.

Para los ensayos de resistencia a la compresión y flexión se utilizaron los dispositivos mostrados en la figura 28.

#### **4.6. FASE DE INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

Durante esta fase se llevó a cabo la integración de la información recolectada a lo largo del desarrollo del proyecto, así como la interpretación de los resultados obtenidos en cada una de las fases anteriores, determinando como los elementos que componen cada mezcla, reaccionan entre sí para formar mezclas y bloques de adobes que optimicen sus propiedades iniciales, mediante el análisis de las variables obtenidas para cada ensayo.

**Figura 28.** (a y b). Prensa digital marca Pinzua, modelo PC-160/116. (c y d). Dispositivo empleado para el ensayo de flexión. Fuente: Autores.



#### **FASE DE ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL**

Finalmente, durante esta fase se realizó la preparación del informe final del proyecto, el cual presenta los resultados de la investigación.

## **5 GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO**

### **5.1. LOCALIZACIÓN DEL SECTOR PRADOS DE LAURENTIA**

La zona se encuentra localizada sobre la calle 200, en el municipio de Floridablanca, departamento de Santander, ubicada en la parte alta del valle aluvial de la quebrada Aranzoque hacia al sur, que está integrado por dos áreas, una de pendiente baja en la parte superior del valle, y otra en la parte central, conformada por una ladera de pendiente alta que está cubierta de pastos cortos, maleza y algunos árboles de gran tamaño, con una topografía del terreno circundante de forma ondulada, con pendientes máximas, de aproximadamente 75% hacia el sur. El drenaje está concentrado hacia la quebrada Aranzoque, localizada en el sector sur de la zona (Figura 29).

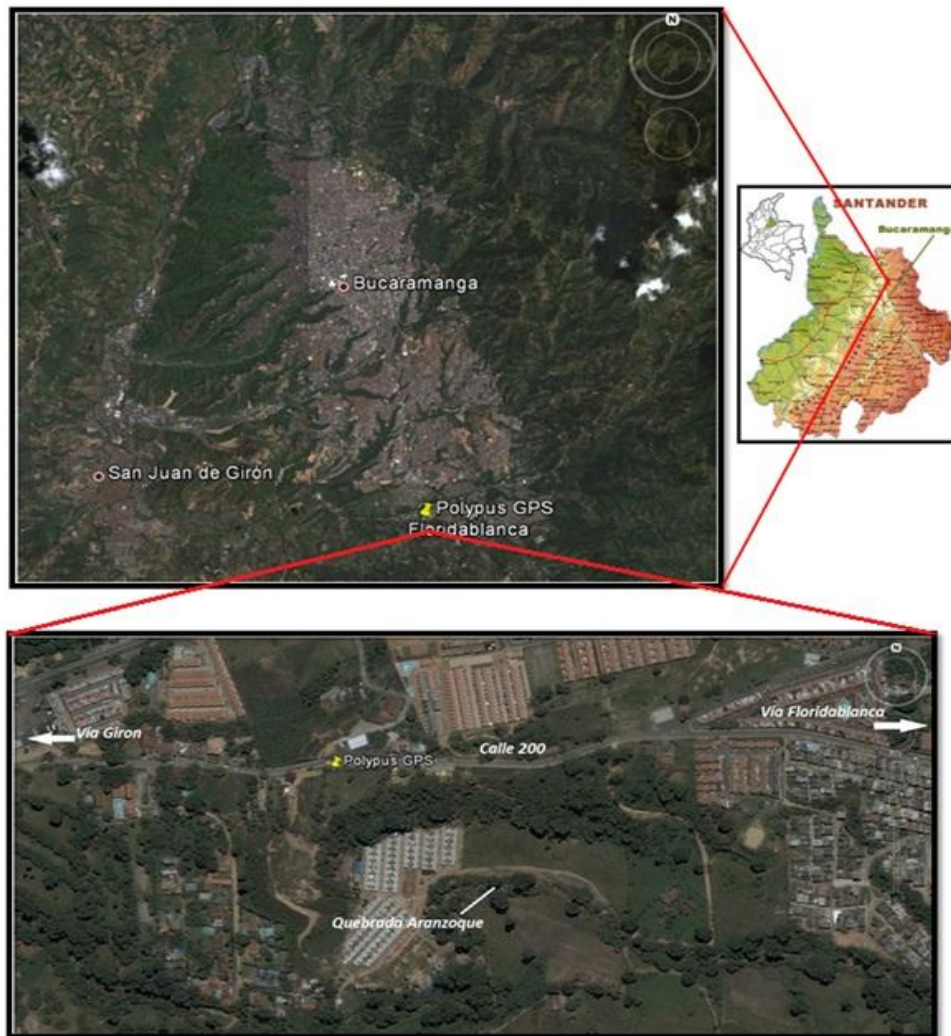
### **5.2. CLIMA**

El Área Metropolitana de Bucaramanga se localiza ecológicamente en el bosque seco tropical, con transición al fresco húmedo premontano. El piso térmico sobre el cual se encuentra el Municipio de Floridablanca, es templado con variaciones importantes de temperatura. Las principales características del clima de la zona son las siguientes:

- Temperatura: El Área Metropolitana de Bucaramanga presenta una temperatura media de 24° C, con 23.7°C en la parte norte de la terraza y 24.3° C en la parte sur más cerca de Girón.
- Precipitación: La lluvia en el Área Metropolitana de Bucaramanga se caracteriza por presentar un comportamiento anual bien definido así: Un período seco inicial bastante fuerte durante los meses de Enero, Febrero y parte de Marzo, luego se presentan dos período lluviosos: Uno entre Abril y Junio y luego otro entre Septiembre y Noviembre, con un período seco intermedio entre Julio y Agosto,

donde se presentan algunas lluvias importantes. La precipitación anual promedio es de 1.130 mm.

**Figura 29.** Esquema de Localización de la zona de estudio.



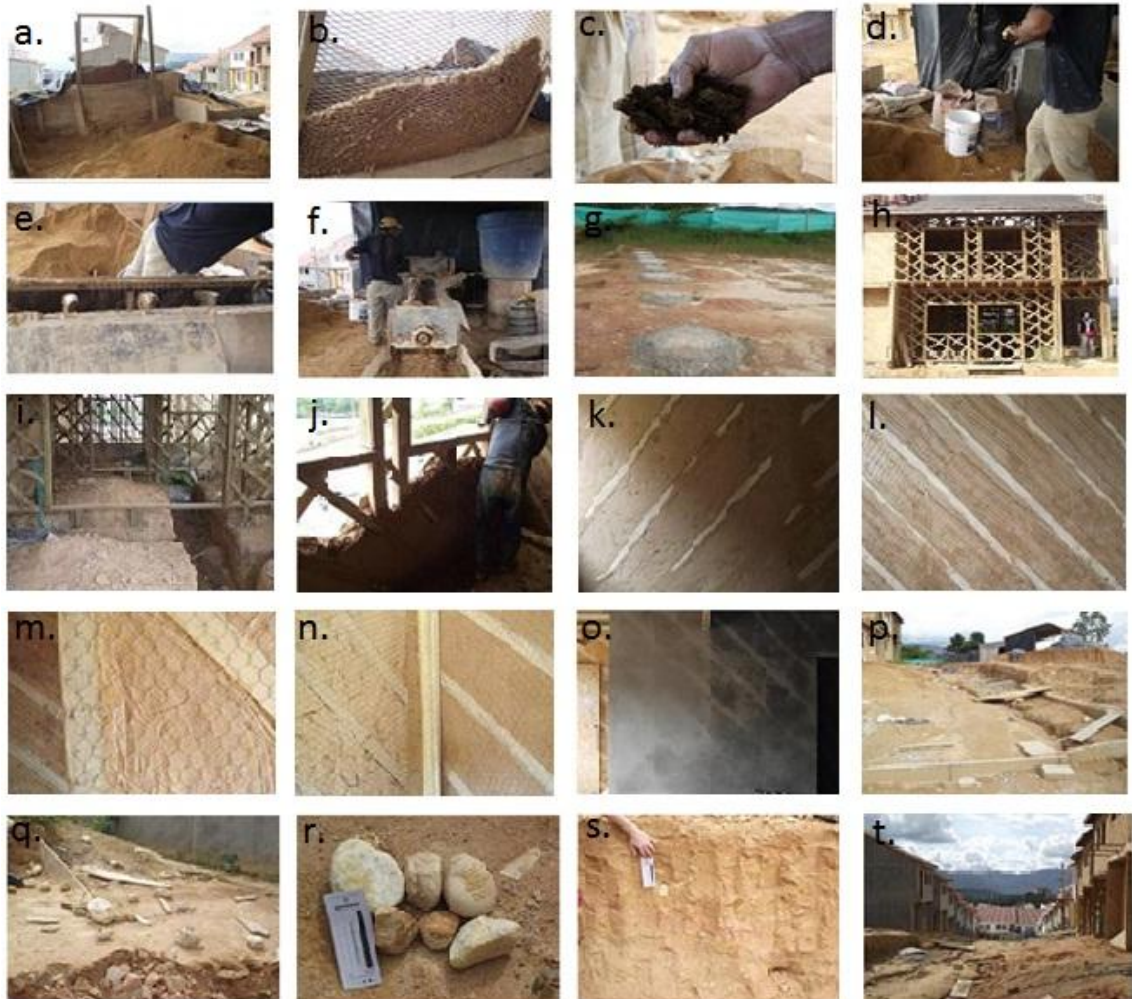
Fuente: Google earth.

### 5.3. PROYECTO PRADOS DE LAURENTIA

En esta área se realizó el proyecto **Prados de Laurentia**, elaborado por Polypus de Colombia, quienes utilizaron como materia prima la tierra que se encuentra en el terreno sobre el cual edificaron para la elaboración de casas de tipo tapia,

reforzados con una estructura en madera, cuyo procedimiento fue documentado y se explica en la figura 30.

**Figura 30.** Prados de Laurentia. Elaboración de las viviendas.



Fuente: Los autores.

- a. Material tamizado que se usa para preparar la mezcla.
- b. Se toma el material que pasa por el tamiz, No se hace control granulométrico.
- c. Estiércol de caballo, regula el pH, evita la oxidación de las puntillas.
- d. Zona de mezcla del material seco empleado en la mezcla.

- e. Distribución de agua constante en el molino.
- f. Material mezclado y humedecido.
- g. Cimientos en los cuales se inserta las columnas principales de la estructura.
- h. Estructura en madera de la casa.
- i. Elevación de la madera por encima del suelo, 40 cm. Evita la humedad.
- j. Aplicación de arcilla. Nótese que no es pisada o aprisionada.
- k. Muro con arcilla fresca.
- l. Muro de rayado para friso.
- m. Muro cubierto. Ayuda a evitar el colapso.
- n. Comparación entre muro de mala calidad (con grietas, mal proceso de humectación) y uno de buena.
- o. Aplicación de friso de cemento.
- p. Explotación escalonada de las arcillas.
- q. Carga superior del terreno de extracción de la tierra
- r. Guijarro-Cobble (64-256 mm.).
- s. Perfil del suelo. Materiales de coluvión con múltiples tamaños de grano y composiciones mineralógicas. Alto contenido de matriz arcillosa.
- t. Explotación a través de toda el área, no hay prioridad de muestreo.

#### **5.4. GEOLOGÍA GENERAL**

El área urbana de los municipios de Bucaramanga y Floridablanca, se sitúa en la llamada Formación Bucaramanga, depositada en una depresión tectónica limitada al este por el sistema de fallas Bucaramanga – Santa Marta, que lo separa del macizo de Santander, al oeste por la falla del Suárez – Rio de Oro, que lo separa de la mesa de Lebrija, al norte por la intersección de las dos fallas anteriores y por la falla de los Angelinos y al sur por el sistema de fallas de Ruitoque y Los Santos (este sistema es ortogonal a la falla de Bucaramanga) que permitió el levantamiento de las mesas de Ruitoque y los Santos (Figura 33). A continuación se presenta una descripción resumida de la estratigrafía presentada en el Informe

de zonificación sismogeotectónica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga, elaborado por el Ingeominas en el 2001.

#### **5.4.1. Formación Bucaramanga**

La formación Bucaramanga fue descrita inicialmente por De Porta (1958). Se trata de un importante depósito sedimentario de edad Cuaternaria que morfológicamente corresponde a un abanico aluvial erosionado, posiblemente asociado en su mayor parte al río Suratá. De acuerdo con las dataciones paleomagnéticas publicadas en el proyecto hidroeléctrico Fonce-Suárez, la parte más antigua de la formación Bucaramanga tiene unos 730.000 años ubicándola dentro del Pleistoceno medio-superior. El espesor del depósito aumenta de oriente a occidente, siendo actualmente motivo de investigación. Algunos cortes geológicos permiten estimar, en los sectores más profundos, valores promedios cercanos a los 250 m. De acuerdo con la granulometría, morfología, agentes de transporte y fuentes de los materiales, esta unidad se acumuló en un ambiente típicamente fluvial, donde alternan materiales de origen aluvial tipo cono de deyección, flujos de escombros, canal y lagunar.

Teniendo en cuenta las clasificaciones hechas por Hubach (1952) y Niño y Vargas (1993), se propone dividir la formación Bucaramanga, de base a techo, en los siguientes miembros: miembro Organos (Qbo), miembro Finos (Qbf), miembro Gravoso (Qbg) y miembro Limos Rojos (Qblr).

##### **5.4.1.1. Miembro Organos (Qbo)**

Definido por Hubach (1952). De acuerdo con Bueno y Solarte (1994), corresponde a una serie monótona de niveles polimícticos de fragmentos gruesos, de aspecto conglomerático, en alternancia con capas y lentes limo arenosos, con variaciones laterales y verticales en composición y textura. Hubach (1952) describe niveles lenticulares limo arenosos, con espesores hasta de 5 m. Los niveles

conglomeráticos conforman depósitos de gravas y bloques, débilmente consolidados, clasto soportados (60%) y grano soportados (40%), dispuestos en forma de capas gruesas a muy gruesas, con espesores hasta de 15 m. El tamaño de los cantos varía entre 10 y 30 cm, alcanzando bloques mayores de 1 metro de diámetro. Estos se componen en su mayoría de areniscas silíceas de grano medio, bien cementadas y en menor proporción de fragmentos de rocas ígneas ácidas de textura fanerítica, neis micáceo de color amarillo a rosado, areniscas lodosas rojizas de grano fino y alto contenido de micas, cuarzo lechoso, liditas y cherts. Todos los fragmentos tienen formas redondeadas a sub redondeadas, esfericidad baja a media y mala selección. Los niveles gravosos presentan matriz arcillosa, pardo amarillenta, con algunas variaciones a gris amarillento. Los feldespatos en las rocas se encuentran moderadamente meteorizados. Los niveles finos corresponden a arcillas arenosas y arenas arcillosas compactas, de consistencia firme, ligeramente micáceas, con trazas de materia orgánica. Su origen se relaciona con depósitos cíclicos intercanales. El mayor espesor de los niveles limo arenosos se presentan hacia la base, lo que explica periodos más largos de retrabajamiento, bajo un régimen fluvial constante. El predominio de lentes hacia la parte superior y los contactos irregulares podrían indicar periodos de erosión por corrientes intermitentes (Bueno y Solarte, 1994). El ambiente de depositación de este miembro se relaciona con flujos de escombros y flujos torrenciales, e interdigitación de facies de corrientes de canal, correspondiendo a la parte proximal y media del Abanico de Bucaramanga.

#### **5.4.1.2. Miembro Finos (Qbf)**

Este nivel fue reconocido y definido por Hubach (1952). Se ubica estratigáficamente entre el miembro Organos de la Formación Bucaramanga y el nivel superior (Miembro Gravoso) en contactos netos plano paralelos. Es una extensa capa lenticular horizontal, mas o menos continua, de unos 15 m de espesor promedio, donde alternan niveles arcillosos, limoarenosos y

arenolimosos, de colores gris verdosos. La geometría de sus niveles es tabular a lenticular, con espesores que oscilan entre 5 y 40 cm, de estratificación plana paralela, cruzada y ondulosa. El ambiente de depositación de este miembro es de depósitos de ambiente aluvial de intercanales poco profundo, de baja energía y de escasas interdigitaciones de flujo de escombros de facies arenosas.

#### **5.4.1.3. Miembro Gravoso (Qbg)**

Definido por Niño y Vargas (1992). Su espesor varía entre 8 y 30 m; presenta niveles gravosos, gravoarenosos y gravolodosos. Los cantos son, en su mayor parte, tamaño grava de diámetro promedio 15 cm y bloques de roca, en menor cantidad, hasta de 0,8 m de diámetro, subangulares a subredondeados, en matriz areno-arcillo-limosa, color pardo rojizo, rojizo y ocre pálido; en general el depósito es matriz soportado, aunque localmente se presenta clasto soportado. El contacto inferior con el miembro Finos es neto, continuo y suavemente ondulado y el contacto superior con el miembro Limos rojos es gradacional. Los cantos están compuestos en su mayor parte por rocas metamórficas-ígneas del Macizo de Santander, y areniscas cuarzosas, areniscas limosas y limolitas moradas de las Formaciones Girón y Jordán. La matriz, por su parte, es de composición cuarzo-feldespática micácea (cuarzo, plagioclasa, láminas de muscovita), de consistencia media y de baja cohesión. El ambiente de depositación indica un dominio de flujo de escombros.

#### **5.4.1.4. Miembro Limos Rojos (Qblr)**

Nivel definido por Julivert (1963). Está constituido por arenas arcillosas gravosas y limos de colores rojizos, amarillentos y naranjas. Se observó la presencia esporádica de bloques angulares de arenisca asociados superficialmente a este miembro; estos cantos pueden estar embebidos dentro de limos rojos y se caracterizan por estar meteorizados. Suprayace al segmento gravoso y su contacto con éste es gradacional. El ambiente de depositación indica un dominio de flujo de lodos combinados con caídas de bloques de la pendiente del macizo.

#### **5.4.1.5. Depósitos de flujos de escombros (Qfe)**

Son depósitos de piedemonte de origen aluvio torrencial y aluvio gravitacional, provenientes principalmente de la denudación de los materiales alterados que componen el Macizo de Santander, los cuales son transportados a lo largo de los cauces de corrientes de agua que nacen en éste. De acuerdo con las características granulométricas, geométricas y composicionales, éstos depósitos provienen de flujos torrenciales de detritos y, en parte, flujos de escombros.

#### **5.4.1.6. Depósitos aluviales**

Son los depósitos de material dejados por los ríos y quebradas mayores, los cuales se distribuyen de acuerdo a la altura y posición en los valles. Se dividen en Terrazas Medias (Qal2), Terrazas Bajas (Qal1), Depósitos Aluviales de Cauce y Llanuras de Inundación (Qal). En la zona de incidencia del proyecto, se encuentran los depósitos aluviales de la quebrada Aranzoque o La Estancia.

##### **5.4.1.6.1. Depósitos Aluviales de Terrazas Medias (Qal2).**

Como su nombre lo indica, son depósitos de origen aluvial, de superficie más o menos plana y horizontal, muy poco disectados, ubicados hacia las márgenes de las corrientes de agua principales.

En estos depósitos se aprecia que hay predominio de rocas de neis cuarzo feldespático - micáceos, además de que los clastos se encuentran en estado de meteorización alto-moderado. Las partículas que componen la terraza media, se encuentran en dicho sector, en estado suelto y con humedad baja, siendo fácilmente disgregables o erosionables. El cuarzo y las plagioclasas conforman casi el 90% de la matriz arenosa (70% arena y 30% finos), con algo de muscovita y máficos; mientras que las gravas y bloques, son esencialmente neises y probablemente cuarzomonzonita.

Este nivel se extiende hacia el occidente de Floridablanca, siendo especialmente extenso sobre la margen izquierda de la quebrada La Estancia, donde también se desarrolla un nivel de terraza aluvial más bajo (Qal1).

