

**ESTUDIO DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y  
QUÍMICAS DE SUELOS RESIDUALES ARCILLOSOS DE LA FORMACIÓN  
BUCARAMANGA, VEREDA LLANADAS, MUNICIPIO DE SAN JUAN DE  
GIRÓN, SANTANDER, ADITIVADO CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN**



**MARY MELISSA CELIS CHAPARRO  
LUZ HELENA MARTINEZ SUAREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA  
2015**

**ESTUDIO DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y  
QUÍMICAS DE SUELOS RESIDUALES ARCILLOSOS DE LA FORMACIÓN  
BUCARAMANGA, VEREDA LLANADAS, MUNICIPIO DE SAN JUAN DE  
GIRÓN, SANTANDER, ADITIVADO CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN**

**MARY MELISSA CELIS CHAPARRO  
LUZ HELENA MARTINEZ SUAREZ**

**Trabajo de grado para optar al título de Geólogas  
Modalidad tesis de investigación**

**Director**

**I.C. LUIS EDUARDO MORENO TORRES**

**Co-Director**

**MSc. MARTHA PATRICIA RUIZ OJEDA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2015**

## **DEDICATORIA**

A Dios por ser la luz que guía mi camino.

A mis padres, Gerardo y Gloria por su esfuerzo, sacrificio, dedicación e  
inagotable amor.

A mi hermano Sebastián por su apoyo incondicional.

A Andrés que con su amor y comprensión ha hecho de este un camino  
maravilloso.

A toda mi familia que de una u otra manera contribuyeron para que este sueño se  
hiciera realidad.

**Melissa Celis**

## **DEDICATORIA**

A mis papás Pablo y Lucia por su paciencia y sabiduría en todo el transcurso de mi vida. A mi hermano Axel por su apoyo y comprensión.

A la vida porque me dio la oportunidad de vivir esta etapa junto a personas maravillosas y momentos inolvidables.

**Luz Helena Martínez**

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos agradecer a la Universidad Industrial de Santander en especial a la Escuela de Geología y todo el cuerpo docente por sembrar en nosotras el conocimiento y la sabiduría que nos hicieron crecer tanto académica como personalmente.

A Luis Eduardo Moreno y Martha Patricia Ruiz, por su apoyo, consejos y paciencia en la elaboración de nuestro proyecto de investigación.

Agradecemos al Laboratorio de Microscopía y al Laboratorio de Rayos-X de la Universidad Industrial de Santander – Parque Tecnológico de Guatiguará y su personal, por el servicio suministrado para la adquisición de datos.

Al Laboratorio de Suelos de la Escuela de Ingeniería Civil y su personal por facilitarnos realizar los análisis necesarios en la elaboración del proyecto.

A todos nuestros amigos y compañeros que nos han acompañado en el transcurso de nuestra vida universitaria que de un modo u otro nos han brindado su apoyo logrando de esta etapa una experiencia única.

Mil gracias a todos.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	22
1. OBJETIVOS.....	24
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	24
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	24
2. ANTECEDENTES .....	25
3. MARCO TEORICO .....	28
3.1 SUELOS: ORIGEN Y FORMACIÓN .....	28
3.1.1 Agentes generadores de suelo. ....	29
3.1.2 Suelos residuales y transportados. ....	33
3.1.3 Clasificación de suelos.....	34
3.2 TÉCNICAS NECESARIAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUELO.....	38
3.2.1 Granulometría. ....	39
3.2.2 Humedad Natural. ....	39
3.2.3 Límites de Atterberg: Límite líquido y límite plástico. ....	40
3.2.4 Proctor Modificado. ....	46
3.2.5 CBR (California bearing ratio). ....	48
3.2.6 Difracción de Rayos-X (DRX). ....	49
3.2.7 Fluorescencia de Rayos-X (FRX). ....	50
3.2.8 Microscopia electrónica de barrido "Scanning electron microscopy" (SEM). ....	50
3.3 ARCILLAS.....	51
3.3.1 Propiedades físico-químicas de las arcillas. ....	52
3.3.2 Intercambio catiónico. ....	53

3.3.3	Minerales constitutivos de las arcillas. ....	54
3.4	CEMENTO .....	57
3.4.1	Especificaciones técnicas. ....	57
3.5	RESIDUO DE CONSTRUCCIÓN .....	58
3.5.1	Características del residuo de construcción.....	59
3.5.2	Impacto generado por el residuo de construcción .....	61
3.6	ESTABILIZACIÓN DEL SUELO.....	62
3.6.1	Estabilización mecánica.....	64
3.6.2	Estabilización física.....	65
3.6.3	Estabilización química. ....	66
3.6.3.1	Reacciones puzolánicas: .....	67
3.6.3.2	Estabilización con cemento.....	68
4.	METODOLOGÍA .....	70
4.1	ACTIVIDAD 1 - ADQUISICIÓN, SELECCIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN .....	70
4.2	ACTIVIDAD 2 - RECOLECCIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	71
4.2.1	Recolección. ....	71
4.2.2	Preparación de las muestras. ....	72
4.3	ACTIVIDAD 3 - ESTUDIOS Y ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS .....	72
4.3.1	Análisis de las muestras. ....	73
4.4	ACTIVIDAD 4 - ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	75
4.5	ACTIVIDAD 5 - DOCUMENTACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE RESULTADOS FINALES .....	76
5.	RESULTADOS.....	77
5.1	CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SUELO .....	77
5.1.1	Localización geográfica.....	77
5.1.2	Descripción física del suelo residual arcilloso .....	79
5.2	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL SUELO .....	85

5.2.1 Difracción de Rayos X (DRX).....	85
5.2.2 Fluorescencia de Rayos X (FRX).....	87
5.2.3 Microscopía electrónica de barrido SEM.....	88
5.3 DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DEL SUELO .....	95
5.4 ADITIVACIÓN Y SELECCIÓN DE MUESTRAS .....	97
5.4.1 Aditivación de muestras.....	97
5.4.2 Selección de muestras.....	101
5.5 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS ADITIVADAS.....	101
5.5.1 Caracterización física de las muestras aditivadas. ....	102
5.5.2 Caracterización química del suelo aditivado. ....	104
6. CONCLUSIONES.....	119
7. RECOMENDACIONES.....	121
BIBLIOGRAFÍA.....	122
ANEXOS.....	127

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.).....	35
Tabla 2. Criterio de clasificación en el laboratorio.....	36
Tabla 3. Abertura según el número de la malla. ....	39
Tabla 4. Diagrama de consistencias de suelos finos, de Atterberg.....	41
Tabla 5. Información técnica del cemento CEMEX.....	58
Tabla 6. Residuos admitidos a tratamiento.....	60
Tabla 7. Tipos de estabilización.....	64
Tabla 8. Niveles mínimo y máximo del residuo de construcción y el cemento portland.....	73
Tabla 9. Combinación del diseño experimental, con residuo de construcción y cemento en determinado tiempo.....	74
Tabla 10. Mezcla realizada para la aditivación. ....	74
Tabla 11. Sistema unificado de clasificación de suelos S.U.C.S. ....	81
Tabla 12. Propiedades del CBR al suelo residual arcilloso.....	84
Tabla 13. Clasificación del suelo de acuerdo al número de CBR. ....	84
Tabla 14. Condiciones establecidas para la elaboración de DRX.....	85
Tabla 15. Resultados DRX para el suelo ARC-RES.....	86
Tabla 16. Condiciones establecidas para la elaboración de FRX.....	87
Tabla 17. Resultados obtenidos de FRX. ....	87
Tabla 18. Porcentaje de cada elemento para el enfoque 1 del suelo ARC-RES. ...	90
Tabla 19. Porcentaje de elementos del enfoque 2 de la muestra ARC-RES. ....	92
Tabla 20. Porcentaje de elementos del enfoque 3 de la muestra ARC-RES. ....	94
Tabla 21. Datos para hallar la humedad natural del suelo.....	97
Tabla 22. Selección de muestras según índice de plasticidad.....	101
Tabla 23. Comparación de resultados del suelo original y el suelo aditivado. ....	103
Tabla 24. Resultados DRX para la combinación 1.....	104

Tabla 25. Resultados análisis de FRX.....	106
Tabla 26. Porcentaje en peso de elementos del enfoque 1 de la combinación 1.....	108
Tabla 27. Porcentaje en peso de los elementos presentes en el enfoque 2 de la combinación 1.....	110
Tabla 28. Resultados DRX para la combinación 3.....	111
Tabla 29. Resultados FRX de la combinación 3.....	113
Tabla 30. Porcentaje en peso de los elementos presentes en el enfoque 1 de la combinación 3.....	115
Tabla 31. Porcentaje en peso de los elementos presentes en el enfoque 2 de la combinación 3.....	117

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Perfil de meteorización. Según diversas fuentes. ....	31
Figura 2. Esquema del proceso de formación de los suelos. ....	32
Figura 3. Diagrama triangular para la determinación de la textura. Clasificación internacional I.S.S.S. ....	37
Figura 4. Diagrama triangular para la determinación de la textura. Clasificación U.S.D.A. ....	38
Figura 5. Cuchara de Casagrande y acanalador. ....	43
Figura 6. Rollos desquebrajados al alcanzar el límite plástico. ....	46
Figura 7. Deformación de la muestra después de estar sumergido en agua por cuatro días. ....	49
Figura 8. Representación esquemática de las capas tetraédricas (superior) y octaédricas (inferior). ....	55
Figura 9. Composición mineral de partículas de diferentes rangos de tamaños. ....	57
Figura 10. Suelo residual arcilloso. ....	71
Figura 11. Curado durante 7 a 14 días. ....	75
Figura 12. Localización del suelo residual arcilloso. ....	78
Figura 13. Cantera de la ladrillera el Diamante. ....	78
Figura 14. Diagrama de flujo para suelos de grano fino. ....	79
Figura 15. Mapa geológico del cuadrángulo H12, Bucaramanga. ....	80
Figura 16. Carta de plasticidad de Casagrande. ....	81
Figura 17. Diagrama triangular para determinación de la textura. ....	82
Figura 18. Diagrama triangular para la clasificación de suelo. ....	83
Figura 19. Difractograma del suelo ARC-RES. ....	86
Figura 20. Enfoque 1 de la muestra ARC-RES. ....	89
Figura 21. Espectrograma del enfoque 1 de suelo ARC-RES. ....	90
Figura 22. Enfoque 2 de la muestra ARC-RES. ....	91

Figura 23. Espectrograma del enfoque 2 de la muestra ARC-RES. ....	92
Figura 24. Enfoque 3 de la muestra ARC-RES.....	93
Figura 25. Espectrograma del enfoque 3 de la muestra ARC-RES. ....	94
Figura 26. Sección delgada del suelo residual en nicoles paralelos. ....	96
Figura 27. Sección delgada del suelo residual en nicoles cruzados.....	96
Figura 28. Proceso de aditivación de muestras. ....	98
Figura 29. Muestras de suelo aditivadas .....	100
Figura 30. Difractograma de la combinación 1.....	105
Figura 31. Enfoque 1 de la combinación 1.....	107
Figura 32. Espectrograma del enfoque 1 de la combinación 1. ....	108
Figura 33. Enfoque 2 de la combinación 1.....	109
Figura 34. Espectrograma del enfoque 2 de la combinación 1 .....	110
Figura 35. Difractograma de la combinación 3.....	112
Figura 36. Enfoque 1 de la combinación 3.....	114
Figura 37. Espectrograma del enfoque 1 de la combinación 3. ....	115
Figura 38. Enfoque 2 de la combinación 3.....	116
Figura 39. Espectrograma del enfoque 2 de la combinación 3. ....	117

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Granulometría y Límites de Atterberg del suelo residual arcilloso.....	127
Anexo B. Proctor Modificado del suelo residual arcilloso.....	129
Anexo C. CBR del suelo residual arcilloso.....	130
Anexo D. Límites de Atterberg del suelo aditivado de la combinación 1.....	133
Anexo E. Límites de Atterberg del suelo aditivado de la combinación 3.....	134
Anexo F. Proctor modificado del suelo aditivado de la combinación 3. ....	135
Anexo G. CBR del suelo aditivado de la combinación 3. ....	136

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE SUELOS RESIDUALES ARCILLOSOS DE LA FORMACIÓN BUCARAMANGA, VEREDA LLANADAS, MUNICIPIO DE SAN JUAN DE GIRÓN, SANTANDER, ADITIVADO CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN.\*

**AUTORAS:** MARY MELISSA CELIS CHAPARRO  
LUZ HELENA MARTINEZ SUAREZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Estabilización físico-química, estabilización de suelos, aditivación de arcilla, residuos de construcción.

### DESCRIPCIÓN

En la construcción de obras civiles se generan residuos de construcción los cuales generan pérdidas, sobre costos y fundamentalmente un gran impacto al medio ambiente (afectación en la atmósfera, alteración de aguas superficiales y alteración del terreno), por esta razón se hace necesario buscar alternativas para su aprovechamiento y así mitigar el daño generado. En este proyecto se busca mejorar las propiedades físicas, químicas y geotécnicas del suelo, usando el material residual como solución para el desarrollo de vías terciarias del país. Para este propósito se utilizó un suelo residual arcilloso de la formación Bucaramanga perteneciente a la vereda Llanadas del municipio San Juan de Girón, Santander, el cual se caracterizó mediante análisis físicos y químicos. Posteriormente este suelo fue aditivado con residuos de construcción y cemento portland en una matriz de diseño con porcentajes entre 0% y 1% y un tiempo de curado de 7 y 14 días escogiendo las combinaciones que presentaron un cambio significativo en sus propiedades.

La combinación que presentó el mayor cambio fue la denominada combinación-3 con 0,5% de residuo de construcción y 1% de cemento Portland arrojando una disminución en los límites de Atterberg, un aumento en los análisis de proctor modificado y CBR que aunque no muy considerables constituyen una mejora en la resistencia del suelo, además se obtuvieron evidencias de reacciones puzolánicas al registrar un aumento de elementos que forman los minerales constituyentes de las arcillas.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-químicas, Escuela de Geología, Director: Ing., Luis Eduardo Moreno – MsC. Martha Patricia Ruiz.

## ABSTRACT

**TITLE:** **STUDY OF IMPROVING THE PHYSICAL AND CHEMICAL WASTE CLAY SOIL PROPERTIES OF FORMATION IN BUCARAMANGA, VILLAGE LLANADAS, MUNICIPALITY SAN JUAN DE GIRÓN, SANTANDER, WITH ADDITION CONSTRUCTION WASTE.\***

**AUTHORS:** MARY MELSSA CELIS CHAPARRO  
LUZ HELENA MARTINEZ SUAREZ\*\*

**KEYWORDS:** Physical-chemical stabilization, soil stabilization, clay additives, construction waste.

## DESCRIPTION

In the construction of civil works, construction waste is generated and therefore produces losses, costs and basically a large impact on the environment (Change in the atmosphere, altering surface water and ground disturbance), therefore it is necessary to find alternatives to their use and to mitigate the damage generated. This project seeks to improve the physical, chemical and geotechnical soil properties, using the residual material as a solution for the development of tertiary roads in the country. Residual clayey soil from Bucaramanga formation belonging to the village Llanadas municipality San Juan de Girón, Santander, which was characterized by physical and chemical analysis, was used for this purpose. Later this soil was additive with construction waste and Portland cement in a design matrix with percentages between 0% and 1% and curing time of 7 to 14 days choosing the combinations that showed a significant change in its properties.

The combination having the greatest change was called combination-3 with 0.5% construction waste and 1% Portland cement throwing decreased Atterberg limits an increase in analysis modified proctor and CBR though not constitute a considerable improvement in soil resistance, is also evidence pozzolanic reactions were obtained by recording an increase of the constituent elements forming clay minerals.

---

\* Degree work.

\*\* Engineering physicochemical faculty, Geology School, Director: Eng., Luis Eduardo Moreno – MsC. Martha Patricia Ruiz.

## INTRODUCCIÓN

La estabilización del suelo se puede utilizar para corregir deficiencias, brindar mayor resistencia al terreno o disminuir su índice de plasticidad. Existen tres formas de lograrlo mediante: estabilización química, estabilización física y estabilización mecánica. Según SOLMINIHAC (1989) la estabilización química consiste en alterar las propiedades del suelo usando un cierto aditivo, el cual mezclado con el suelo, normalmente produce un cambio en las propiedades moleculares superficiales de los granos del suelo y en algunos casos, pega los granos entre sí de modo de producir un incremento en su resistencia.

La estabilización física y química de suelos es fundamental para la conservación de las obras civiles como vías terciarias, puentes y edificaciones que se fundan sobre suelos conflictivos. Es por esto que se busca dar solución al problema mediante el estudio de las propiedades físicas y químicas de un suelo residual arcilloso “químicamente activo”, así como su comportamiento al ser aditivado con residuo de construcción.

En el proceso de construcción de proyectos de obras civiles, se generan residuos de construcción, que además de constituir pérdidas y sobre costos para la obra, también impacta al medio ambiente, generando: Afectación en la atmósfera (partículas sólidas, gases de combustión y contaminación sonora), alteración de las aguas superficiales (contaminación de corrientes superficiales y en algunos casos de acuíferos por partículas sólidas, aceites, hidrocarburos y afectación de su ciclo natural), alteración del suelo (desprendimientos, deslizamientos y hundimientos de tierra) y generación de residuos (escombros y residuos peligrosos).

La realización de este proyecto de investigación va encaminada a contribuir con el desarrollo y avance del país, ya que ayuda en la re utilización y reciclaje de desechos de construcción que al ser re-utilizados en el mejoramiento de las vías terciarias significaría una reducción considerable no solo en costos sino en daños ambientales.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el comportamiento de los residuos de construcción en la estabilización física y química de suelo residual arcilloso de la formación Bucaramanga, vereda Llanadas, municipio de San Juan de Girón, mediante técnicas de difracción de rayos x, límites de Atterberg y microscopia electrónica de barrido SEM.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Describir las propiedades físicas y químicas del suelo arcilloso perteneciente a la formación Bucaramanga, vereda Llanadas, municipio de San Juan de Girón, Santander, mediante caracterización de los límites de Atterberg, humedad natural y humedad óptima para ensayo de compactación tipo Proctor y Proctor modificado.
- Identificar las características físico-químicas del residuo de construcción (bloque de arcilla, bloque de cemento y escombros de concreto mezclados con cemento portland al 0%, 0.5% y 1.0% porcentaje en peso) por medio de límites de Atterberg, difracción de rayos X y microscopia electrónica de barrido SEM.
- Establecer la composición química y el comportamiento del suelo residual arcilloso de la formación Bucaramanga, vereda Llanadas, municipio de San Juan de Girón, Santander, al ser aditivado con residuos de construcción mediante la difracción de rayos X, microscopia electrónica de barrido SEM, límites de Atterberg y CBR.

## 2. ANTECEDENTES

Como subsistema derivado e interdependiente de los otros componentes del ecosistema, el suelo ha sido objeto de muchos estudios y lo sigue siendo de manera gradual y progresiva para un mayor conocimiento.

El mejoramiento de la capacidad de soporte de los suelos a través de su estabilización con aditivos es bastante antiguo; hace 5000 años atrás ya el suelo se estabilizaba con cal o puzolanas. A pesar de ello el verdadero auge de esta técnica y su consecuente desarrollo sólo comenzó a ser realmente significativo a partir de la Segunda Guerra Mundial (1939 – 1945), a raíz de la imperiosa necesidad de construir carreteras y aeropuertos en zonas con carencia de agregados de buena calidad<sup>1</sup>.

En Colombia los suelos en su estado natural no poseen una capacidad de soporte que sea aceptable para resistir las solicitudes de carga a las que son sometidos, principalmente en el campo de la infraestructura vial y pavimentos. Los principales factores que generan la inestabilidad de un suelo están ligados a las propiedades intrínsecas de estos, como son: la resistencia mecánica, tamaño y forma de las partículas, estabilidad volumétrica y permeabilidad.

El desarrollo de muchas ciudades y asentamientos urbanos ha tenido lugar sobre suelos cohesivos como es el caso de Bogotá, en la que un depósito lacustre formado por mantos de suelos arcillosos profundos cubre una amplia porción de la ciudad.

---

<sup>1</sup> SOLMINIHAC, H., ECHEVERRÍA, G. y THENOUX, G. Estabilización química de suelo: Aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimento. Revista ingeniería de construcción. Pontificia Universidad Católica de Chile, 1989, p 1.

El estudio y predicción del comportamiento particular de este tipo de suelos es fundamental para la ejecución y estabilidad de las obras civiles, por lo que cada vez son más las investigaciones y procedimientos encaminados a lograr un mejor análisis de los principales elementos de su comportamiento mecánico<sup>2</sup>.

El comportamiento mecánico de los suelos se puede modificar de acuerdo a los requerimientos de cada obra, esto ha permitido que a través de los años se han desarrollado gran variedad de especificaciones técnicas para seleccionar los materiales adecuados para la construcción de obras civiles, infraestructura vial y pavimentos, en estas especificaciones se emplean materiales de óptima calidad y obtenidos a costos razonales en relación con los beneficios de la obra.

Considerando que hoy en día los materiales de construcción que cumplen con esos requisitos necesarios, se han vuelto escasos y muy costosos para conseguir, a la hora de tratar con suelos no adecuados para sus obras de ingeniería, por no cumplir con los requisitos especificados se contempla: alterar o cambiar las propiedades mecánicas del suelo mediante un método de estabilización, el cual permita adecuar sus propiedades a las condiciones del proyecto<sup>3</sup>.

El problema ambiental que plantean los residuos de construcción se deriva no solo en el creciente volumen de su generación, sino también de su tratamiento, que todavía hoy es ineficiente en gran parte de los casos. La insuficiente prevención de la producción de residuos, se une al escaso reciclado de estos. Entre los impactos ambientales que ello provoca, cabe destacar la contaminación de suelos

---

<sup>2</sup> NIETO, A., CAMACHO, J., RUIZ, E., Determinación de parámetros para los modelos elastoplástico Mohr – Coulomb y Hardening Soil en suelos arcillosos. Revista Ingenierías Universidad de Medellín. 2009, p 77.

<sup>3</sup> SOLANO, G., NIÑO, O., Evaluación de la estabilización de arcillas expansivas en laboratorio implementado pilotines con sal y cal. Ingeniería civil. Universidad Industrial de Santander. 2010, p4.

y acuíferos en vertederos incontrolados, el deterioro paisajístico y la eliminación de estos residuos sin aprovechamiento de sus recursos valorizables<sup>4</sup>.

A raíz de esta problemática se hace necesaria la reutilización de dichos residuos y es por esto que la estabilización físico-química de los suelos ha tomado fuerza a través de los años convirtiéndose hoy en día en una técnica económicamente viable, amigable con el medio ambiente y contribuyendo al desarrollo sostenible del país.

---

<sup>4</sup> PARRADO, C., Manual de manejo de residuos de construcción y demolición para obras en Bogotá. Subdirección de control ambiental al sector público, secretaria distrital de ambiente. 2012. p 7.

### 3. MARCO TEORICO

#### 3.1 SUELOS: ORIGEN Y FORMACIÓN

La tierra está compuesta de tres capas concéntricas: el núcleo, el manto y la corteza. Esta división ordenada es el resultado de las diferencias en densidad entre las capas, en función de las variaciones de composición, temperatura y presión.

El núcleo tiene una densidad calculada de 10-13 gr/cm<sup>3</sup> y ocupa aproximadamente el 16% del volumen total de la tierra, el núcleo está compuesto de una parte interna sólida y una parte externa que se comporta como líquida, se cree que ambas partes del núcleo están compuestas principalmente de hierro y en menor proporción de níquel. El manto rodea al núcleo y comprende alrededor de un 83% del volumen de la tierra y está compuesto principalmente de peridotita, la corteza es la capa más externa de la tierra, está compuesta de dos tipos distintos: la corteza continental tiene un gran espesor de 20-90km y una densidad media de 2,7 gr/cm<sup>3</sup> y contiene una cantidad considerable de silicio y aluminio y la corteza oceánica es mucha más fina con un espesor entre 5-10km y es más densa que la corteza continental con una densidad de 3,0 gr/cm<sup>3</sup> y está compuesta principalmente por basalto<sup>5</sup>.

Suprayaciendo a la corteza terrestre propiamente dicha, existe una pequeña capa, formada por la disgregación y descomposición de sus últimos niveles; esta pequeña pátina del planeta, es el *suelo*.

---

<sup>5</sup> AVELLANEDA J., Seguridad y medio ambiente en minería. Universidad Nacional del centro del Perú. 2010. P 2-6

Según Dueñas et.al., el suelo es una capa de espesor variable que recubre las rocas expuestas sobre la superficie terrestre, se encuentra en relación directa con la vida vegetal y, al estar constituido por diferentes elementos como son, minerales, materiales orgánicos y químicos, agua, etc., se haya sometido a constantes cambios por efecto de las variaciones del clima de la atmósfera y de la acción del hombre.

Es común creencia que el suelo es un agregado de partículas orgánicas e inorgánicas, no sujeta a ninguna organización. Pero en realidad se trata de un conjunto con organización definida y propiedades que varían “vectorialmente”. En la dirección vertical generalmente sus propiedades cambian mucho más rápidamente que en la horizontal. El suelo tiene perfil, y este es un hecho del que se hace abundante aplicación.

Para el geólogo “suelo” es todo material intemperado en el lugar en el que ahora se encuentra y con contenido de materia orgánica cerca de la superficie.

En síntesis la palabra suelo representa todo tipo de material terroso, desde un relleno de desperdicio, hasta areniscas parcialmente cementadas o lutitas suaves. Quedan excluidos de la definición las rocas sanas, ígneas o metamórficas y los depósitos sedimentarios altamente cementados, que no se ablanden o desintegren rápidamente por acción de la intemperie. El agua contenida juega un papel tan fundamental en el comportamiento mecánico del suelo, que debe considerarse como parte integral del mismo<sup>6</sup>.

**3.1.1 Agentes generadores de suelo.** La mayoría de los suelos que cubren la tierra están formados por la meteorización de las rocas. Los geólogos emplean el término meteorización de las rocas para describir todos los procesos externos, por

---

<sup>6</sup> JUÁREZ, E. y RICO, A. Mecánica de suelos. Tomo 1. Fundamentos de la mecánica de suelos. México. Limusa, 2005.

medio de los cuales la roca experimenta descomposición química y desintegración física, proceso mediante el cual masas de roca se rompen en fragmentos pequeños. Esta fragmentación continua es un cambio físico y por eso se llama también meteorización mecánica. Por otra parte, la meteorización química de una roca es un proceso de descomposición, mediante el cual los minerales constitutivos de rocas allí presentes cambian de composición química. En la descomposición, los minerales persistentes se transforman en minerales de descomposición y propiedades físicas diferentes. Es preciso indicar que desintegración física completa la descomposición, ya que los minerales y partículas rocosas de menor tamaño producidos por meteorización mecánica son mucho más susceptibles al cambio químico que los granos minerales firmemente soldados en grandes masas de roca compacta.

La meteorización mecánica es el proceso por el cual las rocas se fracturan en piezas de menor tamaño bajo la acción de las fuerzas físicas, como la corriente de agua de los ríos, viento, olas oceánicas, hielo glacial, acción de congelación, además de expansiones y contracciones causadas por ganancia y pérdida de calor.

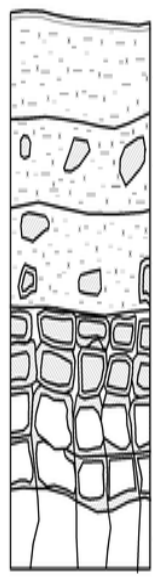
La meteorización química es el proceso de descomposición química de la roca original. Entre los distintos procesos de alteración química puede citarse: la hidratación (paso de anhidrita a yeso), disolución (de los sulfatos en el agua), oxidación (de minerales de hierro expuestos a la intemperie), cementación (por agua conteniendo carbonatos). Por ejemplo, la meteorización química de los feldespatos puede producir minerales arcillosos.

Muy relacionada con la meteorización química, se encuentra la meteorización biológica, producida fundamentalmente por la actividad bacteriana, originando putrefacciones en materiales orgánicos.

La acción conjunta o individual de estos procesos de meteorización da lugar a un perfil de meteorización de la roca en función de la profundidad (Ver figura 1).

En este perfil la roca sana ocupa la zona más profunda, transformándose gradualmente a suelo hacia la parte más superficial.

**Figura 1. Perfil de meteorización. Según diversas fuentes.**

PERFIL ESQUEMÁTICO	LOVE (1951) - LITTLE (1961)	VARGAS (1951)	SOWERS (1954, 1963)	CHANDLER (1969)	GEOLOGICAL SOC. ENG GROUP (1970)	DEERE Y PATTON (1971)	
	ROCAS ÍGNEAS	ÍGNEAS, BASÁLTICAS Y ARENISCAS	ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS	MARGAS Y LIMOLITAS	ROCAS ÍGNEAS	ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS	
	VI SUELO	SUELO RESIDUAL	ZONA SUPERIOR	IV COMPLETAMENTE ALTERADO	VI SUELO RESIDUAL	HORIZONTE IA	
	V COMPLETAMENTE ALTERADA	SUELO RESIDUAL JOVEN	ZONA INTERMEDIA	IV a	V COMPLETAMENTE ALTERADO	HORIZONTE IB	
	IV ALTAMENTE ALTERADO	CAPA DE ROCA DESINTEGRADA	ZONA PARCIALMENTE ALTERADA	PARCIALMENTE ALTERADA	III	HORIZONTE IC (SAPROLITO)	
	III MODERADAMENTE ALTERADO					IV ALTAMENTE ALTERADA	IA TRANSICIÓN CON ROCA METEORIZADA SAPROLITO
	II ALGO ALTERADA					III MODERADAMENTE ALTERADA	
	I ROCA SANA	ROCA SANA	ROCA INALTERADA	ROCA INALTERADA	II DEBILMENTE ALTERADA	IB PARCIALMENTE METEORIZADO	
					IB MUY POCO ALTERADA	ROCA SANA	
					IA ROCA SANA		

Fuente: Modificado de manual de mecánica de suelo y cimentaciones.

