

**VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE LOS SUELOS DEL
DEPÓSITO LACUSTRE DE LA CIUDAD DE TUNJA, ZONA UNIVERSIDAD
PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA.**

**DIANA PAOLA VELANDIA RATIVA
CÓD.: 201411124**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2019**

**VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LOS SUELOS DEL
DEPÓSITO LACUSTRE DE LA CIUDAD DE TUNJA, ZONA UNIVERSIDAD
PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA.**

**DIANA PAOLA VELANDIA RATIVA
CÓD.: 201411124**

**Trabajo de grado para optar por el título de:
INGENIERO CIVIL**

**Director:
Ing. Msc. LESLY NATHALIE LÓPEZ VALIENTE**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2019**

NOTA DE ACEPTACIÓN

PRESIDENTE DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

TUNJA MAYO 2019

DEDICATORIA

A Dios todopoderoso, por permitirme culminar con éxito esta etapa.

A mis padres y hermana por su constante apoyo y paciencia en el desarrollo de este proceso, porque sin ustedes esta meta no habría sido posible.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, doy gracias a Dios, por permitirme culminar este proceso, a mi director (a) de tesis la ingeniera Lesly Nathalie López por apoyarme y guiarme en este proceso arduo, por creer desde el principio en este proyecto y en mis capacidades.

Especialmente agradezco a las siguientes personas, ya que sin su valioso apoyo no hubiera sido posible la culminación exitosa de esta investigación: JAIRO PINZÓN, LEONARDO FIGUEREDO, INGENIERO CRISTIAN PINILLA, INGENIERO MAURICIO, y en general a cada una de las personas que aportaron en mi proceso de formación, con sus valiosos consejos y paciencia durante este trayecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. PROBLEMA.....	22
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	22
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	23
1.3 PREGUNTA DE LA INVESTIGACIÓN.....	23
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	23
1.5 OBJETIVOS.....	25
1.5.1 Objetivo general	25
1.5.2 Objetivos específicos	25
2. MARCO REFERENCIAL	26
2.1 ESTADO DEL ARTE.....	26
2.2 MARCO CONCEPTUAL	31
2.2.1 Estabilización.	31
2.2.2 Suelo.	31
2.2.3 Silicato de calcio.....	31
2.2.4 Deposito lacustre.....	31
2.2.5 Estabilización química.....	32
2.2.6 Gravedad específica (GS).....	34
2.2.7 Deformación elástica.....	34
2.2.8 Deformación plástica.....	34
2.2.9 Deformación compresiva.....	34
2.2.10 Consolidación.	35
2.3 MARCO TEÓRICO	35
2.3.1 Propiedades geotécnicas de los suelos.	35
2.3.2 Mecánica de suelos.....	36
2.3.3 Silicatos.....	37
2.3.4 Mineralogía de arcillas.	41
2.3.5 Ensayos mineralógicos.	44

2.3.6	Estabilización de suelos.....	44
2.4	MARCO LEGAL.....	46
2.4.1	INV. E 125-13: Determinación del límite líquido de los suelos.	46
2.4.2	INV. E 126-13: Determinación del límite plástico de los suelos.	46
2.4.3	INV. E 128-13: Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos, empleando picnómetro con agua.	46
2.4.4	INV. E 151-13: Consolidación unidimensional de suelos.	46
2.4.5	INV. E 152-13: Compresión inconfiada en muestras de suelos	47
2.4.6	INV. E 154-13: Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD).....	47
2.4.7	INV. E 214-07: Cantidad de material fino que pasa el tamiz de 75 μm (n° 200) en los agregados	47
3.	METODOLOGÍA.....	48
3.1	DISEÑO METODOLÓGICO	48
3.1.1	Tipo de investigación.....	48
3.1.2	Fase 1. Lluvia de ideas y búsqueda de información.....	48
3.1.3	Fase 2. Consulta de bibliografía e infografía, construcción de marco referencial.....	48
3.1.4	Fase 3. Caracterización física y mecánica del suelo.....	49
3.1.5	Fase 4. Análisis químico y mineralógico del suelo.	49
3.1.6	Fase 5. Aplicación de la técnica de mejoramiento.	49
3.1.7	Fase 6. Análisis de la efectividad de la aplicación de la técnica de mejoramiento.	49
3.2	DISEÑO EXPERIMENTAL	51
3.2.1	Variables dependientes.....	51
3.2.2	Variables independientes.	51
4.	INFORMACIÓN PRELIMINAR	54
4.1	ZONA DE ESTUDIO	54
4.2	UBICACIÓN Y OBTENCIÓN DE MUESTRAS	55
5.	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	59
6.	ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS SOBRE EL SUELO	60
6.1	DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE LAS PARTÍCULAS DE LOS SUELOS.....	60
6.2	DETERMINACIÓN DEL LIMITE LÍQUIDO, LIMITE PLÁSTICO.	60

6.3	ENSAYO DE CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN NO CONSOLIDADO NO DRENADO (UU)	61
6.4	ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL	62
6.5	ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA	62
6.6	DIAGRAMA DE FASES	63
6.7	GRAVEDAD ESPECIFICA	63
6.8	DIFRACCIÓN DE RAYOS X	64
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	65
7.1	S1M1	68
7.2	S1M2	69
7.3	S2M2	69
7.4	PROPIEDADES DE LA CASCARILLA DE ARROZ Y LA CAL VIVA	69
7.5	ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE MEJORAMIENTO	74
7.5.1	Variación de las propiedades mecánicas	74
7.5.2	Variación de las propiedades mineralógicas	81
8.	CORRELACIONES Y MODELOS MATEMÁTICOS	93
8.1	ÍNDICE DE COMPRESIBILIDAD	94
8.2	ÍNDICE DE RECOMPRESIÓN	95
8.3	PERMEABILIDAD	96
8.4	HUMEDAD	98
8.5	COHESIÓN (Cu)	99
8.6	ANGULO DE FRICCIÓN	100
8.7	PORCENTAJE DE CUARZO	102
8.8	PORCENTAJE DE MOSCOVITA	103
8.9	PORCENTAJE DE KAOLINITA	104
9.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SILICATO DE CALCIO	107
10.	CONCLUSIONES	108
11.	RECOMENDACIONES	111
12.	BIBLIOGRAFÍA E INFOGRAFÍA	113
13.	ANEXOS	117

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Granulometría del suelo	66
Gráfica 2. Representación del Ip vs LI según la carta de plasticidad de Casagrande	67
Gráfica 3. Carta de plasticidad mineralogía	68
Gráfica 4. Difracción de rayos x de la ceniza de la cascarilla de arroz y la cal	70
Gráfica 5. Composición Porcentual De La Cascarilla De Arroz+Cal	71
Gráfica 6. Comparación mineralógica de la cascarilla de arroz+ cal	71
Gráfica 7. Composición mineralógica de la cal	72
Gráfica 8. Composición Porcentual de la Cal viva	73
Gráfica 9. Comparación mineralógica de la cal.....	73
Gráfica 10. Variación Del Índice De Plasticidad Vs Porcentaje De cca+cal.....	74
Gráfica 11. Variación De Los Límites De Atterberg	75
Gráfica 12. Variación del ángulo de fricción del suelo a diferentes porcentajes de cca+cal.....	75
Gráfica 13. Variación de la permeabilidad del suelo a diferentes porcentajes de silicato de calcio.....	76
Gráfica 14. Variación de la cohesión con el porcentaje de cca+cal	77
Gráfica 15. Variación de la humedad con el porcentaje de silicato de calcio.....	78
Gráfica 16. Variación del índice de compresibilidad (Cc) con el porcentaje de cca+cal.....	79

Gráfica 17. Variación del índice de recompresión con el porcentaje de cca+cal ...	80
Gráfica 18. Difracción de rayos x porcentajes 5, 25, 0.....	81
Gráfica 19. Comparación mineralógica entre las tres muestras (5,25,0) y la adición de ceniza de cascarilla de Arroz+Cal.....	82
Gráfica 20. Cambios mineralógicos en las tres muestras	82
Gráfica 21. Cambios mineralógicos en las 3 muestras, entre 0° y 43°.....	83
Gráfica 22. Variación mineralógica entre la cal y la cca+cal.....	84
Gráfica 23. Difracción de rayos x muestra con 5% de cca+cal	85
Gráfica 24. Comparación porcentual de la composición mineralógica del suelo con 5% de cca+cal	86
Gráfica 25. Comparación mineralógica de suelo con 5% de cca+cal	86
Gráfica 26. Difracción de rayos x muestra con 25% de cca+cal	87
Gráfica 27. Comparación porcentual de la composición mineralógica del suelo con 25% de cca+cal	88
Gráfica 28. Comparación mineralógica de suelo con 25% de cca+cal	88
Gráfica 29. Difracción de rayos x para muestra de suelo en estado natural.....	89
Gráfica 30. Comparación porcentual de los minerales del suelo en estado natural	89
Gráfica 31. Difracción de rayos x para muestra de suelo en estado natural comparación con minerales	90
Gráfica 32. Variación del cuarzo con el porcentaje de cca+cal.....	90
Gráfica 33. Variación de la moscovita con el porcentaje de cca+cal	91
Gráfica 34. Variación de kaolinita con el porcentaje de cca+cal	92

Gráfica 35. Índice de compresibilidad (Cc) en función de índice de plasticidad	94
Gráfica 36. Índice de re-compresibilidad (Cr) en función de IP	95
Gráfica 37. Permeabilidad en función de índice de plasticidad.....	97
Gráfica 38. Humedad en función de índice de plasticidad	98
Gráfica 39. Variación de la cohesión con el índice de plasticidad.....	99
Gráfica 40. Variación del ángulo de fricción con el índice de plasticidad	101
Gráfica 41. Variación del porcentaje de cuarzo con el índice de plasticidad	102
Gráfica 42. Correlación entre índice de plasticidad y porcentaje de moscovita ...	103
Gráfica 43. Correlación entre índice de plasticidad y porcentaje de kaolinita	105

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Deformación del suelo	36
Ilustración 2. Esquema de la disposición espacial de los cationes y aniones	38
Ilustración 3. Esquema de la estructura de la lámina silícica	42
Ilustración 4. Esquema de la estructura de la lámina aluminica	42
Ilustración 5. Arcilla montmorillonita.....	43
Ilustración 6. Penetrabilidad de las distintas mezclas de inyección en arcillas	45
Ilustración 7. Metodología	50
Ilustración 8. Ubicación de la zona de estudio	54
Ilustración 9. Ubicación de las muestras dentro del depósito fluvio-lacustre	56
Ilustración 10. Ubicación de la zona de estudio	57
Ilustración 11. Tubos Shelby obtenidos	57
Ilustración 12. Zona de perforación.....	58
Ilustración 13. Perfil geotécnico	59
Ilustración 14. Ensayo de hidrómetro.....	60
Ilustración 15. Limite líquido	61
Ilustración 16. Corte Directo.....	61
Ilustración 17. Consolidación unidimensional	62
Ilustración 18. Compresión inconfiada	63
Ilustración 19. Gravedad específica.....	64

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipos de arcillas	41
Tabla 2. Coordenadas de las perforaciones	56
Tabla 3. Profundidad de los sondeos.....	59
Tabla 4. Resumen de resultados	65
Tabla 5. Resultados porcentaje de finos.....	65
Tabla 6. Resultados hidrómetro.....	68
Tabla 7. Propiedades de la ceniza de arroz + cal	70
Tabla 8. Coeficientes de correlación propiedades físicas	93
Tabla 9. Coeficientes de correlación propiedades mineralógicas	93
Tabla 10. Resumen estadístico.....	94
Tabla 11. Resumen estadístico.....	96
Tabla 12. Resumen estadístico.....	97
Tabla 13. Resumen estadístico.....	99
Tabla 14. Resumen estadístico de la cohesión en función del índice de plasticidad	100
Tabla 15. Resumen estadístico del ángulo de fricción en función del índice de plasticidad (IP)	101
Tabla 16. Resumen estadístico del porcentaje de cuarzo en función índice de plasticidad (IP)	102

Tabla 17. Resumen estadístico del porcentaje de moscovita en función índice de plasticidad (IP)	104
Tabla 18. Resumen estadístico del porcentaje de kaolinita en función índice de plasticidad (IP)	105
Tabla 19. Análisis comparativo de la aplicación de silicato de calcio en el suelo	107

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Relación de vacíos	32
Ecuación 2. Porosidad	33
Ecuación 3. Grado de saturación.....	33
Ecuación 4. Humedad natural del suelo	33
Ecuación 5. Peso unitario seco (γ_d).....	34
Ecuación 6. Peso unitario saturado	34
Ecuación 7. Peso unitario total.....	34
Ecuación 8. Gravedad específica.....	34
Ecuación 9. Índice de plasticidad en función de porcentaje de cca+cal	74
Ecuación 10. Modelo matemático para ángulo de fricción en función del porcentaje de cca+cal.....	76
Ecuación 11. Permeabilidad en función del porcentaje de cca+cal	76
Ecuación 12. Modelo matemático entre la cohesión y el porcentaje de cca+cal ...	78
Ecuación 13. Humedad en función del porcentaje de cca+cal.....	78
Ecuación 14. Modelo matemático entre C_c en función del porcentaje de cca+cal	79
Ecuación 15. Índice de recompresión en función del porcentaje de cca+cal	80
Ecuación 16. Modelo matemático %cuarzo en función del porcentaje de cca+cal	91
Ecuación 17. Modelo matemático para %moscovita en función del porcentaje de cca+cal.....	91