#### **5.4.1.6.2. Depósitos Aluviales de Terrazas Bajas (Qal1).**

Los mayores depósitos de este tipo, conforman el área urbana de Girón, se observan en las márgenes de los ríos de Oro y Frío. Además, corresponden estos depósitos a los niveles máximos de inundación alcanzados por las crecientes extraordinarias actuales. Los cortes de terraza, de profundidad inferior a 6.0 metros, muestran cantos subredondeados a redondeados de areniscas cuarzosas blancas, amarillentas y resistentes, guijos ígneo-metamórficos, algunas areniscas violáceas y fragmentos de cuarzo lechoso, con una disposición no uniforme y algunos lentes arenosos.

En el sector del proyecto, está compuesto de gravas arenosas y arenas gravosas, de forma angular a subangular, con algunos bloques de roca de tamaño métrico, de neis y cuarzomonzonita, provenientes del macizo de Santander. Corresponden a Depósitos Aluviales, tipo Flujos Torrenciales y Flujos de Escombros, transportados a lo largo del río Frío en época reciente; dicho nivel es susceptible a flujos torrenciales y flujos de escombros.

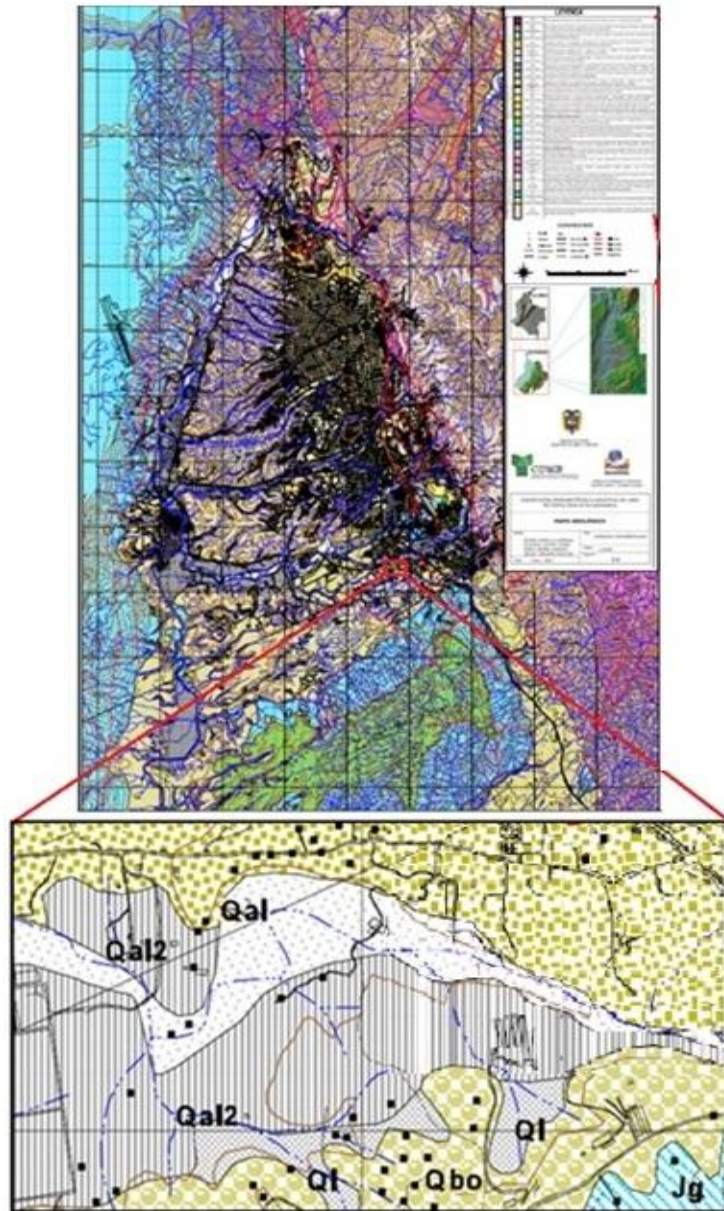
#### **5.4.1.6.3. Depósitos Aluviales de Cauce y Llanura de Inundación (Qal).**

En su mayoría, estos depósitos están localizadas en los valles y llanuras de inundación de el río de Oro; Estos depósitos están compuestos por fragmentos de composición y granulometría muy variable. En general contienen cantos de areniscas silíceas, areniscas conglomeráticas, conglomerados, cuarcitas y lodolitas, como también granito, granodiorita, diorita, gabro, neis y esquisto, en una matriz areno lodosa.

El tamaño de los cantos varía desde unos pocos centímetros hasta un metro, con predominio del diámetro de 50 cm., de forma subredondeada a redondeada y baja esfericidad. Estos depósitos son bastante sueltos y permeables.

La figura 31 muestra el mapa geológico regional del Área Metropolitana de Bucaramanga.

**Figura 31.** Mapa geológico regional del área de estudio.



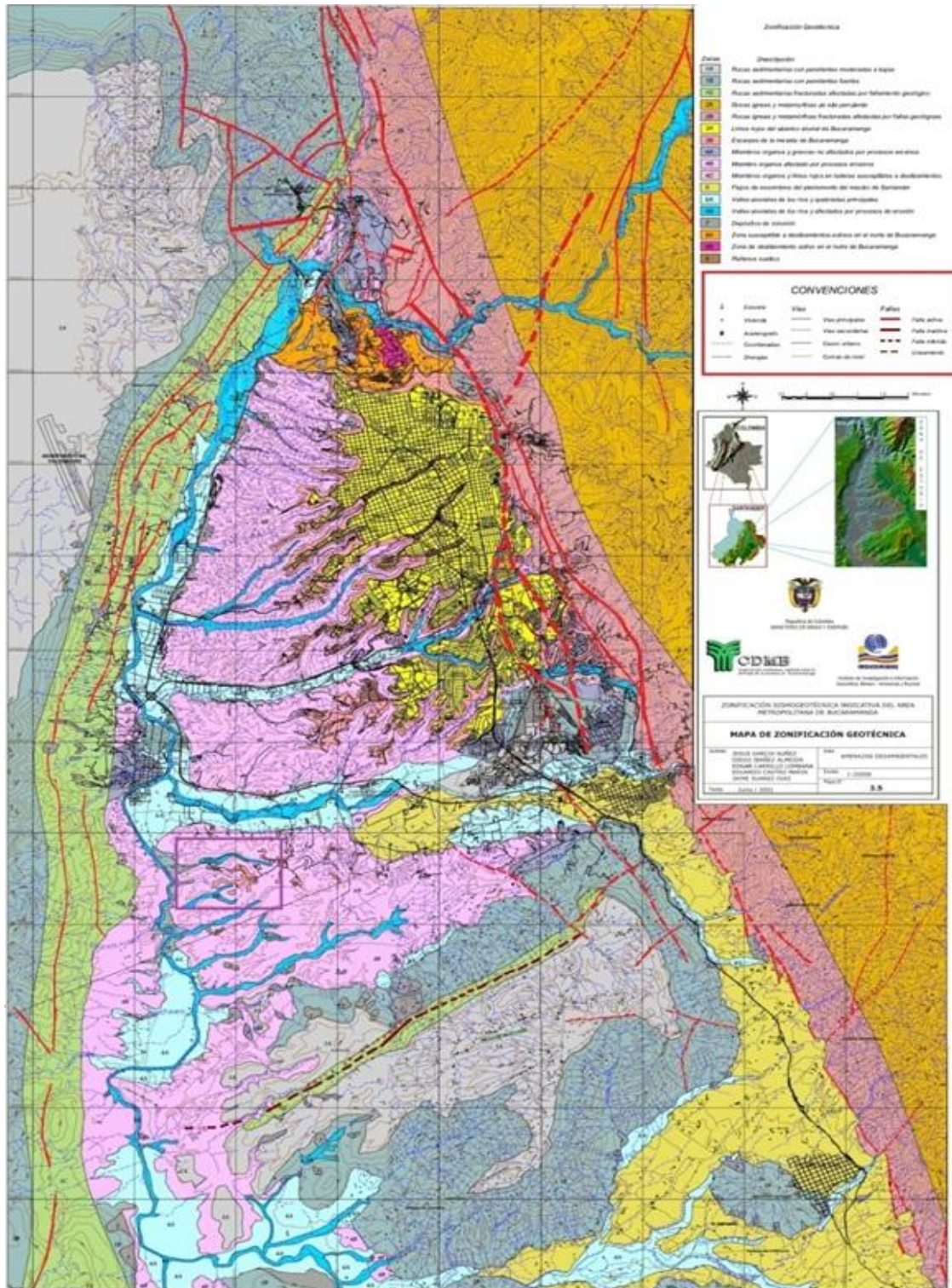
Fuente: Ingeominas, CDMB, 2001, y modificado por autores.

Figura 32. Leyenda del mapa geológico de Bucaramanga.

CUATERNARIO	Qls	Llenos sanitarios	Intercalaciones de basuras y desechos orgánicos con niveles arenosos y arcillosos compactados.
	Qlim	Llenos Antropogénicos	Materiales de cortes de talud y escombros que han sido arrojados sobre laderas naturales y depresiones, cuyo resultado final son zonas planas para construcciones civiles.
	Qda	Deslizamiento activo	Zona del deslizamiento principal donde se observa reptación, grietas, hundimientos del terreno, agrietamientos de paredes y pisos de algunas viviendas.
	Qdi	Deslizamiento	Depósitos sueltos y permeables, compuestos por cantos subangulares a subredondeados, de rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas en matriz grano soportada.
	Ql	Depósitos de ladera	Depósitos de color amarillo claro y rojizo, con cantos y bloques de conglomerados y areniscas cuarzo-feldespáticas, subangulares, en matriz areno-arcillosa
	Qal	Aluvial reciente	Cantos de areniscas silíceas, conglomerados, cuarcitas y lodolitas, granito, granodiorita, diorita, gabro, neis y esquisto, en matriz areno lodosa.
	Qal1	Terrazas Bajas	Depósitos de cantos subredondeados a redondeados de areniscas cuarzosas y resistentes, guijos ígneo-metamórficos, areniscas violáceas y fragmentos de cuarzo lechoso, en matriz areno - arcillosa. Se
	Qal2	Terrazas medias	Depósitos de fragmentos angulares a subangulares de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, clasto soportados, en matriz de arena cuarzo feldespática
	Qfe	Flujos de Escombros	Depósitos constituidos por fragmentos de rocas ígneas y metamórficas, tamaño grava y bloque, principalmente neises y granodiorita, esporádicamente anfíbolitas y esquistos, en matriz
BUCARAMANGA	Qbr	Miembro limos rojos	Arenas arcillosas gravosas y limos de colores rojizos, amarillentos y naranjas. Existen esporádicos bloques angulares grandes, de arenisca, asociados superficialmente a este miembro.
	Qbg	Miembro gravoso	Depósito fluvio-torrencial con niveles gravosos, gravoarenosos y gravolodosos. Cantos subredondeados a subangulares de areniscas y rocas ígneas, en matriz areno-arcillo-limosa, color pardo rojizo, rojizo y ocre pálido.
	Qbf	Miembro finos	Depósitos con niveles arcillo-limosos plásticos de colores grises a verdes hacia la base. Hacia el techo predominan niveles areno - limosos y limoarenosos arcósicos de colores amarillento a pardo amarillento.
	Qbo	Miembro órganos	Depósito fluvio-torrencial compuesto por una serie monótona de fragmentos gruesos polimícticos, de aspecto conglomerático, en alternancia con capas y lentes limo arenosos, con variaciones laterales y verticales en composición y textura
MESOZOICO	Kita	Formación tambor	Capas de areniscas cuarzosas claras intercaladas con areniscas micáceas y conglomerados, de color amarillo. Hacia la base se alternan shales de color amarillo rojizo
	Jg	Formación Girón	Arenisca de grano grueso, con intercalaciones de arenisca conglomerática, gris clara, limolita y arcillolita roja, en estratos hasta de 1 m de espesor y areniscas rojizas, de grano medio a grueso
	Jj	Formación Jordan	Secuencia de areniscas violetas claras, de grano fino a medio, con intercalaciones de lodolitas y limolitas violetas oscuras a marrón
	Trb	Formación bocas	Limolita calcáreas de grano fino, de color gris verdoso y pardo rojizo; limolita gris verdosa, calcáreas, en capas delgadas con nódulos calcáreos grises; conglomerados con cantos redondeados; calizas grises cuarzo - arenosas calcáreas
	TRPt	Formación tiburón	Conglomerados muy compactos, conformados por guijos de caliza, dolomita, arenisca y chert negro; se intercalan niveles de caliza gris, masiva, limolita calcárea, gris y rojiza, niveles de arenisca de grano fino, con cemento calcáreo, de color gris rojizo
	Jrci	Cuarzomonzonita de la corcova	Cuarzomonzonita de color gris, de grano fino a medio, equigranular, de textura sacaróide, con biotita uniformemente diseminada.
	Jrcg	Cuarzomonzonita - granito	Cuarzomonzonita de grano grueso, biotítica, inequigranular, rosada, naranja y gris, con textura hipidiomórfica y Granito rosado pálido
Trt	Tonalita	Dioritas y tonalitas, bastante alteradas y cizalladas por fallamiento, equigranulares, de grano medio y color verde grisáceo; es común encontrar inclusiones de diorita de grano fino	
PALEOZOICO	Pcd	Formación diamante	Miembro Inferior: Arenisca lodosa de grano muy fino a muy grueso, de variados colores, intercalada con lodolita y arcillolita morada, pardo rojiza y verde. Miembro Medio: Lodolita, arenisca de grano muy fino, verde, parda y gris con intercalaciones de rocas carbonatadas de color gris y pardo. Miembro Superior: Caliza dura, masiva, cristalina de grano fino a medio, ligeramente arcillosa, fosilífera
	Df	Formación floresta	Rocas de grano fino, principalmente argilitas, pizarras y filitas
	Pds	Formación silgará	Esquisto cuarzo clorítico, de color gris verdoso, filita, anfíbolita verde y gris, con foliación delgada a media, intercalados con niveles de mármol
CUATERNARIO	Pcb	Neis de Bucaramanga	Neis gris verdoso con alternancia de bandas anfíbolicas y cuarzo-feldespáticas; neis hornbléndico, esquisto y ortoneis; incluye pequeñas cantidades de mármol y zonas de migmatitas y rocas cataclásticas cerca a los planos de las fallas principales.

Fuente: Ingeominas, CDMB, 2001.

**Figura 33.** Mapa de zonificación geotécnica, donde se resaltan las principales fallas.



Fuente: Ingeominas, CDMB, 2001, y modificado por autores.

## 6. RESULTADOS

En este capítulo se recopilan la información obtenida en el levantamiento estratigráfico del área de estudio. Además, se muestran los resultados obtenidos y la interpretación de los ensayos de laboratorio correspondientes al análisis granulométrico por tamizado y por hidrometría, límites de atterberg, descripción de muestras de mano, análisis de Difracción de Rayos X, Fluorescencia de Rayos X, Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier, realizados sobre la materia prima; así como también los ensayos de compresión simple, flexión y absorción para cada una de las diferentes mezclas elaboradas.

### 6.1. ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

#### Estudio de Campo.

Se realizó el levantamiento de la información estratigráfica de la zona correspondiente a los depósitos denominados flujos de escombros donde se recorrió un área de 0.33 Km<sup>2</sup> mediante estaciones (figura 34) y se recolectaron los siguientes resultados:

**Figura 34.** Estaciones en la etapa de cartografía y límites estratigráficos en superficie.



Fuente: Google earth.

### 6.1.1. Estación 1.

Coordenadas:

X= 1'108.050

Y= 1'272.656

Z= 864 m.

Este afloramiento se encuentra ubicado a 200 metros del cruce de la calle 200 y la vía de acceso a la urbanización Gonzales Chaparro, sobre dicha vía, en el municipio de Floridablanca.

En esta sección no se observan estructuras definidas, se presentan depósitos polimícticos consolidados matrizsoportados ó granosoportados por sectores, de fragmentos gruesos, compuestos por cantos y bloques de mala calibración que abarcan tamaños desde 2 a 14 cm, de esfericidad media a baja . Los cantos se encuentran embebidos en una matriz arenolimosa de color pardo amarillenta que no presenta ninguna estructura. El afloramiento presenta un espesor entre 3 y 4 m aproximadamente a partir de la superficie del suelo. Los cantos presentes corresponden en su mayoría a areniscas de cuarzo de grano medio, algunas son friables y otras bien cementadas; fragmentos de rocas ígneas de textura fanerítica, compuestas en su mayoría por cuarzo y moscovita, en un grado de alteración moderado a alto, donde se registra la presencia de caolinita; esquistos micáceos con alto grado de oxidación color ocre; neis micáceo de color amarillo a rosado y cantos de cuarzo lechoso. En esta zona se puede inferir un límite entre el depósito de flujos de escombros y los depósitos aluviales y de llanuras de inundación, debido al cambio en el grado de la pendiente que disminuye notablemente y pasa a ser más suave hasta llegar al de una planicie aluvial (Figura 35).

**Figura 35.** Fotomosaico estación 1. (a) Vista oriental del afloramiento. (b) Límite entre el depósito de flujos de escombros y los depósitos aluviales y de llanuras de inundación. (c) 1, 2. Clastos que corresponden a areniscas siliciclasticas de tamaño 14 cm. (d). 1, 2, Cantos y gravas con disposición clastosoportada 3, 4. Gravas y cantos matrizsoportadas en una matriz arenolimososa. (e, f, g). Depósitos polimícticos consolidados de gravas y bloques de areniscas de grano medio y conglomeráticas, fragmentos de rocas ígneas, esquistos micáceos, neis micáceo y cantos de cuarzo lechoso, embebidos en una matriz arenolimososa de color pardo amarillenta.



### 6.1.2. Estación 2.

Coordenadas:

X= 1'272.579

Y= 1'108.082

Z= 866 m.

Esta estación se localiza desde los 240 metros sobre la vía, desde el cruce de la calle 200 y la vía de acceso a la urbanización Gonzales Chaparro, en el municipio de Floridablanca, hasta los 350 metros aproximadamente sobre la misma vía, donde se intercepta con el cauce actual de la quebrada Aranzoque.

Esta estación corresponde a los Depósitos Aluviales de Cauce y Llanura de Inundación de la quebrada Aranzoque ó La Estancia. En el sector se observa cambios en la pendiente, que es muy baja en esta sección, además de variación en la vegetación que deja de ser abundante (estación 1) a consistir en arbustos, pastos y arboles de menor tamaño. Los depósitos están compuestos por fragmentos de composición y granulometría muy variable y poco compactados. Se encuentran cantos de areniscas de cuarzo y conglomerados, lodolitas, fragmentos de rocas ígneas de textura fanerítica, neis y esquisto, en una matriz arenolodosa que presenta laminación plana en algunos sectores. El tamaño de los cantos varía desde gravas hasta un metro en el margen actual de la quebrada, y poseen forma subredondeada y baja esfericidad. (Figura 36).

**Figura 36.** Fotomosaico Estación 2. (a) Llanura aluvial de la quebrada Aranzoque o La Estancia. (b) y (c) depósitos Aluviales de Cauce actual, donde se observan los cantos rodados de mayor tamaño.