Los sedimentos pueden ser transportados por cualquiera de los cinco agentes siguientes:

- Agua
- Aire
- Hielo

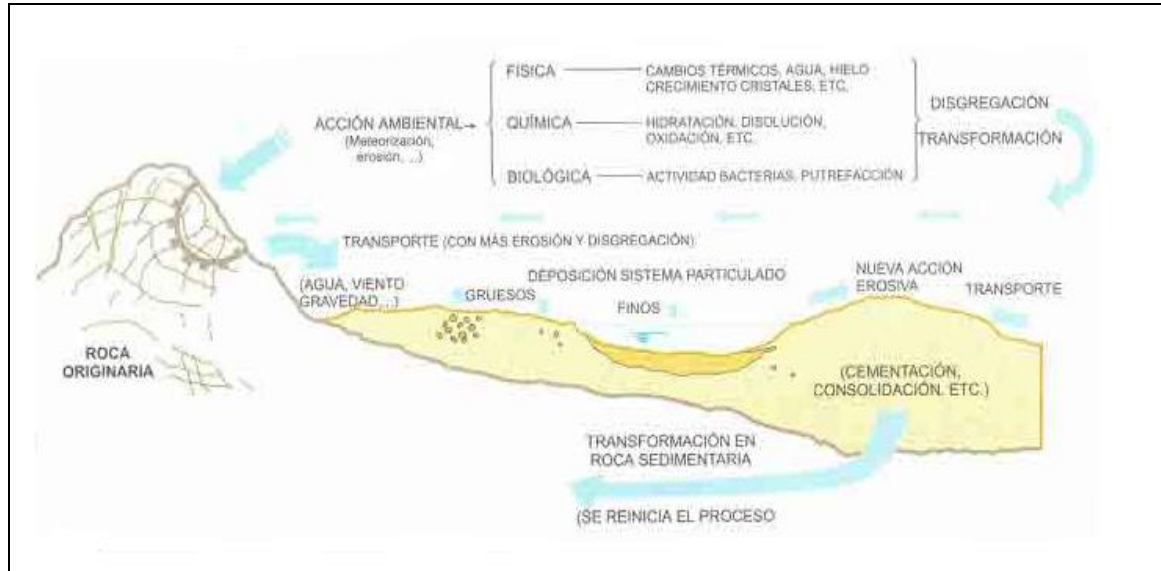
- Gravedad
- Organismos vivos

El transporte afecta a los sedimentos de dos formas principales:

- Modifica la forma, el tamaño y la textura de las partículas por abrasión, desgaste, impacto y disolución.
- Produce una clasificación o graduación de las partículas.

Después de que las partículas se han formado y han sido transportadas se depositan para formar un suelo sedimentario. Por tanto, el suelo es el resultado del proceso de meteorización de las rocas, con o sin transporte de los productos de alteración<sup>7</sup>.

**Figura 2. Esquema del proceso de formación de los suelos.**



*Fuente: Manual de mecánica de suelo y cimentaciones.*

<sup>7</sup> MUELAS, A. Manual de mecánica de suelo y cimentaciones. Capítulo 1: Caracterización de los suelos. P 3-5.

**3.1.2 Suelos residuales y transportados.** De acuerdo con el origen de sus elementos, los suelos se dividen en dos amplios grupos: suelos cuyo origen se debe a la descomposición física y/o química de la rocas, es decir suelos inorgánicos, y suelos cuyo origen es principalmente orgánico.

Si en los suelos inorgánicos el producto del intemperismo de las rocas permanece en el sitio donde se formó, da origen a un suelo residual; en caso contrario, forman un suelos transportado, cualquiera que haya sido el agente transportador (por gravedad: talud; por agua; aluviales o lacustres; por viento: eólicos; por glaciares: depósitos glaciales).

En cuanto a los suelos orgánicos, ellos se forman casi siempre in situ. Muchas veces la cantidad de materia orgánica, ya sea en forma de humus o materia no descompuesta, o en su estado de descomposición, es tan alta con relación a la cantidad de suelo inorgánico que las propiedades que pudieran derivar de la porción mineral quedan eliminadas<sup>8</sup>.

**Suelos residuales:** Son los que se forman en el sitio por procesos de meteorización física y química y se desarrollan principalmente, en condiciones tropicales húmedas, de meteorización química intensa (Reading, 1999). Las propiedades de los suelos residuales varían de una región a otra, debido a la naturaleza heterogénea de los ambientes tropicales. La meteorización está controlada por el clima regional, el relieve y la litología de la roca y estos factores varían de sitio en sitio<sup>9</sup>.

---

<sup>8</sup> CRESPO, C. Mecánica de suelos y cimentaciones. Capítulo 1: Mecánica de suelos. México, Limusa, 2004. P 21.

<sup>9</sup> SUAREZ, J. Deslizamientos: Análisis geotécnico. Capítulo 10: Suelos residuales. P 389.

**Suelos transportados:** se desarrollan sobre material meteorizado que fue erosionado en el lugar de meteorización y transportado a una nueva ubicación, donde se altera hasta formar el suelo<sup>10</sup>.

**3.1.3 Clasificación de suelos.** Las denominadas clasificaciones de suelos surgen a raíz del objetivo de dividirlos en grupos de comportamiento semejante, con propiedades geotécnicas similares.

Para poder asignar el suelo a un determinado grupo la mayoría de las clasificaciones de suelos suelen utilizar ensayos muy sencillos, para obtener así las características necesarias. Las propiedades básicas que utilizan las distintas clasificaciones son: la distribución granulométrica, los límites de Atterberg y el contenido de materia orgánica.

El principal sistema de clasificación usado actualmente es el sistema U.S.C.S por sus siglas en inglés Unified Soil Classification System, el cual fue propuesto inicialmente por Casagrande en 1942 y posteriormente revisado por el Bureau of Reclamation de Estados Unidos y por el Cuerpo de Ingenieros.

A continuación se muestra dicha clasificación, junto con los símbolos empleados en la misma (Ver tabla 1 y tabla 2).

---

<sup>10</sup> MONROE, J. Geología dinámica y evolución de la tierra. 4ta edición. Capítulo 6: Meteorización, suelo y rocas sedimentarias. P 158.

**Tabla 1. Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.).**

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACION DE SUELOS							
PROCEDIMIENTO DE CLASIFICACION EN EL CAMPO (Excluyendo las partículas mayores de 76 cm <sup>3</sup> y basando las fracciones en pesos estimados)					SÍMBOLOS DEL GRUPO (*)	NOMBRES TÍPICOS	
SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla N°200 (**)	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida en la malla N°4	GRAVAS LIMPIAS (Poco o nada de partículas finas)	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 poco o nada de finos
			Predominio de un tamaño a un tipo de tamaños, con ausencia de algunos tamaños intermedios			GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos
		GRAVAS CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	Fracción fina poco o nada plástica (Para identificación véase grupo ML abajo)			GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo
			Fracción fina plástica (Para identificación véase grupo CL abajo)			GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla
	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla N°4 (Para clasificación visual puede usarse 1/2cm como equivalente a la abertura de la malla N°4)	ARENAS LIMPIAS (Poco o nada de partículas finas)	Amplia gama en los tamaños de las partículas y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios			SW	Areñas bien graduadas, arenas con grava, con poco o nada de finos
			Predominio de un tamaño a un tipo de tamaños, con ausencia de algunos tamaños intermedios			SP	Areñas mal graduadas, arenas con grava, con poco o nada de finos
		ARENAS CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	Fracción fina poco o nada plástica (Para identificación véase grupo ML abajo)			SM	Areñas limosas, mezclas de arena y limo
			Fracción fina plástica (Para identificación véase grupo CL abajo)			SC	Areñas arcillosas, mezclas de arena y arcilla
	PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACION EN LA FRACCION QUE PASA LA MALLA N°40						
	SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS Más de la mitad del material pasa la malla N°200 (Las partículas de 0.074mm de diámetro (malla N°200) son aproximadamente las más pequeñas visibles a simple vista)	LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido menor de 50	RESISTENCIA EN ESTADO SECO (Características al rompimiento)	DILATANCIA (Reacción al agitado)	TENACIDAD (Consistencia cerca al límite)		
Nula a ligera			Rápida a lenta	Nula	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos a arcillosos ligeramente plásticos	
Media a alta			Nula a muy lenta	Media	CL	Arcilla inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas,	
Ligera a media			Lenta	Ligera	OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	
LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido mayor de 50		Ligera a media	Lenta a nula	Ligera a media	MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatómáceo, limos elásticos	
		Alta a muy alta	Nula	Alto	CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas	
		Media a alta	Nula a muy lenta	Ligera a media	OH	Arcilla orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad	

(\*) Clasificaciones de frontera - Los suelos que poseen las características de dos grupos se designan con la combinación de los dos símbolos. Por ejemplo GW - GC, mezcla de grava y arena bien graduada con cementante arcilloso

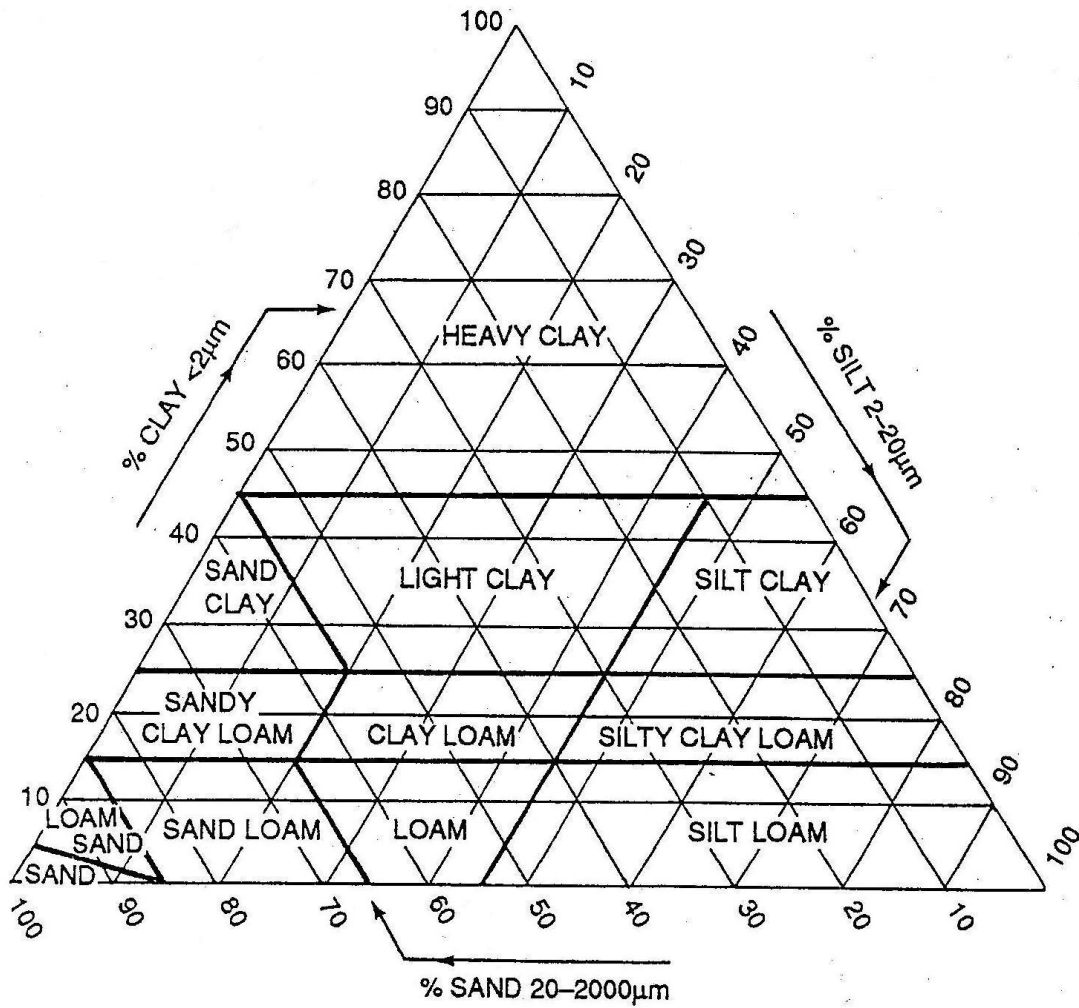
(\*\*) Todos los tamaños de las mallas en esta carta son los U S Standard

**Tabla 2. Criterio de clasificación en el laboratorio.**

CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO				
Usese la curva granulométrica para identificar las fracciones de suelo anotadas en la columna de indentificación en el campo	Determinese los porcentajes de grava y arena de la curva granulométrica. Dependiendo del porcentaje de finos (fracción que pasa la malla N°200) los suelos gruesos se clasifican como sigue: Menos del 5% GW, GP SW, SP Más del 12% GM, Gc, SM, SC 5% a 12% Casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles			
	Coeficiente uniformida (Cu); Coeficiente de cobertura (Cc) $Cu = D_{60}/D_{10}$ , mayor de 4; $Cc = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ , entre 1 y 3			
	No satisfacen los requisitos de graduación para GW			
	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">Límites de plasticidad debajo de la "línea A" o <math>I_p</math> menor que 4</td> <td rowspan="2" style="width: 50%;">Arriba de la "línea A" y con <math>I_p</math> entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles</td> </tr> <tr> <td>Límites de plasticidad arriba de la "línea A" con <math>I_p</math> mayor que 7</td> </tr> </table>	Límites de plasticidad debajo de la "línea A" o $I_p$ menor que 4	Arriba de la "línea A" y con $I_p$ entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles	Límites de plasticidad arriba de la "línea A" con $I_p$ mayor que 7
	Límites de plasticidad debajo de la "línea A" o $I_p$ menor que 4	Arriba de la "línea A" y con $I_p$ entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles		
	Límites de plasticidad arriba de la "línea A" con $I_p$ mayor que 7			
	$Cu = D_{60}/D_{10}$ , mayor de 6; $Cc = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ , entre 1 y 3			
	No satisfacen los requisitos de graduación para SW			
	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">Límites de plasticidad debajo de la "línea A" o <math>I_p</math> menor que 4</td> <td rowspan="2" style="width: 50%;">Arriba de la "línea A" y con <math>I_p</math> entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles</td> </tr> <tr> <td>Límites de plasticidad arriba de la "línea A" con <math>I_p</math> mayor que 7</td> </tr> </table>	Límites de plasticidad debajo de la "línea A" o $I_p$ menor que 4	Arriba de la "línea A" y con $I_p$ entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles	Límites de plasticidad arriba de la "línea A" con $I_p$ mayor que 7
	Límites de plasticidad debajo de la "línea A" o $I_p$ menor que 4	Arriba de la "línea A" y con $I_p$ entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles		
Límites de plasticidad arriba de la "línea A" con $I_p$ mayor que 7				
<b>EQUIVALENCIA EN SÍMBOLOS</b>				
G-Grava M-Limo O-Suelos orgánicos W-Bien graduado L-Baja compresibilidad S-Arena C-Arcilla R-Turba P-Mal graduado H-Alta compresibilidad				
<b>COMPARANDO SUELOS A IGUAL LÍMITE LÍQUIDO LA TENACIDAD Y LA RESISTENCIA EN ESTADO SECO AUMENTA CON EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD</b>				
<p style="text-align: center;">CARTA DE PLASTICIDAD PARA CLASIFICACIÓN DE SUELOS DE PARTICULAS FINAS EN EL LABORATORIO</p>				

Según la clasificación internacional I.S.S.S (International Society of Soil Science), para la determinación de la textura basándose en el tamaño de las partículas se usa el diagrama triangular mostrado a continuación (Ver figura 3).

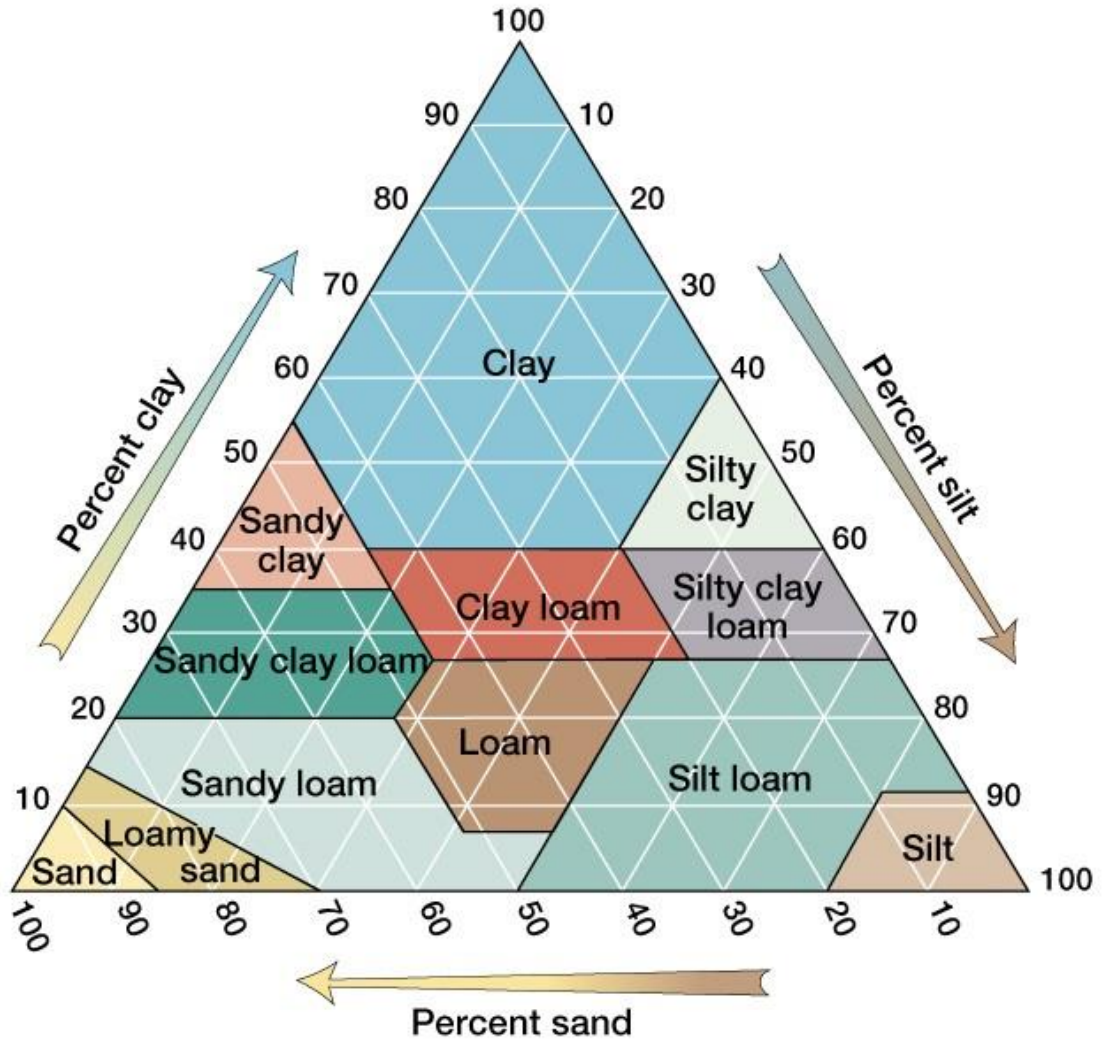
**Figura 3. Diagrama triangular para la determinación de la textura. Clasificación internacional I.S.S.S.**



**Soil textural triangle (ISSS system)**

Según la clasificación internacional U.S.D.A. (United States Department of Agriculture), para la determinación de la textura basándose en el tamaño de las partículas se usa el diagrama triangular mostrado a continuación (Ver figura 4).

Figura 4. Diagrama triangular para la determinación de la textura. Clasificación U.S.D.A.



### 3.2 TÉCNICAS NECESARIAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

Para identificar las propiedades físico-químicas que presenta un determinado suelo es indispensable someterlo a diferentes estudios que arrojan resultados como tamaño de las partículas, humedad óptima, humedad natural, distribución de los elementos químicos y distribución mineralógica.

Cada análisis cuenta con un procedimiento y unas normas previamente establecidas que se observan a continuación.

**3.2.1 Granulometría.** Para la determinación del análisis granulométrico se usa como base la norma INV E 123-07 del Instituto Nacional de Vías INVIAS, la cual tiene por objeto separar cuantitativamente el material de acuerdo al tamaño de las partículas las cuales se separan por medio de tamices dispuestos sucesivamente de mayor a menor apertura de malla y así determinar los porcentajes de suelo que pasan por cada una de ellas.

**Tabla 3. Abertura según el número de la malla.**

GRUESOS		FINOS	
MALLA N°	ABERTURA mm	MALLA N°	ABERTURA mm
2"	50,8	10	2
1 1/2"	36,1	20	0,84
1"	25,4	40	0,42
3/4"	19,05	60	0,25
1/2"	12,7	100	0,149
3/8"	9,52	200	0,074
N° 4	4,75	Pasa 200	-

Según sean las características de los materiales finos de la muestra, el análisis con tamices se hace, bien con la muestra entera, o bien con parte de ella después de separar los finos por lavado. Si la necesidad del lavado no se puede determinar por examen visual, se seca en el horno una pequeña porción húmeda del material y luego se examina su resistencia en seco rompiéndola entre los dedos. Si se puede romper fácilmente y el material fino se pulveriza bajo la presión de aquellos, entonces el análisis con tamices se puede efectuar sin previo lavado.

**3.2.2 Humedad Natural.** Según la norma INV E 122-07 la aplicación práctica de la determinación del contenido de agua en un material, es conocer la masa del agua

removida al secar dicho material cuando está húmedo (espécimen de prueba) hasta peso constante, en un horno controlado a  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{ C}$  ( $230^{\circ} \pm 9^{\circ} \text{ F}$ ); y usar este valor como la masa del agua en el espécimen de prueba. La masa del material remanente después de secado en el horno, corresponde a la masa de las partículas sólidas. El contenido de agua se calcula relacionando la masa de agua en la muestra húmeda con la masa de la muestra seca.

El contenido de agua en el material se calcula así:

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c} \times 100 = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Dónde:

$w$  = Contenido de agua en %

$W_1$  = Peso del recipiente y del espécimen húmedo, g.

$W_2$  = Peso del recipiente y del espécimen seco, g.

$W_c$  = Peso del recipiente, g.

$W_w$  = Peso del agua

$W_s$  = Peso de las partículas sólidas.

**3.2.3 Límites de Atterberg: Límite líquido y límite plástico.** La plasticidad de un suelo depende, no de los elementos gruesos que contiene, sino únicamente de sus elementos finos. El análisis granulométrico no permite apreciar esta característica, habiendo de recurrir al método descrito por el sueco Atterberg. Este método consiste en definir los límites correspondientes a los tres estados en los cuales puede presentarse un suelo: líquido, plástico o sólido. Estos límites, llamado límites de Atterberg, son: el limite liquido (LL), el limite plástico (LP) y el límite de retracción (LR). Para respetar las notaciones internacionales más empleadas, pueden ser llamados  $W_L$ ,  $W_P$  y  $W_S$ .

La determinación de estos límites se realiza solo sobre elementos finos que pasan por un tamiz de malla 0.42 mm (N°40). Estos no son, pues, valores representativos del conjunto de suelo y para apreciar todas las características de este, había que tener en cuenta la proporción de elementos gruesos y finos que contiene<sup>11</sup>.

Albert Mauritz Atterberg (Marzo 19, 1846 – Abril 4, 1916) fue un químico y agrónomo sueco, que estableció los tres límites que separan la consistencia en 4 estados.

**Tabla 4. Diagrama de consistencias de suelos finos, de Atterberg.**

Humedad, $w$ , creciente →				
Estados:	sólido	semisólido	plástico	semilíquido
Consistencia:	<i>dura</i>	<i>semidura</i>	<i>plástica</i>	<i>fluida</i>
Límites:		$w_r$	$w_p$	$w_l$

Fuente: El terreno

**Limite liquido (LL):** es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico, para la determinación del límite liquido de los suelos se debe utilizar la norma INV E – 125 – 07. Se determina con la ayuda de la Cazuela de Casagrande o Cuchara de Casagrande, se debe colocar la muestra de suelo en una vasija y se mezcla completamente con agua destilada entre 15 a 20 ml, agitándola, amasándola y tajándola con una espátula en forma alternada y repetida. Se realizan más adiciones de agua en incrementos de 1 a 3 ml. Cuando el agua y el suelo han sido mezclados perfectamente hasta formar una pasta uniforme de consistencia dura, se coloca una cantidad adecuada de esta mezcla

<sup>11</sup> SANZ, J., Mecánica de suelos, Reunión de ingenieros. Capítulo V: Identificación y clasificación de los suelos. Editores técnicos asociados S.A., Barcelona. P 36.

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

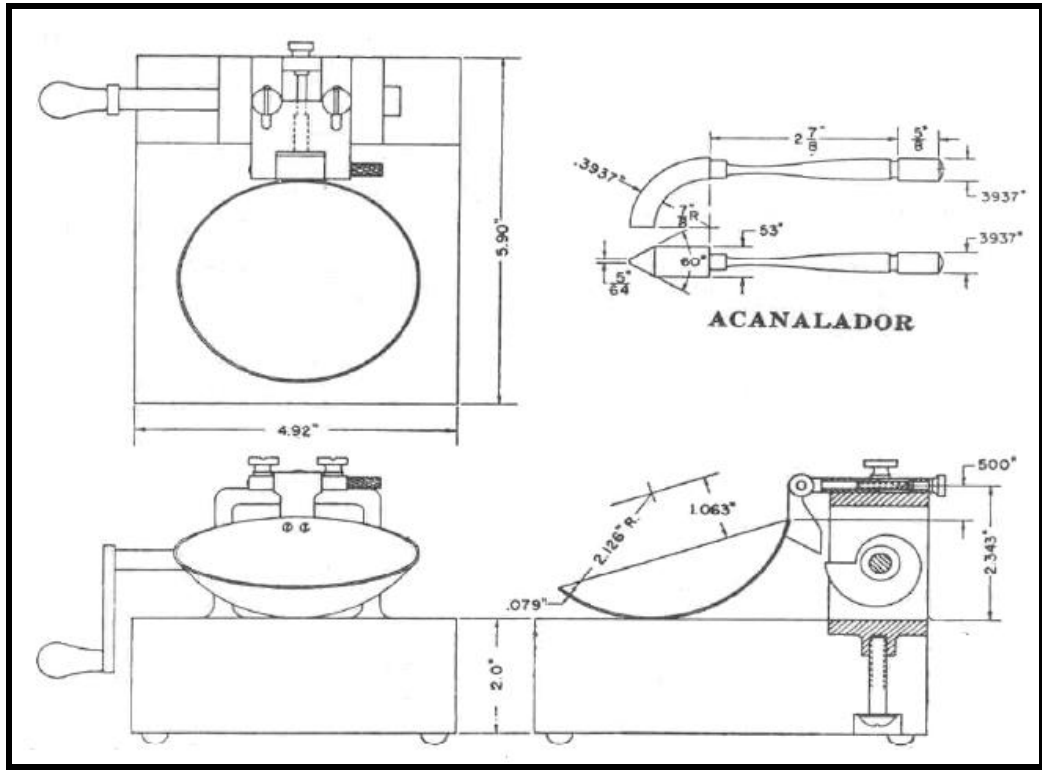
Se divide el suelo en la cazuela de bronce con una firme pasada del ranurador a lo largo del diámetro y a través de la línea central de la masa del suelo, de modo que se forme una ranura limpia y de dimensiones apropiadas.

Se levanta y golpea la cazuela girando la manija, a una velocidad de dos revoluciones por segundo, hasta que las dos mitades de la pasta de suelo se pongan en contacto en el fondo de la ranura a lo largo de una distancia de cerca de 13mm (0.5"). Se anota el número de golpes requeridos para cerrar la ranura.

Se saca una tajada de suelo, aproximadamente del ancho de la espátula y se coloca en un recipiente adecuado. Se pesa y se anota el valor. Se coloca el suelo con el recipiente dentro del horno a  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ) hasta obtener una masa constante y se vuelve a pesar tan pronto como se haya enfriado antes de que pueda haber absorbido humedad higroscópica. Se anota esta masa, así como la pérdida de masa debida al secamiento y la masa del agua.

Se repite la operación anterior tres veces, adicionando el suelo restante en la vasija de porcelana, al cual se le agrega agua suficiente para ponerlo en un estado de mayor fluidez. El objeto de este procedimiento es obtener muestras de tal consistencia que al menos una de las determinaciones del número de golpes requeridos para cerrar la ranura del suelo se halle en cada uno de los siguientes intervalos: 50 - 40; 40 - 30; 30 - 20 y 20 - 10, de manera que la oscilación entre las 4 determinaciones sea de, por lo menos, 10 golpes.

Figura 5. Cuchara de Casagrande y acanalador.



Fuente: Instituto nacional de vías, INVIAS.

Se calcula el contenido de humedad del suelo, expresándolo como porcentaje de la masa del suelo secado en el horno, como sigue:

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

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

Para el cálculo del límite líquido se debe utilizar la “curva de fluidez” que representa la relación entre el contenido de humedad y el correspondiente número de golpes de la cazuela de bronce, se dibuja en un gráfico semi-logarítmico, con el contenido de humedad como abscisa sobre la escala aritmética y el número de

golpes como ordenada sobre la escala logarítmica. La curva de flujo es una línea recta promedia que pasa tan cerca, como sea posible, de los tres o más puntos dibujados.

El contenido de humedad correspondiente a la intersección de la curva de flujo con la ordenada de 25 golpes se toma como Límite Líquido del suelo y se aproxima este valor al número entero más cercano.

**Límite plástico (LP):** El límite plástico de un suelo es el contenido más bajo de agua determinado por este procedimiento (Norma INV E 126 – 07), en el cual el suelo permanece en estado plástico. El índice de plasticidad de un suelo es el tamaño del intervalo de contenido de agua, expresado como un porcentaje de la masa seca de suelo, dentro del cual el material está en un estado plástico. Este índice corresponde a la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico del suelo.

$$IP = LL - LP$$

Dónde:

IP = Índice de plasticidad

LL = Límite líquido

LP = Límite plástico

Si se quiere determinar sólo el límite plástico, se toman aproximadamente 20 g de la muestra que pase por el tamiz de 425  $\mu\text{m}$  (N° 40). Se amasa con agua destilada hasta que pueda formarse con facilidad una esfera con la masa de suelo. Se toma una porción de unos 6 g de dicha esfera como muestra para el ensayo.

Se rueda la masa de suelo entre la palma de la mano o los dedos y el plato de vidrio esmerilado (o un pedazo de papel que esté sobre la superficie horizontal y lisa) con solo la presión necesaria para formar un rollo de diámetro uniforme en

toda su longitud. El rollo se debe adelgazar más con cada rotación, hasta que su diámetro alcance 3 mm, tomándose para ello no más de dos minutos. La presión requerida de la mano o de los dedos, variará en gran medida, dependiendo del tipo de suelo. Suelos frágiles de baja plasticidad se enrollan mejor bajo el lado exterior de la palma de la mano o la base exterior del pulgar.