Ecuación 18. Modelo matemático para kaolinita en función del porcentaje de cca+cal	92
Ecuación 19. Coeficiente de compresibilidad en función de IP.....	95
Ecuación 20. Modelo matemático para Cr en función del índice de plasticidad	96
Ecuación 21. Modelo matemático para permeabilidad en función del índice de plasticidad.....	98
Ecuación 22. Modelo matemático para humedad en función del IP	99
Ecuación 23. Cohesión en función del índice de plasticidad	100
Ecuación 24. Porcentaje de cuarzo en función del índice de plasticidad	103
Ecuación 25. Índice de plasticidad en función del porcentaje de moscovita	104
Ecuación 26. Modelo matemático para porcentaje de kaolinita en función del índice de plasticidad	106

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo1. Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos, empleando un picnómetro (INV E 128-13)	117
Anexo 2. Determinación del límite líquido de los suelos (INV E 125-13, LIMITE PLASTICO E INDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS (INV E 126-13).....	118
Anexo 3. Diagrama de fases.....	119
Anexo 4. Consolidación unidimensional de suelos (INV E 151-13)	120
Anexo 5. Compresión inconfiada en muestras de suelos (INV E 152-13)	121
Anexo 6. Ensayo de corte directo en condición no consolidada no drenada (UU) INV E 154-13:	122
Anexo 7. Cantidad de material fino que pasa el tamiz de 75 µm (N° 200) en los agregados (INV E 214-07)	123
Anexo 8. Ensayo de hidrómetro.....	124
Anexo 9. Difracción de rayos X.....	125
Anexo 10. Evidencias fotografías.....	127

LISTA DE ABREVIATURAS

Cca. Ceniza de cascarilla de arroz
Ka. Kaolinita
Mo. Moscovita
C. Cuarzo
 Φ . Ángulo de fricción del suelo
Cu. Cohesión no drenada
Ip. Índice de plasticidad
Ll. Límite líquido
Lp. Límite plástico
w. Humedad natural del suelo
Gs. Gravedad específica
e. Relación de vacíos del suelo
 η . Porosidad de suelo
Y. Peso unitario del suelo
Cc. Índice de compresibilidad
Cr. Índice de recompresión
K. Permeabilidad

RESUMEN

Desde hace varias décadas se ha venido trabajando en la búsqueda de diferentes materiales y métodos que reduzcan los cambios volumétricos abruptos en el suelo y que a su vez contribuyan al aumento de las propiedades de resistencia, teniendo en cuenta lo anterior se realiza en esta investigación el mejoramiento de un suelo fino con el adicionamiento de silicatos, condición que pretende optimizar las propiedades mecánicas del suelo del depósito lacustre que se compone principalmente de arcillas y suelos blandos, que los hacen susceptibles a grandes deformaciones ante la aplicación de cargas.

Diferentes autores han propuesto el tratamiento de suelos con silicato de calcio, para mejorar las condiciones del terreno, además de la búsqueda de materiales de bajo costo que reduzcan el precio de las inyecciones químicas y de ecuaciones probabilísticas que permitan la aplicación de la sílice de cal en diferentes suelos.

Por lo anterior, la presente investigación tiene como objetivo principal evaluar el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de un suelo fino extraído del depósito lacustre de la ciudad de Tunja, mediante la aplicación de diferentes porcentajes de silicato de calcio a base de cascarilla de arroz, ejecutando pruebas de laboratorio antes y después del mejoramiento, igualmente se hicieron pruebas de Difracción de rayos x (DRX) para evaluar los cambios moleculares que presenta la muestra

PALABRAS CLAVE: *Silicato, Resistencia, Suelo, Deformación, estabilización química, geotecnia, nano-partículas, propiedades mineralógicas*

INTRODUCCIÓN

La estabilización química llevada a cabo con silicatos se inicia a partir del siglo XIX, el primero en proponer silicatos solubles para su comercialización fue Johann Van Fuchs; hacia 1910, el silicato de sodio inicio a usarse como agente impermeabilizado, que, junto con aditivos como silicato de calcio y aluminio, generaban precipitación de sus componentes formando un gel duro. (BERNAL GÓMEZ, 2018)

Hacia 1915 Albert Francois, encontró que se podría incrementar la efectividad de una inyección de cemento si se precedía de silicato de sodio, posteriormente, el ingeniero holandés Hugo Joosten, inyectó silicato de sodio en forma de lechada en fundaciones profundas seguidas por una inyección de cloruro de calcio.

Hacia 1967 en España se usa la primera inyección en obra, para la construcción del metro, esta técnica se desarrolla principalmente en Japón, de acuerdo con el planteamiento que realiza Alvaro Lopez Ruiz al comparar los costos de las técnicas de mejoramiento de suelos, la estabilización con silicatos de sodio, aunque es muy efectiva tiene costos muy elevados.

Actualmente muchas empresas como Sireg Geotech, empresa italiana y SIDESA, comercializan tratamientos productos y maquinaria especializada para realizar seguimientos y tratamiento en los suelos a los cuales se les inyecta el silicato de sodio.

En el siguiente trabajo se evalúa la aplicación de silicato de calcio en una muestra del depósito fluvio-lacustre de la ciudad de Tunja, ya que es una técnica relativamente nueva y ampliamente estudiada por diversos autores en el campo de la ingeniería civil, estos estudios se basan principalmente en la implementación de silicato de sodio, autores como Kermani, Hassani, Aflaki, Benzaazoua, Nokken, investigadores canadienses cuyo trabajo evalúa el efecto del silicato de sodio para el relleno de un mina, esta técnica de tratamiento y estabilización de un suelo se aplica principalmente en suelos expansivos, con gran cantidad de arcillas, ya que, como lo dice Eduardo Besoain, en su libro mineralogía de arcilla en suelos, la arcilla está constituida por minerales de montmorillonita e Illita, pertenecientes al grupo de silicatos, que se componen de aluminio, hierro y magnesio, entre muchos otros, estos a su vez forman laminas, que al ser hidratadas y por su estructura cristalina débil absorben el agua produciendo expansión del suelo, generando problemas en las estructuras.

Las investigaciones realizadas en el área de estabilización de suelos con silicato de sodio se enfocan principalmente en encontrar cantidad óptima de sílice con la cual se mejoran propiedades mecánicas del suelo tales como: resistencia a la compresión inconfiada, resistencia al corte, consolidación y en el caso de ser usado para vías CBR, autores como Brabston, William N; Hammitt, George M. han escrito algunas consideraciones para tener en cuenta en cuanto a las características del suelo, a las ventajas y desventajas que tiene el uso de diferentes técnicas de estabilización.

Este trabajo tiene como finalidad recolectar información de diversas fuentes (artículos, revistas, libros) comparando datos y esquemas propuestos por diferentes autores para obtener correlaciones y parámetros estandarizados en cuanto a la aplicación de silicatos de calcio, se evalúan efectos físicos y geo-mecánicos en suelos finos, adicionalmente se busca contribuir a la ampliación de conocimiento de la ingeniería civil y específicamente de la rama de la geotecnia en el área de estabilización de suelos tema tratado por diferentes investigadores y empresas; ya que actualmente en la aplicación del mejoramiento de suelos se busca reducir los daños ambientales que se causan al suelo mediante la implementación de sustancias como geo-polímeros y el reemplazo de aditivos como el cemento, de igual manera se busca reducir los costos y tiempos en obra.

1. PROBLEMA

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La Ciudad de Tunja se encuentra ubicada sobre una meseta en la cordillera oriental de los Andes, a 130 km de la ciudad de Bogotá, se halla en la unidad morfológica del altiplano cundiboyacense; se presentan precipitaciones de 645 mm al año en promedio, de acuerdo con el IDEAM en la ciudad en la temporada seca llueve entre 5 y 10 días al mes y en temporada de lluvias aproximadamente entre 17 y 19 días, lo que indica que en los suelos del municipio contiene casi en la totalidad del año agua y su nivel freático es cercano al nivel del terreno, esto implica que en suelos arcillosos se aumenten las deformaciones en periodos lluviosos y haya un flujo y cambios por reducciones de volumen en épocas de sequía, aumentando así las deformaciones presentadas especialmente en el depósito lacustre, cuya composición tiene materiales finos de arenas y arcillas.

De acuerdo con historia geológica de la ciudad de Tunja, sus suelos se caracterizan por presentar contenidos de arcillas y arenas, especialmente los que se encuentran ubicados dentro del depósito lacustre de la ciudad, lo que los hace susceptibles a grandes deformaciones generando en algunas ocasiones asentamientos diferenciales que hacen que las estructuras se vean afectadas, suelos que por su composición conservan el agua aumentando así la plasticidad de este.

Actualmente en Ingeniería Civil y específicamente en la rama de Geotécnica se ha encontrado que los suelos presentan distintas propiedades como permeabilidad, cohesión, resistencia al corte, porosidad, entre otras, propiedades que contribuyen a la estabilidad del mismo, condicionando su capacidad de soporte y sus procesos de deformación, cuando estos procesos de deformación son excesivos requieren análisis más profundos, por esta razón actualmente se busca la manera de mejorar estas condiciones de modo que se reduzcan los costos en cimentaciones y además que se prevean futuros deterioros en las estructuras, bajo estos preceptos, existen diferentes procesos físicos y químicos por medio de los cuales se logra modificar la estructura físico-química de los suelos contribuyendo así al mejoramiento del mismo.

Teniendo en cuenta la literatura consultada, se evidencia que las cimentaciones, aunque son parte fundamental de la estructura tienen elevados costos, en algunos terrenos debido a la falta de propiedades de resistencia adecuadas, se sugiere la realización de mejoramientos de suelos acompañada de cimentaciones más profundas, evaluando en cada caso el tipo de mejoramiento requerido, ya que cada

suelo presenta un comportamiento distinto ante la aplicación de cales, inyecciones y cemento.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo del depósito lacustre por medio de la mezcla de ceniza de cascarilla de arroz y cal?

1.3 PREGUNTA DE LA INVESTIGACIÓN

Por medio del uso de silicatos de calcio a diferentes porcentajes ¿se mejoran las propiedades de resistencia de las muestras obtenidas del depósito lacustre de la ciudad de Tunja?

1.4 JUSTIFICACIÓN

A través de esta investigación se pretende contribuir a dar una solución viable a los cambios volumétricos producidos en suelos con alto contenido de finos por su bajo tiempo de consolidación y por la presencia de niveles freáticos. Teniendo en cuenta lo anterior se busca evaluar una técnica de mejoramiento de suelos aplicada a una zona del depósito lacustre de la ciudad de Tunja específicamente a suelos extraídos con barreno manual en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia , que permita desarrollar un modelo matemático del comportamiento del suelo al inyectar silicatos de calcio; ya que, la ciudad tiene un crecimiento acelerado y actualmente se desarrollan proyectos de gran envergadura, incluyendo edificios de gran altura, que requieren de grandes inversiones de dinero para lograr cimentaciones adecuadas y evitar daños en las estructuras, se requiere a si mismo de técnicas que reduzcan costos de cimentación y que mejoren el comportamiento del suelo como se mencionó anteriormente .

Los depósitos lacustres por lo general se caracterizan por tener alto contenido orgánico, su granulometría es fina, en cuanto a su litología se caracterizan por tener areniscas, arcillas de grano fino y calizas o evaporitas, específicamente la ciudad de Tunja se caracteriza por su contenido de arcillas con diatomeas, de acuerdo con las características mencionadas anteriormente se puede esperar que los terrenos pertenecientes al depósito lacustre presenten en algunos casos capacidad de resistencia bajas y por lo tanto las construcciones que se encuentran sobre este tenga problemas o requieran de cimentaciones especializadas y mejoramientos de

suelo, la opción que se pretende dar con este proyecto es reducir los costos para tratamiento de suelos y evaluar el porcentaje de mejoramiento de suelo y su capacidad de resistencia.

Los suelos como las arenas presentan fricciones grandes, pero cohesiones bajas y en presencia de agua presentan fenómenos de licuefacción, permitiendo el hundimiento de edificaciones y daños colaterales grandes. (“Cohesión y Fricción Interna: Propiedades del Suelo. | APUNTES INGENIERÍA CIVIL,” n.d.), las arcillas por su parte son suelos con cohesiones altas debido a su formación molecular, permitiendo deformaciones grandes en tiempos muy cortos y con consolidaciones que requieren de mucho tiempo para alcanzar su estabilidad.

Actualmente no se cuenta con un modelo matemático que permita correlacionar las propiedades de distintos suelos con el porcentaje de estabilizador, esto aumenta los tiempos de evaluación de ciertas técnicas de mejoramiento y por lo tanto genera retrasos en las obras, es así como por medio de esta investigación se pretende generar modelos matemáticos que a través de diferentes ecuaciones permitan tener un conocimiento del comportamiento del suelo ante la aplicación de una mezcla de material que aumente su resistencia, esto previo a la realización de otros ensayos que corroboren y precisen la información.