### 6.1.3. Estación 3.

Coordenadas:

X= 1'272.691

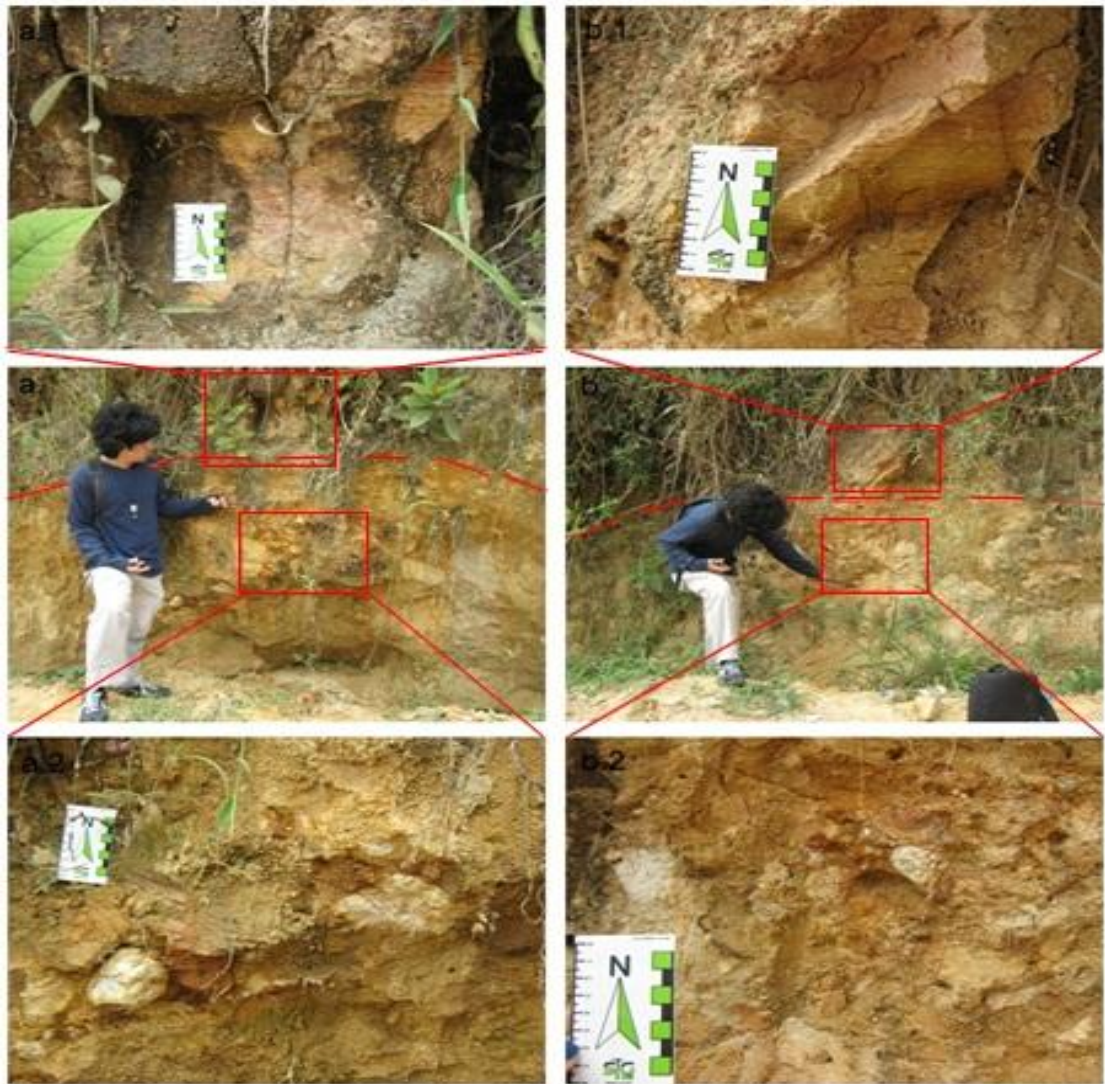
Y= 1'107.975

Z= 896 m.

Esta estación se localiza en el cruce de la calle 200 y la vía de acceso a la urbanización Gonzales Chaparro, junto al proyecto residencial Altos de Aranjuez, en el municipio de Floridablanca, y corresponde al sector topográfico más alto del área de estudio.

En esta se observa un depósito polimictico matrizsoportado, con una distribución granodecreciente. Hacia la base se encuentran cantos y gravas de areniscas de cuarzo subredondeadas, cuarzo lechoso, material ígneo fanerítico y esquistos. El grado de alteración es alto, siendo fácilmente disgregables a excepción de los cantos de areniscas. Todos estos se encuentran en una matriz arenolimososa, de coloración amarillo rojiza y ocre. La relación de los cantos disminuye hacia el tope. En la parte superior de esta sección, se puede diferenciar una superficie de erosión y estratificación, donde se presentan pequeñas capas con laminaciones horizontales de color parda rojiza, compuestas por areniscas de tamaño media a gruesa, de forma subangular compuestas por cuarzo, feldespato, plagioclasa, muscovita y fragmentos de rocas. No se observan cantos de material ígneo o metamórfico (Figura 37).

**Figura 37.** Fotomosaico Estación 3 Vista de la sección superior de los flujos de escombros, donde se observa la secuencia granodecreciente y hacia el tope las estructuras con laminación. (a.1, b.1) Depósitos de areniscas con laminación plana paralela. (a.2, b.2). Cantos de areniscas de cuarzo, cuarzo, esquistos y material ígneo.



#### **6.1.4. Estación 4.**

Coordenadas:

X= 1'272.638

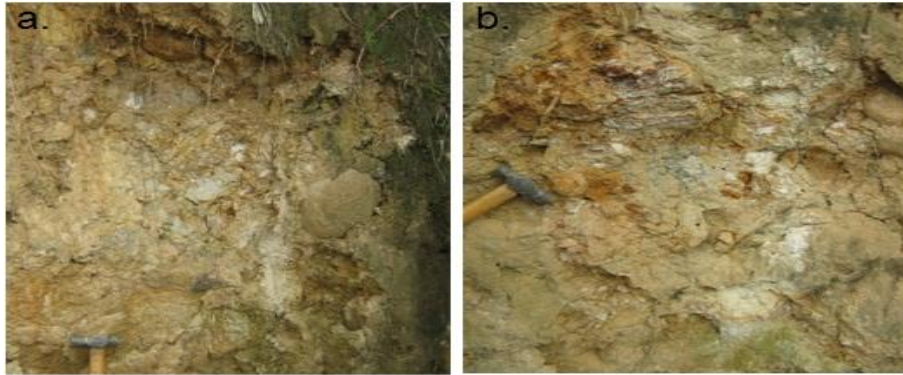
Y= 1'107.690

Z= 882 m.

Esta estación se encuentra ubicada sobre el escarpe paralelo a la calle 200, bajando 8 metros por el camino peatonal en la escalera que conduce del lote de la urbanización prados de Laurentía hacia la urbanización Gonzales Chaparro.

Esta estación se encuentra inmediatamente debajo del segmento de extracción del material utilizado para la elaboración de los adobes, y corresponde a depósitos de cantos matrizsoportados. Los cantos están compuestos por areniscas bien cementadas, fragmentos de rocas ígneas de textura fanerítica y esquistos y neises. Algunos se encuentran fuertemente alterados, disgregándose fácilmente en las manos. La matriz intersticial está constituida en su mayoría por arena media a gruesa (alrededor de un 70-80%) y por material fino en menor proporción. Esta matriz se compone principalmente cuarzo, feldespatos, fragmentos de roca, moscovita en laminillas y minerales arcillosos; los depósitos presentan coloración pardo-amarillenta a rojiza dependiendo del grado de oxidación (Figura 38).

**Figura 38.** Fotomosaico Estación 4. Depósitos matrizsoportados. (a). Cantos de areniscas bien cementadas, (b). Fragmentos de rocas ígneas tipo granítico y esquistos (centro – arriba) con un grado de alteración moderado a alto.



#### **6.1.5. Estación 5.**

X= 1'272.703

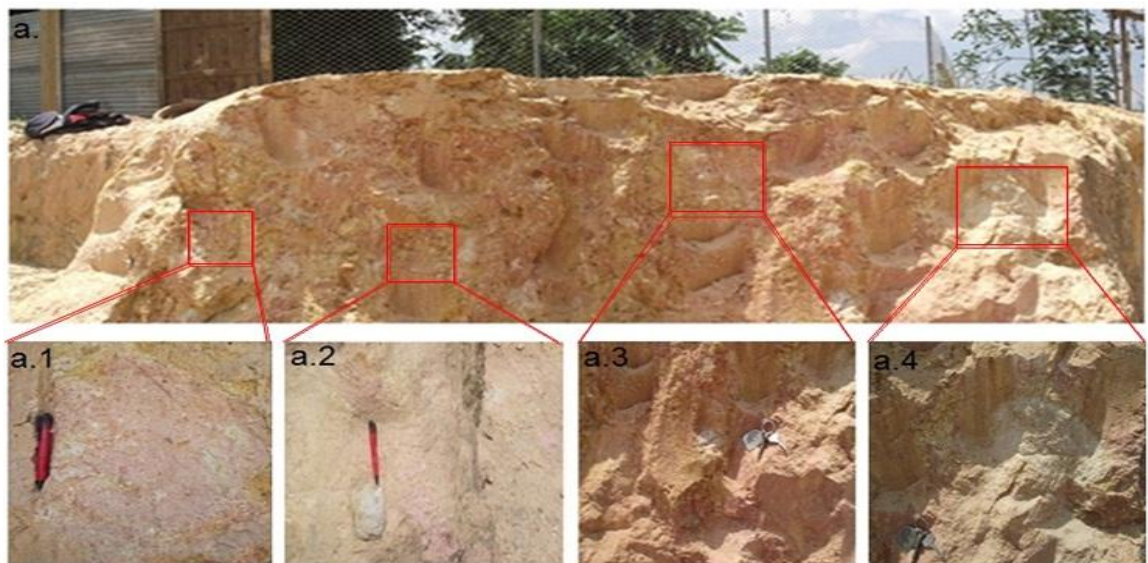
Y= 1'107690

Z= 893.

Esta estación se encuentra justamente frente a Corveica y la sede recreacional de Cotrasur, sobre la calle 200 paralela al anillo vial en Floridablanca. En esta sección se ubica la zona de extracción del material con el que se elaboraron los bloques de adobe y coincide con el área del proyecto Prados de Laurentía. Está conformada por depósitos consolidados de cantos y gravas matrizsoportadas. Los cantos son principalmente rocas ígneas de graníticas con cuarzo, plagioclasa y feldespatos fuertemente alterados a minerales arcillosos; neises, esquistos y areniscas de cuarzo bien cementadas. Algunos de estos cantos presentan un alto grado de alteración presentándose minerales arcillosos y disgregándose fácilmente (esquistos y rocas graníticas), con lo cual se genera material fino que pasa a formar parte de la matriz. Se observa una disminución del material tamaño grava en relación a la matriz, que es arenolodosa. Esta matriz es la que fue

utilizada para elaborar las mezclas de los adobes, y a la cual se le realizaron los ensayos de caracterización (figura 39).

**Figura 39.** Fotomosaico Estación 5 (a). Zona de extracción del material utilizado en la elaboración de los adobes. Se observa mayor predominancia de la matriz arenolosa. (a.1, 3, 4). Cantos de material ígneo de tipo granítico 2) canto de arenisca de cuarzo subredondeado resistente a la meteorización.



#### 6.1.6. Estación 6.

X= 1'272.375

Y= 1'107.444

Z= 845 m.

Esta estación se encuentra a 400 metros sobre la carrera 13 desde el cruce de ésta con la calle 200, hasta llegar al cauce actual de la quebrada Aranzoque ó la Estancia.

Estos depósitos se encuentran ubicados en los márgenes de la quebrada Aranzoque o La Estancia, y están conformados por depósitos polimicticos

consolidados de cantos granosoportados de mala selección de entre 1 y 50 cm de longitud, compuestos por fragmentos de rocas ígneas graníticas con por cuarzo, feldespato, mica y plagioclasa (algunas presentan gran tamaño de los cristales, siendo consideradas como pegmatitas); neises cuarzofeldespáticos, y areniscas de grano grueso. Algunos de estos clastos se encuentran en estado de meteorización avanzado. Sobre el cauce de la quebrada, se encuentran bloques mayores a 1 metro. La matriz intersticial arenosa está compuesta principalmente por cuarzo y feldespato (70% arena y 30% finos aproximadamente), con algo de moscovita. (Figura 40).

**Figura 40.** Fotomosaico estacion 6. (a, b, c). Mala selección de los cantos, los tamaños varían entre 1- 50 cm. El cuarzo y el feldespato conforman la mayoría de la matriz arenosa. (a). Se observa un predominio de areniscas de gran tamaño, (b). Predominio de rocas ígneas de tipo graníticas, neises cuarzofeldespáticos, y (c). Pegmatitas con tamaño de grano de hasta 2 cm.



#### 6.1.7. Estación 7.

X= 1'272.640

Y= 1'107.459

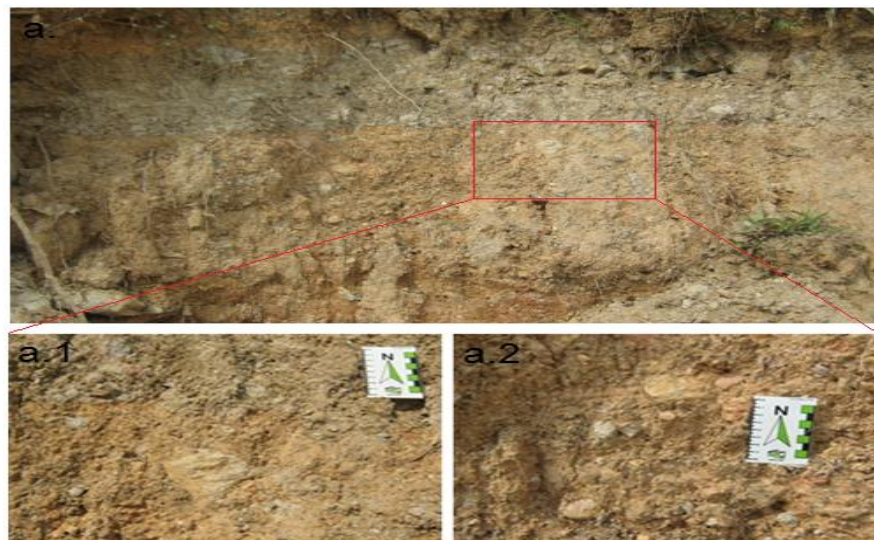
Z= 852 m.

Esta estación se encuentra a 125 metros sobre la carrera 13 desde el cruce de ésta con la calle 200, paralela al anillo vial en el municipio de Floridablanca. Se observa un deposito polimictico matrizsoportado, compuesto por cantos y gravas

de areniscas de cuarzo, rocas ígneas graníticas, que oscilan entre 1 y 10 cm, algunos de forma subredondeada y otros con forma subangular, de mala selección. La matriz está compuesta por arenas de grano medio, cuarzo, feldespatos, fragmentos de rocas y una menor proporción de material arcilloso. (Figura 41).

Por la diferencia en la distribución y tamaño de los componentes de los depósitos, en esta zona se identifica el contacto entre los eventos aluviales de la quebrada Aranzoque y los Flujos de escombros del Macizo de Santander.

**Figura 41.** Fotomosaico Estación 7 (a.1, a.2). Matriz compuesta por arenas de grano medio, cuarzo, feldespatos y fragmentos de rocas. Los tamaños de los clastos varían entre 1- 10 cm.



## 6.2. DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS

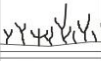




Se realizó la descripción macroscópica en muestras de mano, recolectadas de manera representativa en los niveles descritos y levantados en la columna estratigráfica, en un estereomicroscopio binocular. La figura 42 muestra el registro fotográfico realizado para las muestras, y una descripción general de las mismas.

**Figura 42.** Registro fotográfico de muestras de mano. (a). (a). Arenisca conglomerática matrizsoportada de grano medio a grueso, mal calibrada, friable, compuesta de cuarzo, feldespato, plagioclasa y fragmentos de rocas. Los cantos presente poseen tamaños de 1 mm a 1 cm. Esta muestra fue tomada en la estación 1 (b) Roca ígnea granítica, de grano grueso compuesta por cuarzo, feldespato, plagioclasa, moscovita. Esta muestra fue tomada en la estación 6 (c y d). Roca ígnea granítica, de grano grueso compuesta por cuarzo, feldespato, plagioclasa, moscovita y minerales máficos como anfíboles. Los cantos tienen forma angular – subangular. Esta muestra fue tomada en la estación 1 (e). esquisto micáceo alterado por oxidación, de color pardo oscuro – pardoamarillento, tomado en la estación 1. (f). Arenisca granosoportada de grano medio a grueso, y matriz arenolodosa, de mala selección, de color pardoamarillento-rojiza, con laminación plana paralela. Tomada en la estación 3. (g). Canto de cuarzo lechoso subangular – subredondeado, tomado en la estación 3. (h). Canto subredondeado de pegmatita, que presenta cristales entre 1 y 2 cm de moscovita, feldespato potásico y cuarzo. Tomada en la estación 6. (a, b, c, d, e, f, g). Corresponde a depósitos flujos de escombros. (b, h). Corresponde a depósitos aluviales.



Con base en estos resultados obtenidos, se elaboró una columna estratigráfica correspondiente al depósito de flujo de escombros del macizo de Santander en el sector, la cual se muestra en la figura 43.

**Figura 43. Columna estratigráfica**

UNIDAD	ESPESOR (m)	LITOLOGIA				DESCRIPCION	FOTOGRAFIA	ESTACION
		ARCILLAS	LIMOS	ARENAS	GRAVAS CANTOS			
FLUJOS DE ESCOMBROS DEL MACIZO DE SANTANDER (Gste)	1,5					Depósitos de gravas y cantos matrizsoportados en matriz arenolimsa, de coloración amarillo rojiza y ocre (hacia la base), separados por una superficie erosiva de depósitos de areniscas media a gruesa subangulares de cuarzo, feldespatos, plagioclasa, muscovita y fragmentos de rocas.		3
					Depósitos matrizsoportados de gravas, y cantos en matriz arenolimsa de color pardo amarillento. La relación de los clastos con respecto a la matriz disminuye, siendo esta última predominante. De este nivel se extrae el geomaterial para construcción.		5	
	20				Depósitos consolidados constituidos por gravas de rocas ígneas y metamórficas (néfes, granodiotitas, esquistos) en una matriz intersticial predominante constituida por arena media a gruesa y en menor proporción por limo y arcilla.; los depósitos presentan coloración rojiza y ocre, dependiendo del grado de oxidación.		4	
					Depósitos palmiticos consolidados de gravas, cantos y bloques matrizsoportados y grancosportados (sectores), en matriz arenolimsa de color pardo amarillento que no presenta ninguna estructura.		1 - 7	

**Fuente: Los autores.**

### 6.3. VISITA AL ÁREA DE EXTRACCIÓN DEL ESTABILIZANTE

Como aditivo estabilizante se encuentra el residuo obtenido en la explotación de yeso en las minas ubicadas en zonas aledañas al municipio de los Santos, 62 km al sur de Bucaramanga en el departamento de Santander. La zona del cañón del Chicamocha tiene los mejores yacimientos de yeso, un alto porcentaje de la producción de estas minas es destinado a la industria cementera, dependiendo de su porcentaje de  $\text{SO}_3$ . Estos afloramientos de yeso están asociados con la formación Rosablanca, la cual aflora en la parte occidental del municipio de Los Santos y es concordante con las formaciones Los Santos (infrayacente) y Paja (suprayacente). La Formación Rosablanca está compuesta en su parte inferior por capas de caliza y yeso; hacia la parte superior consta de areniscas y lodolitas calcáreas. El yeso estratificado es asociado a rocas calcáreas en la base de la formación Rosablanca, con un espesor promedio de 12 metros, aproximadamente 20 metros encima del contacto con la Formación Los Santos (en el municipio de Los Santos). Allí se observan una serie de bancos masivos lenticulares de yeso gris, de espesores variables (de 16 cm a 2,10 m) con intercalaciones menores de lutitas grises, calcáreas. El residuo está constituido por lutitas calcareas grises y oscuras, algunas de las cuales presentan diferentes estructuras entre físilas, laminadas y masivas. Una vez seleccionado el residuo, se dispone en centros de acopio donde es acumulado esperando algún uso potencial. El 21% del material que se extrae en la mina es estéril, y debido a la alta demanda que estas minas tienen se producen altas concentraciones de residuos, más de 2500 toneladas en el año 2010, para un solo centro de acopio (Administradores contratistas de centros de acopio) que generan problemas de disposición y que algunas veces es vendido como material para relleno en la elaboración de obras civiles como caminos y algunas carreteras (Figura 44).

**Figura 44** . Disposición del residuo minero de la Mesa de los Santos. Centro de acopio.



## **6.4 DESCRIPCION Y ENSAYOS INSTRUMENTALES DE MATERIALES**

### **6.4.1. Difracción de rayos x (drx)**

Los análisis por DRX se realizaron para tres muestras representativas, la arcilla de la tierra como materia prima, el residuo minero y material pulverizado fino del centro de uno de los bloques de la mezcla 3, que fue la que presentó un mejor comportamiento, con el fin de intentar determinar la formación de alguna nueva forma cristalina. Estos análisis fueron desarrollados en los laboratorios de difracción de RX de escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander. Se realizaron en un difractómetro de polvo marca SIEMENS, modelo D500, bajo las siguientes condiciones:

Voltaje 40(kV), Corriente 30(mA), Rendija de Divergencia 0.15mm, Rendijas Soller Primario 2°; Muestreo 0.02° 2theta, Rango de Medición 2-70° 2theta, Radiación CuK 1, Monocromador Grafito, Detector Centelleo, Tipo de barrido Continuo, Tiempo de muestreo 1 segundo.