El desmoronamiento puede ocurrir cuando el rollo tenga un diámetro mayor o igual a 3 mm. El desmoronamiento se manifestará de manera diferente con distintos tipos de suelos. Algunos suelos se desbaratan en numerosas agregaciones pequeñas de partículas; otros pueden formar una capa tubular que comienza partiéndose en ambos extremos. El resquebrajamiento continúa hacia el centro y finalmente el suelo se desbarata en muchas y pequeñas partículas lajosas. Suelos muy arcillosos requieren mayor presión para formar el rollo, especialmente cuando se aproximan a l límite plástico, partiéndose finalmente en una serie de segmentos en forma de barriles, cada uno de aproximadamente 6 a 9 mm de longitud.

Se unen las porciones de suelo desmoronado y se colocan en un recipiente previamente pesado. Se tapa el recipiente inmediatamente. Se repite la operación hasta obtener aproximadamente 8 g, se debe realizar el procedimiento una vez más y se deben llevar al horno a una temperatura de  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{ C}$  ( $230 \pm 9^{\circ} \text{ F}$ ) por alrededor de 45 minutos, se pesan las muestras húmedas y las muestras secas y se anotan los resultados, como se observa en la Figura 6.

Se calcula el Límite Plástico, expresado como el contenido de agua en porcentaje de la masa de suelo seca al horno, de la siguiente manera:

$$\text{Límite Plástico} = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de suelo secado al horno}} \times 100$$

Finalmente se debe sacar un promedio de los dos análisis y registrar el Limite Plástico, aproximado al número entero más cercano.

**Figura 6. Rollos desquebrajados al alcanzar el límite plástico.**



**3.2.4 Proctor Modificado.** La resistencia de un suelo depende de dos factores principalmente como lo son la compacidad y en consecuencia la densidad. Un suelo más compacto y denso, será más resistente.

De igual forma la resistencia de un suelo depende también de la cantidad de agua que este contenga. El agua contenida en un suelo lubrica los granos y les permite deslizarse los unos sobre los otros más fácilmente, pero una cierta humedad permite el movimiento de las partículas del suelo y en consecuencia su compactación.

Según Juárez y Rico (1975) “la compactación busca el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo provocando un aumento de resistencia y una disminución en la capacidad de deformación”<sup>12</sup>.

El ensayo empleado en la compactación de suelos es denominado ensayo *proctor* el cual tiene como finalidad determinar la cantidad óptima de agua de un suelo que permite la mejor compactación para una energía dada. Este ensayo está basado en el hecho de que la compacidad es proporcional a la densidad del terreno seco. La parte de una muestra de un suelo secado mediante estufa se compacta con una energía y una humedad fijas y se mide su densidad seca. Se realizan las mismas observaciones aumentando progresivamente la humedad y se dibuja finalmente una curva, siendo las abscisas las humedades y las ordenadas las densidades secas correspondientes, esta curva presenta un máximo para una cierta humedad que se llama por definición óptimo Proctor<sup>13</sup>.

El proctor modificado tiene un molde de 6 pulgadas de diámetro exterior y 6 pulgadas de altura, la compactación se realiza en 5 capas de 2.5cm de espesor, utilizando un compactador de 10 libras cayendo desde una altura de 18 pulgadas. Se dan 25 golpes por capa. El ensayo se hace sobre elementos del suelo inferiores a 20mm. Este procedimiento se debe realizar cuatro veces.

El primer método de compactación desarrollado fue el Proctor estándar pero conforme se avanzó en tecnología y se desarrollaron mejores equipos de compactación en campo, se desarrolló el Proctor modificado que aplica mayor energía a la muestra.

---

<sup>12</sup> Juárez B. E y Rico R. A. (1975). Mecánica de suelos Tomo 1: Fundamentos de la mecánica de Suelos. México: Limusa.

<sup>13</sup> SANZ, J. Mecánica de suelos. Capítulo 5: Identificación y clasificación de los suelos. P 40-41.

**3.2.5 CBR (California bearing ratio).** Este ensayo fue inventado por la División de Carreteras de California en 1.929 y nos permite determinar la Resistencia al Corte de un suelo bajo condiciones de Humedad y Densidad controladas.

Según ASTM D 1883 el CBR (California Bearing Ratio) se obtiene como un porcentaje del esfuerzo requerido para hacer penetrar un pistón una profundidad de 0.1 pulgadas en una muestra de suelo y el esfuerzo requerido para hacer penetrar el mismo pistón, la misma profundidad de 0.1 pulgadas, en una muestra patrón de piedra triturada.

La relación C.B.R. generalmente se determina para 0.1” y 0.2” de penetración, ósea para un esfuerzo de 1000 y 1500 libras por pulgada cuadrada en el patrón respectivamente. Con el fin de duplicar en el laboratorio la condición más crítica que se presenta en el terreno, las muestras para el ensayo del C.B.R. se sumergen en agua hasta obtener su saturación.

**Figura 7. Deformación de la muestra después de estar sumergido en agua por cuatro días.**



**3.2.6 Difracción de Rayos-X (DRX).** La difracción de rayos X (DRX) es una de las técnicas más eficaces para el análisis cualitativo y cuantitativo de fases cristalinas de cualquier tipo de material, tanto natural como sintético. Con DRX se puede saber además que tipo de moléculas están formando esos átomos. Dado que puede diferenciar incluso entre compuestos que tienen los mismos elementos

básicos (átomos). Un ejemplo de la capacidad de esta técnica es la Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y Aragonita ( $\text{CaCO}_3$ ) que tienen exactamente los mismos y la misma cantidad de átomos. Así para una técnica como Fluorescencia de Rayos X, estos dos compuestos son indistinguibles, esto no ocurre en DRX donde esos dos compuestos son perfectamente distinguibles el uno del otro. Debido a que el ordenamiento atómico en cada especie es distinto, por lo tanto, las distancias atómicas son distintas, lo que produce espectros diferentes en ambos casos (ver figura 19).

**3.2.7 Fluorescencia de Rayos-X (FRX).** La fluorescencia de rayos X es una técnica de espectroscopia atómica, la cual se basa en la transición de electrones de los átomos que se producen cuando una radiación electromagnética de cierta energía incide con el material a estudiar, de esta manera se produce una excitación del átomo que pasa de un estado estable a otro inestable o de mayor energía, resultando así transiciones en diferentes estados energéticos, los cuales son únicos para cada átomo.

En la espectrometría de fluorescencia de rayos X, se cuantifica la energía liberada cuando el electrón pasa de un orbital de mayor a menor energía, para esto se requiere de una radiación de rayos X produciendo fluorescencia en determinados materiales (Ver tabla 17).

La FRX se utiliza con fines de determinación y cuantificación de los diferentes elementos presentes en la muestra<sup>14</sup>.

**3.2.8 Microscopia electrónica de barrido “Scanning electron microscopy” (SEM).** La microscopia electrónica de barrido o SEM se basa en el principio de la microscopia óptica en la que se sustituye el haz de luz por un haz de electrones.

---

<sup>14</sup> MELÉNDEZ, C., y CAMACHO, A. Espectrometría de fluorescencia de rayos X. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Chihuahua. Enero 2009.

Con esto se consigue hasta los 100 Å de resolución, muy superior a cualquier instrumento óptico.

El funcionamiento consiste en hacer incidir un barrido de haz de electrones sobre la muestra, dicha muestra salvo que ya sea conductora esta generalmente recubierta con una capa muy fina de oro o carbón para otorgarle propiedades conductoras.

La técnica de preparación de las muestras se denomina “sputtering” o pulverización catódica.

### **3.3 ARCILLAS**

El termino arcilla puede tener varios significados dependiendo del punto de vista en que se observe, estos pueden ser: Mineralógicamente, las arcillas son un grupo de minerales (minerales de arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (<2µm). Petrológicamente, la arcilla es una roca sedimentaria en la mayor parte de origen detrítico, con características bien definidas, y en sedimentología, arcilla es un término granulométrico, que abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 2 µm.

Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan suelos<sup>15</sup>.

---

<sup>15</sup> GARCIA, E, y SUÁREZ, M., Las Arcillas: Propiedades y usos. Universidad Complutense. Madrid. P 3.

A continuación se dará un análisis más detenido sobre las propiedades físico-químicas de las arcillas y los minerales que las constituyen.

**3.3.1 Propiedades físico-químicas de las arcillas.** Los silicatos, se encuentran en las rocas ígneas y metamórficas y los agentes de descomposición química dan origen a las arcillas<sup>16</sup>

Según *Gino Picasso et Al.* (2008) la arcilla, desde el punto de vista químico-estructural, es una roca sedimentaria consistente en mezclas de distintos minerales, esencialmente silicatos hidratados de aluminio, hierro o magnesio, junto a diversas impurezas, en forma de partículas cristalinas extremadamente pequeñas y en proporciones variables.

Las propiedades físico-químicas que presentan las arcillas las hacen atractivas para aplicaciones industriales y dichas propiedades derivan, principalmente, de:

- Su extremadamente pequeño tamaño de partícula.
- Su morfología laminar.
- Las sustituciones isomorfas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

La elevada superficie específica con la que cuentan las arcillas es muy importante para ciertos usos industriales ya que la interacción solido-fluido depende directamente de esta propiedad la cual se define como “el área de la superficie externa más el área de la superficie interna de las partículas constituyentes por unidad de masa”.

---

<sup>16</sup> OLGUIN, J. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Mecánica de suelos 1. 2011, p 14.

Por otro lado la hidratación e hinchamiento que presentan las arcillas se debe a la absorción de agua en el espacio interlaminar el cual tiene como consecuencia la separación de las láminas para posteriormente dar lugar al hinchamiento.

Otra propiedad con la que cuentan algunas arcillas es la denominada Tixotropía la cual se refiere al fenómeno que consiste en la pérdida de resistencia de un coloide al ser amasado y su posterior recuperación con el tiempo, para que una arcilla tixotrópica muestre este comportamiento es necesario que tenga un contenido de agua próximo a su límite líquido.

Algunas arcillas cuentan con la capacidad de absorción elevada ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar o en las canales estructurales y está definida como una propiedad que se encuentra directamente relacionada con las características texturales que presentan como la porosidad y la superficie específica<sup>17</sup>.

Villarino Alberto en una conferencia sobre materiales cerámicos afirma que una de las principales propiedades de las arcillas es la plasticidad la cual se define como la capacidad de un cuerpo para deformarse bajo la acción de un esfuerzo y que aun después de retirada la causa que produjo dicho cambio este permanezca deformado. La plasticidad depende de muchas propiedades de las arcillas entre las que están el contenido de agua, la estructura laminar que presenta y el diminuto tamaño de las partículas.

**3.3.2 Intercambio catiónico.** La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se define como la capacidad que tienen las arcillas de adsorber y desadsorber cationes que se encuentran disponibles en la solución del suelo. Una diferencia a destacar es que las arcillas pueden retener cationes en su superficie externa. Este

---

<sup>17</sup> GARCÍA, E., SUAREZ, M., Las arcillas: propiedades y Usos. Universidad Complutense y Universidad de Salamanca. P 8.

mecanismo de retención se llama adsorción y es un fenómeno de superficie. Otras arcillas son capaces de retener cationes no solo en su superficie (adsorción) sino también inter e intra-laminarmente, proceso llamado absorción<sup>18</sup>.

Es un proceso reversible por lo cual las partículas sólidas del suelo adsorben iones de la fase acuosa, desadsorben al mismo tiempo cantidades equivalentes de otros cationes y establecen un equilibrio entre ambas fases. Estos fenómenos se deben a las propiedades específicas del complejo coloidal del suelo que tienen cargas electrostáticas y una gran superficie. La materia orgánica, las arcillas y los hidróxidos funcionan como “cambiadores”.

Como cationes cambiables en el suelo se presentan principalmente  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ , e  $\text{H}^+$ . Ellos forman el “enjambre” de iones que cubre el complejo coloidal. La suma de los cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ , y  $\text{Na}^+$  cambiables se denomina bases cambiables y su porcentaje dentro de la capacidad total de intercambio se denomina porcentaje de saturación. El  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , y  $\text{Mn}^{2+}$  cambiables se agrupan bajo la acidez cambiable. La suma de la acidez y de las bases cambiables es la capacidad de intercambio catiónico<sup>19</sup>.

**3.3.3 Minerales constitutivos de las arcillas.** Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados, y presentando en algunos casos, silicatos de magnesio, hierro y otros metales, también hidratados. Estos minerales, generalmente, tienen una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas.

Existen dos variedades de estas láminas: la sílica y alumínica.

---

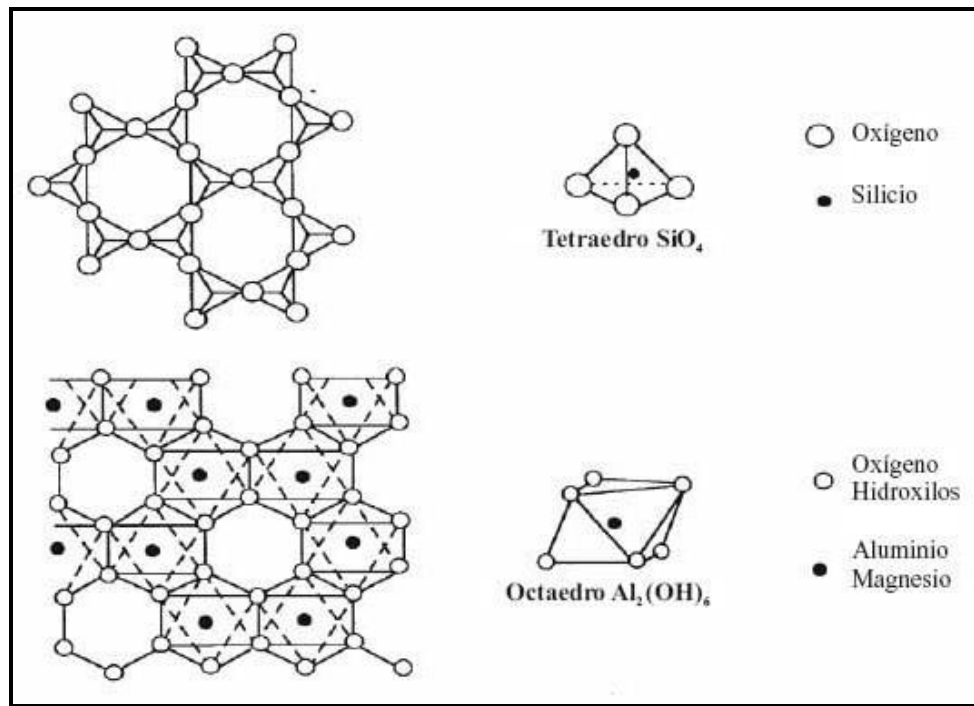
<sup>18</sup> NÚÑEZ, J., Fundamentos de edafología. Tema IV: Química y fertilidad de suelos; La capacidad de intercambio catiónico (CIC). Editorial EUNED, San José, Costa Rica, 2000. P 90.

<sup>19</sup> FASSBENDER, H., Química de suelos. Capítulo 5: Intercambios catiónicos aniónicos. Instituto interamericano de ciencias agrícolas de la OEA. Turrialba, Costa Rica. 1975. P 119.

**Estructura de lámina silíca:** formada por un átomo de silicio, rodeado de cuatro de oxígeno, disponiéndose en forma de tetraedro. Estos tetraedros se agrupan en formas hexagonales, sirviendo un átomo de oxígeno de nexa entre cada dos tetraedros.

**Estructura de lámina aluminica:** están formadas por retículas de octaedros, dispuestos con un átomo de aluminio al centro y seis de oxígeno alrededor. El oxígeno también es el nexa entre cada dos octaedros vecinos, para constituir la retícula<sup>20</sup>. Como se observa en la figura 8.

**Figura 8. Representación esquemática de las capas tetraédricas (superior) y octaédricas (inferior).**



Fuente: Aplicaciones tecnológicas de las arcillas modificadas.

<sup>20</sup> JUAREZ, E. y RICO, A., Mecánica de suelo. Tomo I: fundamentos de la mecánica de suelos. Capítulo I. Suelos: Origen y formación. Minerales constitutivos. Editorial Limusa. México. 2005. P 38.

De acuerdo con su estructura reticular, los minerales de arcilla se encuentran en tres grandes grupos: caolinitas, montmorillonitas e illitas. Ver figura 9.

**Caolinita ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ):** puede concebirse como la superposición de una capa de  $[(SiO_3)^{2-}]$  sobre una capa octaédrica de composición  $OHO_2Al_2(OH)_3$ , en la cual átomos de oxígeno octaédrico satisfacen la cuarta valencia del silicio. En otras palabras se dice que la estructura caolinitica está formada por unión de una capa tetraédrica de silicio con una octaédrica de aluminio.

**Montmorillonita  $[(OH)_4(Si_8Al_3O_{20} \cdot nH_2O)]$ :** Las partículas tienen dimensiones que no sobrepasan los 100-200 Å y están formadas por una superposición irregular de unidades de estructura comparables a las de la pirofilita o talco. Estructuralmente están formadas por una capa alumínica entre dos capas silíceas, la unión entre las retículas es débil lo que facilita que las moléculas de agua se introduzcan en la estructura de manera relativamente fácil, produciendo un incremento en el volumen de los cristales lo que se traduce en una posterior expansión.

**Illita  $[(OH)_4 \cdot K_y (Si_{8-y} \cdot Al_y) (Al_4 \cdot Fe_4 \cdot Mg_4 \cdot Mg_6) \cdot O_{20}]$ :** Con y generalmente igual a 1.5, presentan una hoja unitaria constituida por una capa octaédrica en medios de dos capas de tetraedros de sílice cuyos vértices apuntan en la misma dirección. Se clasifican en dioctaédricas y trioctaédricas, y se consideran derivados de la moscovita y flogopita<sup>21</sup>.

---

<sup>21</sup> BESOAIN, E., Curso de mineralogía de suelos. Minerales secundarios del suelo. Instituto interamericano de ciencias agrícolas de la OEA. Turrialba, Costa Rica. 1970. P 135.

**Figura 9. Composición mineral de partículas de diferentes rangos de tamaños.**

Tamaño de Partícula (µm)	Constituyentes predominantes	Constituyentes comunes	Constituyentes raros
0,1	Montmorillonita-Beidellita	Mica intermedia	Illita
0,1-0,2	Mica intermedia	Caolinita-Montmorillonita	Illita-cuarzo
0,2-2,0	Caolinita	Illita-Mica intermedia	Cuarzo
		Micas	Montmorillonita
		Halosyta	Feldespatos
2,0-11,0	Micas	Cuarzo	Halosyta
	Illitas	Caolinita	Montmorillonita
	Feldespatos		

Fuente: J.K. Mitchell

### 3.4 CEMENTO

Según *Sanjuán Barbudo et al.* en su libro *Cemento Portland: Fabricación y expedición* (2004) indica que el cemento es un conglomerante hidráulico lo que quiere decir que después de ser amasado con agua, fragua y endurece tanto al aire como sumergido en agua, siendo los productos resultantes estables en ambos medios. Por fraguado se entiende la trabazón y consistencia inicial de un conglomerante; una vez fraguado, el material puede seguir endureciéndose.

Su uso habitual es en combinación con otros materiales y aunque existen diferentes clases de cementos el más utilizado es el cemento portland.

**3.4.1 Especificaciones técnicas.** Como se observa en la Tabla 5, se determina la ficha técnica del cemento CEMEX.

**Tabla 5. Información técnica del cemento CEMEX.**

INFORMACIÓN TÉCNICA		
<b>Resistencias a compresión (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>		
1 día	60 - 100	NA
3 días	130 - 190	Mínimo 80
7 días	170 - 240	Mínimo 150
28 días	245 - 300	Mínimo 240
<b>Análisis físicos</b>	<b>Rango resultados</b>	<b>Requisitos Norma NTC121</b>
Superficie específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3000 - 6000	Mínimo 2800
Tiempos de fraguado Vicat (minutos)		
Inicial	100 - 180	Mínimo 45
Final	180 - 260	Máximo 480
Expansión en autoclave (%)	0,00 - 0,20	Máximo 0,80
<b>Análisis químicos</b>		<b>Requisitos Norma NTC321</b>
% SO <sup>3</sup>	1,50 - 3,00	Máximo 3,5
%MgO	1,00 - 3,00	Máximo 7,0
<small>Cumple las normas NTC 121 y 321 para Cemento Portland Tipo I.                      Producto elaborado bajo un sistema de gestión de calidad certificado con ISO 9001 por ICONTEC.</small>		

Fuente: CEMEX

### 3.5 RESIDUO DE CONSTRUCCIÓN

Los residuos de construcción generan un desafío importante en el sector de la construcción, puesto que la energía, los materiales, el agua y la tierra se encuentran relacionados con este. La reducción en el uso de recursos minerales y la conservación del medio ambiente, requieren del empleo de materiales renovables o reciclados/reusados, según la selección de los mismos y la predicción de la vida en servicio. Es por esto que la reutilización de residuos de construcción nace como alternativa para el ahorro (Bajo costo), reducción del CO<sub>2</sub> (Disminución en la producción de cemento) y reciclado de materiales, que

desarrollan nuevas técnicas amistosas con el medio ambiente para la reparación de la infraestructura vial<sup>22</sup>.

**3.5.1 Características del residuo de construcción.** Los residuos de las obras de construcción tienen una característica singular: Mientras que la mayoría de otros residuos se generan en sitios concretos, asociados a las industrias productoras, estos residuos de construcción aparecen de forma diseminada y generalizada en todos los entornos urbanos con producciones similares.

Los residuos de construcción y demolición (RCD), aglutinan las características base de los materiales que en su día constituyeron la materia prima de la obra de la que proceden. En función de su origen es posible distinguir dos grandes grupos de residuos de construcción: Los que proceden de una única obra y los que se proceden de la mezcla de múltiples obras.

Es evidente que cuando el RCD procede de una deconstrucción controlada con un único origen o una única obra (demolición de un pavimento de carretera/aeropuerto o de un gran edificio) su rango de propiedades es limitado y conocido por lo que su aprovechamiento o tratamiento en estos casos es fácil, y su empleo contaría con las ventajas e inconvenientes de otros tipos de residuos (escorias, cenizas, etc.). Así, frente a una calidad controlada y conocida, los problemas en este caso son de volumen y localización, que limitan mucho el posible ámbito de empleo.

En el caso del conocido como residuo “mixto” o que procede de la mezcla de múltiples obras, de origen diverso y desconocido, su composición suele estar relacionada con el peso proporcional de cada material en la construcción. No

---

<sup>22</sup> SALAZAR, A., El futuro de los materiales de construcción, un avance hacia la sostenibilidad ambiental y económica de la construcción. Unidad de planeación minero energética. Ministerio de minas y energía. Bogotá, 2011.

obstante, el hecho de la demolición o vertido incontrolado introduce una variedad en estas propiedades que no tiene por qué llevar a un desconocimiento total.

Los materiales que componen un residuo mixto se recogen en los grupos siguientes de la Lista Europea de Residuos (Tabla 6):

**Tabla 6. Residuos admitidos a tratamiento**

RESIDUOS ADMITIDOS A TRATAMIENTO		
C.E.R. A-17 Residuos de Construcción y Demolición		
17-01-01	HORMIGON	Hormigón en Masa Hormigón Armado Prefabricados de Hormigón, Etc.
17-05-01	SUELOS Y PIEDRAS	Aridos, Terrazos, Granito Mármol, Etc.
17-01-02/03	CERAMICOS	Fábrica de ladrillo, Tejas Rasillones, Bloques, etc
17-03-00	ASFALTO	Capas de Rodadura, Etc
17-07-01	RCD, MEZCLADOS	Límite máximo de mezclas con productos mixtos (% por Planta) (Maderas, Plásticos, Papel, Cableado eléctrico, etc.)

Fuente: BAUZÁ, J., Características de los residuos.

En cuanto a su proporción, aunque depende claramente de la geografía, dado que los materiales usuales cambian en cada región, un ejemplo típico suele contener un 80 % de materiales de origen “pétreo” (cerámicos, hormigón, asfalto y piedras) y un resto variado de maderas, metales, vidrios, plásticos, etc.

En cuanto al origen por procesos, y aunque hay pocos datos al respecto, un estudio argentino reparte la siguiente cifra:

- 10 % de los procesos de demolición;
- 20 % de las obras de nueva construcción, en forma de “sobrantes”; y

- 70 % de las obras de rehabilitación y/o reparación<sup>23</sup>.

**3.5.2 Impacto generado por el residuo de construcción.** Se considera un problema ambiental y social para las ciudades, cuando los proyectos de infraestructura reflejan ausencia de gestión, control y correctivas, además de poca sensibilización. Solamente en la ciudad de Bogotá D.C. los procesos de expansión y desarrollo urbano, y el crecimiento demográfico, generaron en el año 2011, un volumen aproximado de escombros (Denominados Residuos de Construcción y Demolición – RCD) de 13 millones de t/año; correspondiente al material sobrante de las actividades de construcción y obras civiles.

El panorama en los países industrializados difiere al del país (en Colombia, estas actividades son enfocadas primeramente a los Residuos Sólidos Domiciliarios (RSD)), mientras que estos países promueven el reciclaje y reúso de toda clase de residuos, incluyendo los RCD, como principal objetivo de los planes estratégicos, dirigidos a un manejo sostenible e integral de los recursos<sup>24</sup>.

En general, los residuos generados en las fases de la construcción RCD, o generalmente conocidos como “Escombros” por la comunidad, son materiales inertes generados en todas y cada una de las etapas por las que pasa una obra, a lo largo de su vida útil (que se estima es alrededor de cincuenta años); constituyendo cerca del 60% de la cantidad total de los residuos generados en las ciudades, los cuales al aumentar su cantidad, aproximadamente, con una tasa de tendencia de 4%, desencadenan diversos impactos negativos para el medio ambiente y la sociedad. Su inadecuada gestión por los centros urbanos ha sido objeto de análisis a nivel nacional e internacional; dando soluciones como el diseño y la implementación de sistemas productivos, y plantas o unidades de

---

<sup>23</sup> BAUZÁ, J., Características de los residuos. Aprovechamiento de residuos. Elabora, S.L P 3-5

<sup>24</sup> GUARIN, A., et. al. Estudio comparativo en la gestión de residuos de construcción en Brasil y Colombia. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá.

reciclaje, que han permitido considerarlos como potencial materia prima de reincorporación a las cadenas productivas<sup>25</sup>.

En la ciudad el amb (Acueducto metropolitano de Bucaramanga) propone un modelo alternativo de gestión de escombros para darle un correcto uso a los escombros procedentes de las actividades de construcción. En el cual la propuesta es incluirlo dentro del marco dispuesto en el Plan de gestión integral de residuos sólidos PGIRS del AMB, de tal manera que todos los generadores estén obligados a llevar los escombros a la planta de tratamiento para su respectiva valorización o eliminación<sup>26</sup>.

### **3.6 ESTABILIZACIÓN DEL SUELO**

La estabilización de suelo se define como el cambio o alteración de sus propiedades con el fin de obtener un material de mejor calidad, que pueda soportar las cargas a las que va a ser sometido. Por lo general los suelos colombianos en su estado natural no poseen una capacidad de soporte que sea aceptable para resistir las cargas determinadas para cada proyecto, principalmente en el campo de la infraestructura vial y pavimentos. Los principales factores que generan inestabilidad en un suelo están ligados a las propiedades intrínsecas de estos, como: Resistencia mecánica, tamaño y forma de partículas, estabilidad volumétrica, compresibilidad, durabilidad y permeabilidad<sup>27</sup>.

---

<sup>25</sup> CHAVÉZ, A., Unidad logística de recuperación de residuos de construcción y demolición: Estudio de caso Bogotá D.C. Universidad militar de nueva granada. Bogotá, 2014.

<sup>26</sup> ACOSTA, M., Propuesta para la implementación de planta de tratamiento de residuos de construcción en el área metropolitana de Bucaramanga. Universidad pontificia bolivariana. Bucaramanga, 2010.

<sup>27</sup> FLOREZ, J., Estabilización de suelo con biocemento. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería civil. Bogotá, 2006.

La estabilización es generalmente un proceso mecánico, físico, físico-químico y químico (Ver Tabla 7) que permite modificar las características de un suelo con el fin de modificar su comportamiento en cuanto a la resistencia y deformación. Para disminuir los cambios volumétricos de un suelo, se puede incorporar un aditivo a este, los métodos más comunes involucran el uso de cal y como nueva alternativa se propone el uso de residuo de construcción<sup>28</sup>.

Para evaluar el cambio en las propiedades y características del suelo se deben realizar los siguientes estudios geotécnicos:

- Humedad natural
- Límites de Atterberg (Limite líquido y limite plástico)
- Densidad y humedad óptimas de compactación (Proctor modificado)
- Resistencia (Ensayo de California bearing ratio CBR)

Y teniendo en cuenta las variaciones composicionales se realiza:

- Microscopia electrónica de barrido (SEM)
- Difracción de Rayos-X (DRX)

Estos ensayos se realizan antes y después de la estabilización de suelo con residuo de construcción, permitiendo evaluar sus características y variaciones composicionales.

---

<sup>28</sup> LOPEZ, T., et. al, Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas. En: Revista iberoamericana de polímeros. Mayo, 2010, vol. 11, no. 3, p. 163.

**Tabla 7. Tipos de estabilización.**

TIPO	ESTABILIZACIÓN	PRODUCE
Mecánica	Proceso de compactación	Densificación
Física	Granulometría Suelo Betún	Ficción y cohesión Cohesión impermeabilización
Físico-química	Suelo-Cal	Intercambio iónico y cementación
Química	Suelo-Cemento	Intercambio iónico y cementación

*Fuente: Modificado de Dorfman, B., Estabilización de suelo.*

**3.6.1 Estabilización mecánica.** La estabilización mecánica es una técnica de mejora basada en la mezcla de diversos materiales con propiedades complementarias, de forma que se obtenga un nuevo material de mayor calidad y que cumpla las exigencias deseadas.

Las propiedades que generalmente se pretenden mejorar con este tipo de estabilización son la plasticidad y/o granulometría; la primera afecta a la susceptibilidad del material al agua y su capacidad drenante; la segunda incide sobre su resistencia, trabajabilidad y compacidad final.

La ejecución de una estabilización mecánica puede llevarse a cabo en el propio lugar de empleo (in situ) o en una central de tratamiento de áridos; requiere una serie de operaciones que, aunque omisibles o variables en su orden, suelen ser las siguientes:

- Escarificación y pulverización –reducción a polvo- del suelo, si el procedimiento se realiza in situ, o pulverización únicamente si se realiza en central. En el caso de las gravas este paso es innecesario.
- Mezcla íntima y homogénea de los materiales, tanto en obra, empleando una grada de discos, como en central, empleando tolvas dosificadoras.