De acuerdo con Aguilar Sierra la ceniza resultante de la quema de cascarilla de arroz contiene un porcentaje en sílice superior al 90%, lo cual la hace una potencial fuente de sílice, presentando algunas impurezas que disminuyen la posibilidad de ser usada para otros fines; el impacto ambiental generado por los residuos es bastante alto, pues se generan grandes cantidades de cascarilla de arroz (82 Ton/día), es un residuo que actualmente es manejado inadecuadamente, porque es dispuesto en botadores de basura a cielo abierto, se presenta incineración y quema indiscriminada del mismo residuo afectando así el suelo, el paisaje y el recurso aire, actualmente no existe una alternativa que permita darle un manejo adecuado. (Aguilar Sierra, 2009).

Así pues, con esta investigación se pretende darle otro tipo de usos a la ceniza producida en la industria arrocera, que al ser tratada adecuadamente y mezclarse con otros materiales y áridos, contribuyen de manera significativa a la generación de lechadas y silicatos que a su vez aumentan y mejoran las propiedades de resistencia del suelo.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo general

Evaluar el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas del depósito lacustre de la ciudad de Tunja, sector Unicentro-Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, mediante la aplicación de silicato de calcio.

1.5.2 Objetivos específicos

- Elaborar micro y nano partículas de silicato de calcio a base de cascarilla de arroz, por medio de reacciones químicas.
- Analizar la variación de las propiedades mecánicas de los suelos antes y después de la aplicación de 5 porcentajes de gel de silicato de calcio: 5, 10, 15, 20, 25. Por medio de tablas y graficas que permitan la interpretación.
- Concluir sobre las ventajas y desventajas de la aplicación de silicato de calcio en suelos provenientes del depósito lacustre por medio de la realización de una tabla comparativa
- Generar un modelo matemático que permita correlacionar las propiedades físicas del suelo con el porcentaje de silicato de calcio, mediante la aplicación de regresiones a los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio.

2. MARCO REFERENCIAL

El marco referencial de esta investigación se muestra a continuación, contiene estado del arte, marco teórico y marco conceptual tenido para el desarrollo del presente trabajo.

2.1 ESTADO DEL ARTE

En el siguiente estado del arte se presentan diversos estudios consultados como fuente de información del proyecto. Para desarrollar la investigación se deben tener en cuenta varios factores, entre ellos, fisicoquímica del suelo de estudio, mineralogía de arcillas, técnicas de análisis de minerales presentes en el suelo, caracterización físico-mecánica del suelo, entre otras.

En el año 2014 en Malasia Bahmani, Sayed Hessam, Huat, Bujang B K Asadi, Afshin Farzadnia, Nima plantearon su artículo “estabilización de suelos residuales usando nanopartículas de silicato y cemento”, en esta investigación se buscó que el contenido de cemento reaccionara con el silicato (SiO_2) formando silicato de calcio hidratado aumentando así la resistencia de los suelos de estudio, los resultados arrojaron que la adición de más de 0,4% de nano-silica en el cemento tiene un efecto adverso en la resistencia al corte del suelo, este artículo es importante para el desarrollo del proyecto ya que indica la cantidad de nanopartículas con las cuales se logra un cambio en las propiedades de los suelos, además sirve como parámetro de comparación con los resultados de los ensayos que se pretende realizar en esta investigación.

Concluyen que el tamaño de las partículas adicionadas a la mezcla no genera un impacto en el límite líquido a ningún nivel de cemento, pero si produce cambios en el límite plástico al aumentar la cantidad de cemento (4%) por partículas de silicato. El cambio más notorio se da con partículas de 15 nm. De acuerdo con los autores estos cambios se producen debido a que con mayores cantidades de cemento las nano partículas se hidratan más rápido (Bahmani, Huat, Asadi, & Farzadnia, 2014), este artículo es importante, ya que, da una idea inicial del tamaño de las partículas que generan afectaciones y cambios positivos en el suelo al aplicar cemento.

De acuerdo con Bahmani al disminuir el tamaño de partículas de nano-silicato se logra aumentar la resistencia a la compresión del suelo. Los investigadores concluyen que es un 85% más efectivo aplicar cemento con nanopartículas que solo aplicar cemento, adicionalmente al aumentar la cantidad de nanopartículas decreció

la densidad máxima y aumento el contenido de humedad óptimo. (Bahmani et al., 2014).

En el año 2017 los autores Ghasabkolaei, Navid Janalizadeh Choobbasti, Asskar Roshan, y Nader Ghasemi, Seiyed E, realizaron un revisión bibliográfica recolectando estudios previos sobre los avances que se han hecho en nanotecnología aplicada en geotecnia, en esta revisión se encontró que las nanopartículas a pesar de su tamaño y su peso tiene una influencia severa en los cambios físicos, químicos y en las propiedades ingenieriles, se ha encontrado que con partículas nanométricas se aumenta la superficie de área específica y así mismo se aumenta la capacidad de absorción del material, además de acuerdo con autores citados en el artículo propuesto, como Gutiérrez, la arcilla se considera un nanomaterial y por lo tanto puede controlarse con nanopartículas. (Ghasabkolaei, Janalizadeh Choobbasti, Roshan, & Ghasemi, 2017)

Gallagher y Mitchell en 2005 comprobaron que al aumentar las concentraciones de silica, específicamente al 5% del peso total (wt) se reducen los riesgos de licuefacción en caso de carga sísmica, además indica que usar más de 10% wt, se vuelve muy costoso. Hacia 2012 Gallagher por medio de ensayos de centrifugación comprobó que al aumentar el porcentaje de silica se disminuyó la deformación presentada en el suelo por licuefacción (Conlee, Gallagher, Boulanger, & Kamai, 2012) .

De acuerdo con el manual de práctico para la estabilización de suelos con cal, los resultados encontrados son aumento en el peso específico, menor porosidad, y un mayor crecimiento, tanto de las partículas como de los cristales de los óxidos. (Anaya Gómez, Sotelo Cornejo, & Morales y Monroy, 2015)

Mashifana, Tebogo Pilgrene Okonta, Felix Ndubisi Ntuli, Freeman hacia 2018, describen en su artículo propiedades geotécnicas y microestructura de ceniza volante como estabilizador de suelo, como mejorar las propiedades físicas y mecánicas de un suelo expansivo por medio del uso de residuos industriales como el silicato de calcio hidratado y las cenizas volantes, ellos desarrollaron compuestos con una mezcla de escoria-silicato de calcio hidratado. Se evaluó el efecto del tratamiento con ácido sobre las propiedades geotécnicas y la microestructura del suelo expansivo estabilizado con cenizas volantes (PG-LFA-BOF), en comparación con el silicato de calcio hidratado no tratado. El suelo expansivo estabilizado con pasta de PG-LFA-BOF tratada con ácido exhibió mejores propiedades geotécnicas. La microestructura del suelo fue mejorada debido a la formación de productos de hidratación. La estabilización de suelos expansivos con silicatos de calcio hidratado, cenizas volantes y escoria no solo mejora las propiedades de ingeniería del suelo,

sino que también proporciona una solución en relación con la eliminación y la contaminación ambiental. (Mashifana, Okonta, & Ntuli, 2018)

Este artículo sirve como referencia para la tesis, ya que, permite dar a conocer algunas metodologías alternas al uso de químicos en el suelo, además permite comparar el porcentaje y el nivel de mejora al que se llega con el uso de cenizas volantes y silicato de calcio, indicando el efecto final en el medio ambiente que se tiene comparado con otras técnicas de mejoramiento actuales.

En Colombia, se han realizado algunas investigaciones basadas en la estabilización de suelos con silicatos de sodio, principalmente usados en tratamiento de arcillas ya que las arcillas cuentan con sales de calcio que reaccionan con los silicatos haciendo que la unión entre cristales sea mucho más fuerte, por esta razón también se aumenta la resistencia al corte y a la compresión confinada, una de estas investigaciones fue realizada por Erick Avellaneda y Joan Camilo Galindo en esta se aplicó silicato de sodio en un suelo arcilloso de alta plasticidad, de consistencia muy blanda y moderado contenido de materia orgánica, de acuerdo con ellos se encontró que el porcentaje óptimo para mejorar las características y propiedades geo-mecánicas es del 6,4% (Avellaneda Moreno & Galindo Torres, 2016)

Foad Changizi y Abdolhosein Haddad en el año 2015 en Iran, publican un artículo llamado Propiedades de resistencia de la arcilla blanda tratada con una mezcla de nano oxido de silicio, en este artículo se investiga el efecto de la fibra de poliéster reciclada, producida a partir de botellas de polietileno (PET), en combinación con nano-SiO₂ como un nuevo estabilizador para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos, especialmente la resistencia al corte y la resistencia a la compresión no confinada (UCS), utilizando suelos arcillosos con un límite de líquido bajo. Se utilizan tres combinaciones diferentes de relaciones fibra-suelo que oscilan entre el 0,1% y el 0,5%, así como tres combinaciones diferentes de proporciones de nano-suelo que varían entre el 0,5% y el 1%.

La resistencia al corte y la UCS de las muestras tratadas se obtienen de la prueba de corte directo y la prueba de compresión no confinada, respectivamente. Los resultados de este estudio muestran que la adición de fibra de poliéster reciclada y nano-SiO₂ aumenta la resistencia de las muestras de suelo. Tanto la resistencia al corte como el UCS se mejoran al aumentar el contenido de fibra de poliéster reciclado y nano-SiO₂ en la mezcla del suelo. La adición de fibra de poliéster reciclada mejora las propiedades mecánicas de los suelos estabilizados con nano-SiO₂, y la fibra de poliéster reciclada tiene un efecto positivo en los comportamientos del suelo, el porcentaje óptimo encontrado fue del 0,3% de poliéster. (Changizi & Haddad, 2015).

El anterior estudio contribuye significativamente al desarrollo de esta tesis ya que permite comparar parámetros e índices de mejoramiento y sus respectivos porcentajes con los parámetros planeados en esta tesis, además la técnica aplicada en este artículo es similar a la tesis desarrollada, ya que, se aplican ciertos porcentajes de óxido de silicio mezclados con otros compuestos orgánicos o reciclables.

En 2014 Maria Chrysochoou realizó una investigación para establecer una relación cuantitativa entre las propiedades mineralógicas (microscópicas) y de resistencia (macroscópicas) de cal estabilizada con arcilla de caolinita, cemento portland y Clase C cenizas volantes, se sometió a proceso de curado por 7, 28, 90 y 300 días evaluando la disminución de caolinitas por medio de difracción de rayos X, para lograr extrapolar los datos de un estudio a otro, ya que cada suelo presenta comportamientos independientes. Se llegó a la conclusión de que la difracción de rayos X, es un método viable para producir evaluaciones cuantitativas de la mineralogía del suelo y que es posible seguir el desarrollo de modelos que predicen la resistencia de los suelos químicamente estabilizados en función de parámetros fundamentales, incluida la mineralogía del suelo y el peso unitario seco. (Chrysochoou & Asce, 2014). Es importante tener en cuenta este artículo, ya que, permite correlacionar ensayos mineralógicos con ensayos geotécnicos y obtener parámetros para comparar diferentes suelos y poder aplicar técnicas de mejoramiento de manera más precisa, en este trabajo se buscó medir que materiales se reducen con el tiempo de curado.

Latifi, Nima Meehan, Christopher L. Majid, Muhd Zaimi Abd Horpibulsuk, Suksun en 2016 realizaron un estudio donde se examina los cambios dependientes del tiempo inducidos en las características de resistencia, mineralogía, morfología, molecular y de microfibras de arcillas moronilloníticas y caoliníticas estabilizadas con un aditivo no tradicional a base de calcio, SH -85.

Los mecanismos de unión fisicoquímica inducidos por el proceso de estabilización se estudiaron a un nivel micro utilizando diversas técnicas espectroscópicas y microscópicas, como la difracción de rayos X (XRD), la microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (FESEM), la espectrometría de rayos X de dispersión de energía (EDAX), espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (FTIR).

Brunauer, Emmett y Teller (BET) análisis de área de superficie y análisis de tamaño de partículas (PSA) utilizando un enfoque de difracción láser. También se realizaron pruebas de resistencia a la compresión no confinada (UCS) en muestras

estabilizadas en varios tiempos de curado para examinar las características de nivel macro.

Los resultados de la prueba de UCS mostraron que el contenido de aditivos del 6% y el 9% fueron óptimos para las arcillas montmorilloníticas y caoliníticas, respectivamente, con una mejora de la UCS tanto de las arcillas estabilizadas significativamente después de 7 días de curado. El estudio a nivel micro reveló que el aditivo a base de calcio modificó la red porosa de las arcillas estabilizadas. Los poros se rellenaron y las partículas se unieron mediante productos cementosos, que incluyen hidrato de silicato de calcio (C-S-H) e hidrato de aluminato de calcio (C-A-H). (Latifi, Meehan, Majid, & Horpibulsuk, 2016).