Las muestras presentan las siguientes nomenclaturas: Arcilla de materia prima: Arcilla (tabla 17), Residuo Minero: EM2 (tabla 18), Bloque de mezcla 3: EM3 (tabla 19).

**Tabla 17.** Análisis por DRX de la muestra arcillosa.

**1. ARCILLA**

FASE		No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
Cristalinos	Si O <sub>2</sub>	010-85-0865	Cuarzo
	K ( Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-87-1787	Microclina
	K Al <sub>2</sub> ( Si, Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>2</sub>	000-58-2034	Moscovita
	Ti O <sub>2</sub>	010-75-2550	Anatasa
	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ( OH ) <sub>4</sub>	000-58-2004	Caolinita

**Tabla 18.** Análisis por DRX del Residuo minero

**2. EM2 (C3PC)**

FASE		No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
Cristalinos	Si O <sub>2</sub>	010-78-1254	Cuarzo
	( Mg, Fe, Al ) <sub>5</sub> ( Si, Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>3</sub>	000-16-0362	Clinocloro
	Ca SO <sub>4</sub> · 2 H <sub>2</sub> O	000-06-0046	Yeso
	Ca Mg ( CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	000-36-0426	Dolomita
	(Mg <sub>0.64</sub> Ca <sub>0.36</sub> ) ( CO <sub>3</sub> )	010-86-2335	Calcita Magnesiana
	Ca CO <sub>3</sub>	000-01-0837	Calcita

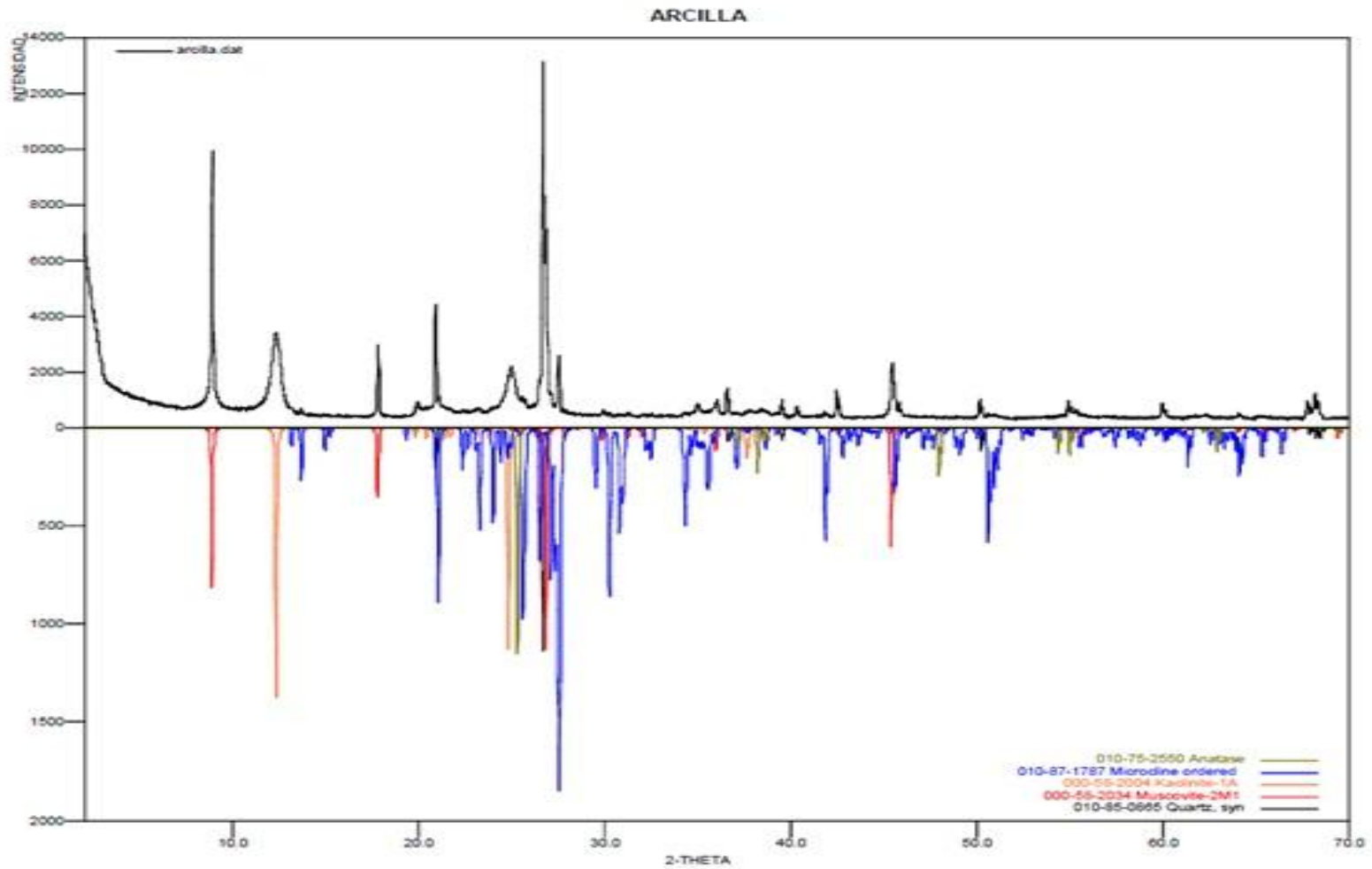
**Tabla 19.** Análisis por DRX del Bloque de la mezcla 3.

**3. EM3 (C3PD)**

FASE		No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
Cristalinos	Si O <sub>2</sub>	010-71-0261	Tridimita
	K Al <sub>2</sub> ( Si, Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>2</sub>	000-58-2034	Moscovita
	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ( OH ) <sub>4</sub>	010-72-2300	Caolinita
	Fe <sub>0.925</sub> O	010-89-0686	Wuestita
	Ti O <sub>2</sub>	010-71-1169	Anatasa
	(Mg <sub>0.64</sub> Ca <sub>0.36</sub> ) ( CO <sub>3</sub> )	010-86-2335	Calcita Magnesiana
	K Al <sub>2</sub> ( Si, Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>2</sub>	000-58-2004	Caolinita
	Si O <sub>2</sub>	010-74-3485	Cuarzo

El difractograma de rayos-X es la huella digital de cada mineral, en ésta se deben verificar tanto la posición de los picos o ángulo 2θ (eje de abscisas) de cada reflexión, así como su intensidad (eje de las coordenadas). Por esto, es una técnica muy poderosa para la identificación de compuestos e incluso de mezclas. Los difractogramas correspondientes al análisis se presentan en las figuras 45- 47.

Figura 45. Difractograma de la muestra de arcilla de la tierra usada como materia prima.



**Figura 46.** Difractograma de la muestra de residuo minero EM2 que será usado como estabilizante.

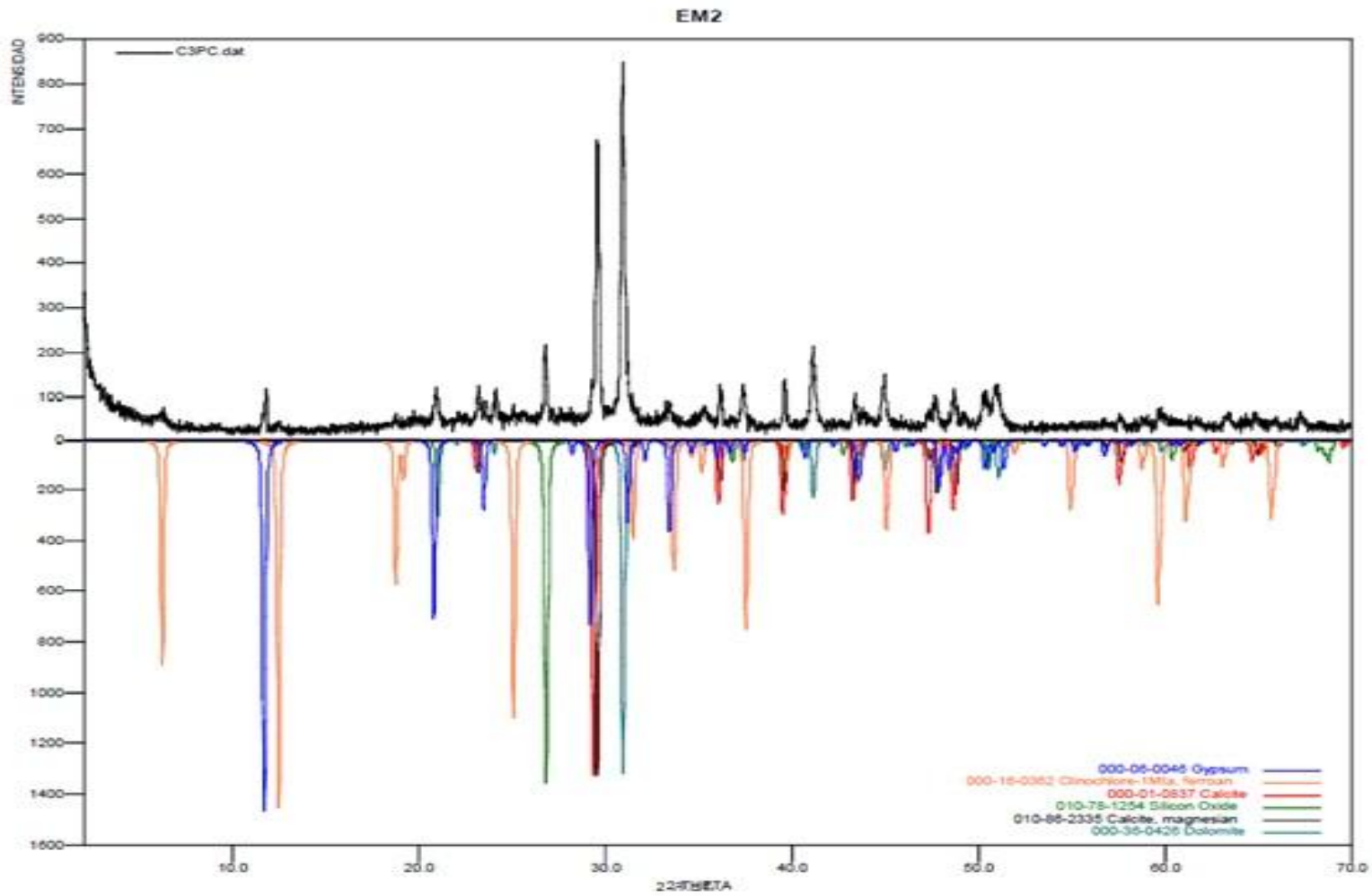
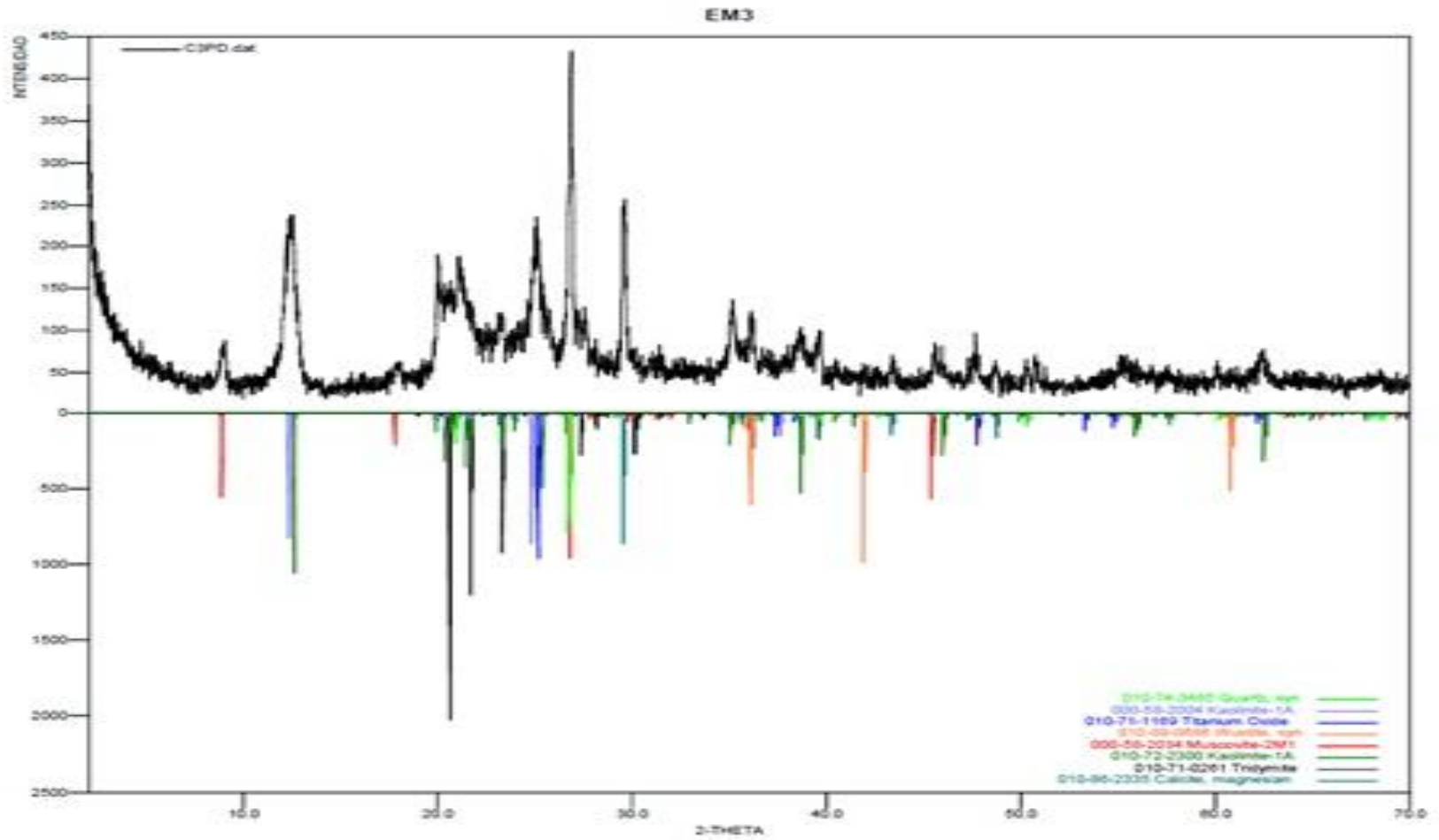


Figura 47. Difractograma para un bloque de la mezcla M3



A partir del análisis se obtuvieron los resultados cualitativos siguientes:

En la muestra de arcilla (tabla 17, difractograma 45), se identificaron 5 minerales conformados por: Cuarzo, el cual es el mineral más abundante y cristalino en la naturaleza y es el único que se encuentra presente en las tres muestras analizadas. En el difractograma, la fase cristalina del cuarzo se identifica con el color negro, obteniendo intensidades desde 200 cps (ciclos por segundo) y 1200 cps para ángulos de  $35^\circ$ ,  $50^\circ$  y  $68^\circ$ . En el grupo de los feldespatos potásicos se encontró Microclina, que es muy abundante y suele estar asociado a minerales como el cuarzo y la moscovita, como en este caso. En el difractograma se identifica por el color azul, alcanzando intensidades de reflexión de más de 1500 cps, los picos se presentan en varios ángulos que van desde  $10^\circ$  a  $70^\circ$ . La Moscovita, químicamente es un aluminosilicato de potasio y aluminio, está asociada a minerales como el cuarzo y el feldespato, tal como se presenta en el análisis. En el difractograma aparece con el color rojo y se refleja en intensidades de hasta 1250 cps y en ángulos de  $10^\circ$ ,  $18^\circ$ ,  $28^\circ$  y  $46^\circ$ . La presencia de la fase cristalina de la Anatasa, que es una de las cinco formas minerales del Oxido de Titanio, no fue evidenciada en el análisis por espectroscopia de infrarrojo, ni en el análisis elemental por fluorescencia de rayos x, por lo tanto no es posible confirmar su registro en este análisis. En el difractograma aparece identificada con el color verde. Finalmente se encontró la Caolinita, silicato de aluminio hidratado resultado de la alteración del feldespato y otros silicatos de aluminio, este mineral arcilloso tiene una capacidad de intercambio catiónico baja, lo que podría disminuir la capacidad de generar materiales cementantes al reaccionar con agua. En el difractograma este mineral aparece con el color naranja y se observan variaciones en las intensidades de los picos hasta de 1500 cps, las más altas se encuentran en ángulos de  $12^\circ$  y  $25^\circ$ .

La muestra de residuo (tabla 18, difractograma 46) se caracteriza por la presencia de Cuarzo, en el difractograma para esta fase cristalina se observa una alta intensidad de los picos, alcanzando 1400 cps para un ángulo de  $27^\circ$ . Hace parte

también el Clinocloro, que es un aluminosilicato de magnesio, hierro y aluminio, perteneciente al grupo de los clorhidratos. En el difractograma este mineral identificado con el color naranja presenta variados niveles de intensidad llegando desde 200 cps a 1500 cps para diferentes ángulos que van desde 5° hasta 65°. La presencia de Yeso en el residuo no es conveniente en grandes proporciones ya que esta puede influir negativamente en el comportamiento del material estabilizado al reaccionar con el agua, favoreciendo la formación de minerales expansivos, que contribuyen a la formación de fisuras en las mezclas elaboradas, sin embargo en el análisis de fluorescencia se registra un bajo contenido de sulfatos (Yeso), el cual no es significativo. En el difractograma el yeso está identificado con el color azul, alcanzando picos de intensidad de hasta 1500 cps y ángulos desde 12° y 60°. Por último se presentan tres tipos de Carbonatos: Dolomita, que es un mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio que se produce por una sustitución de intercambio iónico del calcio por magnesio en la roca caliza. En el difractograma se identifica con el color azul claro y se observa un pico con una intensidad de 1400 cps para un ángulo de reflexión de 32°. La calcita que es el carbonato de calcio más estable, identificado con el color rojo en el difractograma posee un pico alto de intensidad de 1300 pcs, y se distribuye para ángulos entre 20° y 70°, y la Calcita magnesiana mostrada en el difractograma con color negro, la cual presenta un pico alto de intensidad de 1400° en un ángulo de 29°. Estos carbonatos pueden influir en las reacciones de hidratación de la cal incrementando la liberación de calor el cual, es el factor determinante para la solubilización de la sílice y la alúmina, activando sus capacidades cementantes.

En la muestra del bloque de la mezcla M3 (tabla 19, difractograma 47), resultado del conjunto de la arcilla, residuo minero y cal, el cual presentó los mejores resultados en los ensayos de comportamiento ante esfuerzos, minerales como el Cuarzo, Caolinita, Moscovita y Calcita, provenientes de la arcilla y el residuo minero, permanecen sin alterar en la mezcla, mientras que la Tridimita, polimorfo de SiO<sub>2</sub>, la Wuestita, óxido ferroso, y un tipo de caolinita que presenta en su

composición potasio , hacen parte de nuevos minerales formados, aunque para el caso de la condiciones para la formación de la Tridimita, se dan en altas temperaturas mayores a 870°C. por lo que no se pudo haber formado en las condiciones de este estudio por lo tanto se tomará como cuarzo. En el difractograma la Wuestita está identificada con el color naranja, alcanzando su pico de intensidad más alto en 1000 cps en un ángulo de reflexión de 28° y 32°, y la Caolinita con potasio en su composición, mostrada con el color verde oscuro, en la que para un ángulo de reflexión de 14° presenta un pico en 1100 cps.

#### 6.4.2. Fluorescencia de rayos x

Para el análisis elemental por fluorescencia de rayos x se uso un equipo consistió de un tubo de rayos X marca Rontgen-Technik con ánodo en tungsteno. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 20.