- Extensión y nivelación de la mezcla.
- Humectación y compactación de la misma hasta alcanzar la densidad mínima prescrita en la obra, generalmente el 95 o 100% del proctor modificado<sup>29</sup>.

**3.6.2 Estabilización física.** Este método se utiliza para mejorar el suelo produciendo cambios físicos en el mismo, sin que se produzcan reacciones químicas de importancia. Hay varios métodos como lo son:

- a) Estabilización por compactación la cual consiste en comprimir los granos entre sí aumentando así su fricción interna (compacidad), lo que incrementa su poder soportante. Aunque mejora la calidad de los suelos, ella por sí sola no proporciona la resistencia y durabilidad que necesitan las capas del suelo. Esta técnica se divide en tres modalidades: compactación, precarga y drenaje.
- b) Estabilización empleando la mezcla de suelos la cual es de amplio uso pero por si sola no logra reducir los efectos deseados, necesitándose siempre de por lo menos la compactación como complemento. Por ejemplo, los suelos de grano grueso tienen una alta fricción interna lo que lo hacen soportar grandes esfuerzos, pero esta cualidad no hace que sea estable como para ser la superficie de rodamiento de una carretera ya que al no tener cohesión sus articulaciones se mueven libremente. Las arcillas, por el contrario tienen una gran cohesión y muy poca fricción lo que provoca que pierdan estabilidad cuando hay mucha humedad. La mezcla adecuada de estos dos tipos de suelo pueden dar como resultado un material estable en el que se puede aprovechar la gran fricción interna de uno y la cohesión del otro para que las partículas se mantengan unidas.

---

<sup>29</sup> BAÑÓN, L., BEVIÁ, J., Manual de Carreteras, vol. 2, Construcción-mantenimiento. Capítulo 22, Capas Granulares. P 17-18.

- c) Elementos prefabricados: consiste en la incorporación de elementos como geomallas y/o tierra armada, las cuales actúan incrementando la cohesión y el ángulo de fricción del material, aumentando su capacidad portante.
- d) Vibroflotación: es aplicable en arenas o suelos con alta permeabilidad y consiste en la inserción de un dispositivo vibratorio, capaz de aplicar un chiflón de agua simultáneamente con el vibrado, de tal manera que al encontrarse dicho dispositivo dentro del suelo inyectando agua y vibrando se produce la licuación de la arena logrando con ello su compactación<sup>30</sup>.

**3.6.3 Estabilización química.** Según *Solminac (1989)* la estabilización química consiste en alterar las propiedades del suelo usando cierto aditivo (ej., residuo de construcción), el cual al ser mezclado con el suelo, generalmente produce un cambio en las propiedades moleculares superficiales de los granos del suelo y en algunos casos, pega los granos entre sí de modo de producir un incremento en su resistencia.

La estabilización química se refiere principalmente al uso de ciertas sustancias y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el procesos. Las sustancias químicas más usadas son: la cal y el cemento.

- Cal: disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es económica.
- Cemento portland: aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o arcillas.

---

<sup>30</sup> VALDEZ, C., Estudio comparativo de estabilización de un suelo arcilloso altamente expansivo, utilizando un co-polimero multienzimático. Universidad Michoacana De San Nicolás De Hidalgo. 2008 P 17.

Los porcentajes adecuados para cada agente estabilizante varían de acuerdo al autor, por lo que se debe tener en cuenta las características del suelo a estabilizar y las condiciones climáticas del entorno. Al usar un agente estabilizante tipo inorgánico, soluble en agua (ej. Cal o cemento), se espera que a nivel microscópico aumente la actividad puzolánica que produce al mezclar el suelo y el estabilizante, para que de esta manera pueda formar compuestos con propiedades cementantes, dando como resultado una reacción de combinación (puzolánica) o síntesis<sup>31</sup>.

**3.6.3.1 Reacciones puzolánicas:** Una puzolana es una materia que es esencialmente sílice que finamente dividida no posee ninguna propiedad hidráulica, pero posee constituyentes tanto sílice como aluminio capaces a temperatura ambiente, de fijar el hidróxido de cal para dar compuestos estables con propiedades hidráulicas.

Generalmente son carentes de propiedades cementantes y de actividad hidráulica, pero contienen constituyentes que se combinan con cal a temperatura ambiente y en presencia de agua, que dan lugar a compuestos permanentemente insolubles y estables que se comportan como conglomerantes hidráulicos. En tal sentido, las puzolanas dan propiedades cementantes a un conglomerante no hidráulico como es la cal. Las puzolanas, según su origen, se clasifican en dos grandes grupos el de las naturales y el de las artificiales, aunque puede existir un grupo intermedio constituido por puzolanas naturales que se someten a tratamientos térmicos de activación.

La actividad puzolánica se refiere a la cantidad máxima de hidróxido de calcio con la que la puzolana puede combinar y la velocidad con la cual ocurre esta reacción.

---

<sup>31</sup> BALLESTEROS, Fernanda y Mantilla, Nathalia. Aplicación del residuo de minería (Lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander. Trabajo de grado. Bucaramanga. Universidad industrial de Santander. Facultad de físico-químicas, 2014. P 55.

*Puzolana + Cal + Agua → Silicatos y Aluminatos de Calcio hidratados*

La actividad puzolánica depende: de la naturaleza y proporción de las fases activas presentes en la puzolana (composición mineralógica), de la relación cal – puzolana de la mezcla, de la finura (o superficie específica) de la puzolana y de la temperatura de la reacción<sup>32</sup>.

**3.6.3.2 Estabilización con cemento:** El cemento, mezclado íntimamente con el suelo, proporciona a la mezcla la resistencia mecánica o la capacidad de soporte exigida y mejora tanto su durabilidad, entendiéndose por tal la resistencia a los agentes físicos y químicos agresivos, como la estabilidad dimensional.

En los suelos estabilizados con cemento el tipo de conglomerante tiene una importancia menor en comparación con la dosificación del mismo o la densidad alcanzada en la compactación. Los cementos más adecuados son los que presentan las siguientes propiedades:

- Inicio y final de fraguado suficientemente largos, de forma que se tenga un elevado plazo de trabajabilidad
- Moderado calor de hidratación, para limitar los efectos de la fisuración por retracción (ancho de fisuras y distancia entre las mismas), principalmente en épocas calurosas
- Desarrollo lento de resistencias y módulos de rigidez a edades tempranas, recuperándolas a largo plazo.

Con la estabilización con cemento se obtienen efectos inmediatos y a largo plazo. Los efectos inmediatos se refieren principalmente al estado hídrico del suelo, que sufre un secado por el hecho de la adición de una cierta cantidad de materia seca

---

<sup>32</sup> SALAZAR, A., "Síntesis de la tecnología del concreto. Una manera de entender a los materiales compuestos", 3° edición, Corporación Construir, Cali, 2002.

y, en menor medida, de la pérdida de agua consumida en la hidratación del conglomerante. Los efectos a medio y largo plazo resultan del fraguado y endurecimiento del conglomerante, los cuales proporcionan a los suelos tratados una resistencia mecánica que puede ser predominante en su comportamiento. El valor de esta resistencia varía ampliamente y es función, principalmente, del tipo de conglomerante y de la dosificación del mismo<sup>33</sup>.

La gama de suelos que se pueden estabilizar con cemento es muy amplia. Aunque son los suelos granulares los que presentan una mejor y más rápida mejora de resultados ante una reducida aportación de cemento, no se debe a priori eliminar otros tipos, pues se dan casos de suelos de elevada plasticidad cuyo comportamiento es mejor al ser mezclados con cemento que con cal (por la presencia, por ejemplo, de carbonatos).

En los suelos estabilizados con cemento, las dotaciones de cemento varían ampliamente según el tipo de suelo que se utilice. Para evitar elevados contenidos de conglomerante, se suele restringir la estabilización con cemento a los suelos que cumplen las siguientes condiciones:

- Índice de plasticidad  $IP < 15$
- Límite líquido  $LL < 40$
- Pase por el tamiz UNE 2 mm  $< 20 \%$
- Pase por el tamiz UNE 0,063 mm  $< 35 \%$ <sup>34</sup>.

---

<sup>33</sup> JOFRE, C., et al. Manual de estabilización de suelos con cemento o cal. Capítulo 2. Materiales básicos. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. 2008. p 22, 34-35.

<sup>34</sup> ABASCAL, J., estabilización de suelos con cemento. Guías técnicas. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. P 3-4.

## **4. METODOLOGÍA**

El presente trabajo se enfoca en evaluar el comportamiento de los residuos de construcción en la estabilización física y química de suelo residual arcilloso por lo que seguir una metodología es fundamental para poder dar cumplimiento a los objetivos planteados. Dicha metodología se presenta y describe a continuación.

### **4.1 ACTIVIDAD 1 - ADQUISICIÓN, SELECCIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN**

El estudio de la estabilización física y química de suelos se hace extenso y con lleva a la adquisición de una amplia bibliografía ya que deriva de otros temas, algunos más relevantes que otros por lo que la posterior selección y organización del material es de vital importancia para un correcto uso, desarrollo y entendimiento del tema. Para la adquisición de dicha información acudimos a bases de datos proporcionadas por los recursos electrónicos de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander así como también libros, tesis de grado, artículos y material de circulación libre en internet. Posteriormente en la selección y organización de la información se tuvo en cuenta la confiabilidad de la fuente, así como la claridad y el buen desarrollo del tema. Esta etapa nos permitió ahondar en los diferentes temas y de esta manera despejar las dudas que iban surgiendo durante el desarrollo del proyecto ya que es de carácter continuo y se lleva a cabo durante todo el proceso y hasta la finalización del mismo.

## 4.2 ACTIVIDAD 2 - RECOLECCIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

En esta actividad se recolectaron los materiales necesarios para el desarrollo de esta investigación., para después ser trasladados al laboratorio de Caracterización de Materiales del edificio “Álvaro Beltrán Pinzón” y al edificio de investigación del Parque Tecnológico de Guatiguará.

**4.2.1 Recolección.** El suelo residual arcilloso fue obtenido de la formación Bucaramanga, vereda Llanadas, municipio de San Juan de Girón, Santander (Ver figura 10). El residuo de construcción (bloque de arcilla, bloque de cemento y escombros de concreto) fue tomado de la remodelación de una casa. El cemento portland utilizado (CEMEX) es de venta libre en el mercado.

**Figura 10. Suelo residual arcilloso.**



**4.2.2 Preparación de las muestras.** Una vez recolectados todos los materiales fueron transportados al laboratorio de Caracterización de Materiales de Construcción el cual es una dependencia de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, en el edificio “Álvaro Beltrán Pinzón”, posteriormente fue necesario transportar las muestras al Laboratorio de difracción de rayos X (DRX), y el laboratorio de Microscopia Electrónica de barrido (SEM) el cual pertenece al edificio de investigación del Parque Tecnológico de Guatiguará Centro de la Universidad Industrial de Santander para la caracterización física y química. Una pequeña parte de la muestra del suelo residual arcilloso fue llevado al laboratorio de Geología para la realización de una sección delgada, en donde se cortó, pulió y fue aplicado todos los procedimientos necesarios para la elaboración de la sección delgada, que posteriormente fue analizada en el laboratorio de petrografía de la Escuela de Geología.

### **4.3 ACTIVIDAD 3 - ESTUDIOS Y ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS**

Durante el desarrollo de esta actividad se realiza la caracterización de los materiales utilizados, dicha caracterización se lleva a cabo por medio de los estudios de: Humedad natural, granulometría, límites de atterberg, compactación o Proctor modificado, los cuales se hacen al suelo residual arcilloso antes de las aditivaciones. La Difracción de rayos X se realiza en el suelo residual arcilloso y residuo de construcción antes de aditivar, así como también el SEM y CBR.

Estas pruebas se llevaron a cabo siguiendo las normas de ensayo para carreteras propuestas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), adoptadas por el ministerio de transporte en la resolución número 3290 del 15 de agosto de 2007.

Esta información es básica para conocer el comportamiento químico y físico de los materiales, el cual será modificado mediante aditivación, con el fin de obtener un material más estable y compacto.

**4.3.1 Análisis de las muestras.** Para la aditivación de suelo con residuo de construcción y cemento portland se construye una matriz de diseño que se realiza para establecer una reacción puzolánica, se fijaron las siguientes condiciones:

- Tiempo de curado durante los días 7 y 14 a 25 °C.
- Los materiales a reaccionar son: residuo de construcción (bloque de arcilla, bloque de cemento y escombros de concreto), cemento portland y suelo residual arcilloso. Estos se identifican como los factores que intervienen en el proceso de aditivación, con un valor mínimo de 0% y un valor máximo de 1,0%, establecido para el análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo, utilizando un material residual (residuo de construcción), el cual mediante esta investigación se le dará un valor agregado en la estabilización de suelos.

Finalmente, teniendo en cuenta las condiciones 1 y 2 se diseñan dos tablas, las cuales se observan a continuación:

**Tabla 8. Niveles mínimo y máximo del residuo de construcción y el cemento portland.**

FACTORES	NIVELES	
	Mínimo	Máximo
Residuo de construcción	0%	1%
Cemento Portland	0%	1%
Curado (t)	7 días	14 días

Con los datos anteriores se obtiene la siguiente matriz de diseño experimental:

**Tabla 9. Combinación del diseño experimental, con residuo de construcción y cemento en determinado tiempo.**

<b>MATRIZ DE DISEÑO</b>			
Combinación	Residuo de Construcción %	Cemento Portland %	Tiempo (días)
1	1	0	7
2	1	0,5	7
3	0,5	1	7
4	0	1	7
5	1	0	14
6	1	0,5	14
7	0,5	1	14
8	0	1	14

Para la aditivación se hace en suelo seco, es decir, el suelo es sometido a eliminación de agua en un horno a 110 C por un tiempo de 6 a 12 horas. Teniendo el suelo seco se realiza la siguiente mezcla, como se muestra en la tabla 10.

**Tabla 10. Mezcla realizada para la aditivación.**

Combinación	Suelo (g)	% Humedad natural	Agua (g)*	Residuo de construcción (g)**	Cemento (g)**	Curado (días)
1	300	5,88 %	17,64	3,0	0,0	7 y 14
2	300		17,64	3,0	1,5	
3	300		17,64	1,5	3,0	
4	300		17,64	0,0	3,0	

\*Cálculo de cantidad de agua (g)=  $(300g * 5,88)/100=17,64g$

\*\*Calculo de cantidad de Residuo de construcción y cemento Portland para la combinación número 3 (g) =  $(0,005*300g) = 1,5g$ . El 0,005 se obtiene de  $0,5/100=0,005$ .

El método es el mismo para las aditivaciones restante de Residuo de construcción y cemento Portland. La mezcla se hace: primero se pesa los materiales sólidos, por aparte (300g suelo tamiz 40, Residuo de construcción tamiz 200 y cemento Portland tamiz 200) y el agua se adiciona de último después de mezclar bien los sólidos. Adicionada, el agua se mezcla hasta que todo quede bien homogéneo.

Posteriormente cada combinación se depositó en un frasco de vidrio y se dejaron en curado durante 7 y 14 días a temperatura ambiente (Ver figura 11).

**Figura 11. Curado durante 7 a 14 días.**



#### **4.4 ACTIVIDAD 4 - ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Una vez las muestras son aditivadas y sometidas al tiempo de curado correspondiente (7 y 14 días respectivamente) son caracterizadas por medio de estudios de laboratorio tales como:

- Límites de Atterberg
- Difracción de rayos X
- SEM

Posteriormente se realizan los análisis de los resultados a los ensayos realizados en el laboratorio para conocer el comportamiento del suelo residual tanto en estado original como aditivado con el residuo de construcción (bloque de arcilla, bloque de cemento y escombros de concreto) y cemento portland. Por medio de estos análisis se busca determinar el cambio mineralógico, químico y físico del suelo aditivado, para así poder determinar la acción estabilizadora y si resulta ser estabilizador el porcentaje a utilizar del residuo de construcción.

#### **4.5 ACTIVIDAD 5 - DOCUMENTACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE RESULTADOS FINALES**

Una vez obtenidos y analizados todos los resultados de laboratorio se procede a organizar toda la información obtenida durante todo el proceso de desarrollo del presente trabajo de investigación, para así elaborar el libro donde quedaran plasmados.

## 5. RESULTADOS

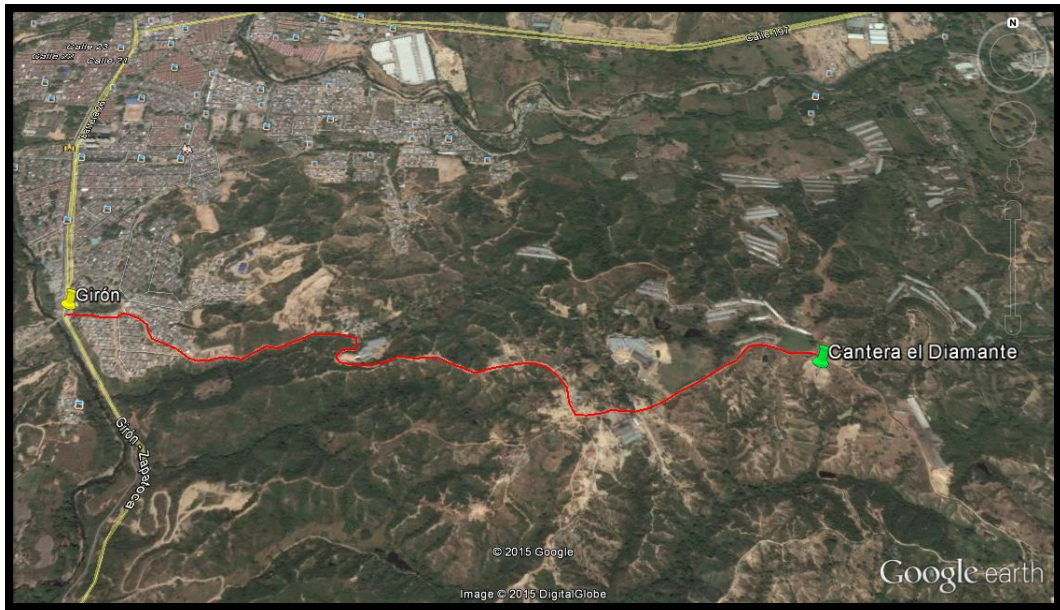
En este capítulo se va a detallar como se realizó la caracterización física y química del suelo residual arcilloso, así como la descripción petrográfica y mineralógica de este, seguido se analizaran los resultados de la aditivación del suelo residual arcilloso con el residuo de construcción y la selección de las muestras además de la posterior caracterización física y química del suelo aditivado.

### 5.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SUELO

Para la caracterización física del suelo residual arcilloso se toma como guía la norma INV E-102-07 que describe el procedimiento para identificar los suelos mediante un examen visual y mediante ensayos manuales, seguido se identifica el suelo por medio del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos S.U.C.S., y se determinan los resultados de los análisis geotécnicos realizados en el laboratorio de suelos perteneciente a la escuela de Ingeniería Civil de la sede central de la Universidad Industrial de Santander.

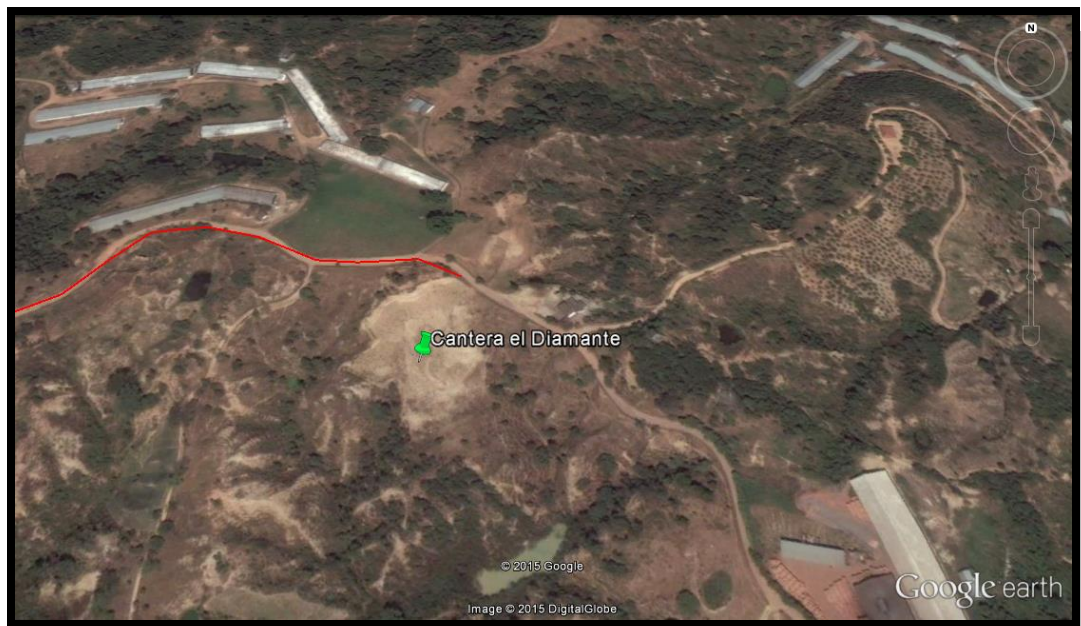
**5.1.1 Localización geográfica.** El suelo residual arcilloso se obtiene de la cantera perteneciente a la ladrillera el Diamante, ubicada en la vereda Llanadas, que pertenece al municipio de San Juan de Girón en el departamento de Santander. Dicha cantera se encuentra aproximadamente al km 3.14 de la vía que conduce de Girón a la ladrillera el diamante al margen derecho del carretable en las coordenadas Lat.: 7°2'50.64"N; Long.: 73°8'42.89"O con una altura de 840 m.s.n.m. como se observan en las figuras 12 y 13.

**Figura 12. Localización del suelo residual arcilloso.**



Fuente: Tomado de Google earth 2015

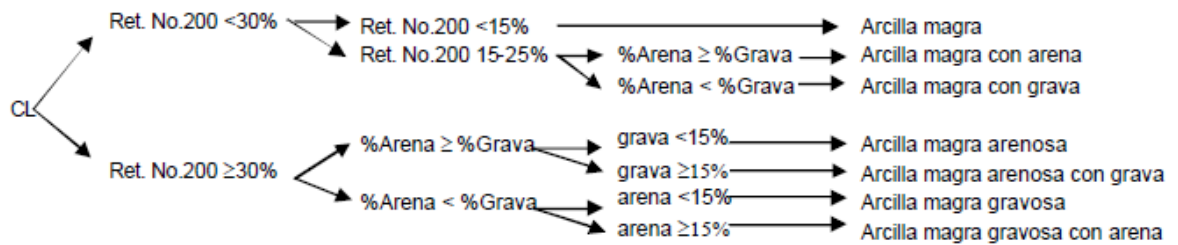
**Figura 13. Cantera de la ladrillera el Diamante.**



Fuente: Tomado de Google earth 2015.

**5.1.2 Descripción física del suelo residual arcilloso.** Según la norma INV E-102-07 del Instituto Nacional de Vías en el diagrama de flujo para suelos de grano fino se obtiene una arcilla magra arenosa debido a que el suelo retenido en la malla No. 200 es mayor al 30% además el porcentaje de arena es más alto que el de grava e igualmente este porcentaje de grava es menor al 15%, como se observa en la figura 14.

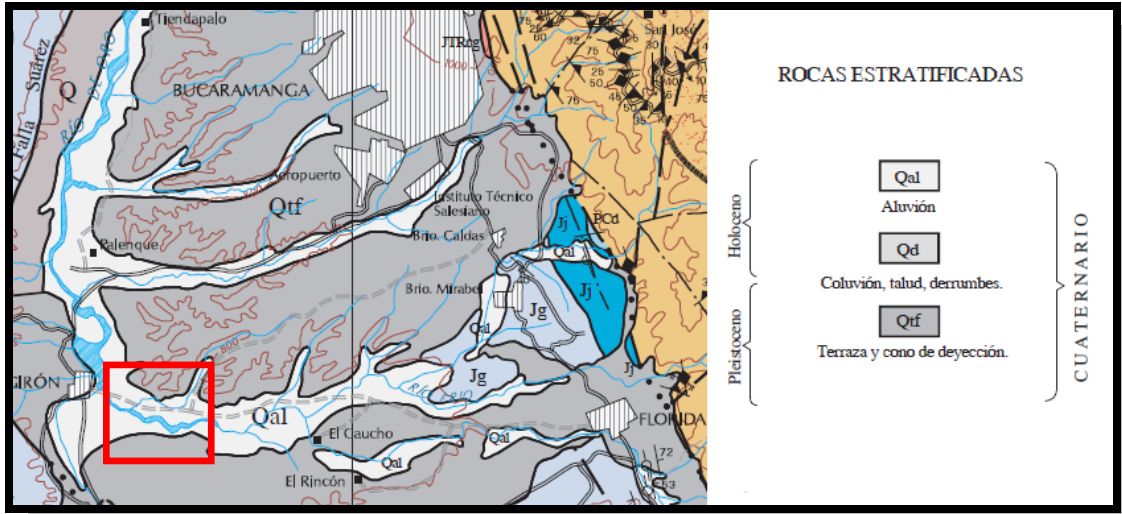
**Figura 14. Diagrama de flujo para suelos de grano fino.**



Fuente: Tomado del Instituto Nacional de Vías.

El suelo residual arcilloso se identifica con las siglas ARC-RES y presenta un color amarillo grisáceo pálido 2.5Y 8/2 según la carta de color de Munsell (2009); de acuerdo a sus condiciones de humedad se clasifica como seca, por ser polvorosa y seca al tacto; la reacción con el ácido clorhídrico HCL es ligera o débil ya que se forman pocas burbujas lentamente. Se compone principalmente de arcillas, seguido de arenas y en menor porcentaje limos, este suelo corresponde a la formación Bucaramanga y está definido Según De Porta (1958) como un depósito sedimentario aluvial de edad Cuaternario (Qal) como se puede ver en la figura 15.

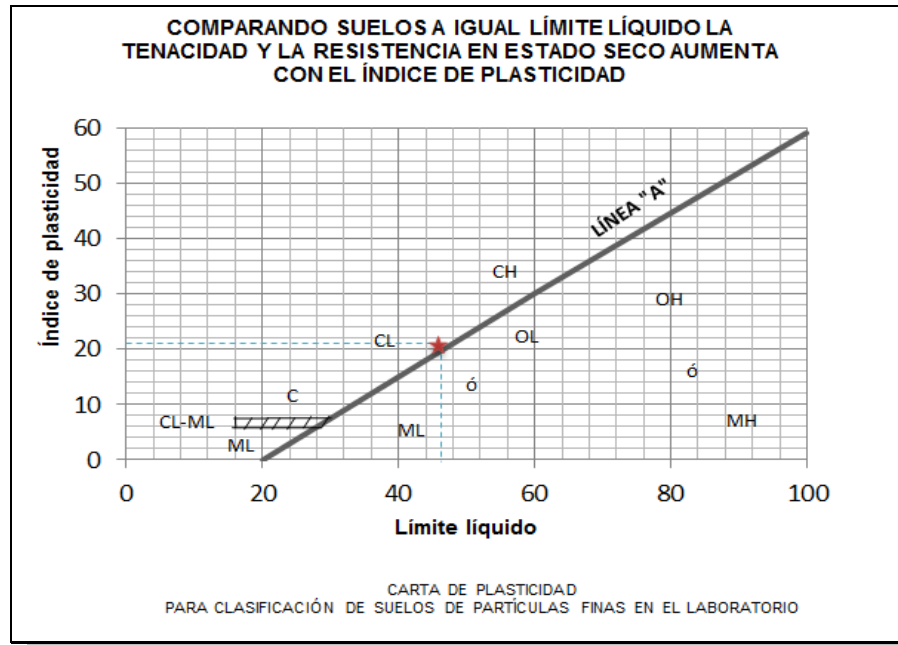
**Figura 15. Mapa geológico del cuadrángulo H12, Bucaramanga.**



Fuente: Modificado de INGEOMINAS (2000).

Para el ensayo de granulometría descrito por el INV E – 123 y el ensayo de límites de Atterberg pertenecientes al INV E – 125-126 da como resultado un porcentaje para finos de 67,13%, de arenas de 32,88% y de gravas de 0,00%. Se obtuvo un límite líquido de 44%, mientras que el límite plástico dio 22% arrojando un índice de plasticidad de 22% (Ver anexo A) y graficando estos datos en la carta de plasticidad de Casagrande según el criterio de clasificación en el laboratorio se tiene un suelo tipo CL como se observa en la figura 16.

**Figura 16. Carta de plasticidad de Casagrande.**



Fuente: Modificado de Sistema Unificado de Clasificación de Suelos S.U.C.S.

Según el procedimiento de identificación en el campo del sistema de clasificación de suelos S.U.C.S., para un suelo de partículas finas donde más de la mitad del material pasa la malla N° 200 y su límite líquido es menor de 50% se clasifica como una arcilla inorgánica de baja a media plasticidad, CL. (Ver tabla 11).

**Tabla 11.** Sistema unificado de clasificación de suelos S.U.C.S.

PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACIÓN EN LA FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA N°40						
LIMOS Y ARCILLAS	Límite líquido menor de 50	RESISTENCIA EN ESTADO SECO (Características al rompimiento)	DILATANCIA (Reacción al agitado)	TENACIDAD (Consistencia cerca al límite)		
		Nula a ligera	Rápida a lenta	Nula	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos a arcillosos ligeramente plásticos
		Media a alta	Nula a muy lenta	Media	CL	Arcilla inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.
		Ligera a media	Lenta	Ligera	OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad

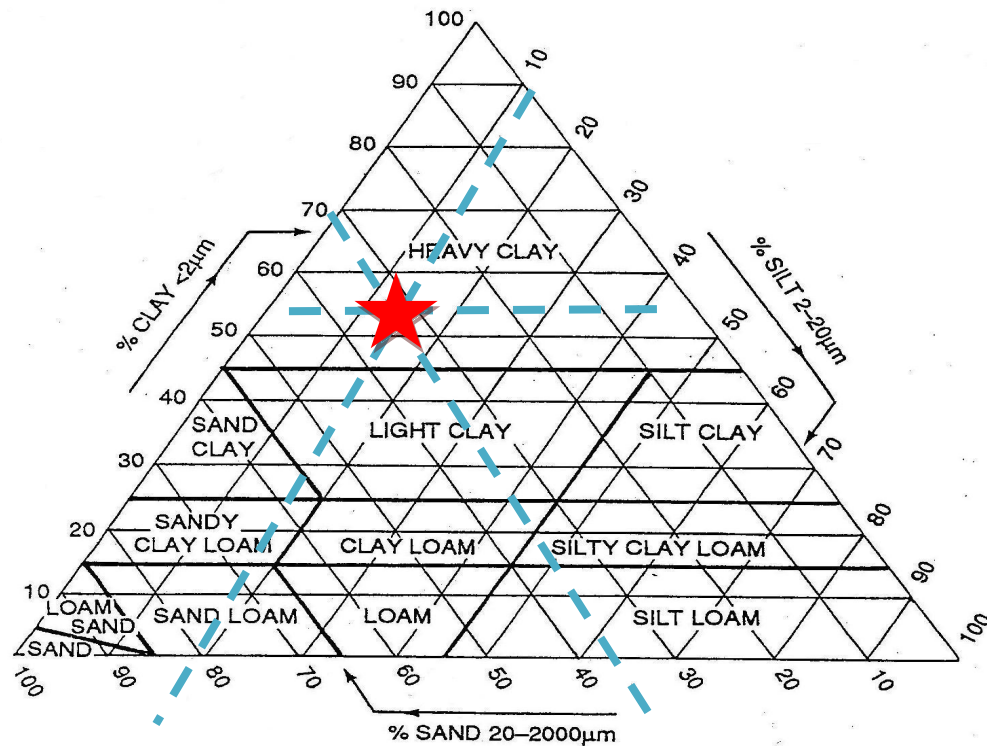
Fuente: Modificado de S.U.C.S.