Este documento es importante, ya que, en la tesis presentada se utilizó silicato a base de silicio y calcio y se analizaron propiedades micro y macroscópicas de materiales finos, se puede entonces comparar los resultados obtenidos por estudios realizados anteriormente y compararlos para conocer si la técnica de mejoramiento es efectiva

En 2015 en Iran, Sadrjamali y Negahdar usaron diferentes aditivos, entre ellos cal, nano y micro silicato de sodio, sulfato de calcio hidratado y mezclas de micro y nano sílice con cemento, para evaluar el cambio en la cohesión y el ángulo de fricción de una arcilla de baja plasticidad, de acuerdo con este estudio se concluyó que el sílice por sí solo no produce una reacción en el suelo y se hace necesario un activador en este caso el cemento, además la nano sílice es mucho más efectiva en bajos porcentajes, lo contrario sucede con la micro sílice que es más efectiva en porcentajes altos, además se concluyó que el porcentaje óptimo para la estabilización de este suelo con mezclas de nano-sílice es el 2% y con micro-sílice es del 5% (Sadrjamali, Athar, & Negahdar, 2015)

En el año 2008, en Uruguay se realizó un estudio donde se caracterizó un material compuesto por suelo arenoso, cal y ceniza de cascarilla de arroz, para utilizarlo en bases y sub-bases de un pavimento de bajo tránsito, en este artículo se concluyó que la cascarilla de arroz al reaccionar con la cal a diferentes porcentajes aumentan la resistencia del suelo y además observa un aumento importante en el CBR del suelo, adicionalmente se analiza la composición de la ceniza de la cascarilla de arroz y como esta reacciona con el suelo de estudio y la cal, lo cual es un aporte importante a esta investigación ya que permite comparar los resultados obtenidos para estos materiales junto con los que se proponen en esta investigación. (Behak & Peres Núñez, 2008)

2.2 MARCO CONCEPTUAL

En este marco conceptual se dan algunas nociones sobre las categorías y temas a tratar en esta investigación, teniendo en cuenta los parámetros bases de referencia para poder desarrollar los objetivos propuestos.

2.2.1 Estabilización.

Proceso mediante el cual se somete los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento, obteniéndose un suelo firme estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas. (Correa, 2006)

2.2.2 Suelo.

Estructura que forma parte de la litosfera conformada por roca en estado sólido y roca meteorizada, presenta vacíos que se encuentran llenos de fluidos y en algunos casos de agua. (Ramirez, 2015)

Se denomina suelo a todo agregado natural no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta junto con el agua y aire que ocupan los espacios vacíos entre partículas sólidas, se puede definir como el conjunto de partículas minerales o de materia orgánica en forma de depósito, generalmente minerales, pero a veces de origen orgánico, que pueden separarse por medio de una acción mecánica sencilla y que incluyen cantidades variables de agua y aire. (UNE-EN ISO 14689-1, 2005)

2.2.3 Silicato de calcio.

CSH: Silicato de Calcio Hidratado – $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Los silicatos de calcio hidratados son compuestos del sistema SiO_2 - CaO - H_2O . Estos materiales se utilizan para fabricar ladrillos de cal-arena, hormigones aireados (espumados), ladrillos de cal-flint, como material de relleno en las industrias de productos de caucho, pinturas y plásticos, entre otros posibles usos. En este trabajo se muestra la obtención de compuestos de silicato de calcio a través del método de precipitación controlada usando como fuente de silicio el dióxido de silicio, SiO_2 obtenido de la cascarilla de arroz.

2.2.4 Deposito lacustre.

Acumulación de material depositado en un lago. Por extensión cualquier acumulación de material depositado en un cuerpo extenso de agua dulce en el que la velocidad de circulación del agua sea nula o cercana a cero. Normalmente los depósitos lacustres están formados predominantemente por arcillas y en menor proporción por limos.

2.2.5 Estabilización química.

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.

2.2.6 Relación de vacíos (e).

De acuerdo con algunos autores y como lo describe el ingeniero Oscar Ramírez en su libro de geotecnia Básica tomo 1, la relación de vacíos es la relación existente entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos del suelo. Su valor teórico puede variar de cero a infinito, aunque en la práctica no suelen encontrarse valores inferiores a 0.25 (arenas muy compactas con finos) ni mayores de 15 (arcillas totalmente compresibles). (Ramírez, 2015)

La relación de vacíos también puede definirse como una relación entre: el volumen de espacios vacíos, y el volumen de las partículas sólidas en una masa de suelo. Su valor puede ser menor a 1, y puede alcanzar valores muy altos. (Duque & Escobar, 2016), su fórmula se muestra en la

Ecuación 1. Relación de vacíos

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

$V_v = \text{volumen de vacios}$
 $V_s = \text{volumen de solidos}$

Fuente: (Duque & Escobar, 2016). Relación de vacíos. [Ecuación]. p31.

2.2.7 Porosidad (η).

La porosidad es el índice de la velocidad con que el agua puede atravesar el suelo o roca, es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de una muestra. (Ramírez, 2015).

Es una relación, expresada como un porcentaje, entre: el volumen de espacios vacíos de un suelo, y el volumen total de la muestra, se puede decir que es la probabilidad de encontrar vacíos en el volumen total. (Duque & Escobar, 2016).

Ecuación 2. Porosidad

$$\eta = \frac{V_v}{V_t} * 100 (\%)$$

Fuente:(Duque & Escobar, 2016). Porosidad. [Ecuación]. p30.

2.2.8 Saturación (s).

La saturación es la propiedad física que indica el porcentaje de volumen de vacíos de la muestra que están llenos de agua, se expresa como un porcentaje en relación con el volumen total de vacíos (Vv) y el volumen de agua (Vw) que posee el suelo.

Ecuación 3. Grado de saturación

$$S = \frac{V_w}{V_v} x 100$$

Fuente:(Duque & Escobar, 2016). Saturación. [Ecuación]. p32.

2.2.9 Humedad (w).

Esta propiedad expresa la porción de agua presente en un elemento de suelo; varía teóricamente de cero a infinito, pero los valores reales están en el intervalo 0% a 100%, para condiciones saturadas. Actualmente hay distintas fórmulas para encontrar el valor de humedad en función de características como gravedad específica del suelo, relación de vacíos y pesos unitarios.

Ecuación 4. Humedad natural del suelo

$$w = \frac{W_w}{W_s}$$

Fuente: (POLITECNICA, n.d.). Humedad natural del suelo. [Ecuación]. p5.

2.2.10 Peso unitario (Y).

Varía de acuerdo con el peso molecular de los minerales que conforman el material, los suelos de menor peso unitario y los más altos pesos corresponden a roca. El peso unitario total incluye el peso de sólidos y el peso del agua que contenga la muestra. El peso unitario del suelo puede variar desde el estado seco (Yd) (Ecuación 5), hasta el saturado (Ys) y un estado intermedio que depende del grado de saturación del suelo.

Peso seco (Ws), volumen total (Vt), peso saturado (Wsat), peso total (Wt), peso unitario del agua (Yw)

Ecuación 5. Peso unitario seco (γ_d)

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t}$$

Fuente:(Duque & Escobar, 2016). Peso unitario seco. [Ecuación]. p33

Ecuación 6. Peso unitario saturado

$$\gamma_{sat} = \frac{W_{sat}}{V_t}$$

Fuente: (Duque & Escobar, 2016). PESO UNITARIO SATURADO. [Ecuación]. p33

Ecuación 7. Peso unitario total

$$\gamma_t = \frac{W_t}{V_t}$$

Fuente: (Duque & Escobar, 2016). Peso unitario total. [Ecuación]. p33

2.2.11 Gravedad específica (GS).

Es la relación entre dos pesos: el peso de sólidos presentes en el material por evaluar y el peso de un volumen de agua igual al volumen de sólidos. En la ecuación 8 se muestra, la relación descrita anteriormente.

Ecuación 8. Gravedad específica

$$GS = \frac{\gamma_t}{\gamma_w}$$

Fuente: (Duque & Escobar, 2016). Gravedad específica del suelo. [Ecuación]. p34

2.2.12 Deformación elástica.

El suelo puede recobrar su forma y dimensiones originales, cuando cesa la fuerza de deformación.

2.2.13 Deformación plástica.

Se da corrimiento de la masa del suelo, pero la relación de vacíos permanece más o menos constante. Al retirar las cargas el suelo queda deformado, pero su volumen casi se mantiene.

2.2.14 Deformación compresiva.

En este caso se presenta deformación en el suelo sometido a carga, y esta se conserva después de esa acción. Esta deformación puede ser por consolidación o por compactación.

2.2.15 Consolidación.

Es la reducción gradual de volumen del suelo por compresión debido a la aplicación de cargas estáticas. También puede darse por pérdida de aire o agua, o por un reajuste de la fábrica textural.

2.3 MARCO TEÓRICO

Actualmente se conocen algunas teorías y leyes sobre elasticidad, comportamientos del suelo y sus propiedades y características, que pueden ser útiles y dar una idea sobre este tema.

2.3.1 Propiedades geotécnicas de los suelos.

Dentro de la Ingeniería Civil se tiene el estudio de los suelos que conforman la parte superficial de la corteza terrestre, donde define como suelo “*aquel agregado con tres fases (partículas, aire, agua)*” (Ramirez, 2015). Compuesto por tres fases: fase sólida, fase líquida y fase gaseosa, fases que se describen a continuación

2.3.1.1 Fase sólida.

Constituida por las partículas minerales que conforman las rocas y los suelos las cuales pueden tener tamaños macroscópicos o microscópicos, se presentan en cantidades variables.

2.3.1.2 Fase líquida.

Conformada principalmente por agua, aunque existen otros líquidos que se encuentran llenando los espacios existentes en la estructura de la roca o del suelo (agua intersticial) y en algunas ocasiones su cantidad es tal que los llena completamente originando así los suelos y las rocas saturadas. La capa viscosa del agua absorbida también se incluye dentro de esta fase, pues puede desaparecer al someter el suelo a un proceso de secado.

2.3.1.3 Fase gaseosa.

La comprenden el aire y los gases que ocupan los poros que no han sido llenados por los líquidos que componen el suelo.

De acuerdo con lo anterior donde se tiene descritas cada una de las fases que compone el suelo, para resolver cada fase inherente al mismo se tiene una rama dentro del área de Geotecnia que se llame mecánica de suelos que se encarga de determinar las propiedades relevantes del suelo, a continuación, se hace un recuento de dicha rama.

2.3.2 Mecánica de suelos.

Terzaghi define la mecánica de suelos como “la aplicación de las leyes de la mecánica y la hidráulica a los problemas de ingeniería que tratan con sedimentos y otras acumulaciones no consolidadas de partículas sólidas, producidas por la desintegración mecánica o la descomposición química de la roca, independiente que tengan o no materia orgánica”. (Duque & Escobar, 2016)

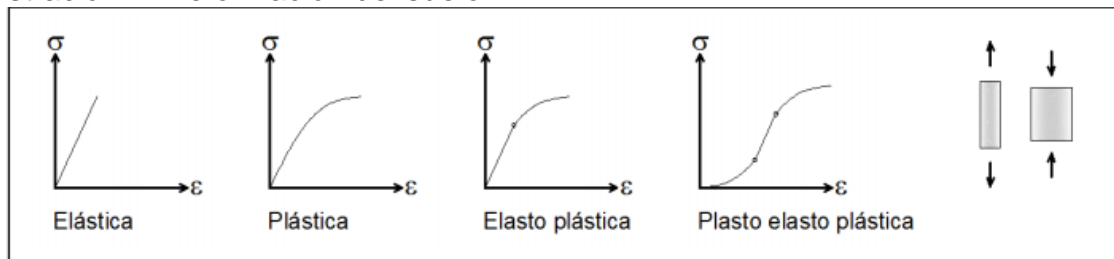
La mecánica de suelos estudia el comportamiento de suelos mediante modelos matemáticos que intentan predecir el comportamiento del suelo ante distintas sollicitaciones, debido a que el suelo tiene características distintas y físicamente es variable, se hace difícil que mediante un solo modelo se explique este comportamiento, se han venido desarrollado otras teorías que se adaptan a cierto tipo de suelos, como lo es la teoría de la elasticidad que permite asemejar el suelo con un modelo elástico, evaluando sus deformaciones, a continuación se explica más detalladamente esta teoría.

2.3.2.1 Teoría de elasticidad suelos.

El propósito de la teoría de la elasticidad es describir el comportamiento de un sólido deformable desde el punto de vista de la mecánica de medios continuos, ya que la elasticidad estudia la relación entre las fuerzas aplicada los cuerpos y sus correspondientes deformaciones. El modelo matemático construido para describir el comportamiento del sólido, tiene como incógnitas fundamentales los desplazamientos de los puntos del sólido. (Sanchez, 1998).

De acuerdo con las leyes que rigen la teoría de la elasticidad en cualquier sólido y teniendo en cuenta, la ley de Hooke y el módulo de Young, que explica las fuerzas que actúan en un resorte, modelo que se asemeja a un al comportamiento de otros materiales, aunque esta ley considera que el material analizado es continuo, homogéneo, isotrópico, lineal y elástico, ya que, el suelo no tiene un comportamiento ideal, esta teoría aplica hasta el límite elástico del material, en la Ilustración 1, se pueden apreciar las deformaciones que presenta el suelo, que pueden ser permanentes o no, dependiendo la carga que aplique al suelo.