**Tabla 20.** Analisis elemental por fluorescencia de Rayos X

Analisis Elemental	
CaO	48.644 %
SiO2	27.311 %
MgO	9.163 %
SO3	6.133 %
Al2O3	4.805 %
Fe2O3	2.411 %
K2O	1.532 %
SrO	0.465 %
MnO	0.196 %
BaO	0.114 %
CuO	0.017 %

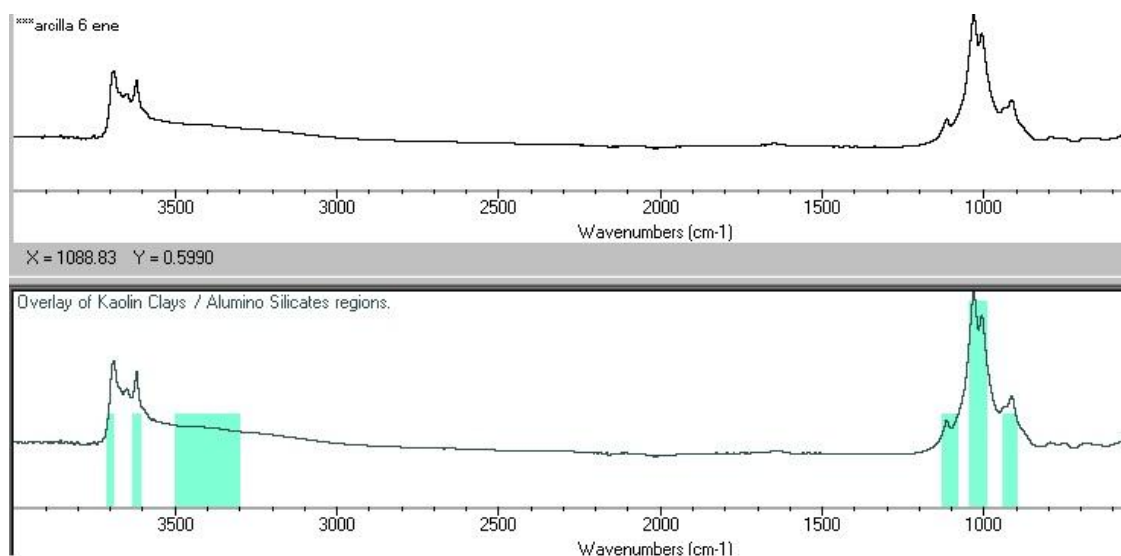
La muestra contiene un alto contenido de oxido de calcio de un 48.6%, y sílice en un 27.3%, seguida de concentraciones de oxido de magnesio, trióxido de azufre, alúmina y oxido de hierro en menor proporción. Las concentraciones de oxido de calcio, sílice y alúmina son fundamentales en las reacciones activantes, junto con las concentraciones contenidas en la arcilla y la cal.

### 6.4.3. Espectroscopia infrarroja por transformada de fourier (irtf).

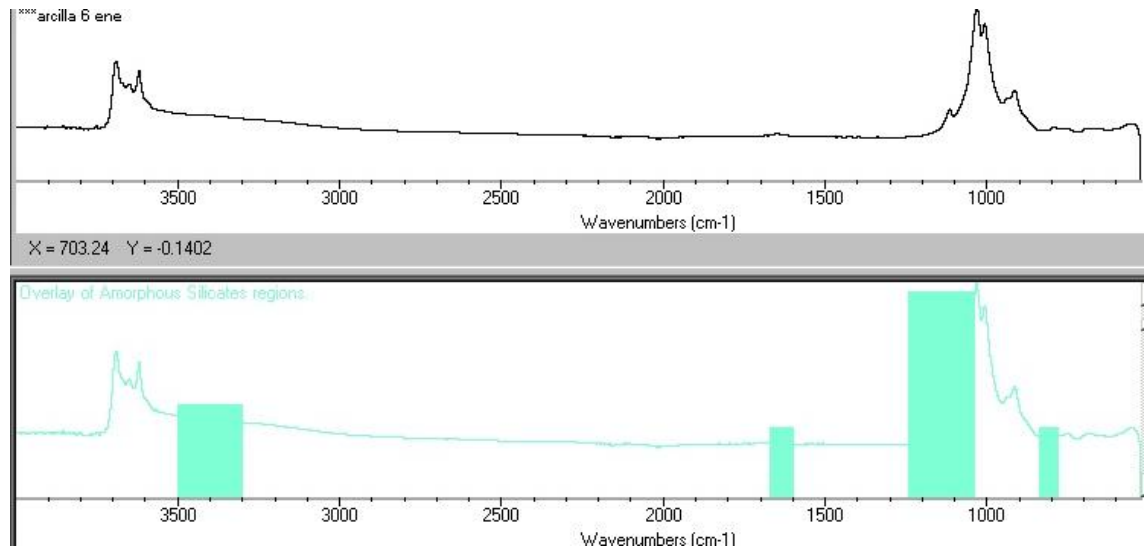
El equipo empleado fue un **NICOLET 6700**, con transformada de Fourier, marca **TERMO SCIENTIFIC**. Las muestras en estado sólido fueron colocadas directamente en el portamuestras para interacción con la luz infrarroja, en un rango de  $4000\text{ cm}^{-1} - 200\text{ cm}^{-1}$ . Los espectros obtenidos fueron los siguientes:

La muestra identificada como arcilla (figuras 48-51) presenta bandas características de compuestos inorgánicos tipo aluminosilicatos, como se muestra en los espectros, cada color representa la banda o sello espectral de cada mineral, al comparar estas bandas con los espectros se confirma que los picos de estos, concuerdan con las bandas establecidas para cada mineral, esto ratifica la información arrojada por la difracción de rayos x, la cual evidencia señales características de caolinita, moscovita y microclina. Por otra parte, no se evidenciaron bandas características de óxido de titanio (anatasa). Este último resultado no concuerda con los resultados suministrados por la difracción de rayos X.

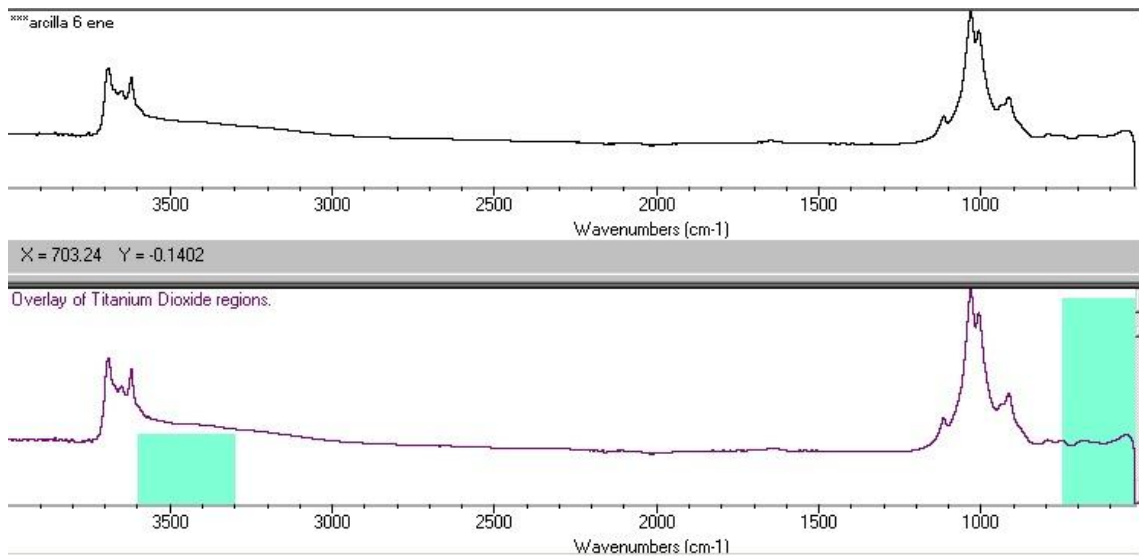
**Figura 48.** Análisis de IR-ATR para la arcilla.



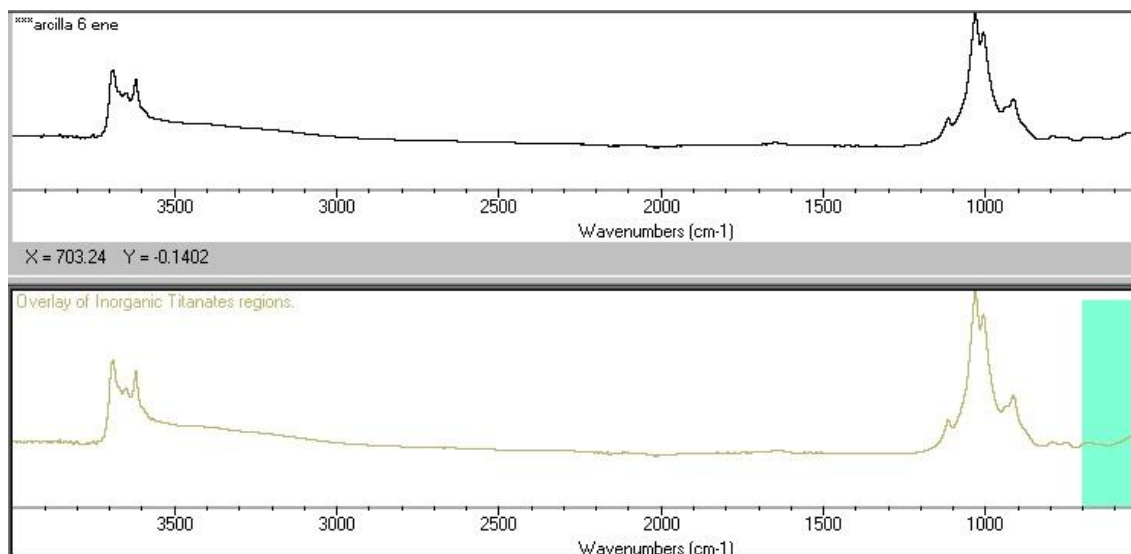
**Figura 49.** Análisis de IR-ATR para la arcilla.



**Figura 50.** Análisis de IR-ATR para la arcilla.

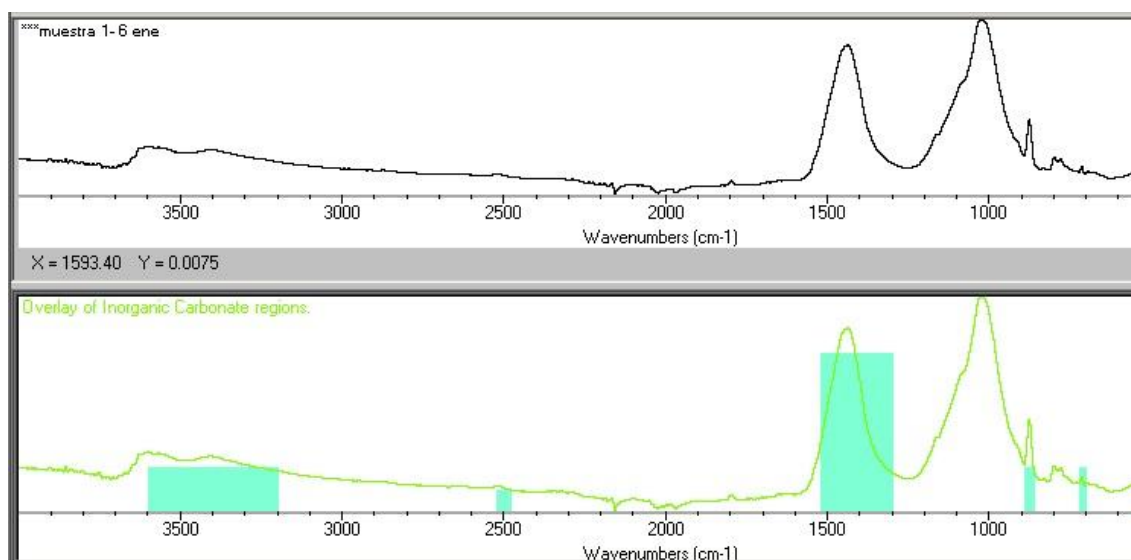


**Figura 51.** Análisis de IR-ATR para la arcilla.

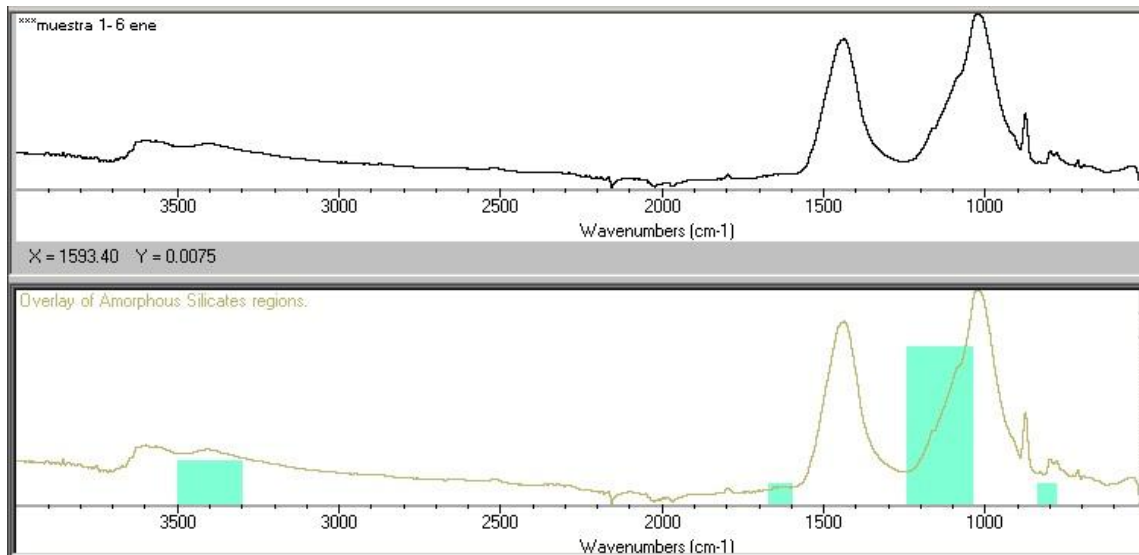


El análisis de IR-ATR para el residuo mineral (figuras 52-53) confirma la presencia de carbonato y silicatos amorfos, como se muestra en los espectros, cada color representa la banda o sello espectral de cada mineral, al comparar estas bandas con los espectros se confirma que los picos de estos, concuerdan con las bandas establecidas para cada mineral, ratificando los resultados arrojados por la Difracción de rayos X.

**Figura 52.** Análisis de IR-ATR para el residuo mineral.



**Figura 53.** Análisis de IR-ATR para el residuo minero



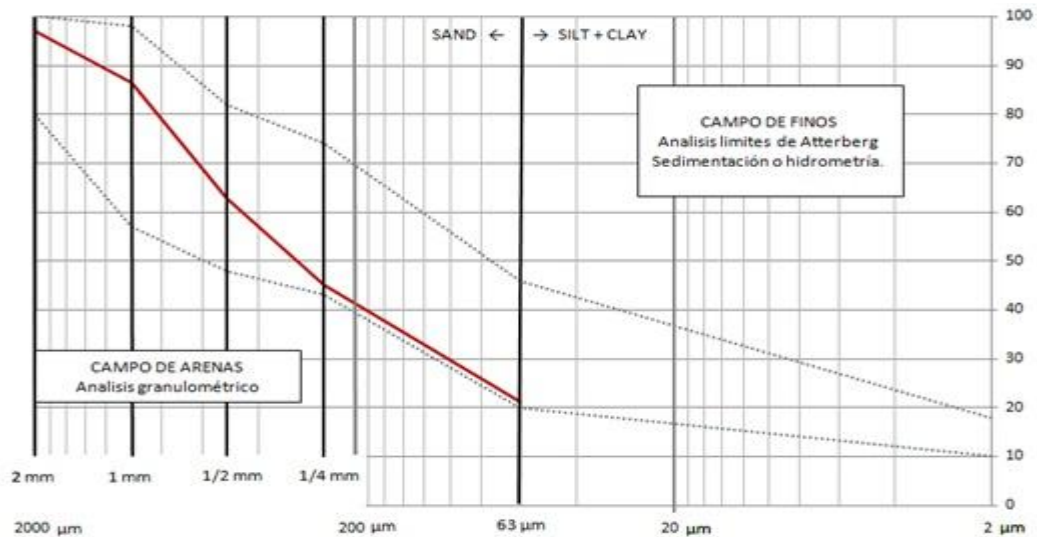
## 6.5. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Con los datos obtenidos (Tabla 21) se procedió a elaborar la grafica CRATerre (Fig. 54), con la cual podemos ver que el material se encuentra dentro de los límites recomendados para ser utilizado en la elaboración de adobes. El porcentaje de material fino corresponde a 21.1%, el cual será utilizado en la determinación de los porcentajes de limos y arcilla en la prueba de Hidrometría.

**Tabla 21.** Datos obtenidos a partir de los cálculos de granulometría.

	Peso individual	Peso con Muestra	Peso Retenido	Porcentaje Retenido	Porcentaje que pasa
Malla 2 mm	491,2	505,7	14,5	3	97
Malla 1 mm	423,6	475,1	51,5	10,6	86,4
Malla 1/2 mm	375	494,9	114,9	23,6	62,8
Malla 1/4 mm	447	532,7	85,7	17,6	45,2
Malla 1/16mm	440,5	313,4	117,1	24,1	21,1
Fondo	255,7	357,7	101,8		

**Figura 54** . Curva de granulometría de la muestra. Obsérvese que está dentro de los límites recomendados para la elaboración de adobes, determinados por: .finos entre un 20 – 45%, arenas entre un 55 – 75% y un mínimo de 10% de arcilla es necesario para la cohesión en los bloques (Plagiolico et al 2010).



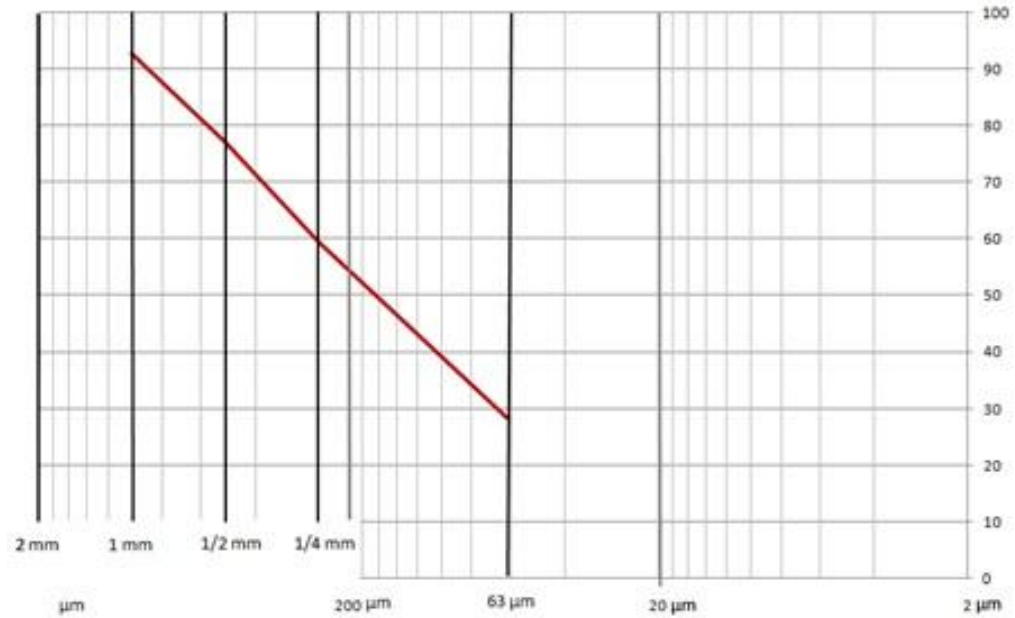
### 6.5.1. Análisis Granulométrico para el estabilizante

De los datos de la prueba de granulometría (tabla 22), podemos observar que el 77,25% del residuo es de un tamaño inferior 0,5 mm. Un 22.75% es superior a 0,5 mm. La Curva granulométrica del residuo minero triturado se observa en la figura 55. Dado que el tamaño de las partículas influye en la capacidad de intercambio catiónico, se realizaron las probetas con el material menos a 0,5 mm, por lo cual este fue tamizado antes de ser mezclado con la tierra.