Mediante los diagramas triangulares para la determinación de la textura, según la clasificación internacional I.S.S.S (International Society of Soil Science) y la U.S.D.A. (United States Department of Agriculture) las cuales se basan en el porcentaje de arcillas, limos y arenas que presenta el suelo, se puede clasificar este como arcilla gruesa (Heavy Clay) y Arcillosa (Clay) respectivamente ya que cuenta con un porcentaje de:

- Arcilla: 67,13%
- Limos: 9,93%
- Arenas: 22,95%.

Como se observa en las figuras 17 y 18.

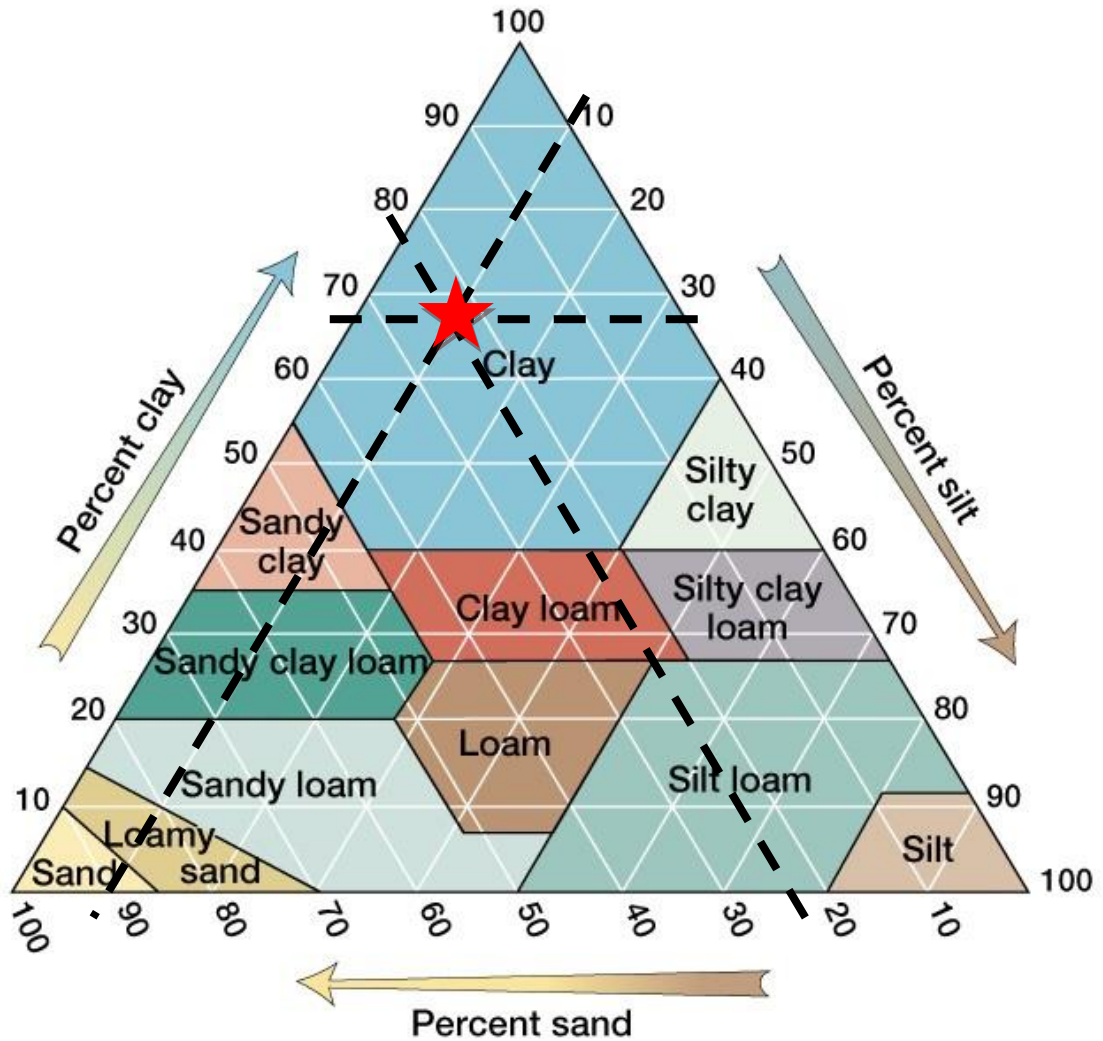
**Figura 17.** Diagrama triangular para determinación de la textura.



**Soil textural triangle (ISSS system)**

Fuente: Tomado de International Society of Soil Science (I.S.S.S.).

Figura 18. Diagrama triangular para la clasificación de suelo.



Fuente: United States Department of Agriculture (U.S.D.A.).

Del análisis del Proctor Modificado se puede concluir que el suelo presenta una densidad máxima seca de 1,93 gr/cm<sup>3</sup> y una humedad óptima de 13,9% (Ver anexo B), la cual es primordial para llevar a cabo el análisis de CBR (California Bearing Ratio) que indica la resistencia que presenta el suelo. Para el suelo residual arcilloso se obtuvo como resultado las propiedades que se observan en la tabla 12 las cuales se obtuvieron del ensayo INV E-148 (Ver Anexo C).

**Tabla 12. Propiedades del CBR al suelo residual arcilloso.**

PROPIEDADES	SUELO ORIGINAL
Humedad de compactación %	12
CBR 12 GOLPES	0
CBR 26 GOLPES	1
CBR 55 GOLPES	2
% de Expansión	4,01

De acuerdo a la clasificación de Aytekin 2004., para suelo y su uso de acuerdo al número de CBR y comparando los resultados obtenidos anteriormente se puede definir el suelo como muy malo y usado exclusivamente como subrasante en pavimentos.

**Tabla 13. Clasificación del suelo de acuerdo al número de CBR.**

CBR	DEFINICIÓN DEL SUELO	USO	CLASIFICACIÓN	
			SUCS	ASSHO
0 - 3	Muy malo	Subrasante	OH,CH,MH,OL	A5,A6,A7
3 - 7	Malo - Medio	Subrasante	OH,CH,MH,OL	A4,A5,A6,A7
7 - 20	Medio	Subbase	OL,CL,ML,SC,SM,SP	A2,A4,A6,A7
20 - 50	Bueno	Base y Subbase	GM,GC,S,SM,SP,GP	A1b,A2-5,A3,A2-6
> 50	Muy bueno	Base	GW,GM	A1a,A2-4,A3

Fuente: Tomado y modificado de Ballesteros y Mantilla 2014.

## 5.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL SUELO

Para la caracterización química del suelo fueron necesarios tres análisis químicos, Difracción de Rayos X (DRX), Fluorescencia de Rayos X (FRX) y Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), llevados a cabo en los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander, sede Guatigará y los resultados se observan a continuación.

**5.2.1 Difracción de Rayos X (DRX).** Para llevar a cabo este análisis la muestra de suelo fue pulverizada en un mortero de ágata. El espécimen seleccionado fue montado en un portamuestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal. Se realizó en un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con geometría DaVinci bajo las siguientes condiciones.

**Tabla 14. Condiciones establecidas para la elaboración de DRX.**

Voltaje	40 (kV)
Corriente	30 (mA)
Rendija de Divergencia	0,6 mm
Rendijas Soller Primario	2,5°
Muestreo	0,01526° 2 theta
Rango de Medición	3,5-70° 2 theta
Radiación	CuK $\alpha$ I
Filtro	Níquel
Detector	Lineal LynxEye
Tipo de Barrido	A pasos
Tiempo de Muestreo	0,4 segundos

Fuente: Laboratorio de Rayos X. Universidad Industrial de Santander.

El suelo residual arcilloso denominado ARC-RES presentó 9 fases cristalinas y la identificación de estos minerales se observa a continuación.

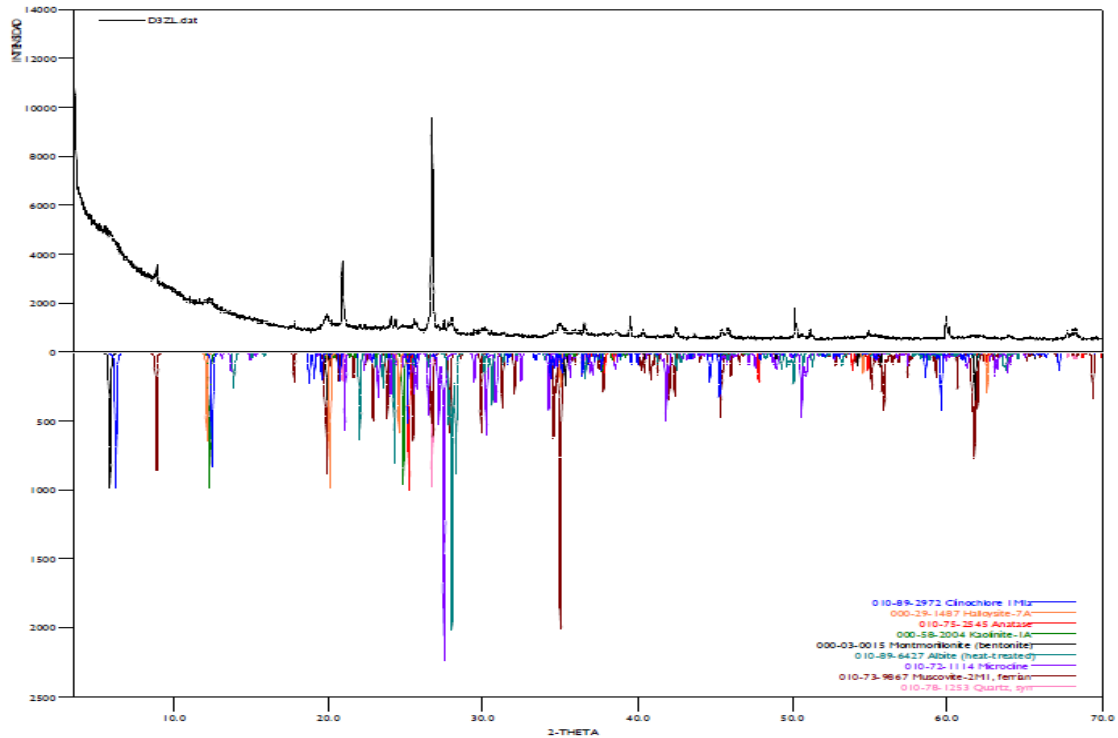
**Tabla 15. Resultados DRX para el suelo ARC-RES.**

	FASE	NOMBRE
<b>Cristalinos</b>	$\text{Si O}_2$	Cuarzo
	$\text{K}_{0.93} \text{Na}_{0.07} \text{Al}_{1.66} \text{Fe}_{0.18} \text{Mg}_{0.16} (\text{Al}_{0.82} \text{Si}_{3.18} \text{O}_{10}) (\text{OH})_2$	Moscovita
	$\text{K Al Si}_3 \text{O}_8$	Microclina
	$\text{Na (Al Si}_3 \text{O}_8)$	Albita
	$(\text{Na, Ca})_{0.3} (\text{Al, Mg})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot x \text{H}_2 \text{O}$	Montmorillonita
	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$	Halloisita
	$\text{Mg}_{2.5} \text{Fe}_{1.65} \text{Al}_{1.5} \text{Si}_{2.2} \text{Al}_{1.8} \text{O}_{10} (\text{OH})_8$	Clinocloro
	$\text{Ti O}_2$	Anatasa
	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$	Caolinita

Fuente: Laboratorio Rayos-X, UIS Guatiguará.

De acuerdo al resultado de cristalinos en el suelo residual arcilloso y su respectivo difractograma, y comparado con el FRX se puede determinar que los minerales presentes en mayor porcentaje son el cuarzo y la moscovita.

**Figura 19. Difractograma del suelo ARC-RES.**



Fuente: Laboratorio Rayos-X, UIS Guatiguará.

**5.2.2 Fluorescencia de Rayos X (FRX).** Para la realización de los análisis cuantitativos de la Fluorescencia de Rayos-X se utiliza el método QUANT-EXPRESS (Parámetros Fundamentales) en el rango de sodio (Na) a Uranio (U), en un espectrómetro secuencial de Fluorescencia de rayos-X de longitud de onda dispersivas de 4KW marca BRUKER modelo S8 TIGER, con las siguientes especificaciones:

**Tabla 16. Condiciones establecidas para la elaboración de FRX.**

Tipo de detector	Centelleo (elementos pesados) y Flujo (elementos livianos)
Fuente de rayos-X:	Tubo de Rodio (Rh)
Goniómetro:	De alta precisión para ángulos theta y 2 theta

Fuente: Laboratorio de Rayos X. *Universidad Industrial de Santander.*

Para el suelo residual arcilloso descrito como ARC-RES se obtienen los siguientes resultados.

**Tabla 17. Resultados obtenidos de FRX.**

Elemento	Número Atómico (Z)	Concentración	Óxido	Concentración
Si	14	24,90%	SiO <sub>2</sub>	53,28%
Al	13	11,42%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,58%
Fe	26	5,73%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,19%
K	19	3,12%	K <sub>2</sub> O	3,76%
Ti	22	0,62%	TiO <sub>2</sub>	1,03%
Mg	12	0,53%	MgO	0,88%
Ca	20	0,51%	CaO	0,72%
Na	11	0,50%	Na <sub>2</sub> O	0,67%
Ba	56	0,08%	BaO	0,09%
Zr	40	0,04%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,09%
P	15	0,04%	ZrO <sub>2</sub>	0,05%
Mn	25	0,03%	MnO	0,05%

Elemento	Número Atómico (Z)	Concentración	Óxido	Concentración
Rb	37	0,02%	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03%
V	23	0,01%	Rb <sub>2</sub> O	0,02%
Sr	38	0,01%	SrO	0,01%
Zn	30	0,01%	ZnO	0,01%
Cr	24	70 mg/Kg	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01%
Ni	28	53 mg/Kg	SO <sub>3</sub>	78 mg/Kg
Y	39	50 mg/Kg	NiO	67 mg/Kg
Cu	29	44 mg/Kg	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	63 mg/Kg
S	16	31 mg/Kg	CuO	55 mg/Kg
Pb	82	29 mg/Kg	PbO	32 mg/Kg
Ga	31	22 mg/Kg	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30 mg/Kg
Nb	41	19 mg/Kg	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	28 mg/Kg
<i>Balance (C.H.O.)</i>		----	<i>*L.O.I.</i>	9,50%

Fuente: Laboratorio de Rayos-X, Universidad Industrial de Santander.

\*El siguiente elemento fue detectado, sin embargo no pudo ser cuantificado: Sc.

Los resultados de FRX determinan la concentración de elementos como también la concentración de óxidos presentes en la muestra denominada ARC-RES, indicando un alto contenido de Sílice (Si) con 24,90% y de su respectivo óxido (SiO<sub>2</sub>) con 53,28%, además se observa un gran contenido de Aluminio (Al) con 11,42% y de su óxido (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con 21,58%, en un porcentaje de concentración menor pero presente en el suelo analizado se encuentra el Hierro (Fe), Potasio (K) y Titanio (Ti).

**5.2.3 Microscopia electrónica de barrido SEM.** Las muestras fueron analizadas mediante el microscopio electrónico de barrido el cual proporciona imágenes de alta resolución y permite identificar los elementos presentes y su porcentaje en peso.

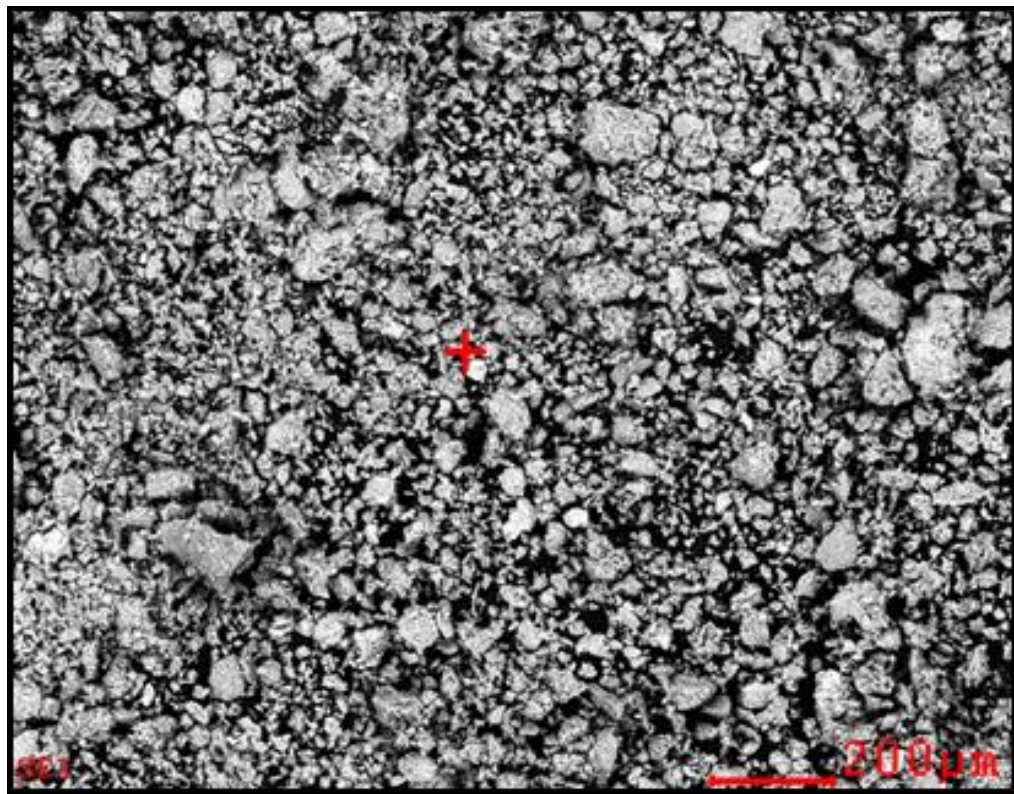
Para el suelo residual arcilloso denominado ARC-RES se tomaron dos imágenes de alta resolución con un acercamiento de 200x y 1600x (ver figura 20 y 23) donde

se observa la distribución y geometría de las partículas, posteriormente se realizaron 7 enfoques de acuerdo a las tonalidades que presentaba, y se escogieron las tres muestras más representativas.

- Primer Enfoque

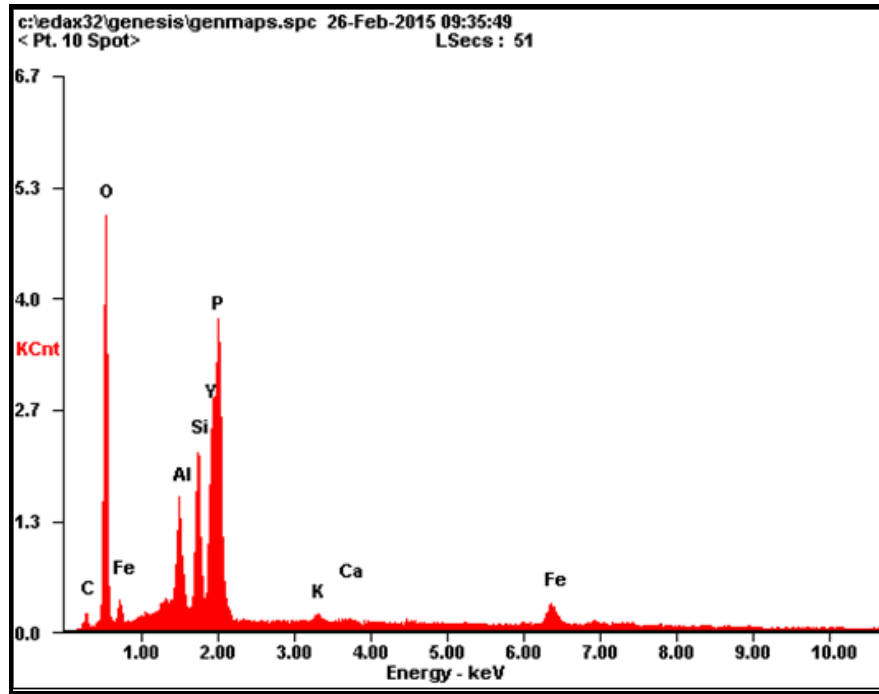
De la figura 19 se hace un enfoque a la partícula que tiene un brillo sobresaliente y una forma sub-redondeada para identificar su espectrograma (ver figura 21) y así poder determinar tanto los elementos que presenta como su porcentaje (tabla 18).

**Figura 20. Enfoque 1 de la muestra ARC-RES.**



Fuente: Laboratorio SEM, UIS Guatiguará.

Figura 21. Espectrograma del enfoque 1 de suelo ARC-RES.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS Guatiguará.

Tabla 18. Porcentaje de cada elemento para el enfoque 1 del suelo ARC-RES.

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	04.82	09.32
<i>OK</i>	44.27	64.24
<i>AlK</i>	05.25	04.52
<i>SiK</i>	06.99	05.78
<i>YL</i>	22.75	05.94
<i>PK</i>	10.23	07.67
<i>KK</i>	00.61	00.36
<i>CaK</i>	00.37	00.21
<i>FeK</i>	04.70	01.95
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Fuente: Laboratorio SEM, UIS Guatiguará.

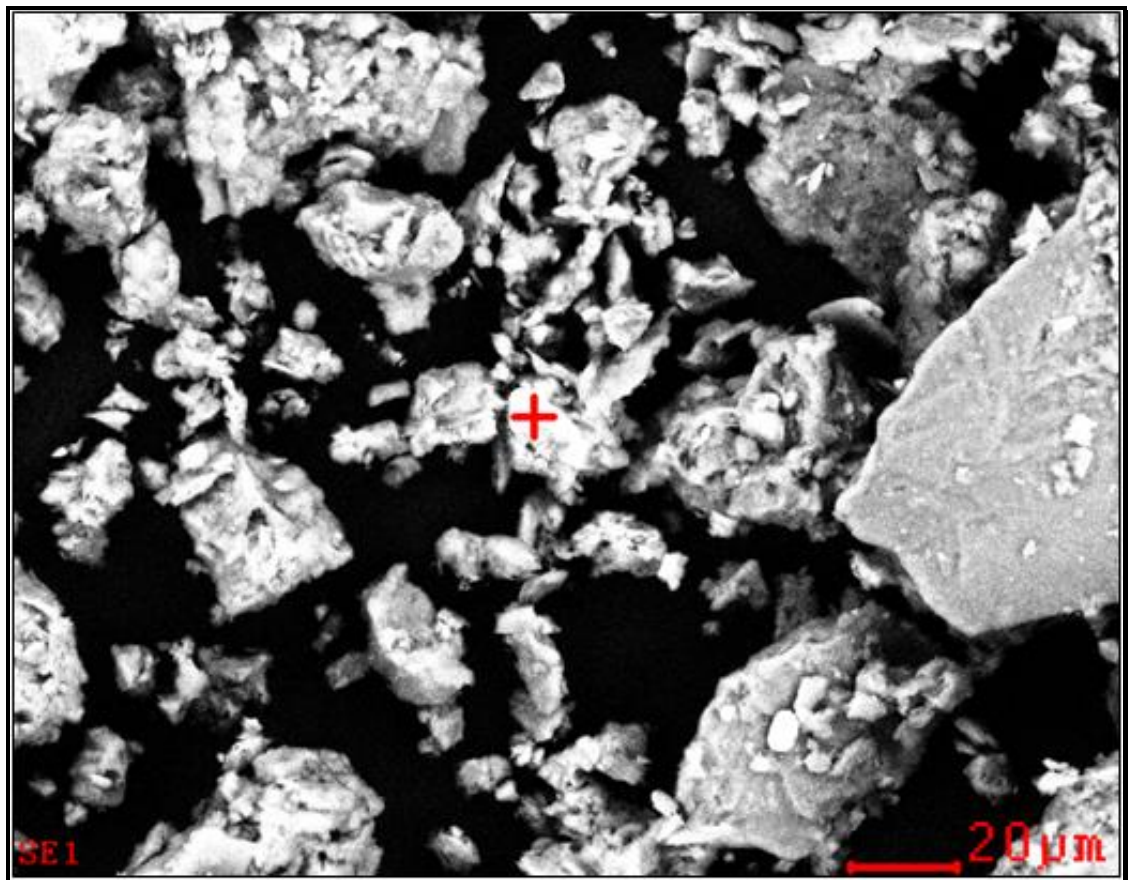
El espectrograma de la figura 20 se relaciona con los porcentajes de la tabla 17 pertenecientes al análisis FRX, donde sobresalen el contenido de Oxígeno con un porcentaje de 44,27 %Wt y el Itrio con un porcentaje de 22,75 %Wt en el nivel k, lo

que indica la presencia de cuarzo y el Itrio podría relacionarse con un mineral amorfo.

- *Segundo enfoque*

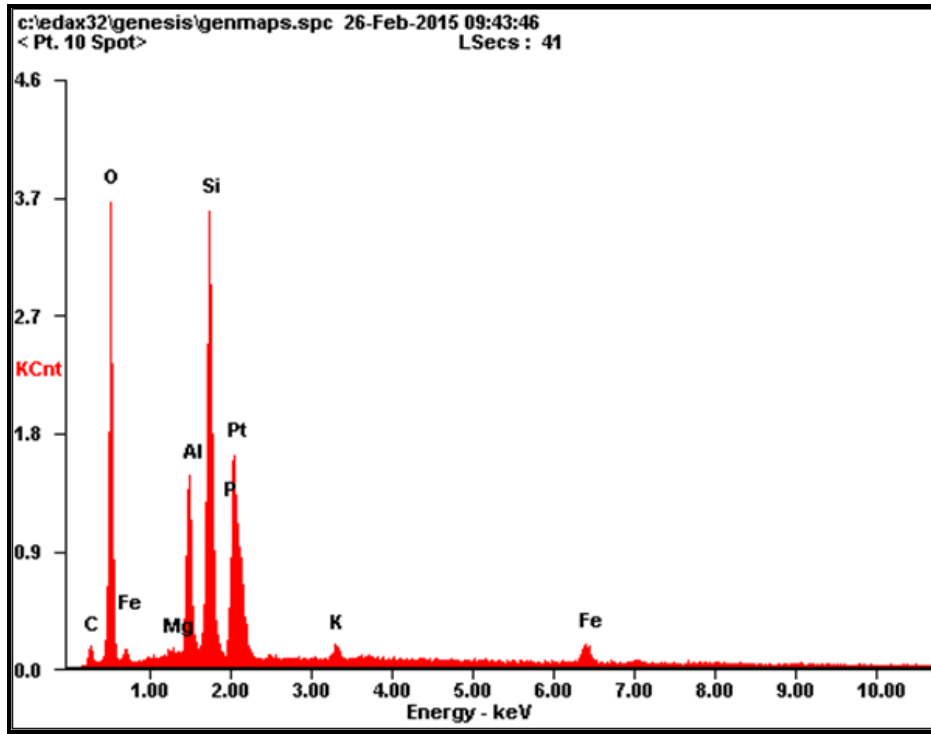
De la figura 19 se tomó un enfoque basado tanto en la diferencia de tonalidades como en la forma que presenta ya que se observa muy brillante y con forma irregular (ver figura 22) además se identifica su espectrograma (ver figuras 23) y el porcentaje de elementos presentes (Ver tablas 19).

**Figura 22. Enfoque 2 de la muestra ARC-RES.**



Fuente: Laboratorio SEM, UIS Guatiguará.

Figura 23. Espectrograma del enfoque 2 de la muestra ARC-RES.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS Guatiguará.

Tabla 19. Porcentaje de elementos del enfoque 2 de la muestra ARC-RES.

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	04.37	09.35
<i>OK</i>	36.61	58.85
<i>MgK</i>	00.40	00.42
<i>AlK</i>	06.96	06.63
<i>SiK</i>	18.36	16.81
<i>PK</i>	02.78	02.30
<i>PtM</i>	26.21	03.45
<i>KK</i>	00.95	00.62
<i>FeK</i>	03.36	01.55
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

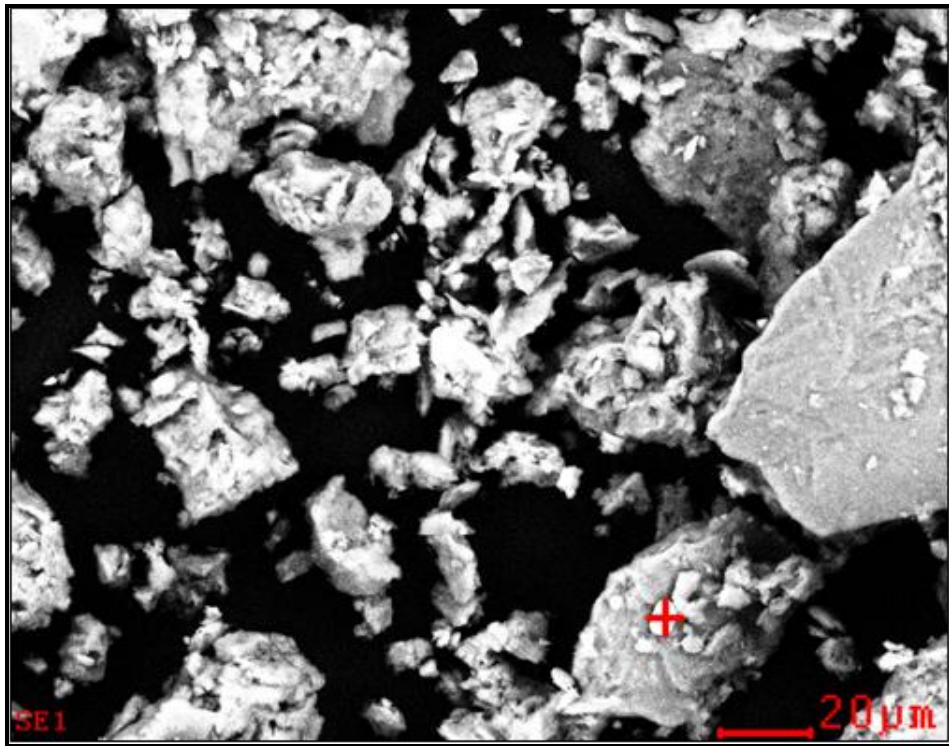
Fuente: Laboratorio SEM, UIS Guatiguará.