Ilustración 1. Deformación del suelo



Fuente: DUQUE, Gonzalo; ESCOBAR, Carlos. Relaciones gravimétricas y volumétricas del suelo. [Imagen]. Geomecánica. Colombia. 2016. p.108

2.3.2.2 Plasticidad.

La plasticidad es la propiedad que expresa la magnitud de las fuerzas de las películas de agua dentro del suelo, ya que, éstas permiten que el suelo sea moldeado sin romperse hasta un determinado punto. Es el efecto resultante de una presión y una deformación. La forma laminar ejerce una influencia importante en la compresibilidad de los suelos, mientras que el pequeño tamaño propio de esas partículas hace que la permeabilidad del conjunto sea muy baja.

De acuerdo con la mecánica de suelos puede definirse la plasticidad como *“la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse”*. (Juarez Badillo & Rodriguez Rico, 2005)

De acuerdo con Atterberg, Terzaghi y Goldschmidt han revelado que la plasticidad de los suelos se debe a la carga eléctrica de las partículas laminares, que generan campos, que actúan como condensadores e influyen en las moléculas bipolares del agua. En los suelos plásticos, el espesor de estas capas de agua sólida y viscosa influidas es grande, y su efecto en la interacción de las partículas de suelo determina su plasticidad.

- **Límites de Atterberg.**

El comportamiento de los suelos finos está asociado a la cantidad de agua presente en sus vacíos, se han adoptado ciertos valores límites para predecir su comportamiento antes distintos valores de humedad, a partir de estos los suelos finos cambian su comportamiento. De acuerdo con su contenido de humedad, puede presentar cuatro estados de consistencia y en cada estado su respuesta ante la modificación de la condición de esfuerzos o de deformaciones es diferente. El primer estado es seco, para una humedad de 0% y a partir de este punto la humedad va aumentando hasta alcanzar el estado elasto-plástico, plástico y luego viscoso, conocidos comúnmente, como límite de contracción, límite plástico y límite líquido, respectivamente.

Debido a que el comportamiento físico y mecánico, como se mencionó anteriormente está determinado por la distribución laminar y la mineralogía correspondiente a cada suelo en seguida se presenta un breve recuento de los principales grupos y sub-grupos que componen los suelos finos, que son objeto de este estudio.

2.3.3 Silicatos.

A continuación, se presenta un breve resumen de la composición fisicoquímica y mineralógica de silicatos y compuestos de suelos finos que permiten evaluar los cambios sufridos al inyectar silicato de calcio, por la interacción química de minerales.

2.3.3.1 Mineralogía silicatos.

Se define como mineral a una sustancia inorgánica y natural, que tiene una estructura interna característica determinada por un cierto arreglo específico de sus átomos e iones. Su composición química y sus propiedades físicas o son fijas o varían dentro de límites definidos. (Juarez Badillo & Rodriguez Rico, 2005)

“Los silicatos son todos aquellos minerales que tienen como unidad básica fundamental al tetraedro de silicio (SiO_4)⁴⁻: un catión de silicio (Si^{4+}) enlazado con 4 aniones de oxígeno (O^{2-}), los cuales se hallan dispuestos a su alrededor en las direcciones de los vértices de un tetraedro”(Ibañez, Moreno, & Gisbert, 2011), el enlace que une los iones de silicio con los de oxígeno es mitad iónico y mitad covalente lo que los hace mucho más fuerte.

Ilustración 2. Esquema de la disposición espacial de los cationes y aniones



Fuente: IBÁÑEZ, Sara; MORENO, Ramón; GISBERT, Juan. Estructura general de los silicatos. [Imagen]. España. 2011. p.3

“Los silicatos de sodio, en disolución acuosa, son líquidos alcalinos, incoloros e inodoros, que presentan unas propiedades fisicoquímicas, tales como adherencia y cohesión, que los hace potencialmente idóneos para su utilización como aglomerantes en suelos. Ajustando adecuadamente su viscosidad se puede lograr que penetren y ocupen todas las irregularidades del terreno, tanto en la superficie como en el subsuelo”, los silicatos son sólidos solubles que al formar un gel pueden penetrar fácilmente en el suelo, al estar en contacto con sales de calcio, producen un silicatos de calcio gelatinosos que al hidratarse se endurecen y recubren la capa de suelo, impidiendo el paso de agua y de paso formando una capa dura, que llena todos los vacíos y cambia las propiedad del suelo en el cual se está aplicando.

De acuerdo con la tesis de Cesar Alirio Bernal, realizada en Colombia, en la Universidad Distrital, en el año 2018, la reacción de lo silicatos con los minerales de las arcillas no ha sido explicada adecuadamente. Se sabe que el silicato se encuentra en la forma de cadenas poliméricas de vínculos de silicato oxígeno con el sodio distribuido a lo largo de la cadena en el oxígeno. La adición de un ion polivalente como el Ca^{++} o bien el Mg^{++} en reemplazo del Na^{+} permite la unión de dos cadenas para formar una estructura insoluble.

- **Tipos de silicatos.**

La unión de los oxígenos con cationes de diferente carga y naturaleza supone la formación de nuevos óxidos distintos a los del tetraedro (O-Si).

Las combinaciones entre las distintas clases de uniones (compartir oxígenos o enlazarse mediante cationes) y los diferentes cationes-monovalentes, divalentes, trivalentes o tetravalentes determinarán el tipo de silicato y sus características.

- **Nesosilicatos**

Son silicatos en los que todos los oxígenos están unidos por cationes; no hay tetraedros compartiendo oxígenos.

- **Sorosilicatos**

Son silicatos en los que hay pares de tetraedros unidos entre sí compartiendo oxígenos; las uniones entre estos pares se realizan mediante cationes

- **Ciclosilicatos**

Son silicatos en los que todos los tetraedros de silicio están unidos entre sí formando un anillo cerrado de tres, cuatro o seis tetraedros.

- **Inosilicato**

Son silicatos en los que los tetraedros de silicio están unidos entre sí formando una cadena que puede ser sencilla (inosilicatos tipo piroxeno) o doble (inosilicatos de tipo anfíbol). La unión entre cadenas se realiza mediante cationes de diferente carga.

- **Filosilicatos**

En los filosilicatos las cadenas de inosilicatos se unen entre sí compartiendo oxígenos (no mediante cationes) de manera que los tetraedros forman una hoja o lámina (siloxano) en la que todas las cargas de los oxígenos están satisfechas. Las láminas se unen entre sí mediante cationes.

Sin embargo, en los filosilicatos no todas las láminas están formadas por tetraedros de silicio (láminas de siloxano); en la estructura hay intercaladas láminas de octaedros formadas por 6 grupos de hidroxilos (OH)-y por cationes de Al $3+$ o de Mg $2+$.

Según sea el número y naturaleza de las láminas intercaladas se formarán los siguientes tipos de filosilicatos:

Filosilicatos 1:1

En los filosilicatos de este tipo cada lámina de tetraedros (siloxano) se une a una lámina octaédrica con Aluminio o Magnesio

Filosilicatos 2:1

Cada lámina de octaedros (de brucita o de gibsita) se une a dos láminas de tetraedros. En ocasiones en algunos de estos filosilicatos puede ocurrir que haya sustituciones isomórficas de algún catión de Si^{+4} por un catión de Al^{+3} ; el déficit de carga positiva que esto supone tiene como consecuencia la entrada en la estructura de algún otro catión que asegure un balance neutro final. Según sea el catión entrante resultará la formación de un mineral del grupo de las llamadas micas

Filosilicatos 2:2

En este caso, grupos formados por 2 láminas de tetraedros y 1 de octaedros (filosilicatos de tipo 2:1) se unen con otra lámina trioctaédrica. También pueden producirse entradas de moléculas de agua en los huecos existentes entre los tetraedros, y sustituciones al azar -no regulares- de cationes con o sin entrada de moléculas de agua, dando lugar respectivamente al grupo de las illitas (o hidrómicas) y a los filosilicatos de naturaleza expansible (vermiculitas y montmorillonitas).

De acuerdo con Ramón Torecillas, las arcillas contienen fundamentalmente minerales arcillosos (filosilicatos) y no arcillosos que en conjunto son los que imparten la plasticidad del material.

Tabla 1. Tipos de arcillas

Tipo de capa	Grupo (x=carga)	Subgrupo	Minerales
1:1	Caolín/ serpentina X 0	Caolines (Di) Serpentinas (Tr)	Caolinita, dickita, nacrita, crisotilo, antigorita
2:1	Talco/ pirofilita X 0	Talcos (Tr) Pirofilitas (Di)	Talco Pirofilita
	Esmeclita X 0,2-0,6	Montmorillonitas (Tr) Saponitas (Di)	Montmorillonita sponita
	Vermiculita X 0,6-0,9	Vermiculitas dioctaédricas y trioctaédricas	Vermiculita dioct. Vermiculita trioct.
	Mica X 1-2	Micas y micas frágiles dioctaédricas y trioctaédricas	Biotita, moscovita, clintonita, margarita
2:1:1	Clorita X Variable	Cloritas dioctaédricas y trioctaédricas	Clinocloro, chamosita, sudaíta, nimita
2:1	Sepiolita/ palygorskita	Sepiolitas Palygorskitas	Sepiolita, loughlinita, palygorskita

Fuente: DÍAZ RODRÍGUEZ, L.A; TORRECILLAS, Ramón. Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones. [Cuadro]. Oviedo, España. 2011. P.3.

- **Tectosilicatos**

En los tectosilicatos las láminas de siloxano se unen entre sí compartiendo oxígenos, de manera que no hay cationes enlazando tetraedros.

2.3.4 Mineralogía de arcillas.

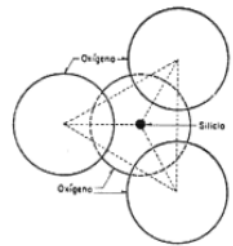
De acuerdo con el libro mineralogía de arcillas de suelos de Eduardo Besoain, 1985, las arcillas se definen “como un producto natural originado a partir de la meteorización de las rocas, cuyas partículas son generalmente de tamaño inferior a 2 micrómetros, constituido principalmente por aluminosilicatos de origen secundario y componente accesorios, primarios, secundarios u orgánicos, en el cual radica gran parte de la actividad fisicoquímica del suelo”.(Besoain, 1985)

Las arcillas son suelos constituidos por agregados de silicatos de aluminio hidratado, proveniente de la descomposición de rocas que contienen feldespatos. El diámetro de sus partículas es inferior a 0.002 mm. Las arcillas se caracterizan por adquirir plasticidad al ser mezclada con agua.

Las arcillas están constituidas por silicatos de aluminio hidratados, presentando, en algunas ocasiones, silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen casi siempre, una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas. Existen dos variedades de tales láminas: la silícica y la alumínica.

La lámina silícica, está formada por un átomo de silicio, rodeado de cuatro de oxígeno, que se disponen en forma de tetraedro, como se puede apreciar en la figura 1. Estos tetraedros se agrupan en unidades hexagonales, sirviendo un átomo de oxígeno de nexo entre cada dos tetraedros.

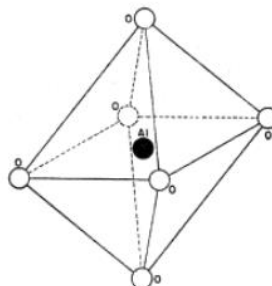
Ilustración 3. Esquema de la estructura de la lámina silícica



Fuente: BESOAIN, EDUADRO. Mineralogía de arcillas. [Imagen]

Las láminas Alumínicas por su parte están formadas por redes de octaedros dispuestos con un átomo de aluminio al centro y seis de oxígeno alrededor.

Ilustración 4. Esquema de la estructura de la lámina alumínica



Fuente: BESOAIN, EDUADRO. Mineralogía de arcillas. [Imagen]

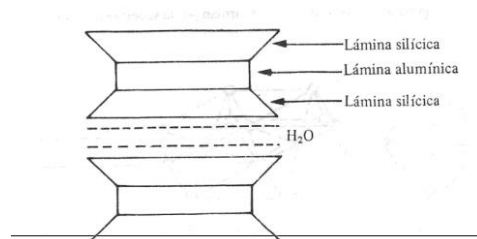
De acuerdo con su estructura, los minerales de arcilla se clasifican en tres grupos: caolinitas, montmorilonitas e illitas. Las caolinitas ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) están formadas por una lámina silícica y otra alumínica, que se superponen indefinidamente. La unión entre todas las retículas es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de moléculas de agua entre ellas (adsorción). En consecuencia, las arcillas caoliníticas son relativamente estables en presencia de agua. (Juarez Badillo & Rodriguez Rico, 2005).

Las montmorilonitas ($(\text{OH})_4\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20} \cdot n\text{H}_2\text{O}$) están formadas por una lámina alumínica entre dos silícicas, superponiéndose indefinidamente. En este caso la unión entre las retículas del mineral es débil, por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad a causa de las fuerzas eléctricas generadas por su naturaleza dipolar. Lo anterior, produce un incremento en el volumen de los cristales, lo que se traduce en expansión. Las arcillas montmoriloníticas, especialmente en presencia de agua, presentarán fuerte tendencia a la inestabilidad. Las bentonitas son arcillas del grupo montmorilonítico, originadas por la descomposición química de las cenizas volcánicas y presentan la expansividad típica del grupo en forma particularmente aguda, lo que las hace sumamente críticas en su comportamiento mecánico.