**Tabla 22.** Curva granulométrica del residuo minero triturado

Malla	Tamaño (mm)	Tamaño (micras)	% que pasa
200	0,06	60	28
60	0,25	250	59,49
40	0,5	500	77,25
20	1	1000	92,74
10	2	2000	98,2

**Figura 55.** Curva granulométrica del residuo minero triturado



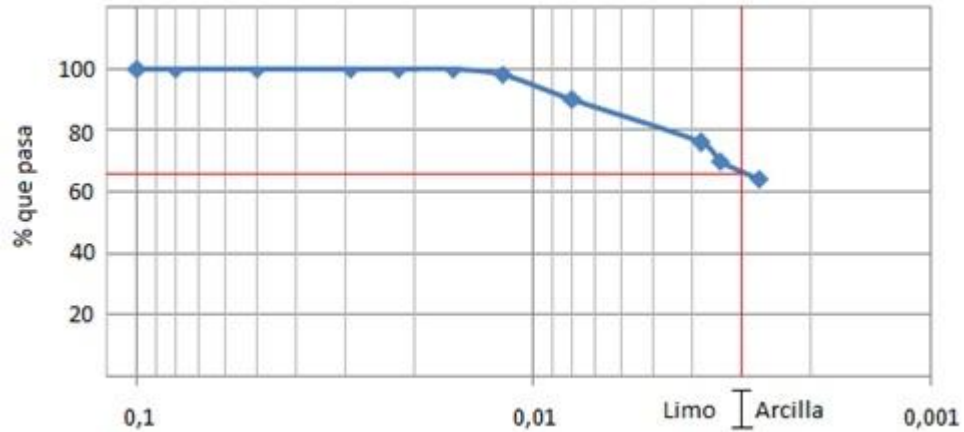
### 6 .6. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR HIDROMETRÍA

Con base en estos resultados obtenemos que el porcentaje de material fino correspondiente a la arcilla, con diámetros menores a 0,0027, es de 64%, este hace parte del 21% de material fino total, el cual se determinó en los cálculos de la granulometría, aplicando una regla de tres simple, donde el 21% corresponde al contenido total de finos (limos y arcillas), y de este, el 64% corresponde a material arcilloso. Así se concluye que nuestro material posee un 13,5% de contenido arcilloso y un 7,5% de limos (tabla 23 y figura 56).

Tabla 23. Análisis granulométrico por hidrometría..

Tiempo	R'	Tº	Rc	% de suelo en suspensión	Diametro	Longitud Efectiva (L)	K	W muestra (g)	α
1	70	20	71	100	0,1	65	0.01435	50	1
2	68	20	71	100	0,08	65	0.01435	50	1
5	63	19	64	100	0,05	65	0.01435	50	1
15	60	19	61	100	0,029	65	0.01435	50	1
30	54	20	55	100	0,022	74	0.01435	50	1
60	50	20	51	100	0,016	81	0.01435	50	1
120	48	20	49	98	0,012	84	0.01435	50	1
240	46	20	47	90	0,008	88	0.01435	50	1
1440	37	20	38	76	0,0038	101	0.01435	50	1
1800	35	19	36	70	0,0034	104	0.01435	50	1
2880	32	20	33	64	0,0027	109	0.01435	50	1

**Figura 56.** Grafica de granulometría para partículas de limo y arcillas.



## 6.7. LÍMITES DE ATTERBERG

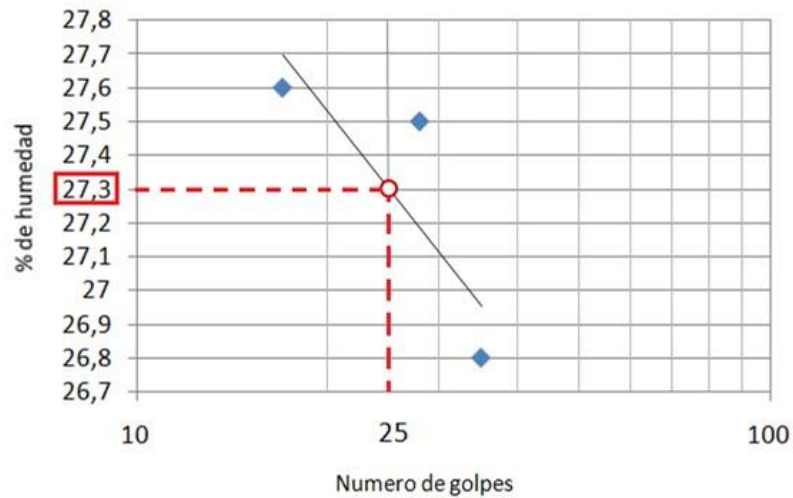
### 6.7.1 Limite líquido

Con los resultados obtenidos en la tabla 24 correspondientes al número de golpes y el porcentaje del contenido de agua, se elaboró una curva de flujo (figura 56) y por medio de una regresión lineal, se estableció el porcentaje de humedad correspondiente al corte en la línea de regresión para 25 golpes como lo establece la norma I.N.V. E. 125. El límite líquido de la muestra es 27.3%

**Tabla 24.** Resultados obtenidos en la determinación del límite líquido para la muestra.

Limite Liquido								
Capsula No.	No Golpes	Peso Capsula (g)	Peso Capsula y Suelo Humedo (g)	Peso Capsula y suelo seco (g)	Peso suelo Humedo (g)	Peso suelo seco (g)	Peso del Agua (g)	Contenido de Agua (%)
1	35	7,3	46,1	35,7	38,8	28,4	10,4	26,8
2	28	7,1	44,6	34,3	37,5	27,2	10,3	27,5
3	17	7,3	47,1	36,1	39,8	28,8	11	27,6

**Figura 57.** Determinación del límite líquido a partir de la gráfica de curva de flujo. El límite líquido de nuestra muestra es 27,3 %.



### 6.7.2. Límite plástico

Los resultados obtenidos en la determinación del límite plástico se muestran en la tabla 25. El resultado obtenido en el límite plástico para nuestra muestra es **21,2%**, el cual es el resultado del promedio entre los porcentajes del contenido de agua.

**Tabla 25.** Resultados obtenidos en la determinación del límite plástico para la muestra.

Límite Plástico							
No. Prueba	Peso Capsula (g)	Peso Capsula y Suelo Humedo (g)	Peso Capsula y suelo seco (g)	Peso suelo Humedo (g)	Peso suelo seco (g)	Peso del Agua (g)	Contenido de Agua (%)
1	6,7	14,5	12,9	7,8	6,2	1,6	20,5
2	6,8	14,1	12,5	7,3	5,7	1,6	21,9

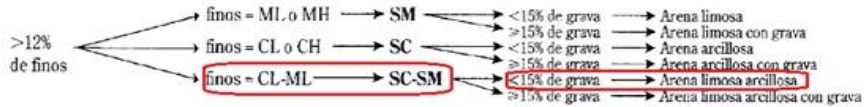
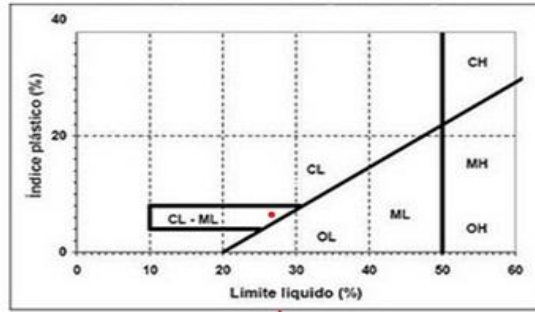
**El Índice Plástico** corresponde a la diferencia entre el límite líquido y el plástico, cuyo resultado es 6.1, este valor se emplea en la determinación del sistema unificado de clasificación de suelos.

A continuación presentamos el tipo de suelo a partir de la clasificación unificada de suelos (SUCS ASTM D 2487). Este fue determinado teniendo en cuenta el porcentaje de partículas mayores a 1/16 mm (arenas), la relación de arenas y gravas, el porcentaje de finos presentes (menor a 1/16 mm) y el índice plástico. Podemos describir nuestra muestra como un suelo granular, donde más del 50% del material es tamaño arena y grava, pero es arenoso debido que a más del 50% de la fracción gruesa es menor a 4,75 mm (malla No 4 ASTM). Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado y el comportamiento de la fracción fina del suelo, clasificamos nuestra muestra como una **arena limoarcillosa (SC-SM)** (Tabla 26 y 27).

**Tabla 26.** Clasificación de la muestra en el sistema unificado de clasificación de suelos.

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACION DE SUELOS (SUCS) ASTM D 2487

Criterios para la asignación de símbolos de grupo y nombre de grupo con el uso de ensayos de laboratorio			Clasificación de suelos			
			Símbolo de grupo	Nombre del grupo		
Suelos de partículas gruesas más del 50% es retenido en la malla No. 200	Gravas Más del 50% de la fracción gruesa es retenida en la malla No. 4	Gravas limpias Menos del 5% pasa la malla No. 200	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3$	GW	Grava bien graduada	
			$Cu < 4$ y $1 > Cc > 3$	GP	Grava mal graduada	
	Gravas con finos Más del 12% pasa la malla No. 200		$IP < 4$ o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad	GM	Grava limosa	
			$IP > 7$ o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	GC	Grava arcillosa	
	Gravas limpias y con finos Entre el 5 y 12% pasa malla No.200		Cumple los criterios para GW y GM	GW-GM	Grava bien graduada con limo	
			Cumple los criterios para GW y GC	GW-GC	Grava bien graduada con arcilla	
		Cumple los criterios para GP y GM	GP-GM	Grava mal graduada con limo		
		Cumple los criterios para GP y GC	GP-GC	Grava mal graduada con arcilla		
	Suelos de partículas finas El 50% o más de la fracción gruesa pasa la malla No. 4	Arenas limpias Menos del 5% pasa la malla No. 200		$Cu \geq 6$ y $1 \leq Cc \leq 3$	SW	Arena bien graduada
				$Cu < 6$ y $1 > Cc > 3$	SP	Arena mal graduada
Arenas con finos Más del 12% pasa la malla No. 200			$IP < 4$ o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad	SM	Arena limosa	
			$IP > 7$ o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	SC	Arena arcillosa	
Arenas limpias y con finos Entre el 5 y 12% pasa malla No.200			Cumple los criterios para SW y SM	SW-SM	Arena bien graduada con limo	
			Cumple los criterios para SW y SC	SW-SC	Arena bien graduada con arcilla	
		Cumple los criterios para SP y SM	SP-SM	Arena mal graduada con limo		
		Cumple los criterios para SP y SC	SP-SC	Arena mal graduada con arcilla		
Suelos de partículas finas El 50% o más pasa la malla No. 200		Limos y arcillas Limite Líquido menor que 50	Inorgánicos	$IP > 7$ y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	CL	Arcilla de baja plasticidad
				$IP < 4$ y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"	ML	Limo de baja plasticidad
	Orgánicos	Limite líquido - secado al horno $< 0.75$ limite líquido - no secado	OL	Arcilla orgánica Limo orgánico		
	Limos y arcillas Limite Líquido mayor que 50	Inorgánicos	$IP > 7$ y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	CH	Arcilla de alta plasticidad	
			$IP < 4$ y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"	MH	Limo de alta plasticidad	
	Orgánicos	Limite líquido - secado al horno $< 0.75$ limite líquido - no secado	OH	Arcilla orgánica Limo orgánica		
Suelos altamente orgánicos	Principalmente materia orgánica de color oscuro		PT	Turba		



**Tabla 27.** Resumen clasificación en el sistema unificado de suelos para la muestra de tierra

CLASIFICACION DE SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS (SUCS ASTM D 2487)					
Suelos de Partículas gruesas, mas del 50% es de tamaño mayor a 63 µm	El 50% o mas de la fraccion gruesa es menor a 4,75 mm (malla No 4 ASTM)	Arenas con Finos. Más del 12 % es menor a 63 µm	$4 \leq IP \leq 7$	Comportamiento de Finos SC-SM	Arena Limoarcillosa

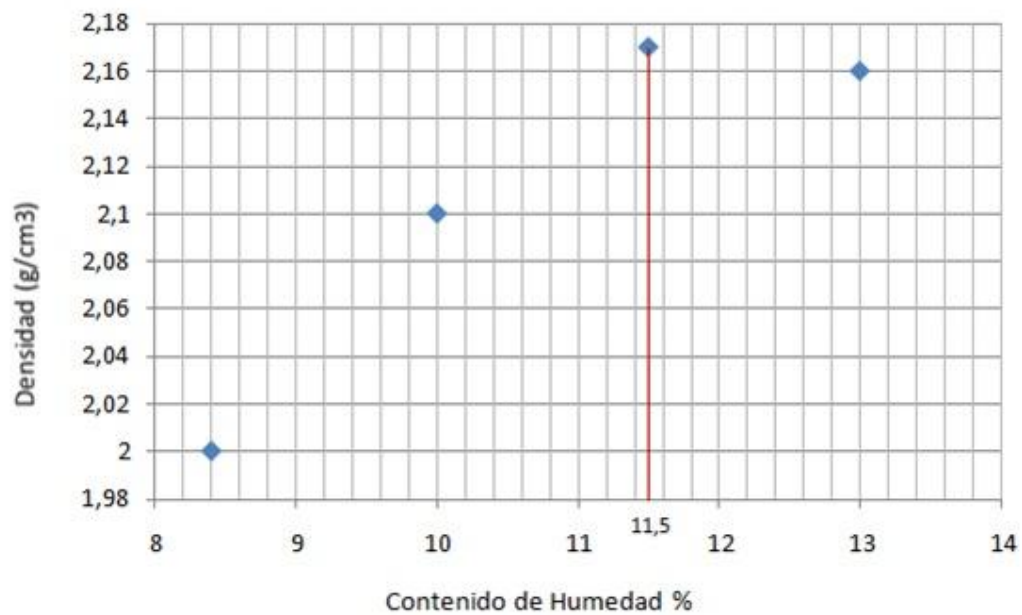
## 6.7 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA ÓPTIMO (CAO) POR MEDIO DE LA PRUEBA PROCTOR.

En la determinación del contenido óptimo de agua, los valores medidos se muestran en la tabla 28. La grafica 58 ilustra la curva de compactación elaborada a partir de los valores de humedad y densidad de la muestra. El valor del contenido de agua óptimo, corresponde al valor de la humedad para la densidad máxima obtenida.

**Tabla 28.** Valores obtenidos en la prueba de Proctor

Peso de la Tara vacio (g)	Peso de la tara y suelo humedo (g)	Peso de la tara con suelo seco (g)	Peso suelo humedo (g)	Peso suelo seco (g)	Peso agua (g)	Porcentaje de agua	Porcentaje de Agua Promedio	Densidad de Muestra (g/cm3)
6,9	48,4	44,9	41,5	38	3,5	8,4	8,4	2
8,2	43,8	40,8	35,6	32,6	3	8,4		
6,8	47,4	43,3	40,6	36,5	4,1	10,1	10	2,1
6,9	47,3	43,3	40,4	36,4	4	9,9		
6,7	49,7	44,7	43	38	5	11,6	11,5	2,17
8,4	50,3	45,5	41,9	37,1	4,8	11,4		
7,2	51,8	46	44,6	38,8	5,8	13	13	2,16
7,6	48,7	43,3	41,1	35,7	5,4	13,1		

**Figura 58.** Datos obtenidos en la prueba de compactación Proctor modificada.



A partir de la curva de compactación, determinamos el contenido de agua óptimo para nuestra muestra en **11,5 %**.

## 6.9. ENSAYOS DE COMPORTAMIENTO ANTE ESFUERZOS Y AGENTES EXTERNOS.

Las mezclas fueron sometidas a las pruebas de resistencia a la compresión simple (44 días de curado), flexión (44 días de curado) y absorción de agua (36 días de curado,) obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 29.

**Tabla 29.** Valores promedios obtenidos para los ensayos elaborados con los 5 especímenes para cada mezcla

Mezcla	Resultados		
	Compresion Mpa	Flexion (Mod Rotura) Mpa	Absorcion % humedad
M1	0,251	0,291	0
M2	0,624	0,333	0
M3	1,574	0,446	25,502
M4	0,466	0,262	0
M5	1,206	0,58	22,378
M6	0,901	0,357	0
M7	1,319	0,334	23,036

**6.9.1. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE.** Resultados del ensayo para cada mezcla.

### 6.9.1.1. MEZCLA 1

Para la mezcla 1, el resultado de comportamiento a la compresión simple alcanzó un valor promedio para las 5 unidades de 0,251 MPa. Este valor ha de ser tenido en cuenta, para comparar los resultados obtenidos con las demás muestras y notificar su mejoría. Los bloques tienden a disgregarse en sus extremos mientras

en el centro se mantiene consistente (figura 59). La tabla 30 presenta los valores obtenidos para las 5 unidades de esta mezcla.

**Figura 59.** Ensayos de compresión para las 5 unidades de adobes de la mezcla 1.



**Tabla 30.** Resultados de ensayo de resistencia a la compresión para las 5 unidades de la mezcla 1.

Nº LADRILLO	MEZCLA	PESO (Kg)	CARGA MAXIMA (KN)	AREA (Cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA A LA COMPRESION (Mpa)
1	1	6.03	6.4	406	0.16
2	1	6.52	11.2	406	0.28
3	1	5.88	9.8	406	0.24
4	1	6.34	12.3	406	0.31
5	1	6.18	10.4	406	0.26
<b>PROMEDIO</b>		<b>6.19</b>	<b>10.02</b>	<b>406</b>	<b>0.25</b>

### 6.9.1.2. MEZCLA 2

Para la mezcla 2, el resultado de comportamiento a la compresión simple alcanzó un valor promedio para las 5 unidades de 0,624 MPa. el cual, muestra una diferencia con la mezcla 1 de 0,373 MPa, lo que representa una mejora del 148 %. Los bloques tienden a separarse en sus extremos mientras en el centro se

mantiene consistente (figura 60). La tabla 31 presenta los valores obtenidos para las 5 unidades de esta mezcla.

**Figura 60.** Ensayos de compresión para las 5 unidades de adobes de la mezcla 2.



**Tabla 31 .** Resultados de ensayo de resistencia a la compresión para las 5 unidades de la mezcla 2

Nº LADRILLO	MEZCLA	PESO (Kg)	CARGA MAXIMA (KN)	AREA (Cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA A LA COMPRESION (Mpa)
1	2	6.47	31.3	406	0.79
2	2	6.21	20.3	406	0.51
3	2	6.32	24.6	406	0.62
4	2	6.28	22.7	406	0.57
5	2	6.41	25.3	406	0.63
<b>PROMEDIO</b>	<b>2</b>	<b>6.34</b>	<b>24.85</b>	<b>406</b>	<b>0.62</b>

### 6.9.1.3. MEZCLA 3.

Para la mezcla 3, el resultado de comportamiento a la compresión simple alcanzó un valor promedio para las 5 unidades de 1,574 MPa. El cual, muestra una diferencia con la mezcla 1 de 1,323 MPa, lo que representa una mejora del 527%. Los bloques tienden a separarse en sus extremos, algunos se disgregan en sus superficies laterales mientras que las frontales y el centro se mantienen

consistentes (figura 61). La tabla 32 presenta los valores obtenidos para las 5 unidades de esta mezcla.

**Figura 61.** Ensayos de compresión para las 5 unidades de adobes de la mezcla 3.



**Tabla 32.** Resultados de ensayo de resistencia a la compresión para las 5 unidades de la mezcla 3

Nº LADRILLO	MEZCLA	PESO (Kg)	CARGA MAXIMA (KN)	AREA (Cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA A LA COMPRESION (Mpa)
1	3	6.56	65.7	406	1.65
2	3	6.22	59.8	406	1.50
3	3	6.39	62.3	406	1.56
4	3	6.65	70.2	406	1.76
5	3	6.44	63.4	406	1.59
<b>PROMEDIO</b>	<b>3</b>	<b>6.45</b>	<b>64.28</b>	<b>406</b>	<b>1.57</b>

#### 6.9.1.4. MEZCLA 4

Para la mezcla 4, el resultado de comportamiento a la compresión simple obtuvo un valor promedio para las 5 unidades de 0,466 MPa. El cual, muestra una diferencia con la mezcla 1 de 0,215 MPa, lo que representa una mejora del 85%. Se observan fisuras profundas en los bloques aunque no se disgregan completamente las unidades (figura 62). La tabla 33 presenta los valores obtenidos para las 5 unidades de esta mezcla.