De acuerdo al espectrograma y a la tabla de elementos del enfoque 2 y comparándolo con los resultado de FRX se puede concluir que los elementos con mayor cantidad presentes en la muestra son el Oxígeno con 36,61 %Wt, Silicio 18,36%, y Aluminio 6,96% los cuales son elementos formadores de minerales de arcilla, además se encontró un porcentaje significativo de Platino con 26,21 %Wt que se puede encontrar como mineral amorfo.

- Tercer Enfoque

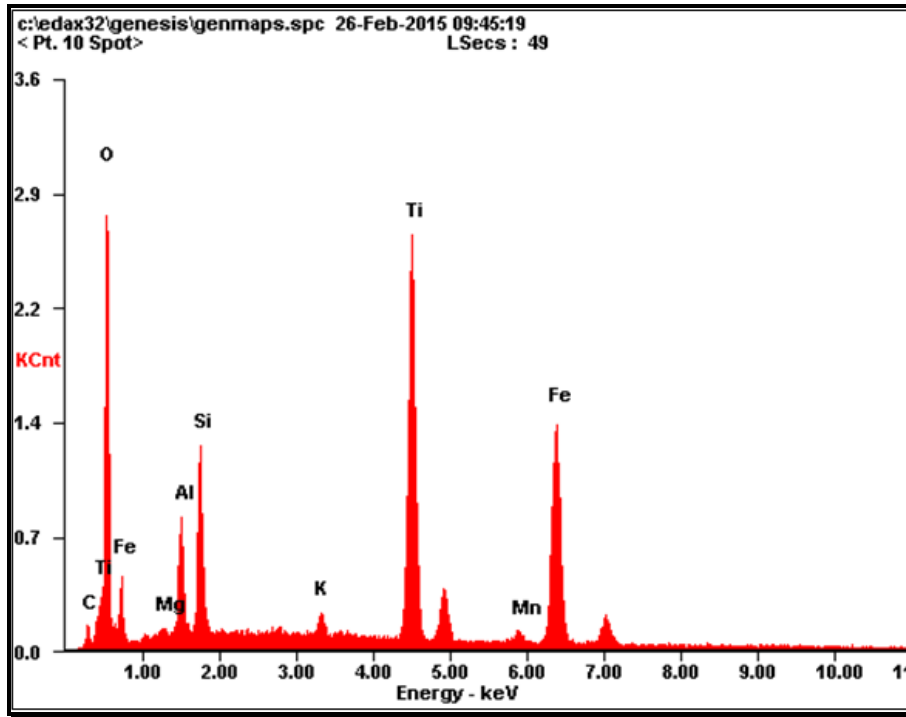
En la figura 24 se señala el tercer enfoque de la muestra ARC-RES basado en la forma regular y el brillo que se observa, así como también el respectivo espectrograma (ver figura 25) y tabla de elementos (Tabla 20).

**Figura 24. Enfoque 3 de la muestra ARC-RES.**



Fuente: Laboratorio SEM, UIS Guatiguará.

Figura 25. Espectrograma del enfoque 3 de la muestra ARC-RES.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS Guatiguará.

Tabla 20. Porcentaje de elementos del enfoque 3 de la muestra ARC-RES.

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	02.50	05.57
<i>OK</i>	34.00	56.79
<i>MgK</i>	00.33	00.36
<i>AlK</i>	04.12	04.08
<i>SiK</i>	06.13	05.83
<i>KK</i>	00.82	00.56
<i>TiK</i>	23.55	13.14
<i>MnK</i>	01.34	00.65
<i>FeK</i>	27.21	13.02
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Fuente: Laboratorio SEM, UIS Guatiguará.

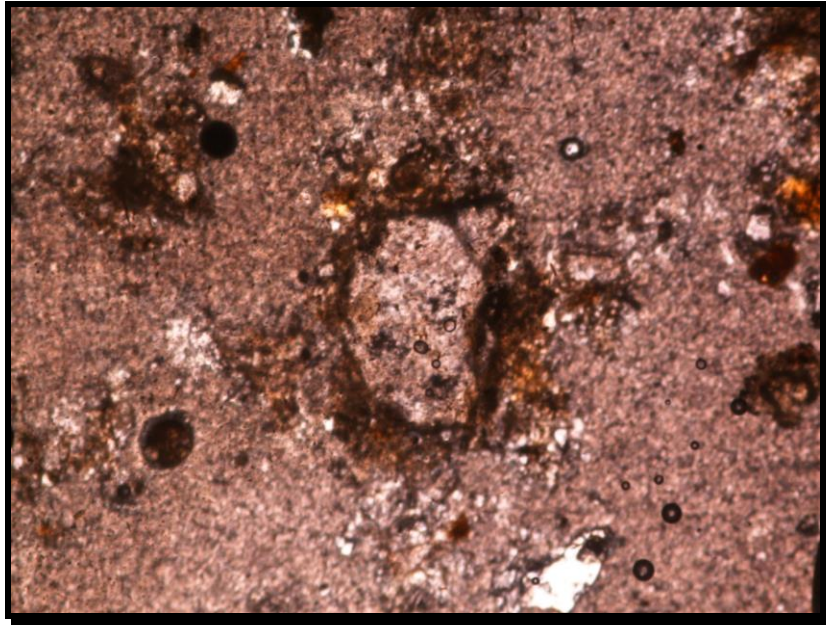
De acuerdo al espectrograma y a la tabla de porcentajes de elementos se observa una cantidad significativa de Oxígeno con 34,00 %Wt y Titanio con un porcentaje en peso de 23,55 %Wt del nivel K, concluyendo a partir de esto y apoyándose en los resultado de difracción de Rayos-X que la muestra contiene Anatasa.

### **5.3 DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DEL SUELO**

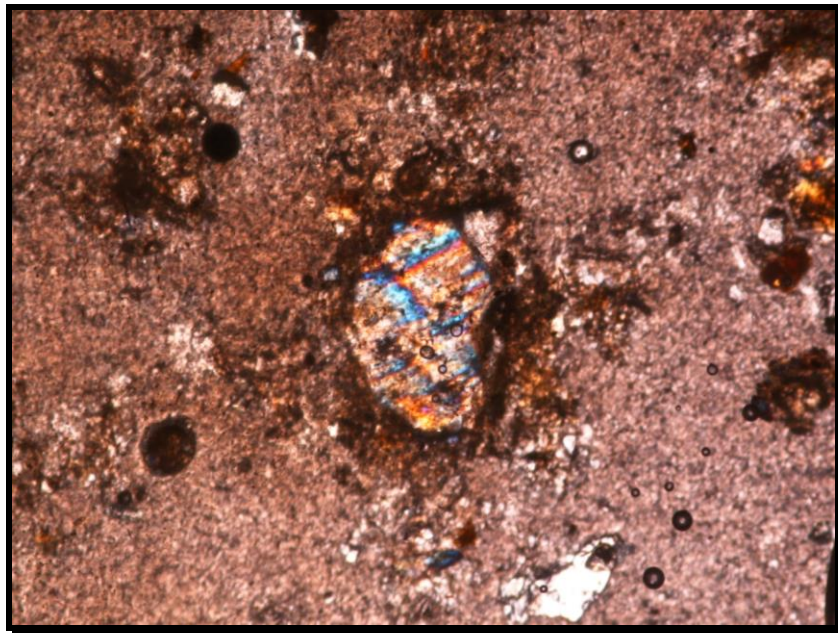
A continuación se lleva a cabo la descripción del suelo residual arcilloso mediante el uso del microscopio petrográfico donde se identificaron lo diferentes minerales y se relacionaron con los resultados obtenidos de la DRX, teniendo en cuenta el Manual de Laboratorio de Petrología Sedimentaria de Cruz Guevara y Caballero del año 2007, el Atlas de minerales bajo el microscopio de luz transmitida de Ríos y Castellanos del año 2005 y el Manual de mineralogía de Dana de 1965.

En la figura 25 se observa la sección delgada vista en nicoles paralelos y con un aumento de 5x y en la figura 26 la misma región de la sección delgada pero en nicoles cruzados. En general se pueden observar partículas de tamaño arcilla < 2 $\mu$ ; de formas esféricas-angulares, esféricas-sub-angulares y no esféricas-angulares; se puede definir la muestra como mal calibrada, apoyándose en los resultados obtenidos en la DRX y comparando con lo visto en la sección delgada se puede decir que se tiene cuarzo, mica moscovita, albita, microclina, caolinita entre otros.

**Figura 26. Sección delgada del suelo residual en nicoles paralelos.**



**Figura 27. Sección delgada del suelo residual en nicoles cruzados.**



## 5.4 ADITIVACIÓN Y SELECCIÓN DE MUESTRAS

Esta etapa se basa en la simulación de la estabilización de terreno mediante la aditivación de residuo de construcción y cemento portland con el diseño experimental presentado en la metodología (Ver tablas 8 y 9). Posteriormente se seleccionaron las muestras que presentan una disminución en el índice de plasticidad para ser caracterizadas tanto física como químicamente (Ver tabla 22).

**5.4.1 Aditivación de muestras.** En una fase previa a la aditivación fue necesario calcular la humedad natural del suelo residual arcilloso para así determinar la cantidad de agua necesaria a utilizar en las combinaciones (ver tabla 21).

**Tabla 21. Datos para hallar la humedad natural del suelo.**

Tara	Peso tara (g)	Tara + Suelo húmedo (g)	Tara + Suelo seco (g)	Suelo seco (g)	Agua (g)
S6M1	8,3	24,5	23,6	15,3	0,9

Para determinar la humedad natural se utiliza la siguiente formula:

$$W\% = Ww / Ws \times 100$$

Dónde:

W = Humedad natural

Ww = Agua

Ws = Suelo seco

$$W\% = 0,9 / 15,3 \times 100$$

Obteniendo como resultado un porcentaje de humedad natural de 5,88%.

Una vez obtenida la humedad natural se deben tomar 1200 g de suelo residual arcilloso (300g para cada combinación) pasados previamente por el tamiz N° 40 (0,42 mm) y sometidos a la eliminación de agua en un horno a 110 °C por un tiempo de 6 horas. Finalmente se proceden a realizar los cálculos de los diferentes aditivos utilizados para cada combinación (ver tabla 10).

Para realizar las aditivaciones de cada combinación se mezclaron de manera homogénea tanto el suelo como el residuo de construcción y el cemento portland, posteriormente se adiciona el agua equivalente a la humedad natural del suelo, impregnando la mayor cantidad de material para lograr las reacciones de intercambio catiónico (ver figura 28).

**Figura 28. Proceso de aditivación de muestras.**







Una vez mezclados se disponen en frascos de vidrio y son dejados a la sombra por un tiempo de curado de 7 y 14 días respectivamente (Ver figura 29).

**Figura 29. Muestras de suelo aditivadas**



**5.4.2 Selección de muestras.** Para la selección de muestras es necesario realizar los límites de Atterberg a las cuatro combinaciones al cumplir el tiempo de curado tanto a los siete días como a los catorce días.

Se escogieron las muestras que presentaron una disminución en el índice de plasticidad tomando como referencia las propiedades geotécnicas del suelo original para el cual se registró un índice de plasticidad de 22%, las muestras seleccionadas corresponden a la combinación 1 con un porcentaje de 1% de residuo de construcción y 0% de cemento Portland y la combinación 3 con 0,5% de residuo de construcción y 1% de cemento Portland (*Ver Anexo D y E*).

**Tabla 22. Selección de muestras según índice de plasticidad.**

COMBINACIONES				
Combinaciones	Residuo de construcción (%)	Cemento (%)	Tiempo de curado (días)	Índice de plasticidad (%)
1	1	0	7	16,56
2	1	0,5	7	17,05
3	0,5	1	7	17,4
4	0	1	7	18,19
1	1	0	14	16,4
2	1	0,5	14	16,54
3	0,5	1	14	15,11
4	0	1	14	15,76

## 5.5 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS ADITIVADAS

En este capítulo se realizan los estudios físicos (Límites de Atterberg, Proctor modificado y CBR) y químicos (DRX, FRX y SEM) para las muestras anteriormente seleccionadas y así conocer los cambios obtenidos al ser aditivadas.

**5.5.1 Caracterización física de las muestras aditivadas.** La caracterización física se realizó mediante los límites de Atterberg para la combinación 1 y combinación 3, y los análisis de Proctor modificado y CBR se realizaron únicamente para la combinación 3 por presentar menor índice de plasticidad. Los respectivos resultados se compararon con el suelo residual arcilloso para identificar los cambios obtenidos en sus propiedades.

- *Combinación 1*

La combinación 1 presenta 1% de residuo de construcción y 0% de cemento, con un tiempo de curado de 14 días, en la cual se observó una variación en el índice de plasticidad disminuyendo de 22% del suelo original a un 16% del suelo aditivado, cambiando su clasificación de un suelo muy arcilloso a un suelo arcilloso.

*IP > 20 suelos muy arcillosos,*

*IP > 10 suelos arcillosos,*

*IP < 4 suelos poco arcillosos,*

*IP = 0 suelos exentos de arcilla*

- *Combinación 3*

La combinación 3 corresponde a 0,5% de residuo de construcción y 1% de cemento con un tiempo de curado de 14 días, presentó la mayor disminución de todas las combinaciones con un porcentaje de 15%, en comparación al 22% del suelo original, obteniendo de igual forma un cambio en la clasificación de suelo muy arcilloso a un suelo arcilloso, lo cual indica una disminución de materiales finos.

El análisis de Proctor modificado arrojó como resultado una humedad óptima de 15%, evidenciando un incremento de 1% respecto al suelo original, con lo cual se puede inferir que el suelo aditivado tendrá una mayor capacidad de absorción de agua; mediante el mismo análisis se determinó la densidad máxima en seco con un resultado de 1,900 Kg/m<sup>3</sup> la cual no representó un cambio significativo en comparación con la muestra original (*Ver Anexo F*).

En el análisis de CBR se mide la resistencia al corte que presenta el suelo con un contenido de agua y densidad controlado, obteniendo así la capacidad de soporte del suelo. Los resultados arrojados (*Ver Anexo G*), varían de acuerdo a los golpes dados, obteniendo una mejora en el comportamiento plástico del suelo ya que pasa de un suelo muy malo a malo-medio según la tabla de clasificación de Aytakin 2004.

A continuación se comparan los resultados de la caracterización física del suelo residual arcilloso (original) con el suelo aditivado de la combinación 3.

**Tabla 23. Comparación de resultados del suelo original y el suelo aditivado.**

PROPIEDADES	SUELO ORIGINAL	SUELO ADITIVADO
Límite líquido %	44	41
Límite plástico %	22	25,89
Índice de plasticidad %	22	15,11
Humedad optima %	13,9	15
Densidad máx. seca Kg/m <sup>3</sup>	1,930	1,900
Humedad de compactación %	12	14,4
CBR 12 GOLPES	0	2
CBR 26 GOLPES	1	3
CBR 55 GOLPES	2	4
% de Expansión	4,01	3,9

**5.5.2 Caracterización química del suelo aditivado.** Por medio de la difracción de rayos x, fluorescencia de rayos x y microscopia electrónica de barrido se hace la caracterización química para las combinaciones 1 y 3 del suelo aditivado.

- *Combinación 1*

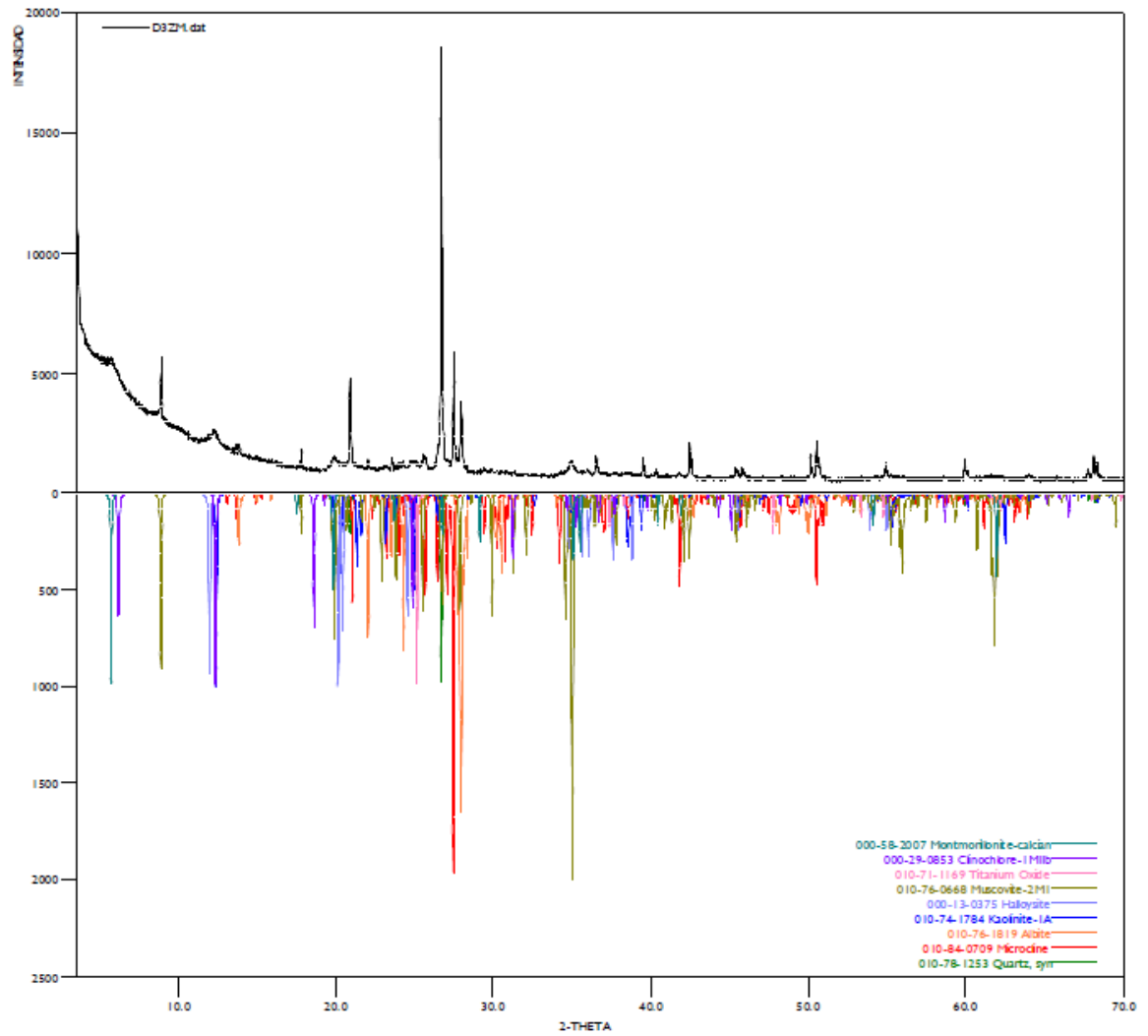
De acuerdo a los resultados de Difracción de Rayos-X se siguen observando las 9 fases cristalinas del suelo original y comparando con la FRX se aprecia un aumento en los elementos presentes, aunque no hay un cambio mineralógico (Ver Tabla 24 y figura 30).

**Tabla 24. Resultados DRX para la combinación 1.**

	<b>FASE</b>	<b>NOMBRE</b>
<b>Cristalinos</b>	$\text{Si O}_2$	Cuarzo
	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{O H})_4$	Caolinita
	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{O H})_4$	Halloisita
	$\text{K Al Si}_3 \text{O}_8$	Microclina
	$\text{Na} (\text{Al Si}_3 \text{O}_8)$	Albita
	$\text{Ti O}_2$	Anatasa
	$\text{Ca}_{0.2} (\text{Al, Mg})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{O H})_2 \cdot x \text{H}_2 \text{O}$	Montmorillonita
	$\text{K}_2 (\text{Al}_{3.74} \text{Fe}_{0.26}) (\text{Si}_6 \text{Al}_2 \text{O}_{20}) (\text{O H})_4$	Moscovita
	$\text{Mg}_5 \text{Al} (\text{Si}_3 \text{Al}) \text{O}_{10} (\text{O H})_8$	Clinocloro

Fuente: Laboratorio de Rayos-X, UIS Guatiguará.

Figura 30. Difractograma de la combinación 1.



Fuente: Laboratorio de Rayos-X, UIS Guatiguará.

Con la fluorescencia de rayos x se conoce el porcentaje de elementos y óxidos presentes en la muestra (ver tabla 25).

**Tabla 25. Resultados análisis de FRX.**

Elemento	Número Atómico (Z)	Concentración	Óxido	Concentración
Si	14	25,23%	SiO <sub>2</sub>	53,98%
Al	13	11,21%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,18%
Fe	26	5,50%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,86%
K	19	3,23%	K <sub>2</sub> O	3,89%
Ca	20	0,75%	CaO	1,05%
Ti	22	0,61%	TiO <sub>2</sub>	1,01%
Mg	12	0,54%	MgO	0,90%
Na	11	0,52%	Na <sub>2</sub> O	0,70%
Ba	56	0,07%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,10%
P	15	0,04%	BaO	0,08%
Mn	25	0,04%	ZrO <sub>2</sub>	0,05%
Zr	40	0,04%	MnO	0,05%
Rb	37	0,02%	SO <sub>3</sub>	0,03%
Sr	38	0,01%	Rb <sub>2</sub> O	0,02%
V	23	0,01%	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02%
S	16	0,01%	SrO	0,02%
Zn	30	0,01%	ZnO	0,01%
Cr	24	72 mg/Kg	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01%
Ni	28	49 mg/Kg	NiO	63 mg/Kg
Y	39	43 mg/Kg	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	55 mg/Kg
Cu	29	40 mg/Kg	CuO	50 mg/Kg
Pb	82	35 mg/Kg	PbO	38 mg/Kg
Ga	31	26 mg/Kg	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35 mg/Kg
Nb	41	17 mg/Kg	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	24 mg/Kg
<i>Balance (C.H.O.)</i>		----	<i>*L. O.I.</i>	9,00%

Fuente: Laboratorio Rayos-X, UIS Guatiguará.

\*El siguiente elemento fue detectado sin embargo no pudo ser cuantificado: Sc

El suelo al ser aditivado aumentó en un pequeño porcentaje la concentración de elementos mayores como el Calcio de 0,51% a 0,75% y la concentración de Sílice de 24,90% a 25,23% y por ende la concentración de sus respectivos óxidos de 0,72% a 1,05% de CaO y 53,28% a 53,98% de SiO<sub>2</sub>. Se puede deducir que este incremento se debió a la composición química que presenta el cemento y el residuo de construcción al reaccionar con la composición química del suelo.

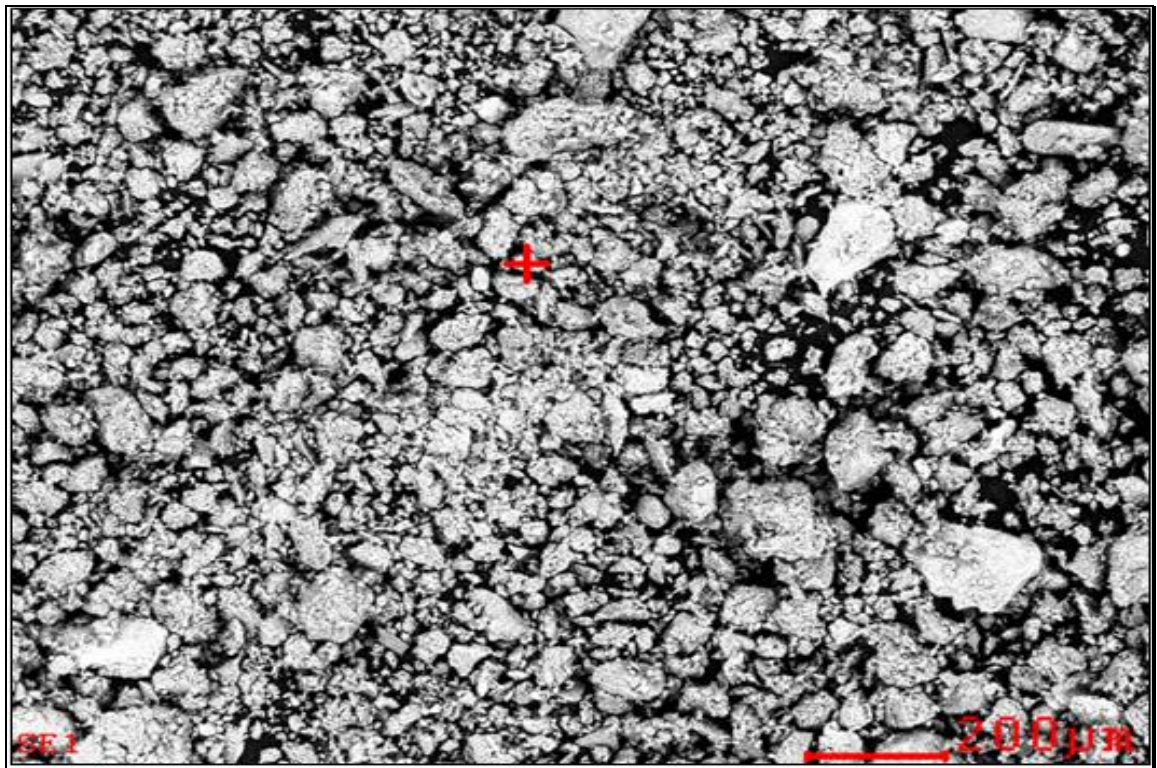
Para el análisis de la combinación 1 por microscopia electrónica de barrido SEM se realizaron dos enfoques teniendo en cuenta la diferencia de brillo y forma de las partículas.

- *Combinación 1 - Enfoque 1*

Para el enfoque 1 realizado a la muestra correspondiente de la combinación 1 que contiene 1% de residuo de construcción y 0% de cemento, se escogió la partícula por su brillo sobresaliente y su forma esférica sub-redondeada (ver figura 31).

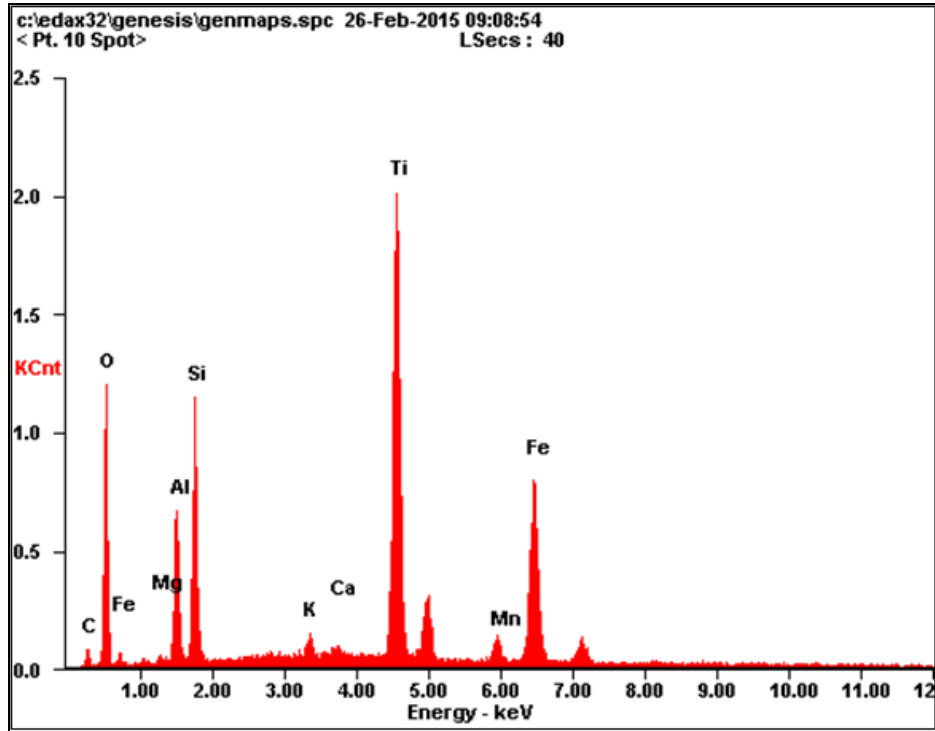
Así mismo se presenta el espectrograma y su respectiva tabla de porcentaje en peso de elementos contenidos en la muestra aditivada.

**Figura 31. Enfoque 1 de la combinación 1.**



Fuente: Laboratorio de SEM, UIS Guatiguará.

Figura 32. Espectrograma del enfoque 1 de la combinación 1.



Fuente: Laboratorio de SEM, UIS Guatiguará.

Tabla 26. Porcentaje en peso de elementos del enfoque 1 de la combinación 1.