Las illitas están estructuradas semejantemente con las montmorilonitas, pero su constitución interna manifiesta tendencia a formar grumos de materia, que reducen el área expuesta al agua por unidad de volumen; por ello, su potencial de expansión es menor que el de las montmorilonitas y su comportamiento mecánico es más favorable.

Las montmorilonitas se forman por la superposición indefinida de una lámina alumínica entre dos láminas silícicas, pero con una unión débil entre ellas como se puede apreciar en la ilustración 5, lo que hace que el agua pueda penetrar en su estructura con facilidad. Estas arcillas sufren fuerte expansión en contacto con agua, lo que provoca su inestabilidad. (Anaya Gómez et al., 2015).

Ilustración 5. Arcilla montmorillonita



Fuente: ANAYA GOMEZ, Pablo; SOTELO CORNEJO, Víctor. Arcilla Montmotillonita. [Imagen]. Distrito Federal, México. 2015. p.9.

Los autores Anaya Gómez, Sotelo Cornejo y Morales coinciden con investigadores previas y complementan la información presentada por Juárez Badillo en su libro mecánica de suelos, ya que, ambos presentan información sobre el comportamiento expansivo de las arcillas, debido a los enlaces débiles entre las láminas alumínicas y silícicas que se forman en arcillas con minerales montmorilloníticos.

Para conocer la composición mineralógica de suelos, se deben realizar algunos ensayos como difracción de rayos x, entre otros, a continuación, se mencionan y se amplía la información sobre estos.

2.3.5 Ensayos mineralógicos.

Actualmente se realizan diferentes análisis mineralógicos que permiten estudiar las partículas de tamaños más pequeños y comparar su distribución, para posteriormente evaluar su influencia en su comportamiento mecánico, a continuación, se describen los relacionados con esta tesis.

2.3.5.1 Difracción de rayos x.

La difracción de rayos X (XRD) permite la rápida identificación de materiales particulados, arcillas y otros minerales. Proporciona información detallada acerca de la estructura cristalográfica de las muestras, que puede utilizarse para identificar las fases presentes. XRD es especialmente útil para la identificación de fases de grano fino que son difíciles de identificar por otros métodos como la microscopía óptica, el microscopio electrónico de barrido/espectrómetro por dispersión de energía (SEM/EDS) o la evaluación cuantitativa de materiales por microscopía electrónica de barrido (QEMSCAN™).

Este ensayo permite conocer la composición mineralógica y la distribución de los minerales, que por su estructura cristalina muestran patrones que se identifican con esta técnica, debido a la composición química y mineralógica de la arcilla mencionada anteriormente, estos suelos presentan deformaciones y asentamientos a largo plazo, por la carga aplicada, es por esta razón que surgen diferentes técnicas de estabilización y mejoramientos de suelos, a continuación se profundiza en el tratamiento media el uso de silicatos.

2.3.6 Estabilización de suelos.

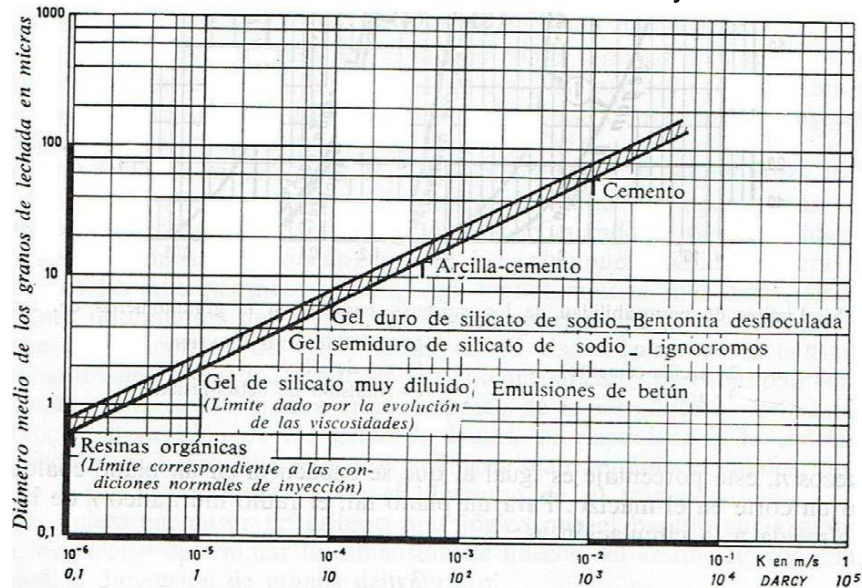
La estabilización o mejoramiento de un suelo se puede realizar por diferentes técnicas investigadas ampliamente por diversos autores; la estabilización de un suelo se define como la alteración de uno o más propiedades, por acción mecánica o química, para crear un material de suelo mejorado que posee las propiedades de ingeniería deseadas. (Brabston & Hammitt, 1997).

La estabilización de un suelo se define como la alteración de uno o más propiedades, por acción mecánica o química, para crear un material de suelo

mejorado que posee las propiedades de ingeniería deseadas. (Brabston & Hammitt, 1997).

La empresa española sondeos inyecciones y trabajos especiales S.A realiza distintos tratamientos en suelos basado en el análisis granulométrico del suelo y teniendo en cuenta la penetración de las distintas inyecciones, en la Ilustración 6 se indica el tamaño de los granos de lechada y la penetrabilidad de cada tipo de inyección. (Retuerto & Iccp, n.d.).

Ilustración 6. Penetrabilidad de las distintas mezclas de inyección en arcillas



Fuente: CAMBEFORT

De acuerdo con la bibliografía consultada la inyección química o solidificación del subsuelo, puede ser utilizada en las siguientes situaciones:

- Donde las formaciones del subsuelo tienen fuerza insuficiente para soportar la carga requerida, tales como bajo las paredes o cimientos
- Donde los poros del subsuelo, permeables al agua, permiten la inundación de minas, pozos y túneles
- Para prevenir la pérdida del agua en presas
- Para sellar poros en los trabajos de concreto o ladrillo como se pueden encontrar en desagües o construcciones subterráneas.

2.4 MARCO LEGAL

La investigación ejecutada en este estudio y los correspondientes ensayos realizados se basaron en las normas reguladas y emitidas por el Instituto Nacional de Vías, las cuales se basan en las normas americanas ASTM, además los ensayos químicos y mineralógicos fueron realizados por el instituto para la investigación e innovación en ciencia y tecnología de los materiales INCITEMA de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, el cual está reconocido a nivel nacional e internacional como centro de investigación.

A continuación, se describen las normas vigentes para los ensayos realizados.

2.4.1 INV. E 125-13: Determinación del límite líquido de los suelos.

Esta norma estandariza el procedimiento para conocer el porcentaje de humedad del suelo, por debajo del cual el suelo se comportará como un material plástico y por encima del cual cambiará su comportamiento a un fluido viscoso.

De acuerdo con la norma expuesta este ensayo permite junto con el límite plástico y el índice de plasticidad conocer propiedades del suelo importantes para la investigación como compresibilidad, permeabilidad, compactibilidad. (Invias, 2012)

2.4.2 INV. E 126-13: Determinación del límite plástico de los suelos.

Esta norma estandariza el procedimiento para conocer el porcentaje de humedad del suelo, por debajo del cual el suelo se comporta como semisólido y por encima del cual cambiara su comportamiento de semisólido a plástico, es importante ya que juntos con el límite líquido se puede determinar a qué tipo de suelo pertenece y su comportamiento ante la presencia de agua.

2.4.3 INV. E 128-13: Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos, empleando picnómetro con agua.

Esta norma indica los procedimientos para encontrar la gravedad específica de un suelo que pase tamiz n°4, la gravedad específica que se define como la relación de un volumen de sólidos a cierta temperatura con un volumen igual de agua destilada a la misma temperatura, es importante ya que permite correlacionar y encontrar las relaciones de fase de un suelo o material dado.

2.4.4 INV. E 151-13: Consolidación unidimensional de suelos.

Esta norma estandariza los diferentes métodos para determinar la magnitud y velocidad de consolidación de muestras de suelos. La aplicación de esta norma mediante ensayo de laboratorio permite conocer el asentamiento y el tiempo de consolidación de un suelo, de acuerdo con esta norma se puede conocer los esfuerzos a los que ha sido sometido el suelo y determinar con incrementos de

carga el asentamiento que va a presentar con el tiempo, es importante ya que los suelos altamente plásticos presentan deformaciones por grandes periodos de tiempo generando problemas en las estructuras.

2.4.5 INV. E 152-13: Compresión inconfiada en muestras de suelos

Esta norma tiene como fin describir y dar las pautas para determinar la resistencia a la compresión no confinada de suelos cohesivos, mediante la aplicación de carga axial con control de deformación.

2.4.6 INV. E 154-13: Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD)

Esta norma permite conocer la resistencia al corte de una muestra de suelo consolidada y drenada, empleando el método de corte directo, este procedimiento se realiza de la misma manera para suelos no consolidados no drenados con la diferencia de la velocidad con que se realice el ensayo para permitir la disipación o no de la presión de poros.

2.4.7 INV. E 214-07: Cantidad de material fino que pasa el tamiz de 75 μm (n° 200) en los agregados

Esta norma describe el procedimiento para determinar, por lavado, la cantidad de material fino que pasa el tamiz de 75 μm

3. METODOLOGÍA

En este capítulo, se presenta la metodología que permitió desarrollar el presente trabajo de investigación sobre estabilización de suelos con ceniza de cascarilla de arroz y cal. Se presentan aspectos como el tipo de investigación, las técnicas y procedimientos que se utilizaron para llevar a cabo la presente investigación.

3.1 DISEÑO METODOLÓGICO

Se realizó un estudio cuantitativo y cualitativo, cuantitativo ya que implicó en análisis de diferentes datos numéricos obtenidos en el laboratorio, y cualitativo ya que se compararon características y se describió el suelo junto con su composición, a continuación, se especifican cada una de las fases y variables tenidas en cuenta para el desarrollo de la investigación.

3.1.1 Tipo de investigación.

El tipo de investigación que se realizó es cuantitativo, ya que los datos que se tomaron son medibles, además la investigación es observacional y experimental ya que en las diferentes fases del proyecto fue necesario realizar una retrospectiva con respecto a ensayos similares realizados y consultar bases de datos y bibliografía previa para conocer los resultados obtenidos y así contrastar lo obtenidos, además se debió conocer análisis realizados en suelos con características similares para poder aplicar la técnica aquí propuesta y de tipo experimental debido a que, se busca aplicar y manipular la estructura molecular del suelo, cambiando los porcentajes aplicados de silicato de calcio, reemplazando el silicato por ceniza de cascarilla de arroz (CCA) y el calcio por cal viva.

El proyecto se llevó a cabo mediante diferentes fases, explicadas a continuación.

3.1.2 Fase 1. Lluvia de ideas y búsqueda de información

Una primera fase donde se estableció la idea inicial de la investigación por medio de la consulta en diferentes medios.

3.1.3 Fase 2. Consulta de bibliografía e infografía, construcción de marco referencial.

Una segunda fase se realizó mediante la consulta de investigaciones realizadas anteriormente nacional e internacionalmente, en esta fase se construyeron antecedentes y estado del arte del proyecto a realizar, además en esta fase se describieron los componentes de los silicatos, cómo estos insumos cambiaron y alteraron las propiedades químicas de los suelos para lograr su mejoría y se describieron los suelos donde se realizaron las pruebas.

3.1.4 Fase 3. Caracterización física y mecánica del suelo.

En la tercera fase del proyecto se realizó la caracterización física de los suelos a tratar, por medio de los siguientes ensayos:

1. Granulometría
2. Límites de Atterberg
3. Gravedad Especifica

En una segunda etapa se realizaron los ensayos geotécnicos correspondientes en estado natural del suelo, de acuerdo con la bibliografía consultada son los siguientes:

1. Ensayo de consolidación unidimensional lenta 24 horas
2. Ensayo de compresión inconfiada
3. Ensayo de corte directo no consolidado no drenado (UU)

Se describieron los componentes de los suelos y sus nombres (arcillas, arenas) se realizaron ensayos de laboratorio para encontrar resistencias.

3.1.5 Fase 4. Análisis químico y mineralógico del suelo.

En una cuarta fase se analizaron las propiedades químicas de los suelos, estructura cristalina y permeabilidad; para este fin se realizó 1 ensayo químico a cada muestra de suelo comprobando los cambios que presente el suelo con la aplicación de silicatos de calcio a base de cascarilla de arroz (CCA).