**Figura 62.** Ensayos de compresión para las 5 unidades de adobes de la mezcla 4.



**Tabla 33.** Resultados de ensayo de resistencia a la compresión para las 5 unidades de la mezcla 4

Nº LADRILLO	MEZCLA	PESO (Kg)	CARGA MAXIMA (KN)	AREA (Cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA A LA COMPRESION (Mpa)
1	4	6.06	16.2	406	0.40
2	4	6.48	19.3	406	0.48
3	4	6.61	21.5	406	0.54
4	4	6.20	17.2	406	0.43
5	4	6.33	18.6	406	0.47
<b>PROMEDIO</b>	<b>4</b>	<b>6.34</b>	<b>18.56</b>	<b>406</b>	<b>0.47</b>

#### 6.9.1.5. MEZCLA 5.

Para la mezcla 5, el resultado de comportamiento a la compresión simple alcanzó un valor promedio para las 5 unidades de 1,206 MPa. El cual, representa una diferencia con la mezcla 1 de 0,955 MPa, lo que representa una mejora del 380 %. Algunos bloques presentan fisuras y otros tienden a separarse en sus superficies externas mientras en el centro se mantienen consistente (figura 63). La tabla 34 presenta los valores obtenidos para las 5 unidades de esta mezcla.

**Figura 63.** Ensayos de compresión para las 5 unidades de adobes de la mezcla 5.



**Tabla 34.** Resultados de ensayo de resistencia a la compresión para las 5 unidades de la mezcla 5

Nº LADRILLO	MEZCLA	PESO (Kg)	CARGA MAXIMA (KN)	AREA (Cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA A LA COMPRESION (Mpa)
1	5	6.16	45.9	406	1.15
2	5	6.21	46.9	406	1.17
3	5	6.45	51.4	406	1.29
4	5	6.36	48.7	406	1.22
5	5	6.29	47.3	406	1.18
<b>PROMEDIO</b>	<b>5</b>	<b>6.29</b>	<b>48.04</b>	<b>406</b>	<b>1.21</b>

#### 6.9.1.6. MEZCLA 6

Para la mezcla 6, en el resultado de comportamiento a la compresión simple se observó un valor promedio para las 5 unidades de 0,901 MPa. El cual muestra una diferencia con la mezcla uno de 0,65 MPa, lo que representa una mejora del 258 %. Los bloques presentaron profundas grietas y tienden a separarse en sus extremos laterales aunque no se desintegran completamente (figura 64). La tabla 35 presenta los valores obtenidos para las 5 unidades de esta mezcla.

**Figura 64.** Ensayos de compresión para las 5 unidades de adobes de la mezcla 6.



**Tabla 35.** Resultados del ensayo de resistencia a la compresión para las 5 unidades de la mezcla

6.

Nº LADRILLO	MEZCLA	PESO (Kg)	CARGA MAXIMA (KN)	AREA (Cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA A LA COMPRESION (Mpa)
1	6	6.76	37.2	406	0.93
2	6	6.58	35.2	406	0.88
3	6	6.50	34.3	406	0.86
4	6	6.67	36.8	406	0.92
5	6	6.64	35.9	406	0.90
<b>PROMEDIO</b>	<b>6</b>	<b>6.63</b>	<b>35.88</b>	<b>406</b>	<b>0.90</b>

#### 6.9.1.7. MEZCLA 7.

Para la mezcla 6, el resultado de comportamiento a la compresión simple alcanzó un valor promedio para las 5 unidades de 1,319 MPa. El cual, arroja una diferencia con la mezcla uno de 1,068 MPa, lo que representa una mejora del 425 %. Los bloques tienden a desintegrarse en sus extremos laterales y frontales, algunos son atravesados por una fractura a lo largo de su cara frontal (figura 65). La tabla 36 presenta los valores obtenidos para las 5 unidades de esta mezcla.

**Figura 65.** Ensayos de compresión para las 5 unidades de adobes de la mezcla 7.



**Tabla 36.** Resultados de ensayo de resistencia a la compresión para las 5 unidades de la mezcla 7

Nº LADRILLO	MEZCLA	PESO (Kg)	CARGA MAXIMA (KN)	AREA (Cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA A LA COMPRESION (Mpa)
1	7	6.60	53.8	406	1.35
2	7	6.50	53.6	406	1.34
3	7	6.02	50.9	406	1.28
4	7	6.39	51.9	406	1.30
5	7	6.44	52.4	406	1.31
<b>PROMEDIO</b>	<b>7</b>	<b>6.39</b>	<b>52.52</b>	<b>406</b>	<b>1.32</b>

**Figura 66.** Resultados promedio de resistencia a la compresión



De la figura 66, observamos que el comportamiento de la tierra sin estabilizar, se ubica muy por debajo de los valores recomendados por las normas técnicas colombianas, que sugieren un valor mínimo de resistencia a la compresión de 1,2 Mpa, por lo cual no sería recomendable usar este material solo para la elaboración de los bloques individuales. Los mejores comportamientos se presentan en las mezclas elaboradas con cal, obteniéndose el mejor valor para la mezcla 3, que contiene 2,5 % porcentaje peso de residuo y 3% de cal, presentando una mejoría del 527% (6 veces mejor) con respecto a la tierra sola; cuando se incrementa el contenido de residuo minero por encima de 2,5% (M5 y M7) aunque mejora, se mantiene por debajo del valor presentado por la mezcla 3. Cuando se utiliza el residuo minero sin la presencia de cal, los resultados obtenidos presentaron una mejoría de entre el 150 y 250%, respecto del material solo (hasta 3 veces mejor). Para todos los casos, las mezclas estabilizadas sin usar cal presentaron siempre valores de resistencia menor a las que usaron cal en la mezcla.

Los resultados para la mezcla 3 son aceptables como lo indica Rodríguez M. 2008, donde se obtuvieron valores de 1,7 a 1,9 Mpa; 1,1 Mpa en Caballero y Martínez 2009; también se recomienda en las normas técnicas de Turquía, en Demir I. un mínimo de 1,0 Mpa y según la Norma Técnica de Edificación E. 080. Adobe, del Perú, la resistencia a la compresión mínima de una unidad corresponde a 1.2 Mpa.

### **6.9.2. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.**

Resultados del ensayo para cada mezcla.

#### **6.9.2.1. MEZCLA 1**

Para la mezcla 1, el resultado del módulo de rotura, alcanzó un valor promedio para las 3 unidades de 1,319 MPa. La distancia promedio del plano de falla al centro de la pieza, se produce entre 1,5 – 1 cm. La figura 67 muestra el bloque

fracturado. La tabla 37 presenta los valores obtenidos para las 3 unidades de esta mezcla.

**Figura 67.** Ensayo de Flexión para la mezcla 1.



**Tabla 37.** Resultados de ensayo de resistencia a la flexión para las 3 unidades de la mezcla 1.

FLEXION					
Nº DE LADRILLO	MEZCLA	PESO (Kg)	CARGA PUNTUAL (KN)	DISTANCIA PLANO FALLA (mm)	MODULO DE ROTURA (Mpa)
1	1	6.19	1,4	10	0,369
2	1	6.34	0,8	15	0,202
3	1	6.23	1,2	15	0,303
<b>PROMEDIO</b>		<b>6,25</b>			<b>0,291</b>

### 7.9.2.2. MEZCLA 2

Para la mezcla 2, el resultado del módulo de rotura, obtuvo un valor promedio para las 3 unidades de 0,333 Mpa, el cual representa una diferencia con la mezcla 1 de 0,042 MPa, esto implica una mejora del 14 %. La distancia promedio del plano de falla al centro del bloque, se produce entre 1,5 – 1 cm. El bloque fracturado se muestra en la figura 68. La tabla 38 presenta los valores obtenidos para las 3 unidades de esta mezcla.

**Figura 68.** Ensayo de Flexión para la mezcla 2.



**Tabla 38.** Resultados de ensayo de resistencia a la flexión para las 3 unidades de la mezcla 2.

FLEXION					
Nº DE LADRILLO	MEZCLA	PESO (Kg)	CARGA PUNTUAL (KN)	DISTANCIA PLANO FALLA (mm)	MODULO DE ROTURA (Mpa)
1	2	6.39	1,5	10	0,395
2	2	6.33	1,1	15	0,278
3	2	6.27	1,3	15	0,328
<b>PROMEDIO</b>		<b>6,33</b>			<b>0,333</b>

### 6.9.2.3. MEZCLA 3

Para la mezcla 3, el resultado del módulo de rotura, alcanzó un valor promedio para las 3 unidades de 0,446 Mpa, el cual representa una diferencia con la mezcla 1 de 0,155 MPa, lo que indica una mejora del 53 %. El plano de falla se produce a 1,5 cm del centro del bloque. En la figura 69, se observa el bloque fracturado y el plano de falla. La tabla 39 presenta los valores obtenidos para las 3 unidades de esta mezcla.

**Figura 69.** Ensayo de Flexión para la mezcla 3.



**Tabla 39.** Resultados de ensayo de resistencia a la flexión para las 3 unidades de la mezcla 3.

FLEXION					
Nº DE LADRILLO	MEZCLA	PESO (Kg)	CARGA PUNTUAL (KN)	DISTANCIA PLANO FALLA (mm)	MODULO DE ROTURA (Mpa)
1	3	6.47	2,0	15	0,505
2	3	6.31	1,6	15	0,405
3	3	6.33	1,7	15	0,429
<b>PROMEDIO</b>		<b>6,37</b>			<b>0,446</b>

#### 6.9.2.4. MEZCLA 4.

Para la mezcla 4, el resultado del módulo de rotura, alcanzó un valor promedio para las 3 unidades de 0,262 Mpa, el cual indica un resultado negativo de 0,029 MPa, lo que representa una reducción del 9 %, con respecto al bloque de la mezcla 1. La distancia promedio del plano de falla al centro de la pieza corresponde a 1 cm. El plano de ruptura del bloque se observa en la figura 70. La tabla 40 presenta los valores obtenidos para las 3 unidades de esta mezcla.

**Figura 70.** Ensayo de Flexión para la mezcla 4.



**Tabla 40.** Resultados de ensayo de resistencia a la flexión para las 3 unidades de la mezcla 4

FLEXION					
Nº DE LADRILLO	MEZCLA	PESO (Kg)	CARGA PUNTUAL (KN)	DISTANCIA PLANO FALLA (mm)	MODULO DE ROTURA (Mpa)
1	4	6.12	0,9	10	0,237
2	4	6.51	1,2	10	0,316
2	4	6.45	0,9	12	0,233
<b>PROMEDIO</b>		<b>6,36</b>			<b>0,262</b>

#### 6.9.2.5. MEZCLA 5.

Para la mezcla 5, el resultado del módulo de rotura, obtuvo un valor promedio para las 3 unidades de 0,58 Mpa, siendo el más alto alcanzado, el cual muestra una diferencia con la mezcla 1 de 0,289 MPa, lo que representa una mejora del 99 %. El plano de falla se produce en promedio a 1 cm del centro del bloque, la figura 71

muestra la ruptura del bloque. La tabla 41 presenta los valores obtenidos para las 3 unidades de esta mezcla.

**Figura 71.** Ensayo de Flexión para la mezcla 5.



**Tabla 41.** Resultados de ensayo de resistencia a la flexión para las 3 unidades de la mezcla 5

FLEXION					
Nº DE LADRILLO	MEZCLA	PESO (Kg)	CARGA PUNTUAL (KN)	DISTANCIA PLANO FALLA (mm)	MODULO DE ROTURA (Mpa)
1	5	6.22	1,8	8	0,482
2	5	6.54	3,0	15	0,758
3	5	6.48	1,9	10	0,500
<b>PROMEDIO</b>		<b>6,41</b>			<b>0,58</b>

#### 6.9.2.6. MEZCLA 6

Para la mezcla 6, el resultado del módulo de rotura, alcanzó un valor promedio para las 3 unidades de 0,357 Mpa, el cual representa una diferencia con la mezcla uno de 0,066 MPa, lo que representa una mejora del 22 %. La distancia promedio del plano de falla al centro de la pieza es bastante amplia y corresponde a 1,5 - 2 cm. En la figura 72, se observa el bloque y su plano de falla. La tabla 42 presenta los valores obtenidos para las 3 unidades de esta mezcla.

**Figura 72 .** Ensayo de Flexión para la mezcla 6.



**Tabla 42.** Resultados de ensayo de resistencia a la flexión para las 3 unidades de la mezcla 6.

FLEXION					
Nº DE LADRILLO	MEZCLA	PESO (Kg)	CARGA PUNTUAL (KN)	DISTANCIA PLANO FALLA (mm)	MODULO DE ROTURA (Mpa)
1	6	6.54	1,3	15	0,328
2	6	6.64	1,4	20	0,339
3	6	6.58	1,6	15	0,404
PROMEDIO		6,58			0,357

### 6.9.2.7. MEZCLA 7.

Para la mezcla 3, el resultado del módulo de rotura, alcanzó un valor promedio para las 3 unidades de 0,334 Mpa, el cual representa una diferencia con la mezcla 1 de 0,043 MPa, esto indica una mejora del 14%. La distancia promedio del plano de falla al centro de la pieza, presenta longitudes mayores a 2 cm del centro del bloque, siendo este el más distante. El bloque fracturado, se muestra en la figura 73. La tabla 43 presenta los valores obtenidos para las 3 unidades de esta mezcla.

**Figura 73.** Ensayo de Flexión para la mezcla 7.

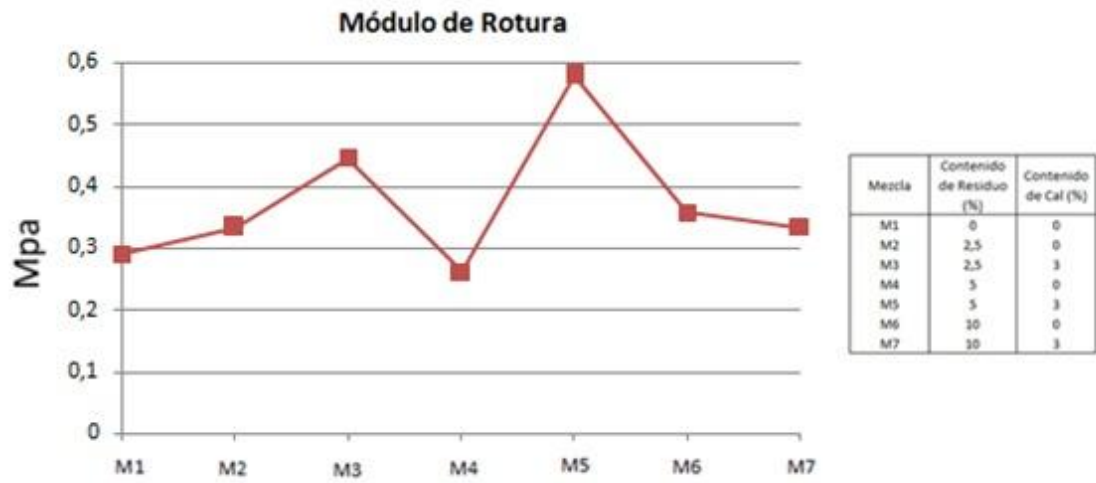


**Tabla 43.** Resultados de ensayo de resistencia a la tensión para las 3 unidades de la mezcla

FLEXION					
Nº DE LADRILLO	MEZCLA	PESO (Kg)	CARGA PUNTUAL (KN)	DISTANCIA PLANO FALLA (mm)	MODULO DE ROTURA (Mpa)
1	7	6.50	1,5	20	0,363
2	7	6.38	1,4	20	0,339
3	7	6.41	1,3	25	0,301
PROMEDIO		6,43			0,334

7.

**Figura 74.** Resultados promedio del módulo de Rotura



En la figura 74, a partir del comportamiento en el modulo de rotura podemos indicar lo siguiente: Las mezclas estabilizadas usando cal y residuo minero, presentaron en términos generales, mejores resultados que aquellos que solo usaron el residuo minero para la estabilización. En este caso, el mejor comportamiento fue el obtenido para la mezcla 5 con un 5% de residuo minero y 3% de cal, alcanzándose un valor de 0,58 Mpa que representa una mejora del 99% (casi dos veces), con respecto a la mezcla sin estabilizar que presentó un valor de 0,291 Mpa. Con la mezcla 3 se obtuvo un valor de 0,446 Mpa, que representa una mejoría del 53 %, respecto a la mezcla sin estabilizar. Con respecto a las demás mezclas M2, M6, M7, la mejora en el comportamiento presentado es de 14, 22 y 14% respectivamente. En el caso de M4, se presentaron valores inferiores a la mezcla sin estabilizar, 0,262 Mpa, mostrando una disminución del 10%. Los valores obtenidos para la mezclas son comparadas con respecto a los resultados encontrados en estudios como el de Diaz, K. y Rios, J. en los que los valores promedio de la resistencia a la flexión fueron de 0.45 Mpa y Yamín, L. et al. 2007, donde los resultados obtenidos fueron de 0.49 Mpa.

### 6.9.3. ENSAYO DE ABSORCIÓN DE HUMEDAD

De los resultados obtenidos para la prueba de absorción de humedad, se concluyó información importante a la hora de evaluar el comportamiento del material bajo condiciones extremas a las que puede estar sometido en el medio en el cual se va a establecer. Para el caso de Bucaramanga, su área metropolitana y alrededores, una de estas condiciones extremas es la posibilidad de una inundación, particularmente los bloques que forman la base de los muros, los cuales son más propensos a quedar sumergidos completamente y deben soportar la carga del muro completo.

Resultados del ensayo para cada mezcla.

#### 6.9.3.1. Mezcla 2

Después del ensayo, los bloques de la mezcla 2, los cuales se elaboraron en ausencia de cal, perdieron su consistencia y se desintegraron completamente, el resultado fue una masa arenolodosa, en la cual el contenido de residuo se separó de la mezcla y se diferenciaba fácilmente del material arenolodoso (Figura 75).

**Figura 75.**Ensayo de absorción de humedad para la mezcla 2.



### 6.9.3.2. Mezcla 3.

Los bloques elaborados en la mezcla 3, conservaron su forma aunque sus dimensiones aumentaron entre 0.5 y 1 cm. como se muestra en la tabla 35, y se observó deformación en los bordes y esquinas. El porcentaje de humedad promedio fue 25.502% siendo el mas alto de las mezclas que preservaron su forma (Figura 76). El ensayo de resistencia a la compresión posterior al exceso de humedad registro valores de 0,59 Mpa (Figura 77). Los resultados del ensayo de absorción de humedad y resistencia a la compresión en exceso de humedad se observan en la tabla 44.

**Figura 76.** Ensayo de absorción de humedad para la mezcla 3



**Figura 77.** Resistencia a la compresión en exceso de humedad para la mezcla 3.



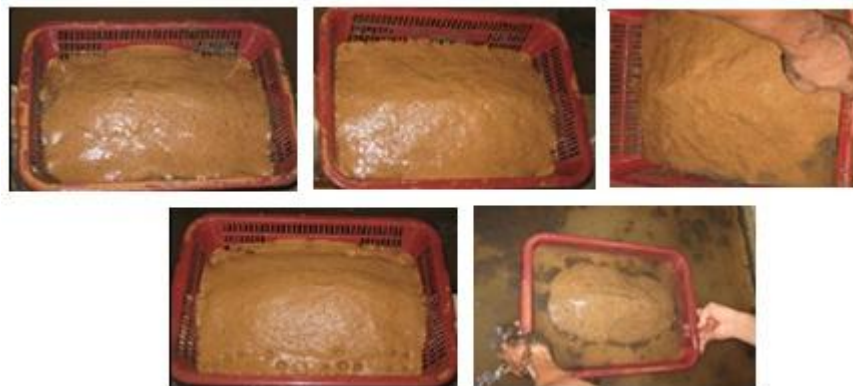
**Tabla 44.** Resultados de ensayo de absorción de humedad y resistencia a la compresión en exceso de humedad para las 5 unidades de la mezcla 3.