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	02.26	05.40
<i>OK</i>	26.43	47.53
<i>MgK</i>	00.24	00.29
<i>AlK</i>	05.55	05.91
<i>SiK</i>	08.36	08.56
<i>KK</i>	00.94	00.70
<i>CaK</i>	00.69	00.49
<i>TiK</i>	28.99	17.41
<i>MnK</i>	02.93	01.54
<i>FeK</i>	23.62	12.17
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

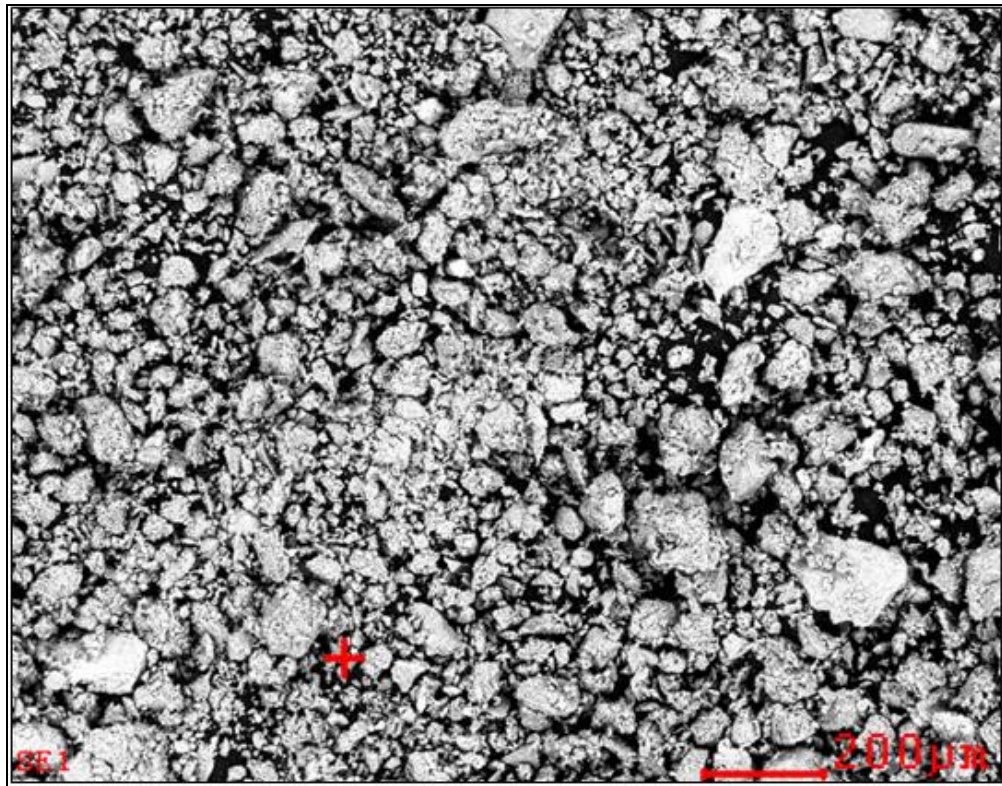
Fuente: Laboratorio de SEM, UIS Guatiguará.

Se destaca el contenido de Titanio con un porcentaje de 28,99 %Wt, Oxígeno con 26,43 %Wt y Hierro con 23,62 % Wt. Al comparar con los resultados obtenidos en DRX se puede asociar este espectrograma con una partícula mineral de Anatasa ( $\text{TiO}_2$ ).

- *Combinación 1 - Enfoque 2*

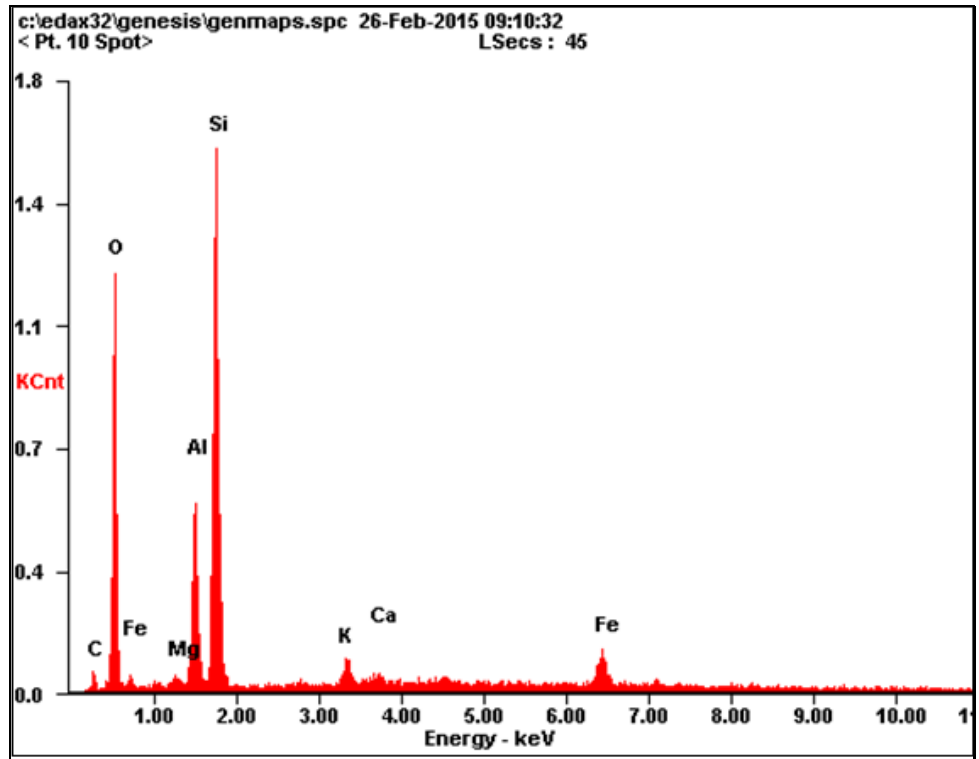
Para el enfoque 2 de la combinación 1, se escogió la partícula de color gris y forma esférica angular (ver figura 33) igualmente se presenta el espectrograma y la tabla de porcentajes en peso de los elementos.

**Figura 33. Enfoque 2 de la combinación 1**



Fuente: Laboratorio de SEM, UIS Guatiguará.

Figura 34. Espectrograma del enfoque 2 de la combinación 1



Fuente: Laboratorio de SEM, UIS Guatiguará.

Tabla 27. Porcentaje en peso de los elementos presentes en el enfoque 2 de la combinación 1.

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	05.71	09.89
<i>OK</i>	42.33	55.05
<i>MgK</i>	00.50	00.43
<i>AlK</i>	10.29	07.93
<i>SiK</i>	29.42	21.80
<i>KK</i>	02.11	01.12
<i>CaK</i>	01.29	00.67
<i>FeK</i>	08.35	03.11
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Fuente: Laboratorio de SEM, UIS Guatiguará.

De acuerdo al porcentaje en peso de los elementos presentes en el enfoque 2 de la combinación 1 se observa un gran contenido de Oxígeno con 42,33%, Silicio con 29,42% y Aluminio con 10,29% y comparando estos resultados con el análisis de DRX probablemente se trate de una moscovita debido a los minerales que la constituyen.

- *Combinación 3*

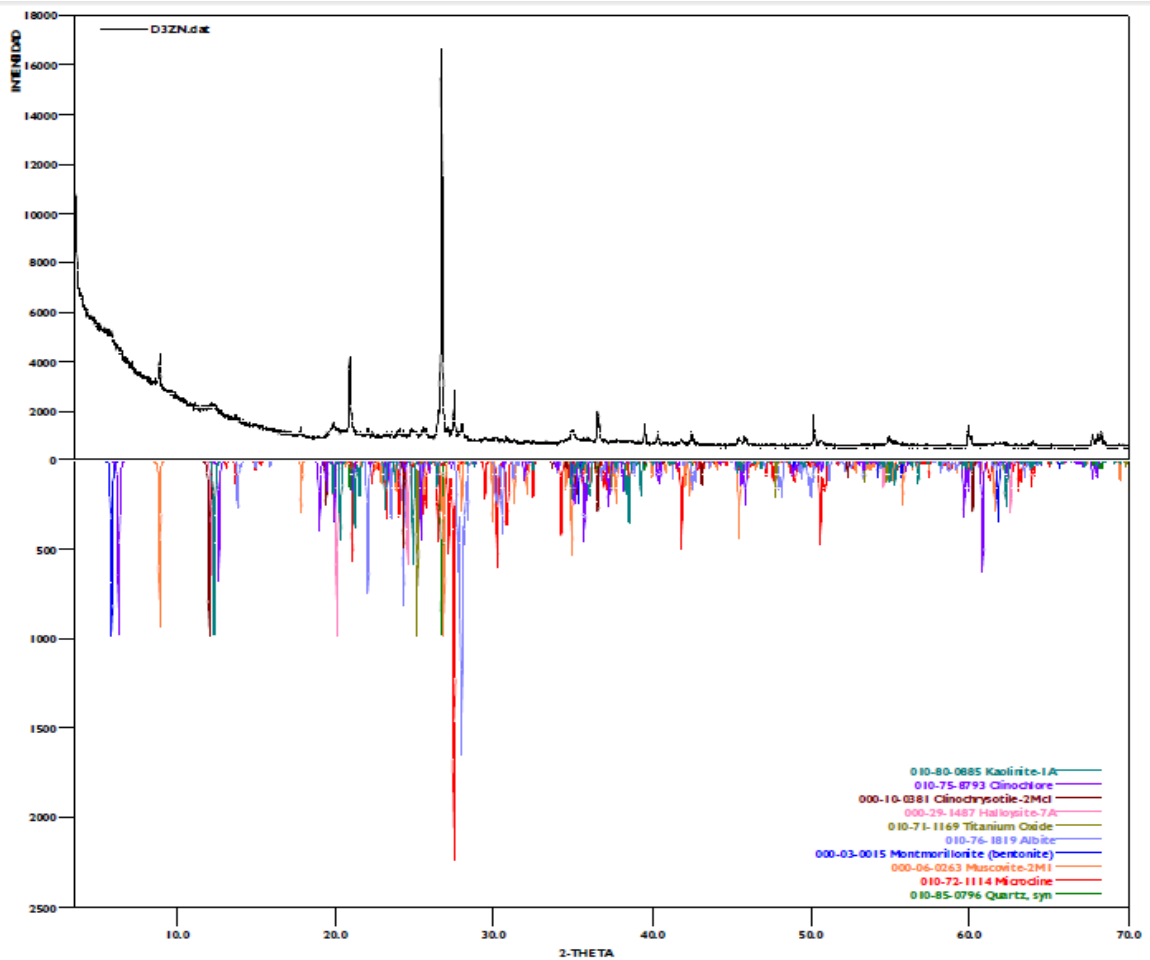
De la difracción de rayos X se obtiene una nueva fase cristalina de acuerdo al suelo original identificada como Clinocrisotilo que se compone principalmente de Magnesio (Mg) y este es uno de los elementos característicos tanto del residuo de construcción y el cemento lo cual puede indicar una reacción puzolánica.

**Tabla 28. Resultados DRX para la combinación 3.**

	<b>FASE</b>	<b>NOMBRE</b>
<b>Cristalinos</b>	$\text{Si O}_2$	Cuarzo
	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{O H})_4$	Caolinita
	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{O H})_4$	Halloisita
	$\text{K Al Si}_3 \text{O}_8$	Microclina
	$\text{K Al}_2 (\text{Si}_3 \text{Al}) \text{O}_{10} (\text{O H})_2$	Moscovita
	$\text{Na} (\text{Al Si}_3 \text{O}_8)$	Albita
	$\text{Ti O}_2$	Anatasa
	$(\text{Na, Ca})_{0.3} (\text{Al, Mg})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{O H})_2 \cdot x \text{H}_2 \text{O}$	Montmorillonita
	$\text{Mg}_3 (\text{Si}_2 \text{O}_5) (\text{O H})_4$	Clinocrisotilo
	$(\text{Mg}_{11.148} \text{Fe}_{0.852}) ((\text{Si}_{4.99} \text{Al}_{3.01}) \text{O}_{20} (\text{O H})_{16})$	Clinocloro

Fuente: Laboratorio Rayos-X, UIS Guatiguará.

Figura 35. Difractograma de la combinación 3.



Fuente: Laboratorio de Rayos-X, UIS Guatiguará.

Mediante el análisis de fluorescencia de Rayos-X se observa un aumento significativo de la concentración de Calcio respecto al suelo original de 0,51% a 1,14% esto debido a la composición química que presentan los materiales aditivados. Con respecto a la concentración de óxidos de Sílice ( $\text{SiO}_2$ ), Aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y Hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) se presenta una disminución mínima en sus concentraciones en relación con las del suelo original, entretanto la concentración del óxido de Calcio ( $\text{CaO}$ ) aumenta de 0,72% a 1,05%.

**Tabla 29. Resultados FRX de la combinación 3.**

Elemento	Número Atómico (Z)	Concentración	Óxido	Concentración
Si	14	24,48%	SiO <sub>2</sub>	53,98%
Al	13	11,33%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,18%
Fe	26	5,65%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,86%
K	19	3,21%	K <sub>2</sub> O	3,89%
Ca	20	1,14%	CaO	1,05%
Ti	22	0,61%	TiO <sub>2</sub>	1,01%
Mg	12	0,55%	MgO	0,90%
Na	11	0,48%	Na <sub>2</sub> O	0,70%
Ba	56	0,08%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,10%
P	15	0,05%	BaO	0,08%
Mn	25	0,04%	ZrO <sub>2</sub>	0,05%
Zr	40	0,04%	MnO	0,05%
Rb	37	0,02%	SO <sub>3</sub>	0,03%
S	38	0,02%	Rb <sub>2</sub> O	0,02%
Sr	23	0,01%	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02%
V	16	0,01%	SrO	0,02%
Zn	30	0,01%	ZnO	0,01%
Cr	24	87 mg/Kg	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01%
Ni	28	53 mg/Kg	NiO	63 mg/Kg
Cu	39	50 mg/Kg	CuO	55 mg/Kg
Y	29	41 mg/Kg	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50 mg/Kg
Ga	82	21 mg/Kg	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38 mg/Kg
Nb	31	18 mg/Kg	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	35 mg/Kg
<i>Balance (C.H.O.)</i>		----	<i>*L.O.I.</i>	9,70%

Fuente: Laboratorio Rayos-X, UIS Guatimar.

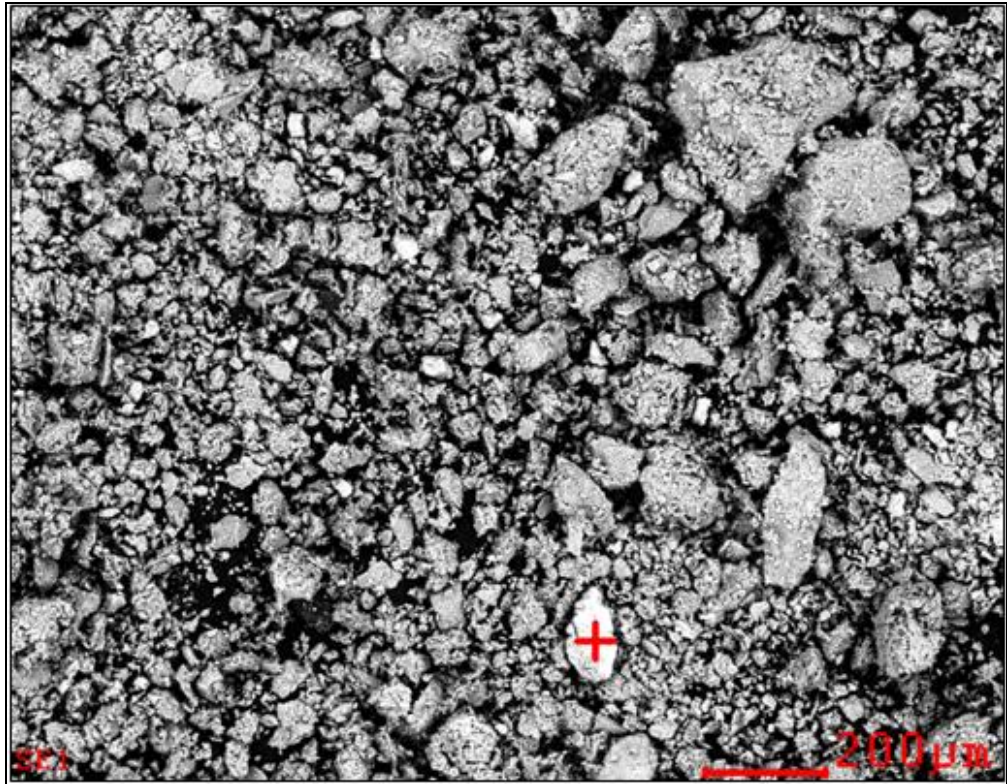
\*Los siguientes elementos fueron detectados, sin embargo no pudieron ser cuantificados: Sc y Pb.

Para el análisis de microscopía electrónica de barrido SEM, se realizaron dos enfoques basándose en el tamaño de las partículas y en la tonalidad que presentaban, como se observa a continuación.

- *Combinación 3 – Enfoque 1*

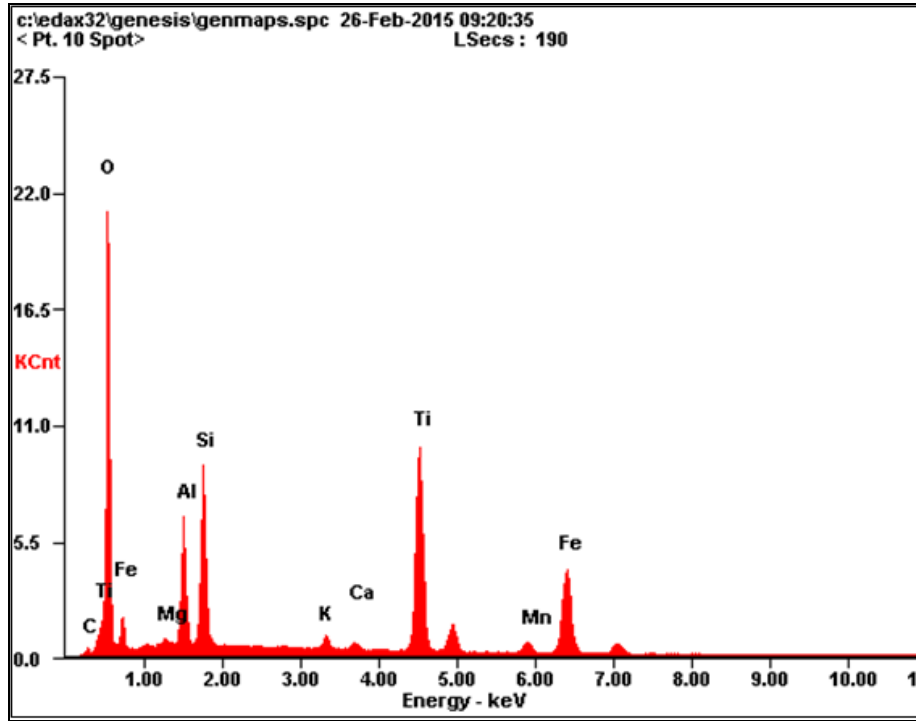
El enfoque 1 realizado en la muestra correspondiente a la combinación 3 que contiene 0,5% de residuo de construcción y 1% de cemento, se basó en la partícula que presenta un tamaño y brillo sobresaliente con forma no esférica sub-angular, así mismo se presenta el espectrograma y su respectiva tabla de porcentaje en peso de elementos contenidos en la muestra aditivada.

**Figura 36. Enfoque 1 de la combinación 3.**



Fuente: Laboratorio SEM, UIS, Guatiguará.

Figura 37. Espectrograma del enfoque 1 de la combinación 3.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS, Guatiguará.

Tabla 30. Porcentaje en peso de los elementos presentes en el enfoque 1 de la combinación 3

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	00.93	01.82
<i>OK</i>	45.67	67.42
<i>MgK</i>	00.39	00.38
<i>AlK</i>	06.20	05.43
<i>SiK</i>	08.69	07.30
<i>KK</i>	00.66	00.40
<i>CaK</i>	00.40	00.24
<i>TiK</i>	18.83	09.28
<i>MnK</i>	01.96	00.84
<i>FeK</i>	16.28	06.89
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

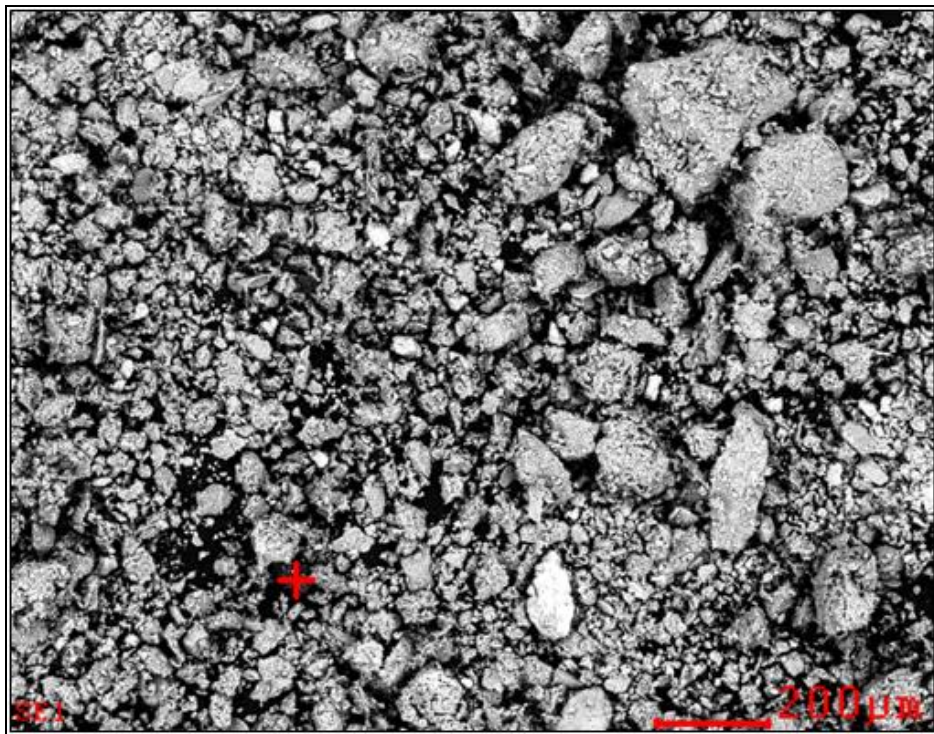
Fuente: Laboratorio SEM, UIS, Guatiguará.

Analizando el espectrograma y la tabla de porcentaje en peso del contenido de elementos y relacionándola con los resultados obtenidos en el análisis de difracción de rayos x se puede decir que la partícula mineral corresponde a una Anatasa por el contenido de Oxígeno (45,67%) y Titanio (18,83%).

- *Combinación 3 - Enfoque 2*

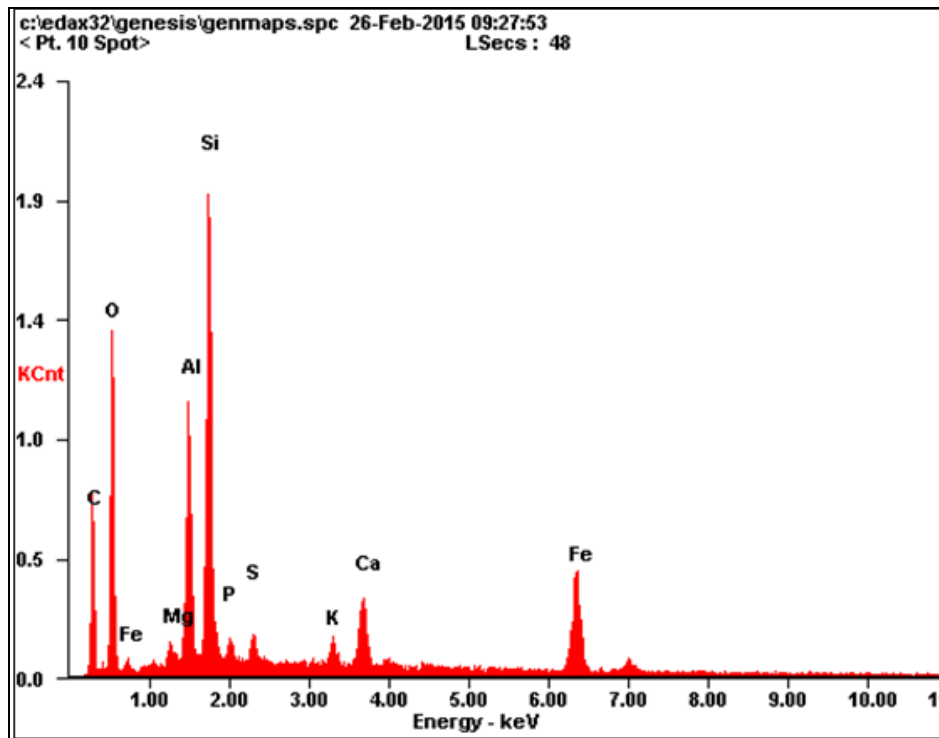
El enfoque 2 realizado a la combinación 3 se escoge por presentar un color gris opaco y una forma no esférica muy angular con ciertas partículas más brillantes simulando una inclusión, así mismo se presenta el espectrograma y su respectiva tabla de porcentaje en peso de elementos contenidos en la muestra aditivada.

**Figura 38. Enfoque 2 de la combinación 3.**



Fuente: Laboratorio SEM, UIS, Guatiguará.

Figura 39. Espectrograma del enfoque 2 de la combinación 3.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS, Guatimará.

Tabla 31. Porcentaje en peso de los elementos presentes en el enfoque 2 de la combinación 3.

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	26.88	42.29
<i>OK</i>	27.54	32.53
<i>MgK</i>	00.73	00.57
<i>AlK</i>	08.04	05.63
<i>SiK</i>	16.10	10.83
<i>PK</i>	00.87	00.53
<i>SK</i>	00.97	00.57
<i>KK</i>	01.12	00.54
<i>CaK</i>	03.70	01.74
<i>FeK</i>	14.06	04.76
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Fuente: Laboratorio SEM, UIS, Guatimará.

Según el contenido de elementos se observa un porcentaje en peso elevado del carbono con un 26,88% el cual probablemente sea ajeno a la muestra y corresponda al soporte del equipo utilizado para el análisis, además se encuentra un porcentaje en peso significativo de Oxígeno (27,54%) y Silicio (16,10%) que relacionándolos con los resultados obtenidos mediante el DRX corresponde a un cuarzo.

## 6. CONCLUSIONES

- Mediante el diseño experimental el suelo fue sometido a cuatro diferentes combinaciones con un tiempo de curado de 7 y 14 días, determinando mediante los límites de Atterberg las combinaciones más favorables para mejorar sus propiedades físico-químicas que correspondían a la combinación 1 (Residuo de construcción al 1% y cemento al 0%) y combinación 3 (Residuo de construcción al 0,5% y cemento al 1%).
- Al evaluar el suelo residual arcilloso aditivado con residuo de construcción al 0,5% y cemento portland al 1% correspondiente a la combinación 3, se evidencia una disminución del índice de plasticidad de 22% a 15% como resultado de una reacción puzolánica y por ende mejorando las propiedades cementantes y plásticas del suelo.
- Por medio del análisis de Proctor Modificado se obtuvo un incremento en su Humedad Óptima de 1% respecto al suelo original, lo cual indica que el suelo aditivado tendrá una mayor capacidad de absorción de agua, por el contrario la Densidad Máxima en Seco no arrojó un cambio significativo en comparación con la muestra original.
- Mediante la aditivación se obtuvo una mejora en el comportamiento plástico del suelo de acuerdo al análisis de CBR y según la clasificación de Aytakin 2004 se puede concluir que el suelo pasa de muy malo a un suelo malo-medio.
- Al realizar la Difracción de Rayos-X a la combinación 3 se obtiene una nueva fase cristalina de acuerdo al suelo original lo cual puede indicar una reacción

puzolanica que se obtiene gracias a la aditivación mejorando el comportamiento inicial del suelo.

- Según los resultados obtenidos en el análisis de Fluorescencia de Rayos X del suelo residual arcilloso antes y después de ser aditivado se puede apreciar un incremento en el contenido porcentual de elementos como el Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Potasio (K) que forman los minerales constituyentes de las arcillas en este caso la Montmorillonita y Moscovita lo cual es evidencia de la aditivación con residuo de construcción y cemento portland.

## 7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer un incremento en los porcentajes de los aditivos (residuo de construcción y cemento) entre 3% y 5% con lo que se espera obtener un cambio más significativo en las propiedades químicas, físicas y mineralógicas.
- Se sugiere profundizar en el estudio de la re utilización y reciclaje de desechos de construcción, ya que significaría una reducción considerable no solo en costos sino en daños ambientales en obras civiles.

## BIBLIOGRAFÍA

- ABASCAL, J., Estabilización de suelos con cemento. Guías técnicas. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. P 3-4.
- ACOSTA, M., Propuesta para la implementación de planta de tratamiento de residuos de construcción en el área metropolitana de Bucaramanga. Universidad pontificia bolivariana. Bucaramanga, 2010.
- BALLESTEROS, Fernanda y Mantilla, Nathalia. Aplicación del residuo de minería (Lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander. Trabajo de grado. Bucaramanga. Universidad industrial de Santander. Facultad de físico-químicas, 2014. P 55.
- BAÑON, L., BEVIÁ, J., Manual de Carreteras, vol. 2, Construcción mantenimiento. Capítulo 22, Capas Granulares. P 17-18.
- BAUZÁ, J., Características de los residuos. Aprovechamiento de residuos. Elabora, S.L P 3-5.
- BESOAIN, E. Mineralogía de arcillas de suelos. San José de Costa Rica. , 1985.
- BESOAIN, E., Curso de mineralogía de suelos. Minerales secundarios del suelo. Instituto interamericano de ciencias agrícolas de la OEA. Turrialba, Costa Rica. 1970. P 135.

- C.D.M.B. Documento de diagnóstico. Amenazas de inundación y erosión en el Rio de Oro. Volumen 1: Geología y geotecnia. Mayo 2005.
- CHAVÉZ, A., Unidad logística de recuperación de residuos de construcción y demolición: Estudio de caso Bogotá D.C. Universidad militar de nueva granada. Bogotá, 2014.
- CRESPO, C. Mecánica de suelos y cimentaciones. Capítulo 1: Mecánica de suelos. México, Limusa, 2004.
- FASSBENDER, H., Química de suelos. Capítulo 5: Intercambios catiónicos anionicos. Instituto interamericano de ciencias agrícolas de la OEA. Turrialba, Costa Rica. 1975. P 119.
- FLOREZ, J., Estabilización de suelo con biocemento. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería civil. Bogotá, 2006.
- GARCÍA, E., SUAREZ, M., Las arcillas: propiedades y Usos. Universidad Complutense y Universidad de Salamanca. P 8.
- GONZÁLEZ, M., El Terreno. Capítulo 1: Origen y clasificación del suelo. Barcelona. Ediciones UPC, 2001.
- GUARIN, A., et. al. Estudio comparativo en la gestión de residuos de construcción en Brasil y Colombia. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá.
- IGLESIAS, C., Mecánica de suelo. 1 edición. Madrid: Editorial síntesis, 1997, p. 133.

- JOFRE, C., et al. Manual de estabilización de suelos con cemento o cal. Capítulo 2. Materiales básicos. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. 2008. p 22, 34-35.
- JUÁREZ, E. y RICO, A. Mecánica de suelos. Tomo 1. Fundamentos de la mecánica de suelos. México. Limusa, 2005.
- LOPEZ, T., et. al, Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas. En: Revista iberoamericana de polímeros. Mayo, 2010, vol. 11, no. 3, p. 163.
- MELÉNDEZ, C., y CAMACHO, A. Espectrometría de fluorescencia de rayos X. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Chihuahua. Enero 2009
- MONROE, J. Geología dinámica y evolución de la tierra. 4ta edición. Capítulo 6: Meteorización, suelo y rocas sedimentarias.
- MUELAS, A. Manual de mecánica de suelo y cimentación. Capítulo 1: Caracterización de suelos.
- NAVAS, J., Estudio estratigráfico del Girón al oeste del Macizo de Santander (Cordillera oriental). Universidad Industrial de Santander. Boletín de Geología N° 12. Bucaramanga 1963.
- NÚÑEZ, J., Fundamentos de edafología. Tema IV: Química y fertilidad de suelos; La capacidad de intercambio catiónico (CIC). Editorial EUNED, San José, Costa Rica, 2000. P 90.