1. Difracción de rayos x

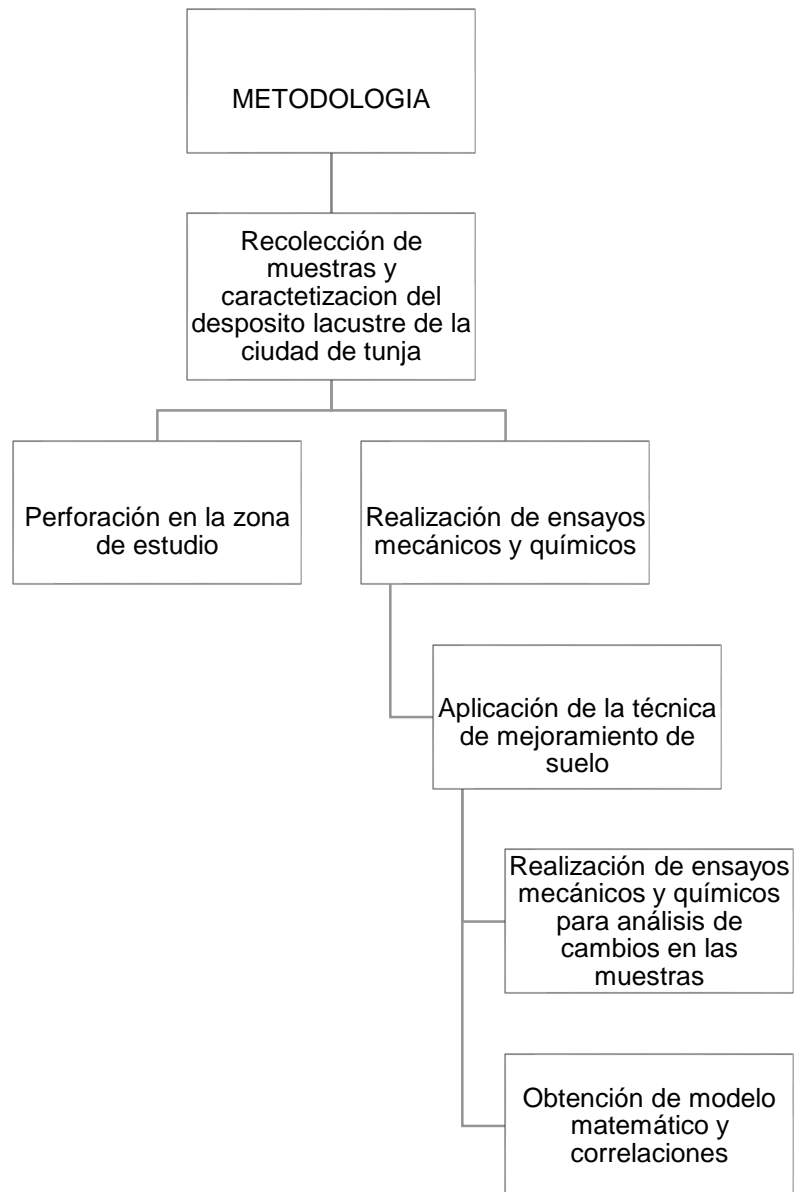
3.1.6 Fase 5. Aplicación de la técnica de mejoramiento.

En una quinta fase se aplicó el gel realizado anteriormente, de acuerdo con la bibliografía se tomó como referencia un porcentaje de entre 12 y 14% máximos del peso del suelo, teniendo en cuenta esto se tomó una serie de porcentaje de aplicación de silicato de calcio de 5, 10, 15, 20 y 25% del peso del suelo, debido a que al aumentar la cantidad de silicio en el suelo este modifica sus propiedades hasta un máximo donde se estabiliza y sus propiedades ya no varían.

3.1.7 Fase 6. Análisis de la efectividad de la aplicación de la técnica de mejoramiento.

En una última fase se concluyó sobre la efectividad del silicato en el suelo, además de su relación beneficio-costos y si este gel es una solución viable a los problemas de estabilidad en suelos que se presentan en diferentes obras civiles, y finalmente se obtuvo un modelo matemático obtener correlaciones para suelos con características similares.

Ilustración 7. Metodología



Fuente: Autor

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

De acuerdo con el tipo de investigación realizada se realizó el diseño experimental por medio de la definición de las variables independientes y dependientes de los suelos recuperados en la perforación

3.2.1 Variables dependientes.

A continuación, se describen cada una de las variables presentes en este estudio.

3.2.1.1 Límites del suelo.

Estos varían respecto de la humedad natural del suelo y dependiendo de la composición granulométrica del suelo, que define la cantidad que existe de finos en el mismo y por tanto define el comportamiento del suelo, se toma como variable dependiente ya que se buscó correlacionar el comportamiento actual del suelo con el que tendrá luego de que mezclarse con silicatos de calcio.

3.2.1.2 Ángulo de fricción del suelo.

Se han realizado diferentes investigaciones donde se determinó que el ángulo de fricción del suelo varía de acuerdo con la humedad del suelo y su densidad relativa, entre más denso el suelo su ángulo de fricción aumenta. (González de Celis, De Barcia, Sulbaran, & Ucar Navarro, 2014)

3.2.1.3 Cohesión del suelo.

La cohesión del suelo varía dependiendo de la humedad, la saturación del suelo y lo esfuerzos a que se encuentre sometido el suelo.

3.2.1.4 Tiempo de consolidación.

Varía dependiendo del esfuerzo que se le aplique al suelo y sirve para comparar el tiempo en el cual la muestra alcanzara una consolidación del 90%.

3.2.1.5 Humedad natural.

Depende únicamente de la cantidad de agua que se aplique al suelo o que tenga en estado natural.

3.2.2 Variables independientes.

A continuación, se describen las variables afectadas y con una variación nula dentro del ensayo.

3.2.2.1 Granulometría.

Esta variable depende únicamente del tamaño de los granos del suelo, por lo que no se modifica al cambiar su composición o incluir nuevos materiales en su estructura.

3.2.2.2 Gravedad específica.

Depende el peso unitario del suelo y su densidad, se tomó como variable independiente ya que el peso unitario se mantendrá constante en todas las probetas de suelo y en cada una de las cuales se apliquen porcentajes de silicato de calcio.

3.2.2.3 Porcentaje de ceniza de cascarilla de arroz.

Esta variable es independiente, ya que, manipulo durante todo el ensayo al darle diferentes valores porcentuales para afectar las características del suelo virgen.

Posteriormente a la definición de las variables implicadas en la parte experimental del presente trabajo de investigación se realizó un ensayo de Gravedad específica (GS) para definir las características del suelo, para este fin también se realizaron ensayos de relación de fases, para determinar relación de vacíos (e) y pesos unitarios del suelo, junto con su humedad natural.

Luego se realizó el ensayo de límites de consistencia de Atterberg que permitió conocer el comportamiento del suelo y con ayuda de la carta de plasticidad se clasificó de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).

Para conocer el rango de resistencia que posee el suelo a diferentes esfuerzos, junto con su permeabilidad se ejecutó un ensayo de Consolidación Unidimensional, colocadas de a tres de acuerdo con la capacidad del equipo usado.

Se efectuó además un corte directo para conocer la cohesión y el Angulo de fricción del suelo, para posteriormente realizar la correlación con el suelo que posee la técnica de mejoramiento.

Finalmente se hizo un ensayo de compresión simple para conocer el esfuerzo máximo a que se puede someter el suelo y su comportamiento ante una carga.

Luego de clasificar la muestra y obtener el comportamiento del suelo se llevó a cabo la elaboración del silicato de calcio por medio del siguiente procedimiento:

Se lavaron muy bien 400 gramos de cascarilla de arroz, posteriormente se secaron a temperatura ambiente, teniendo en cuenta la cantidad de HCL que se usaría y basándose en la cantidad de residuos generados, junto con el gasto de tiempo y dinero necesario para el tratamiento adecuado que se le debe dar a estos residuos, se decidió omitir los lavados con HCL y directamente llevarlas a una mufla a una Temperatura de 800°C durante 3 horas con el fin de eliminar la fracción orgánica presente en las mismas.

Posteriormente una vez obtenidas las cenizas de SiO_2 (polvo blanco) debieron ser mezcladas muy bien con ayuda de un mortero, finalmente se aplicaron en el suelo de estudio a cada uno de los porcentajes requeridos (5, 10, 15, 20, 25).

En una etapa posterior se realizaron las probetas de suelo, las cuales se dejaron con esfuerzo geostático durante un periodo de 7 días, realizándose una pre consolidación, para alcanzar una resistencia considerable y para simular las condiciones iniciales del terreno; se mantuvo el peso unitario del suelo.

Finalmente se realizaron cada uno de los ensayos planteados, corte directo, consolidación, límites de Atterberg para comprobar la efectividad de la mezcla usada y elaborar las correlaciones y modelos matemáticos necesarios.

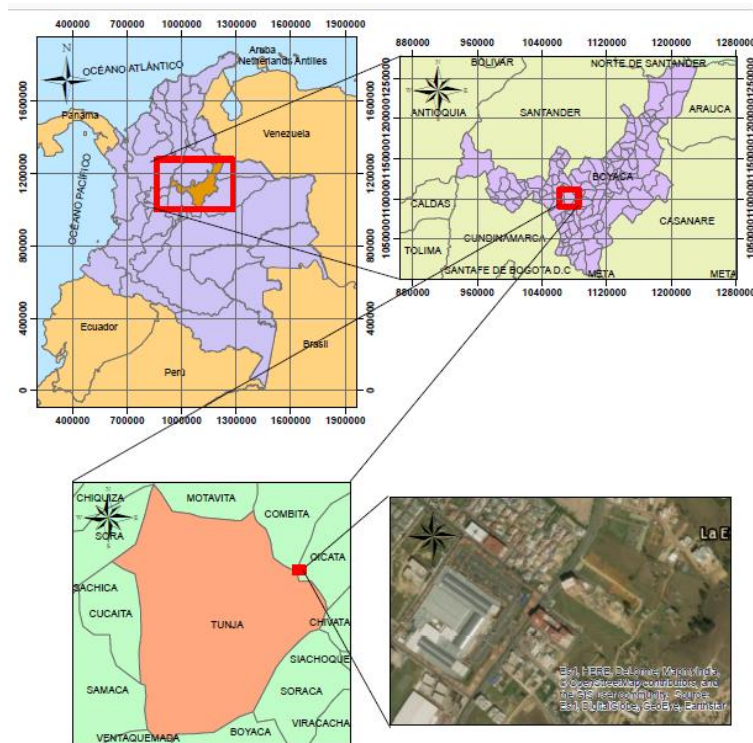
4. INFORMACIÓN PRELIMINAR

En este capítulo se muestra información sobre ubicación y descripción de la zona de estudio.

4.1 ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio se centra en la ciudad de Tunja, ubicada sobre la cordillera oriental de los Andes, a 130 Km de la ciudad de Bogotá, dentro de la provincia centro, la zona de estudio se halla hacia el nororiente (sector UPTC) de la capital Boyacense, a continuación, se puede detallar la localización geográfica.

Ilustración 8. Ubicación de la zona de estudio



Fuente: Autor

4.2 UBICACIÓN Y OBTENCIÓN DE MUESTRAS

Las muestras se obtuvieron del lote ubicado en la parte de atrás del edificio de aulas A, dentro de los predios de la universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, las muestras se obtuvieron por perforación manual, se realizaron dos perforaciones con las siguientes características:

Con la primera perforación se alcanzó una profundidad de 2,80 metros, encontrándose niveles freáticos a 1,20 metros, se obtuvieron 3 tubos shelby a los cuales se le realizaron los distintos ensayos de caracterización, el primer tubo shelby se obtuvo a una profundidad de 1,70 metros, es de color café con raíces, presenta consistencia dura.

El segundo tubo shelby se recuperó a 2,50 metros, de consistencia media, color café.

El tercer tubo shelby se recuperó a 2,80 metros, de consistencia baja, color café oscuro, se encuentra en estado viscoso, se observa una saturación alta.

Se realizó un segundo sondeo alcanzando de 3,80 una profundidad de metros, encontrándose niveles freáticos a 1 m, se obtuvieron 2 tubos shelbys, se realizaron ensayos de caracterización en un 1 solo tubo ya que la muestra perdió consistencia, por el nivel freático, se observó saturación del 100% en el primer tubo, el segundo es más consistente, el primer tubo shelby del segundo sondeo se obtuvo a 2,80 m y el segundo a 3,80 m

En la ilustración 9 se puede observar la ubicación de los sondeos realizados dentro del depósito lacustre de la ciudad de Tunja.

En la tabla 2. Se observa la ubicación de las coordenadas geográficas de los sondeos realizados.

En la ilustración 10 se puede ver la ubicación de los sondeos en google earth en la ciudad de Tunja.