No DE LADRILLO	MEZCLA	PESO SECO (Kg)	PESO SATURADO (Kg)	% DE ABSORCION	DIMENSIONES post-Humedad			CARGA MAX. (KN)	AREA (cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA COMPRESION Mpa
					Largo	Ancho	Alto			
1	3	6,421	8,011	24,76	29	14	10,5	25,4	406	0,62
2	3	6,387	8,059	26,34	30	14,5	10	26,2	406	0,64
3	3	6,45	8,033	24,54	29,5	14	10,5	22,1	406	0,54
4	3	6,44	8,16	26,7	29	14,5	10	24,3	406	0,6
5	3	6,355	7,957	25,17	29,5	14,5	10	20,1	406	0,51
PROMEDIO		6,4	8,044	25,502				23,62		0,58

### 6.9.3.3. Mezcla 4.

Los bloques de la mezcla 4 los cuales se elaboraron en ausencia de cal, perdieron su consistencia y se desintegraron completamente, el resultado fue una masa arenolodosa en la cual el contenido de residuo se separó de la mezcla y se diferenciaba fácilmente del material arenolodoso (Figura 78).

**Figura 78.** Ensayo de absorción de humedad para la mezcla 4



### 6.9.3.4. Mezcla 5.

Los bloques elaborados en la mezcla 5, conservaron su forma aunque sus dimensiones aumentaron hasta 0.5 cm. como se muestra en la tabla 37, y se observó deformación en los bordes y esquinas. El porcentaje de humedad promedio fue 22.378%, siendo el más bajo de las mezclas que preservaron su forma (Figura 79). El ensayo de resistencia a la compresión posterior al exceso de

humedad registro valores de 0,8 Mpa, alcanzando un mayor nivel de resistencia en estado húmedo, con respecto a la mezcla 3 (Figura 80). Los resultados del ensayo de absorción de humedad y resistencia a la compresión en exceso de humedad se observan en la tabla 45.

**Figura 79.** Ensayo de absorción de humedad para la mezcla 5.



**Figura 80.** Resistencia a la compresión en exceso de humedad para la mezcla 5.



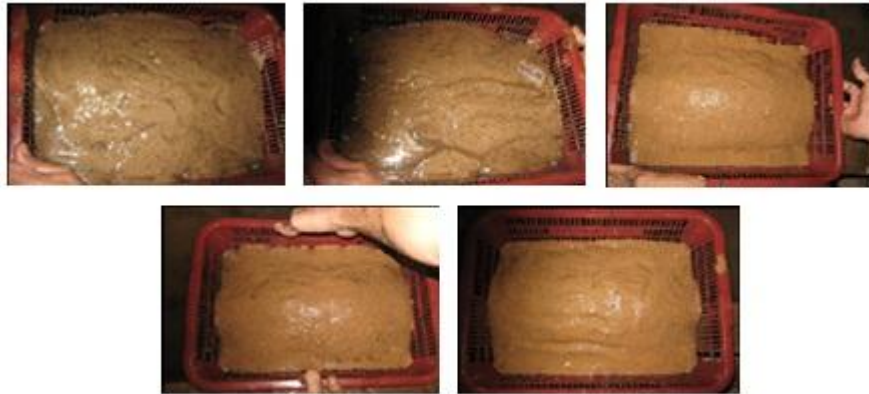
**Tabla 45.** Resultados de ensayo de absorción de humedad y resistencia a la compresión en exceso de humedad para las 5 unidades de la mezcla 5

NO DE LADRILLO	MEZCLA	PESO SECO (Kg)	PESO SATURADO (Kg)	% DE ABSORCION	DIMENSIONES post-Humedad			CARGA MAX. (KN)	AREA	RESISTENCIA COMPRESION (Kg/cm <sup>2</sup> )
					Largo	Ancho	Alto			
1	5	6,538	7,817	19,56	29	14,5	10,5	34,3	406	0,84
2	5	6,329	7,879	24,49	29	14	10,5	32,1	406	0,79
3	5	6,207	7,689	23,88	29,5	14	10	36	406	0,88
4	5	6,364	7,607	19,53	29	14,5	10	35,7	406	0,87
5	5	6,28	7,814	24,43	29	14	10	38,2	406	0,94
PROMEDIO		6,34	7,761	22,378				35,26		0,86

#### 6.9.3.5. Mezcla 6

Después del ensayo, los bloques de la muestra 6, los cuales se elaboraron en ausencia de cal, perdieron su consistencia y se desintegraron completamente, el resultado fue una masa arenolodosa en la cual el contenido de residuo se separó de la mezcla (Figura 81).

**Figura 81.** Ensayo de absorción de humedad para la mezcla 6



#### 6.9.3.6. Mezcla 7.

Los bloques elaborados en la mezcla 7 presentaron una gran pérdida de material hacia los bordes y esquinas, los cuales tomaron forma redondeada (Figura 82). El porcentaje de absorción de humedad promedio fue de 23.36%, aunque, este resultado no es representativo debido a que posiblemente, podría corresponder a la pérdida de material en los bordes del bloque y no al grado de absorción de humedad. El ensayo de resistencia a la compresión posterior al exceso de humedad no fue realizado para esta mezcla. El resultado del ensayo de absorción de humedad en la tabla 46.

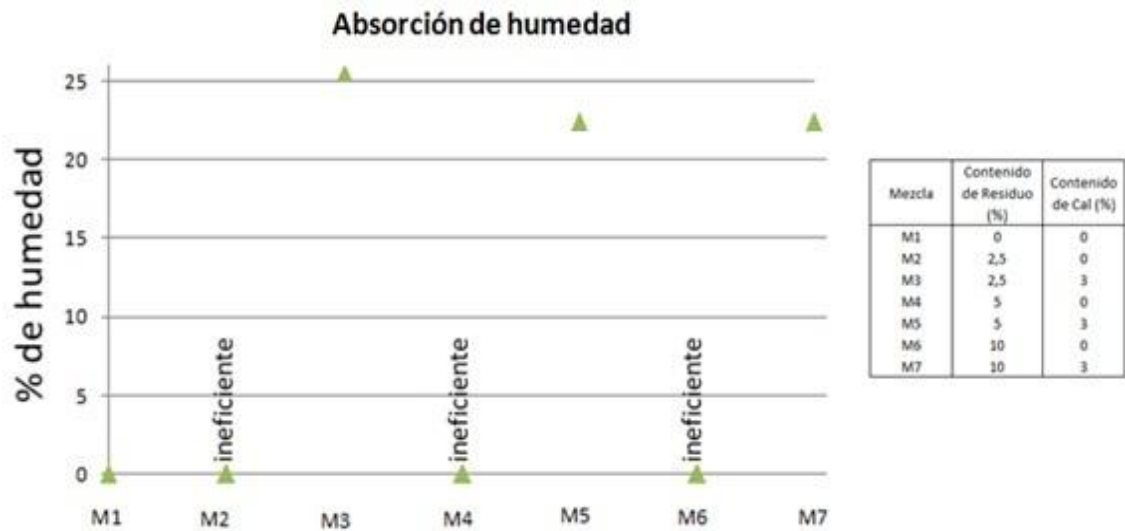
**Figura 82.** Ensayo de absorción de humedad para la mezcla 7



**Tabla 46.** Resultados de ensayo de absorción de humedad y resistencia a la compresión en exceso de humedad para las 5 unidades de la mezcla 7

No DE LADRILLO	MEZCLA	PESO SECO (Kg)	PESO SATURADO (Kg)	% DE ABSORCION
1	7	6,495	8,047	23,89
2	7	6,541	7,981	22,01
3	7	6,423	7,821	21,77
4	7	6,536	8,093	23,82
5	7	6,48	8,02	23,76

**Figura 83 .** Resultados promedio obtenidos en la prueba de absorción de humedad.



De acuerdo con la figura 83, los resultados obtenidos no fueron satisfactorios respecto a las muestras M2, M4, y M6 elaboradas en ausencia de cal, las cuales no mostraron consistencia y se disgregaron como una masa arenolodosa, de la cual se puede diferenciar el residuo minero que se desprende del material y flota en el agua (figuras 75, 78 y 81), de esta manera, se califica esta mezcla como ineficiente en caso de que se presente la situación antes comentada. Lo anterior puede ser debido a la presencia de sulfatos en el residuo que son sensibles al agua por lo que al humedecerse pueden llegar a desprenderse con facilidad. Las mezclas M3, M5 y M7 que son las que contienen 3% de cal, se mantuvieron en forma, presentando desviaciones en sus longitudes en aproximadamente 5 mm, y desintegración en sus bordes y esquinas. La mezcla M7 sufrió más dicha desintegración, tomando sus bordes formas subredondeadas (figura 82). La mezcla M5 presentó la mejor consistencia, manteniendo mejor su forma (figura 79), si bien la mezcla M3 también mantiene su forma (figura 76). En cuanto al porcentaje de humedad en peso, se tiene los valores de 25,502% para el caso de M3, y 22,378% para M5. En el caso de M7 se determinó un 23,036% de humedad absorbida, aunque debido a la pérdida de material en sus bordes, este resultado puede no ser muy representativo. Estos resultados se consideran buenos teniendo en cuenta los valores obtenidos en otras investigaciones como las desarrolladas por Niño y Spinosi 2011, donde se presentaron valores promedios entre 29,06 y 31,57%; y Oti et al 2009 con un 22% a los 28 días de curado; Demir I. obtuvo valores entre 21 y 31.25 %. Las muestras fueron después sometidas a compresión simple para evaluar su grado de consistencia mientras son sometidos a la humedad excesiva. En ellas se observa que el material es nuevamente cohesionado, ya que al haber un exceso de humedad, el material arcilloso adquiere nuevamente un comportamiento plástico. De esta manera se presentan valores de resistencia a la compresión de 0,593 Mpa para la mezcla 3 y de 0,885 Mpa para la mezcla 5, todavía suficientes para mantener en pie una pared en una edificación (Eco Sur South, the network for the ecological and economic habitat).

## CONCLUSIONES

- Se realizó la descripción de los depósitos donde era extraído el material de construcción dentro del proyecto Prados de Laurentia, se determina que si no se utiliza el tipo de estructura en madera que manejan en la construcción de las edificaciones, el material por si solo no sería apto para elaborar bloques de tierra compactado sin ser estabilizados previamente.
- Se estableció el material como un suelo tipo SC-SM, arena limosa arcillosa con un porcentaje de arena mayor a 50% y un 13,5 % de arcillas, estableciéndose cerca al límite de la línea apta para la construcción de adobes.
- Se caracterizó la tierra extraída y se encuentra que posee caolinita, material que en términos generales posee una baja capacidad de intercambio cationico. Esta deficiencia genera que no se optimicen al máximo las propiedades cementantes del suelo, como la resistencia a la compresión .
- Se caracterizó elementalmente el residuo de la explotación de las minas de yeso de la Mesa de los Santos, encontrando que tiene las proporciones de los elementos que en principio serían adecuadas durante la estabilización química, evitando el material que presenta niveles de yeso visibles ya que este podría generar condiciones adversas para la elaboración de los bloques.
- Se encontró que la tierra sin estabilizar presenta un valor en la resistencia a la compresión simple muy por debajo de los límites recomendados, ubicándose en  $2,51 \text{ kg/cm}^2$  o  $0,251 \text{ Mpa}$ .
- Se encontró que al realizar una mezcla 3, compuesta por 2,5 % de residuo minero y 3% de cal, la resistencia a la compresión se mejora hasta en un 500% (5 veces mejor) alcanzando valores de  $15,74 \text{ kg/cm}^2$  o  $1,574 \text{ Mpa}$ , el

cual se ubica dentro de los rangos mínimos que exigen las normas colombianas de construcción. Vale la pena destacar la mejora que se obtiene al desarrollar esta mezcla.

- Se determinó que el valor del modulo de rotura es mucho mejor que el de la tierra sin estabilizar. La mezcla 5, compuesta por 5% de residuo minero y 3% de cal presentó los valores más altos en el modulo de rotura, alcanzando altos niveles de rigidez, aunque en la prueba de resistencia a la compresión se mantiene por debajo del valor alcanzado para la mezcla 3, de 2.5 % de residuo y 3% de cal.
- El uso de un elevado contenido de residuo minero junto con la cal, no representa un aumento indefinido en las propiedades resistentes del material. Cuando se usa un 10 % de residuo minero, los resultados de comportamiento son menores que cuando se usa solo 5% o 2.5%.
- Las mezclas 2, 4 y 6, que fueron realizadas sin utilizar cal, presentan mejorías con respecto a la tierra sin estabilizar, aunque no son tan pronunciadas como el caso de la mezclas que si utilizaron cal.
- Se concluye la mejora significativa que las mezclas estabilizadas con cal presentan en condiciones extremas de humedad, como una inundación, los cuales mantuvieron su forma después de haber sido sumergidos 24 horas en agua y esto confirma la capacidad activante de la cal para generar reacciones cementantes entre la arcilla y el residuo.
- El comportamiento de la tierra que solo tenía residuo minero en las tres proporciones 2.5, 5 y 10%, sin uso de cal, al ser sumergido fue completamente inaceptable, de tal manera que se desintegró por completo, haciendolo no apto en caso de presentarse condiciones extremas, como es el caso de una inundacion.

- En ausencia de cal, el residuo minero parece no reaccionar con el material arcilloso, y al entrar en contacto con agua se desprende del bloque como unidad.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda una mezcla de 2,5% en porcentaje peso de residuo minero y 3% de cal viva para estabilizar el material de tierra a la hora de elaborar bloque de tierra compactada.
- No se recomienda elaborar casas, con adobes de arcilla extraída de los flujos de escombros del macizo de Santander, sin ser previamente mezclados para su estabilización.
- Elaborar este mismo tipo de ensayos y pruebas de manera sistemática en otros tipos de materias primas, que puedan presentar alguna mineralogía diferente, con el fin de tratar de establecer alguna preferencia a la hora de seleccionar un material de construcción que pueda ser estabilizado con el residuo minero, utilizado en este trabajo. De esta manera se podría generar una solución a los inconvenientes de acopio y acumulación de residuo.
- Analizar la posibilidad de hacer uso de esta mezcla para la estabilización de suelo en otros usos civiles que puedan ser benéficos para la sociedad.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] ROUX R, OLIVARES S. Utilización de ladrillos de adobe estabilizados con cemento portland al 6% y reforzados con fibra de coco, para muros de carga en Tampico. España 2002.
- [2] RODRIGUEZ M, SAROZA B. Identificación de la composición óptima del adobe como material de construcción de una escuela en Cuba. *Materiales de construcción*, Vol 56. Abril – junio 2006.
- [3] RODRIGUEZ M, SAROZA B, MENENDEZ J, BARROSO J. Estudio de la resistencia a compresión simple del adobe elaborado con suelos procedentes de Crescencio Valdés, Villa Clara, Cuba. *Materiales de construcción*, Vol 60 julio – septiembre 2008
- [4] Demir I. Effect of organic residues addition on technological properties of clay bricks. *Waste management* 28 (2008). Science Direct. Elsevier
- [5] DEMIR I, SERHAT M. Effect of silica fume and expanded perlite addition on the technical properties of the fly ash-lime-gypsum mixture. *Construction and buildings materials* - 22 (2008).
- [6] OTI J, KINUTHIA J, BAI J. Engineering properties of unfired clay masonry bricks. *Engineering geology* 107 (2008). Elsevier.
- [7] OTI J, KINUTHIA J, BAI J. Compressive strength and microstructural analysis of unfired clay masonry bricks. *Engineering Geology* 109 (2009).Elsevier
- [8] ETCHEBARNE R, PIÑEIRO G, SILVA J. Proyecto tierra Uruguay montaje de prototipos de vivienda a través de la utilización de tecnologías en tierra: adobe, fajina y BTC. Universidad de la República. Uruguay, 2005.

- [9] MENÉNDEZ P, ARDILA M. Ecovivienda en Latinoamérica. Foro Iberoamericano y del Caribe sobre mejores prácticas. Fundación Hábitat Colombia, 2006.
- [10] MORALES R, TORRES R, RENGIFO I, IRALA C. Manual para la construcción de viviendas de adobe. Lima, Perú 1993.
- [11] RIVERA J, MUÑOZ E. Caracterización estructural de materiales de sistemas constructivos en tierra: El adobe. Revista internacional de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil, Vol. 5. Bogotá, Colombia.
- [12] Asociación colombiana de ingeniería sísmica. Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada. Presidencia de la república.
- [13] Morales V, Ortiz M, Alavéz R. Mejoramiento de las propiedades mecánicas del adobe compactado. Naturaleza y desarrollo Vol 5, Núm. 1. 2007.
- [14] Fundación para la preservación, la innovación y el desarrollo de la arquitectura en tierra, TIERRA VIVA. Urbanización casa viva, proyecto piloto de vivienda de interés social en bloque de tierra, Municipio de Vegachí, Antioquia – Colombia. 2007
- [15] Norma Técnica Colombiana. NTC 4017. Método para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla.
- [16] FLORES C, LÓPEZ O. Propuesta de reforzamiento de muros de adobe modificado con confinamiento de madera rolliza. Proyecto de Grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. 2010.
- [17] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INFORMACIÓN GEOCIENTÍFICA, MINERO – AMBIENTAL Y NUCLEAR – INGEOMINAS. Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Colombia, 2001.

- [18] I.N.V.E. 123-07. Análisis granulométrico por medio de tamizado.
- [19] I.N.V.E. 124-07. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro.
- [20] I.N.V.E. 125-07. Determinación del límite líquido de los suelos.
- [21] I.N.V.E. 126-07. Límite plástico e índice de plasticidad de suelos.
- [22] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Clasificación SUCS. Método estándar para la clasificación de suelos con propósitos de ingeniería. Norma ASTM D2487.
- [23] CABALLERO Z, MARTÍNEZ G. Influencia de las propiedades físicas del material tierra para la elaboración de bloques de tierra comprimidos (BTC). Proyecto de Grado. Universidad Industrial de Santander. 2009.
- [24] MINKE G. Manual de construcción en tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual. Editorial fin de siglo. 2001.
- [25] DIAZ K, RIOS J. Alternativas de rehabilitación de adobe y tapia pisada. Universidad de los Andes, Bogotá Colombia.
- [26] MUÑOZ R, MUÑOZ P, MANCILLA J, RODRIGUEZ J, Caracterización fisicoquímica de arcillas del municipio de Guapi – costa pacífica caucana (Colombia). Revista académica colombiana de ciencias V XXXI, No. 121, diciembre de 2007.
- [27] BOLAÑOS S, El uso masivo de la tierra como material de construcción en Colombia. Apuntes, vol 20, núm 2. 2007.
- [28] GONZALES L, Ingeniería Geológica, Ed. Pearson Prentice Hall, 2006
- [29] DORRIK A. V. STOW , Sedimentary rocks in the field. A colour guide. Mansion Publishing. 2009.

- [30] PETER W. BIRKELAND, Soils and Geomorphology. Oxford University Press, 1999.
- [31] HURLBUT C, KLEIN C, Manual de mineralogía de Dana, Editorial Reverte, 1985.
- [32] [www.english.ecosur.org](http://www.english.ecosur.org). The network for the ecological and economical hábitat.
- [33] S.L. PAGLIOLICO, S. RONCHETTI, E.A. TURCATO, G. BOTTINO, L.M. GALLO, R. DEPAOLI. Physicochemical and mineralogical characterization of earth for building in North west Italy. Applied Clay science. 2010.
- [34] BLONDET M, GARCIA G, BRZEZ S, Construcciones de adobe resistentes a los terremotos: Tutor. 2003.
- [35] YAMIN L, PHILLIPS C, REYES J, RUIZ D. Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. Apuntes, vol. 20, núm. 2, 2007.
- [36] COLEGIO DE ARQUITECTOS DE PERU, Norma técnica de edificación E.080 Adobe. 1999.
- [37] MOORE D, REYNOLDS C, X-RAY Diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press. 1997.
- [37] PEREZ P, PACHON C, Determinación de los módulos elástico, plástico y de rotura en material para tapia pisada. Proyecto de Grado. Universidad Industrial de Santander. 2003.