- OLGUIN, J. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Mecánica de suelos 1. 2011, p 14.
- PARRADO, C., Manual de manejo de residuos de construcción y demolición para obras en Bogotá. Subdirección de control ambiental al sector público, secretaria distrital de ambiente. 2012.
- PICASSO, G., Aplicaciones tecnológicas de las arcillas modificadas. En: Revista de la sociedad química del Perú. Enero-marzo 2008, vol. 74 no. 1.
- Plan de ordenamiento territorial de Bucaramanga. Segunda generación, 2013-2027.
- Plan De Ordenamiento Territorial Del Municipio De Bucaramanga, Diagnostico dimensión Biofísico-Ambiental.
- SALAZAR, A., “Síntesis de la tecnología del concreto. Una manera de entender a los materiales compuestos”, 3° edición, Corporación Construir, Cali, 2002.
- SALAZAR, A., El futuro de los materiales de construcción, un avance hacia la sostenibilidad ambiental y económica de la construcción. Unidad de planeación minero energética. Ministerio de minas y energía. Bogotá, 2011.
- SANZ, J., Mecánica de suelos, Reunión de ingenieros. Capítulo V: Identificación y clasificación de los suelos. Editores técnicos asociados S.A., Barcelona.
- SOLMINIHAC, H., ECHEVERRÍA, G. y THENOUX, G. Estabilización química de suelo: Aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimento. Revista ingeniería de construcción. Pontificia Universidad Católica de Chile, 1989.

- SUAREZ, J., y SUAREZ, N., Caracterización, análisis y diagnóstico de los flujos de lodos y detritos en la cuenca de la quebrada Angulito en Girón, Santander. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. Bucaramanga. 2006.
- VALDEZ, C., Estudio comparativo de estabilización de un suelo arcilloso altamente expansivo, utilizando un co-polimero multienzimático. Universidad Michoacana De San Nicolás De Hidalgo. 2008 P 17.
- VALLE, W. Estabilización de suelos arcillosos plásticos con mineralizadores en ambientes sulfatados o yesíferos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 2010, p. 17.

## ANEXOS

### Anexo A. Granulometría y Límites de Atterberg del suelo residual arcilloso.



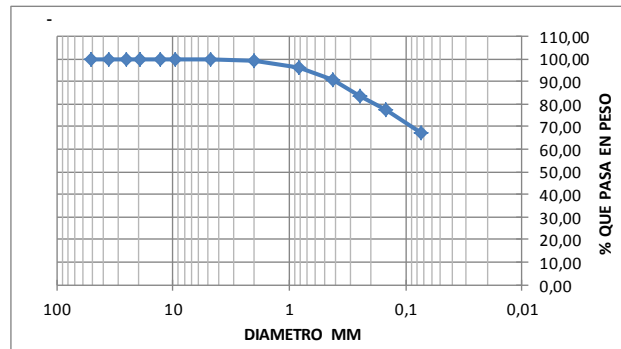
**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS  
ENSAYO DE GRANULOMETRIA INV E- 123**

FECHA	OCTUBRE 14 DE 2014	SONDEO	1
PROYECTO	ESTABILIZACIÓN DE SUELO RESIDUAL ARCILLOSO	MUESTRA	1 (Tomada por el cliente)
LOCALIZACION	VEREDA LLANADAS	PROFUNDIDAD	No se indico

PESO TARA (Kg)	0,0083
TARA+MUESTRA HUMEDA (Kg)	0,0245
TARA+MUESTRA SECA (Kg)	0,0236
PESO A GUA (Kg)	0,0009
PESO MUEST. SECA (Kg)	0,0153
HUMEDAD (%)	5,88%

PESO INICIAL DE LA MUESTRA kg:	<u>0,800</u>
PESO DESPUES DE LAVADO kg:	<u>0,269</u>
PORCENTAJE DE ERROR %:	<u>0,06</u>

MALLA No	ABERTURA	PESO SUELO RETENIDO	PORCIENTO RETENIDO PARCIAL	% QUE PASA LA MALLA	MALLA No	ABERTURA	PESO SUELO RETENIDO	PORCIENTO RETENIDO PARCIAL	% QUE PASA LA MALLA
****	mm	kg	%	%	****	mm	kg	%	%
2"	50,8	0,0000	0,00	100,00	10	2	0,0088	1,10	98,90
1 1/2"	36,1	0,0000	0,00	100,00	20	0,84	0,0209	2,61	96,29
1"	25,4	0,0000	0,00	100,00	40	0,42	0,0455	5,69	90,60
3/4"	19,05	0,0000	0,00	100,00	60	0,25	0,0549	6,86	83,74
1/2"	12,7	0,0000	0,00	100,00	100	0,149	0,0518	6,48	77,26
3/8"	9,52	0,0000	0,00	100,00	200	0,074	0,0811	10,14	67,13
No 4	4,75	0,0000	0,00	100,00	PASA 200	*****	0,5365	67,06	0,06
SUMA	*****	0,0000	0,00		SUMA	*****	0,7995	99,94	
					TOTAL		0,7995		



CLASIFICACION SUCS: CL (ARCILLAS INORGANICAS DE BAJA A MEDIA PLASTICIDAD)

VoBo :

Ing. Jorge A. Guzman J.  
Director Escuela de Ingeniería Civil

REVISO:

Ing. Eduardo A. Castañeda P.  
Jefe Laboratorio Suelos y



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**  
**LIMITES DE ATTERBERG INV E- 125-126**

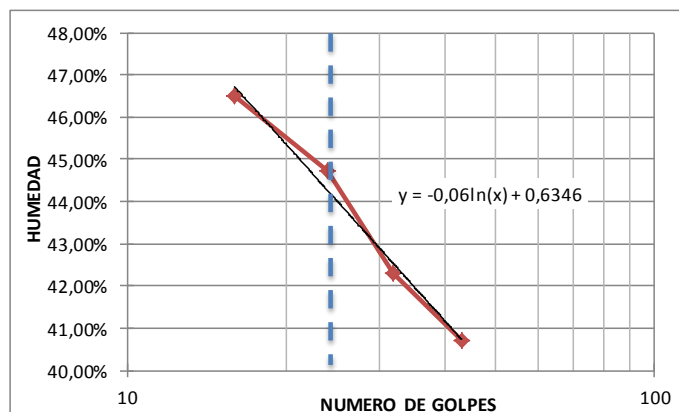
FECHA	<u>OCTUBRE 14 DE 2014</u>	SONDEO	<u>1</u>
PROYECTO	<u>ESTABILIZACIÓN DE SUELO RESIDUAL ARCILLOSO</u>	MUESTRA	<u>1 (Tomada por el cliente)</u>
LOCALIZACIÓN	<u>VEREDA LLANADAS</u>	PROFUNDIDAD	<u>No se indico</u>

**LIMITE LIQUIDO**

CAPSULA No	NUMERO DE GOLPES	PESO CAPSULA Kg	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO Kg	PESO CAPSULA + SUELO SECO Kg	PESO DEL AGUA Kg	PESO SUELO SECO Kg	CONTENIDO DE AGUA %
9	43	0,0157	0,0392	0,0324	0,0068	0,0167	40,72%
11	32	0,0160	0,0409	0,0335	0,0074	0,0175	42,29%
22	24	0,0160	0,0391	0,0321	0,0072	0,0161	44,72%
23	16	0,0157	0,0409	0,0329	0,0080	0,0172	46,51%

**LIMITE PLASTICO**

48	-	0,0157	0,0202	0,0193	0,0009	0,0036	25,00%
35	-	0,0153	0,0178	0,0174	0,0004	0,0021	19,05%



LIMITE LIQUIDO :	<u>44%</u>
LIM. PLASTICO :	<u>22%</u>
IND. DE PLASTI. :	<u>22%</u>
CLASIFICACION SUCS. :	<u>CL</u>

VoBo :

Ing. Jorge A. Guzman J.  
 Director Escuela de Ingenieria Civil

REVISO:

Ing. Eduardo A. Castañeda P.  
 Jefe Laboratorio Suelos y Pavimentos

## Anexo B. Proctor Modificado del suelo residual arcilloso.



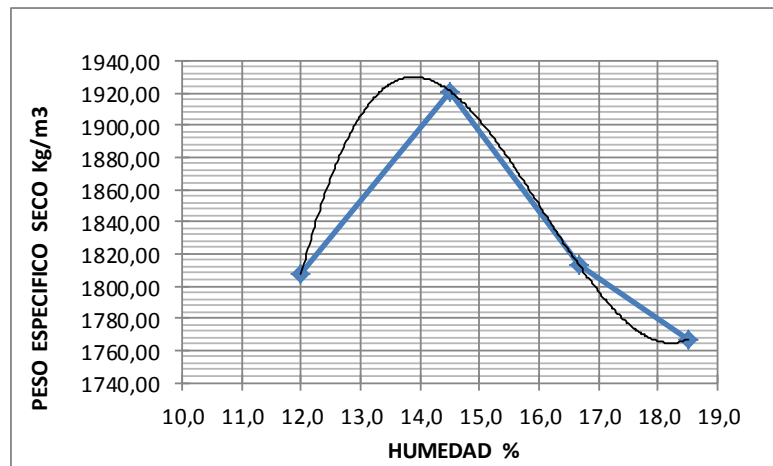
**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO CARACTERIZACION MATERIALES DE CONSTRUCCION**  
**ENSAYO DE COMPACTACION**  
**INV E - 142**

FECHA	FEBRERO 24 DE 2015	SONDEO	_____
PROYECTO	ESTABILIZACIÓN DE SUELO	MUESTRA	_____
LOCALIZACION	VEREDA LLANADAS	DESCRIPCION	_____

TIPO DE ENSAYO	MODIFICADO
NUMERO DE CAPAS	5
# GOLPES POR CAPA	25
MOLDE No	24
DIAMETRO MOLDE(m)	0,105
ALTURA MOLDE (m)	0,11
VOL. MOLDE (m3)	0,00095

PESO TARA (Kg)	0,0071	0,0072	0,0069	0,0068	0,0067	0,0068	0,0070	0,0069
W TARA + S.H (Kg)	0,0494	0,0489	0,0466	0,0429	0,0496	0,0420	0,0419	0,0454
W TARA + S.S (Kg)	0,0448	0,0445	0,0416	0,0383	0,0432	0,0372	0,0368	0,0390
PROM HUMEDAD %	12,00		14,51		16,66		18,53	

PESO MOLDE (Kg)	4,285	4,285	4,285	4,285
W MOLDE+S.H (Kg)	6,213	6,380	6,300	6,280
W DEL S. H. (Kg)	1,928	2,095	2,015	1,995
DENSIDAD H. (Kg/m3)	2024	2199	2115	2095
DENSIDAD S. (Kg/m3)	1807	1921	1813	1767



DEN. MAX. Kg/m<sup>3</sup>      1,93  
HUMEDAD OPTIMA%      13,9

## Anexo C. CBR del suelo residual arcilloso.



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

### COMPACTACION PARA CBR

FECHA	<u>FEBRERO 25 DE 2015</u>	SONDEO	_____
PROYECTO	<u>ESTABILIZACIÓN DE SUELO</u>	MUESTRA	_____
LOCALIZACION	<u>VEREDA LLANADAS</u>	DESCRIPCION	_____

MOLDE #	10	11	12
DIAMETRO (m)	0,150	0,150	0,150
ALTURA (m)	0,178	0,178	0,178
VOLUMEN (m3)	0,00315	0,00315	0,00315
N° DE GOLPES	12	26	55

#### HUMEDAD DE COMPACTACIÓN

PESO TARA (Kg)	0,0084	0,0068	0,0069	0,0068	0,0077	0,0076
W DE TARA + S.HUMEDO (Kg)	0,0452	0,0443	0,0464	0,0464	0,0459	0,0452
W DE TARA + S.SECO (Kg)	0,0411	0,0413	0,0423	0,0421	0,0421	0,0400
HUMEDAD EN %	12,54	8,70	11,6	12,2	11,0	16,0
PROMEDIO HUMEDAD EN %	10,6		11,9		13,5	

CONTENIDO DE HUMEDAD %	10,6	11,9	13,5
W MOLDE + S.HUMEDO (Kg)	13,2	13,5	13,9
PESO MOLDE (Kg)	9,1	9,0	9,1
W SUELO EN EL MOLDE (Kg)	4,1	4,5	4,8
DENSIDAD HUMEDA (Kg/m3)	1302	1445	1539
DENSIDAD SECA (Kg/m3)	1177	1291	1356

#### HUMEDAD DE PENETRACIÓN

PESO TARA (Kg)	0,0084	0,0068	0,0069	0,0068	0,0077	0,0076
W TARA + S.H. (Kg)	0,0452	0,0443	0,0464	0,0464	0,0459	0,0452
W TARA + S.SECO (Kg)	0,0411	0,0400	0,0423	0,0421	0,0421	0,0413
HUMEDAD EN %	12,54	12,95	11,6	12,2	11,0	11,6
PROM. HUMEDAD EN %	12,7		11,9		11,3	



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS  
ENSAYO DE CBR INV E - 148**

FECHA	MARZO 2 DE 2015	SONDEO	_____
PROYECTO	ESTABILIZACIÓN DE SUELO	MUESTRA	_____
LOCALIZACION	VEREDA LLANADAS	DESCRIPCION	_____

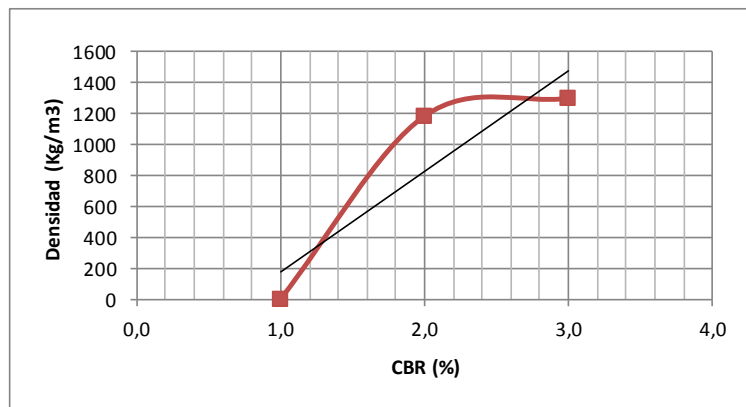
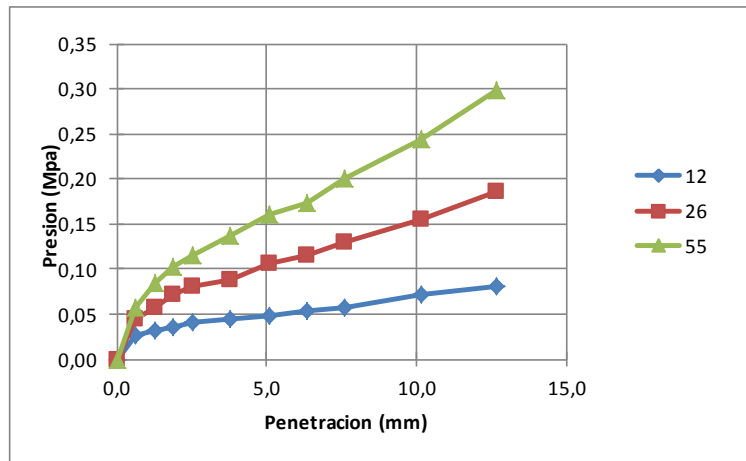
MOLDE No	10			11			12		
No DE GOLPES	12			26			55		
DIAS DE INMERSION	4			4			4		
PENETRACION (mm)	LEC	CARGA (KN)	PRESION (MPa)	LEC	CARGA(K N)	PRESION (MPa)	LEC	CARGA(K N)	PRESION(M Pa)
0,0	0	0	0,00	0	0	0,00	0	0	0,00
0,6	6	0,1	0,03	10	0,1	0,04	13	0,1	0,06
1,3	7	0,1	0,03	13	0,1	0,06	19	0,2	0,08
1,9	8	0,1	0,04	16	0,2	0,07	23	0,2	0,10
2,5	9	0,1	0,04	18	0,2	0,08	26	0,3	0,12
3,8	10	0,1	0,04	20	0,2	0,09	31	0,3	0,14
5,1	11	0,1	0,05	24	0,2	0,11	36	0,4	0,16
6,4	12	0,1	0,05	26	0,3	0,12	39	0,4	0,17
7,6	13	0,1	0,06	29	0,3	0,13	45	0,4	0,20
10,2	16	0,2	0,07	35	0,3	0,16	55	0,5	0,24
12,7	18	0,2	0,08	42	0,4	0,19	67	0,7	0,30
<b>CBR A 0.1"</b>	1			1			2		
<b>CBR A 0.2"</b>	0			1			2		
<b>CBR CORR. 0.1"</b>	1			1			2		
<b>CBR CORR. 0.2"</b>	0			1			2		
<b>EXPANSION (mm)</b>	6,60			5,59			4,95		
<b>EXPANSION (%)</b>	3,7			4,43			3,9		

%Densidad max	DENSIDAD	CBR(%)
95%	1287,88	0
98%	1328,55	1
100%	1355,66	2



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS  
ENSAYO DE CBR INV E - 148

FECHA	MARZO 2 DE 2015	SONDEO	_____
PROYECTO	ESTABILIZACIÓN DE SUELO	MUESTRA	_____
LOCALIZACION	VEREDA LLANADAS	DESCRIPCION	_____



## Anexo D. Límites de Atterberg del suelo aditivado de la combinación 1.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS  
 LIMITES DE ATTERBERG INV E- 125-126

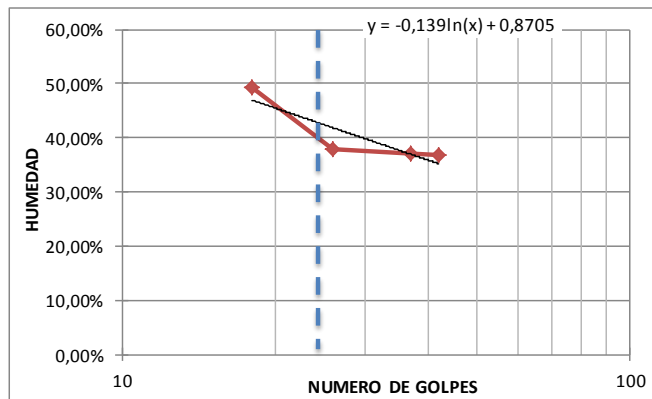
FECHA: FEBRERO 17 DE 2015 SONDEO: 1  
 PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUELO RESIDUAL ARCILLOSO MUESTRA: 1 (Tomada por el cliente)  
 LOCALIZACIÓN: VEREDA LLANADAS PROFUNDIDAD: No se indico

### LIMITE LIQUIDO

CAPSULA No	NUMERO DE GOLPES	PESO CAPSULA Kg	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO Kg	PESO CAPSULA + SUELO SECO Kg	PESO DEL AGUA Kg	PESO SUELO SECO Kg	CONTENIDO DE AGUA %
22	42	0,0069	0,0247	0,0199	0,0048	0,0130	36,92%
20	37	0,0069	0,0269	0,0215	0,0054	0,0146	36,99%
23	26	0,0071	0,0257	0,0206	0,0051	0,0135	37,78%
9	18	0,0069	0,0266	0,0201	0,0065	0,0132	49,24%

### LIMITE PLASTICO

11	-	0,0069	0,0165	0,0146	0,0019	0,0077	24,68%
26	-	0,0069	0,0166	0,0147	0,0019	0,0078	24,36%



LIMITE LIQUIDO : 41%  
 LIM. PLASTICO : 25%  
 IND. DE PLASTI. : 16%  
 CLASIFICACION SUCS. : CL

VoBo :

Ing. Jorge A. Guzman J.  
 Director Escuela de Ingenieria Civil

REVISO:

Ing. Eduardo A. Castañeda P.  
 Jefe Laboratorio Suelos y Pavimentos

## Anexo E. Límites de Atterberg del suelo aditivado de la combinación 3.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS  
 LIMITES DE ATTERBERG INV E- 125-126

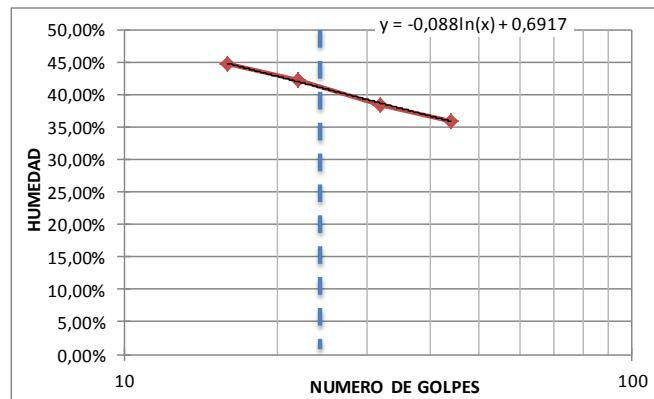
FECHA: FEBRERO 17 DE 2015 SONDEO: 1  
 PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUELO RESIDUAL ARCILLOSO MUESTRA: 1 (Tomada por el cliente)  
 LOCALIZACIÓN: VEREDA LLANADAS PROFUNDIDAD: No se indico

### LIMITE LIQUIDO

CAPSULA No	NUMERO DE GOLPES	PESO CAPSULA Kg	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO Kg	PESO CAPSULA + SUELO SECO Kg	PESO DEL AGUA Kg	PESO SUELO SECO Kg	CONTENIDO DE AGUA %
11	44	0,0069	0,0262	0,0211	0,0051	0,0142	35,92%
22	32	0,0069	0,0267	0,0212	0,0055	0,0143	38,46%
23	22	0,0071	0,0270	0,0211	0,0059	0,0140	42,14%
26	16	0,0069	0,0273	0,0210	0,0063	0,0141	44,68%

### LIMITE PLASTICO

20	-	0,0069	0,0162	0,0144	0,0018	0,0075	24,00%
9	-	0,0069	0,0161	0,0141	0,0020	0,0072	27,78%



LIMITE LIQUIDO : 41%  
 LIM. PLASTICO : 26%  
 IND. DE PLASTI. : 15%  
 CLASIFICACION SUCS. : CL

VoBo :

Ing. Jorge A. Guzman J.  
 Director Escuela de Ingenieria Civil

REVISO:

Ing. Eduardo A. Castañeda P.  
 Jefe Laboratorio Suelos y Pavimentos

### Anexo F. Proctor modificado del suelo aditivado de la combinación 3.



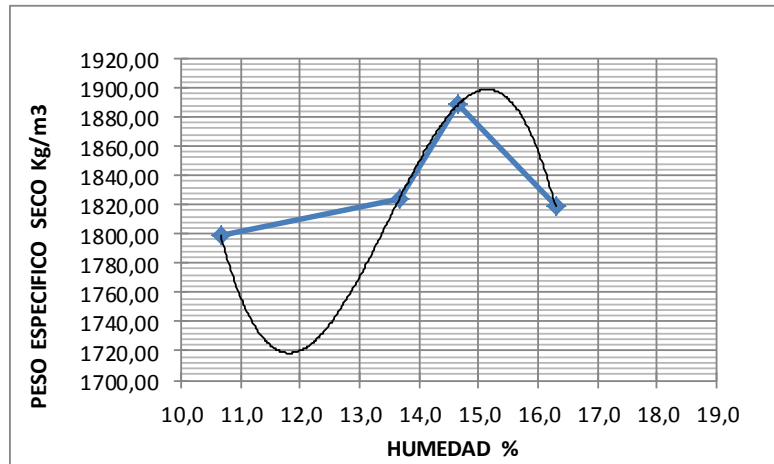
**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO CARACTERIZACION MATERIALES DE CONSTRUCCION**  
**ENSAYO DE COMPACTACION**  
**INV E - 142**

<b>FECHA</b>	<u>MARZO 24 DE 2015</u>	<b>SONDEO</b>	_____
<b>PROYECTO</b>	<u>ESTABILIZACIÓN DE SUELO</u>	<b>MUESTRA</b>	_____
<b>LOCALIZACION</b>	<u>VEREDA LLANADAS</u>	<b>DESCRIPCION</b>	_____

TIPO DE ENSAYO	MODIFICADO
NUMERO DE CAPAS	5
# GOLPES POR CAPA	25
MOLDE No	24
DIAMETRO MOLDE(m)	0,105
ALTURA MOLDE (m)	0,11
VOL. MOLDE (m3)	0,00095

PESO TARA (Kg)	0,0068	0,0069	0,0069	0,0068	0,0068	0,0069	0,0068	0,0068
W TARA + S.H (Kg)	0,0245	0,0245	0,0246	0,0249	0,0248	0,0249	0,0257	0,0250
W TARA + S.S (Kg)	0,0228	0,0228	0,0224	0,0228	0,0225	0,0226	0,0230	0,0225
PROM HUMEDAD %	10,66		13,66		14,65		16,30	

PESO MOLDE (Kg)	4,283	4,283	4,283	4,283
W MOLDE+S.H (Kg)	6,174	6,257	6,345	6,298
W DEL S. H. (Kg)	1,891	1,974	2,062	2,015
DENSIDAD H. (Kg/m3)	1985	2072	2165	2115
DENSIDAD S. (Kg/m3)	1799	1823	1888	1819



**DEN. MAX. Kg/m<sup>3</sup>**            1,90  
**HUMEDAD OPTIMA%**        15,0

**Anexo G. CBR del suelo aditivado de la combinación 3.**



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

**COMPACTACION PARA CBR**

<b>FECHA</b>	<u>MARZO 10 DE 2015</u>	<b>SONDEO</b>	_____
<b>PROYECTO</b>	<u>ESTABILIZACIÓN DE SUELO</u>	<b>MUESTRA</b>	_____
<b>LOCALIZACION</b>	<u>VEREDA LLANADAS</u>	<b>DESCRIPCION</b>	_____

<b>MOLDE #</b>	10	11	12
<b>DIAMETRO (m)</b>	0,150	0,150	0,150
<b>ALTURA (m)</b>	0,178	0,178	0,178
<b>VOLUMEN (m3)</b>	0,00315	0,00315	0,00315
<b>Nº DE GOLPES</b>	12	26	55

**HUMEDAD DE COMPACTACIÓN**

<b>PESO TARA (Kg)</b>	0,0068	0,0071	0,0066	0,0070	0,0069	0,0068
<b>W DE TARA + S.HUMEDO (Kg)</b>	0,0444	0,0422	0,0429	0,0405	0,0405	0,0426
<b>W DE TARA + S.SECO (Kg)</b>	0,0398	0,0378	0,0389	0,0364	0,0359	0,0377
<b>HUMEDAD EN %</b>	13,94	14,33	12,4	13,9	15,9	15,9
<b>PROMEDIO HUMEDAD EN %</b>	14,1		13,2		15,9	

<b>CONTENIDO DE HUMEDAD %</b>	14,1	13,2	15,9
<b>W MOLDE + S.HUMEDO (Kg)</b>	13,0	13,3	13,8
<b>PESO MOLDE (Kg)</b>	8,9	9,1	9,1
<b>W SUELO EN EL MOLDE (Kg)</b>	4,1	4,2	4,7
<b>DENSIDAD HUMEDA (Kg/m3)</b>	1290	1350	1487
<b>DENSIDAD SECA (Kg/m3)</b>	1131	1193	1283

**HUMEDAD DE PENETRACIÓN**

<b>PESO TARA (Kg)</b>	0,0080	0,0081	0,0080	0,0084	0,0085	0,0082
<b>W TARA + S.H. (Kg)</b>	0,0323	0,0372	0,0334	0,0399	0,0395	0,0361
<b>W TARA + S.SECO (Kg)</b>	0,0272	0,0311	0,0281	0,0332	0,0332	0,0305
<b>HUMEDAD EN %</b>	26,56	26,52	26,4	27,0	25,5	25,1
<b>PROM. HUMEDAD EN %</b>	26,5		26,7		25,3	



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS  
ENSAYO DE CBR INV E - 148**

FECHA	MARZO 16 DE 2015	SONDEO	_____
PROYECTO	ESTABILIZACIÓN DE SUELO	MUESTRA	_____
LOCALIZACION	VEREDA LLANADAS	DESCRIPCION	_____

MOLDE No	13			14			15		
No DE GOLPES	12			26			55		
DIAS DE INMERSION	4			4			4		
PENETRACION (mm)	LEC	CARGA (KN)	PRESION (MPa)	LEC	CARGA(K N)	PRESION (MPa)	LEC	CARGA(K N)	PRESION(M Pa)
0,0	0	0	0,00	0	0	0,00	0	0	0,00
0,6	14	0,1	0,06	19	0,2	0,08	27	0,3	0,12
1,3	22	0,2	0,10	29	0,3	0,13	34	0,3	0,15
1,9	27	0,3	0,12	37	0,4	0,16	47	0,5	0,21
2,5	32	0,3	0,14	44	0,4	0,20	58	0,6	0,26
3,8	40	0,4	0,18	53	0,5	0,24	75	0,7	0,33
5,1	47	0,5	0,21	60	0,6	0,27	86	0,8	0,38
6,4	52	0,5	0,23	66	0,6	0,29	95	0,9	0,42
7,6	56	0,5	0,25	71	0,7	0,32	102	1,0	0,45
10,2	65	0,6	0,29	86	0,8	0,38	111	1,1	0,49
12,7	73	0,7	0,32	94	0,9	0,42	121	1,2	0,54
<b>CBR A 0.1"</b>	2			3			4		
<b>CBR A 0.2"</b>	2			3			4		
<b>CBR CORR. 0.1"</b>	2			3			4		
<b>CBR CORR. 0.2"</b>	2			3			4		
<b>EXPANSION (mm)</b>	4,67			5,18			6,40		
<b>EXPANSION (%)</b>	2,6			4,11			5,0		

%Densidad max	DENSIDAD	CBR(%)
95%	1218,91	2
98%	1257,40	3
100%	1283,06	4



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**  
**ENSAYO DE CBR INV E - 148**

FECHA  
PROYECTO  
LOCALIZACION

MARZO 16 DE 2015  
ESTABILIZACIÓN DE SUELO  
VEREDA LLANADAS

SONDEO  
MUESTRA  
DESCRIPCION