Ilustración 9. Ubicación de las muestras dentro del depósito fluvio-lacustre



Escala: 125000

Fuente: http://tunja-boyaca.gov.co/apc-aa-files/30306336653731623764356264663261/p02-mapa_geologia1.pdf

Tabla 2. Coordenadas de las perforaciones

Número de sondeo	Latitud	Longitud
Sondeo 1	5°32'57.61"N	73°21'22.37"O
Sondeo 2	5°32'57.77"N	73°21'22.35"O

Fuente: Autor

Ilustración 10. Ubicación de la zona de estudio



Fuente: Google Earth

Ilustración 11. Tubos Shelby obtenidos



Fuente: Autor

Ilustración 12. Zona de perforación



Fuente: Autor

5. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA

Se realizaron 2 sondeos a una profundidad de 3 metros, en la siguiente tabla se puede apreciar las profundidades a la cual se recuperaron las muestras

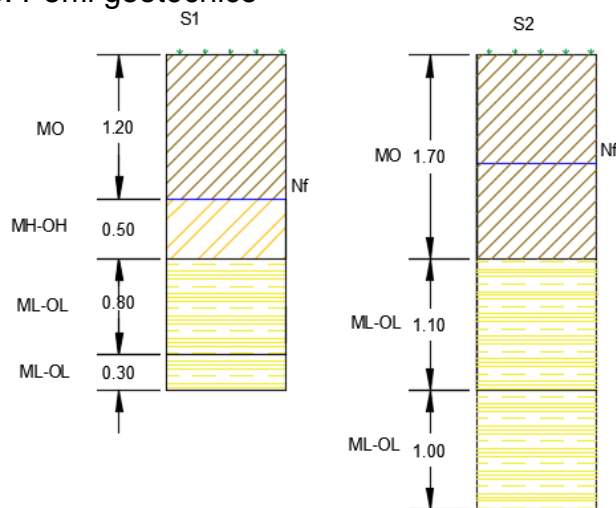
Tabla 3. Profundidad de los sondeos

MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)
S1M1	1,20-1,70
S1M2	1,70-2,50
S1M3	2,50-2,80
S2M1	1,70-2,8
S2M2	2,8-3,80

Fuente: Autor

Se realizó una caracterización visual donde se pudo apreciar que las muestras obtenidas poseen plasticidades medias, la primera muestra posee color café oscuro con betas negras, es suave y no posee olor, la segunda muestra obtenida presenta características similares y la última muestra presenta betas color anaranjado, se encontró nivel freático a 1,20 m, por esta razón algunas de las muestras obtenidas se encontraron en estado viscoso y no se le realizó ensayo de consolidación ni corte directo, se clasificaron y se obtuvieron resultados por ensayos con muestra inalterada que muestras similitudes con las demás muestras ensayadas, la ilustración 13 muestra el perfil geotécnico de las muestras obtenidas.

Ilustración 13. Perfil geotécnico



Escala 1:1000

Fuente: Autor

6. ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS SOBRE EL SUELO

Se realizaron los mismos ensayos en todas las muestras recuperadas exceptuando las muestras recuperadas a más de 3 metros ya que se encontraban en estado viscoso y no fue posible realizar relaciones de fase, consolidación y corte directo en suelo inalterado.

6.1 DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE LAS PARTÍCULAS DE LOS SUELOS

Inicialmente se realizaron lavados sobre tamiz 200, siguiendo las normas INVIAS E 214-07 e INVIAS E 102-13 para conocer la cantidad de finos que poseen las muestras obtenidas, posteriormente se procedió a realizar un ensayo de hidrómetro teniendo en cuenta la norma INVIAS 123-13 para determinar si predominan las arcillas o los limos de acuerdo con el tamaño de las partículas. Ver Anexo 7, Anexo 8 y Anexo 11

Ilustración 14. Ensayo de hidrómetro



Fuente: Autor

6.2 DETERMINACIÓN DEL LIMITE LÍQUIDO, LIMITE PLÁSTICO.

Para determinar los límites de Atterberg primero se seleccionaron los finos, que paso tamiz N° 40 posteriormente teniendo en cuenta la norma INVIAS E 125-13 e INVIAS E 126-13, se procedió a encontrar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de cada una de las muestras. Ver Anexo 2 y Anexo 11

Ilustración 15. Limite líquido



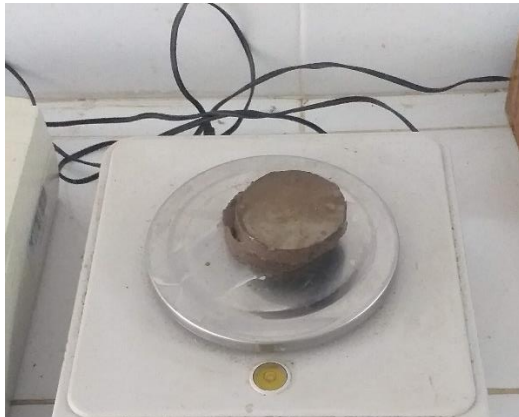
Fuente: Autor

6.3 ENSAYO DE CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN NO CONSOLIDADO NO DRENADO (UU)

Para encontrar la resistencia al corte de cada una de las muestras se tomó como referencia la norma INVIAS 154-13, que da los parámetros para ensayos de corte en condiciones consolidadas drenada.

Esta norma se tuvo en cuenta, aunque en este caso el ensayo que se realizó fue en condiciones no consolidadas no drenadas, el ensayo se desarrolla de la misma manera, solo que se varia la velocidad con que se desarrolla en ensayo, se tuvo en cuenta el tiempo de consolidación de cada una de las muestras para encontrar la velocidad a la cual se debía realizar el ensayo. Ver Anexo 6 y Anexo 11

Ilustración 16. Corte Directo



Fuente: Autor

6.4 ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

Para la realización del ensayo de consolidación unidimensional en el suelo de estudio se tomó como norma de referencia la INVIAS 151-13, que da los parámetros y normas para verificar las deformaciones y asentamientos en el suelo bajo una carga y un incremento de esfuerzo determinado, se realizaron ciclos de carga de 24 horas, con incrementos de carga de 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8 y 16 kg respectivamente, de acuerdo a como lo dicta la norma mencionada anteriormente. Ver Anexo 4 y Anexo 11

Ilustración 17. Consolidación unidimensional



Fuente: Autor

6.5 ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA

Este ensayo se realizó teniendo en cuenta las deformaciones verticales en muestras de suelo inalteradas, a estas se les aplicó carga axial y se tuvo en cuenta y como referencia la norma INVIAS 152-13. Ver Anexo 5 y Anexo 11

Ilustración 18. Compresión inconfiada



Fuente: Autor

6.6 DIAGRAMA DE FASES

Este ensayo se realizó para determinar humedad natural del suelo, peso unitario, relación de vacíos, saturación, entre otras propiedades físicas. Ver Anexo 3 y Anexo 11

6.7 GRAVEDAD ESPECIFICA

Este ensayo se hizo teniendo en cuenta la norma INVIAS E 128-13, que da los parámetros y especificaciones para determinar la gravedad específica del suelo, relación entre el peso de las partículas y un volumen de agua determinado. Ver Anexo1 y Anexo 11

Ilustración 19. Gravedad específica



Fuente: Autor

6.8 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Este ensayo se realizó teniendo en cuenta los porcentajes aplicados a la muestra, además se realizó para verificar la composición de la cascarilla de arroz junto con la cal, mezclada. Ver Anexo 9

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el siguiente capítulo se realiza un consolidado y análisis de los resultados mecánicos y químicos obtenidos para verificar las propiedades físicas y mineralógicas del suelo, analizando la efectividad de la mezcla de cca+cal.

Se realizaron 2 sondeos profundidades de entre 1,20 y 3,80 metros de profundidad, a continuación, se encuentran los resultados, se caracterizaron 5 muestras para identificar el rango entre el cual se encuentran sus propiedades, ya que, algunas de las muestras se encontraban en estado viscoso, no fue posible realizar ensayos en muestras inalteradas. Para la realización de las probetas a las cuales se les aplico silicato de calcio, se mantuvo constante el peso unitario total y la humedad natural de la muestra.

A continuación, se pueden observar cada una de las propiedades analizadas y su correspondiente resultado.

Tabla 4. Resumen de resultados

Muestra	Gs	LI (%)	Lp (%)	Ip (%)	w (%)	η	e (%)	Cc	Cr	Tipo de suelo	Y (ton/m ³)
S1M1	2,81	54,87	41,7	13,20	29,19	51,48	106,12	0,16	0,029	MH-OH	1,80
S1M2	2,64	42,84	29,4	13,47	39,7	47,16	89,24	0,11	0,051	ML-OH	1,84
S1M3	-	49,61	32,6	16,99	48,52	-	-	-	-	ML-OH	-
S2M1	-	-	-	-	47,11	-	-	-	-	-	-
S2M2	2,63	44,37	29,7	14,67	40,41	47,02	88,76	0,10	0,031	ML-OL	1,87

Fuente: Autor

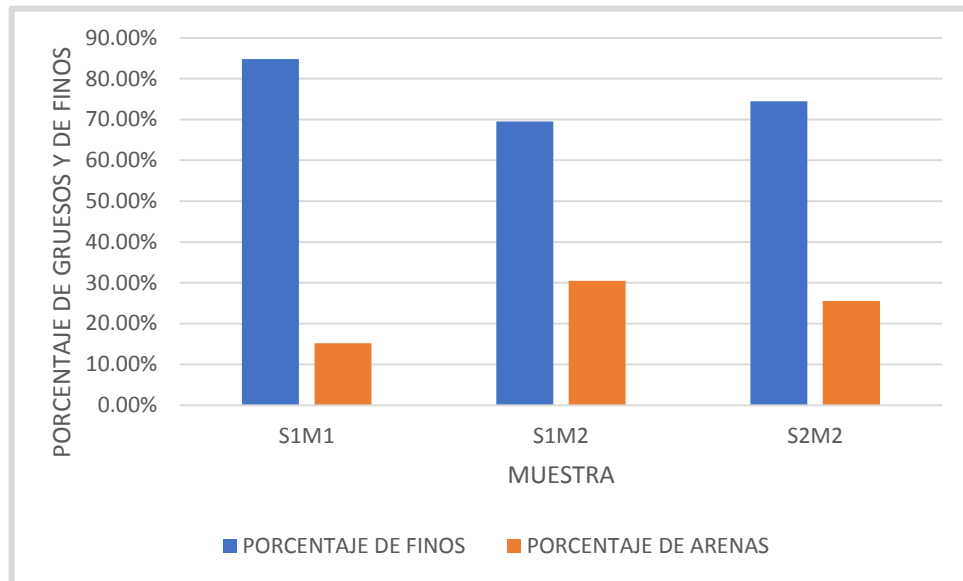
Se realizaron adicionalmente lavados para comprobar la cantidad de partículas finas que pasaban tamiz 200 μ y así realizar ensayos posteriores para conocer el tipo de material predominante, se encontraron los siguientes resultados.

Tabla 5. Resultados porcentaje de finos

MUESTRA	PORCENTAJE FINOS	PORCENTAJE ARENAS
S1M1	84,8%	15,2%
S1M2	69,5%	30,5%
S2M2	74,5%	25,5%

Fuente: Autor

Gráfica 1. Granulometría del suelo

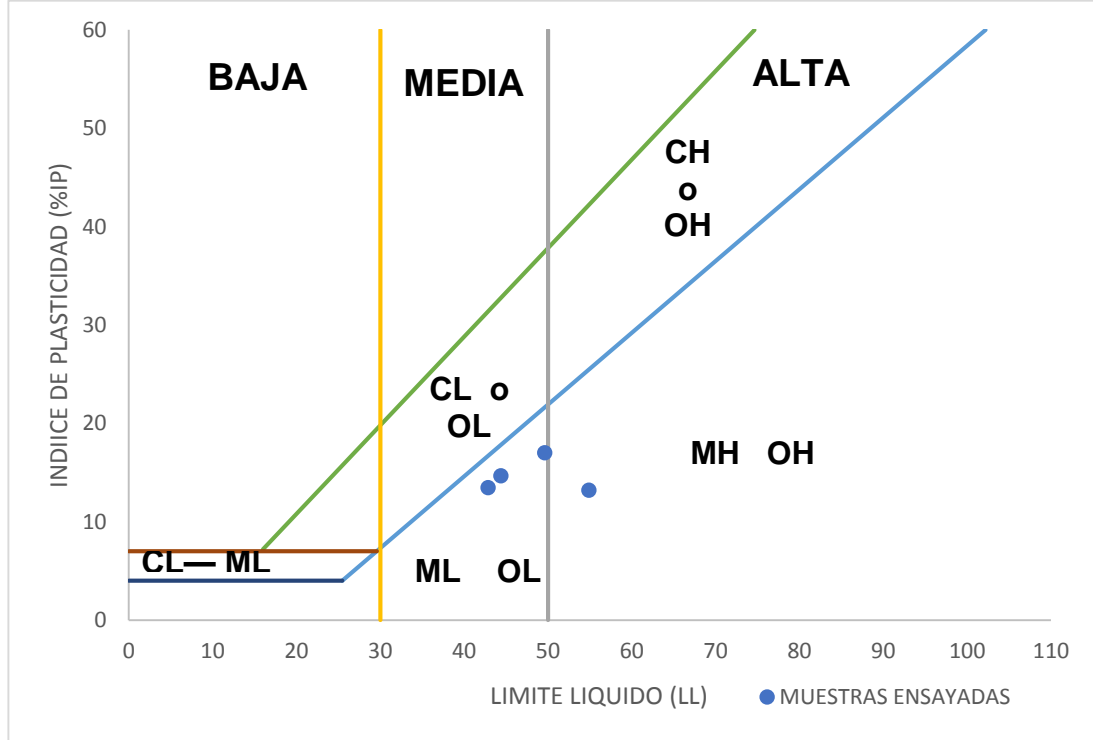


Fuente: Autor

En la gráfica 1 se puede apreciar la predominancia de los suelos finos como arcillas y limos en comparación con las arenas y suelos granulares q posee el suelo.

En la gráfica 2 se observa la clasificación de las muestras inalteradas de acuerdo a la carta de plasticidad de Casagrande

Gráfica 2. Representación del Ip vs Li según la carta de plasticidad de Casagrande

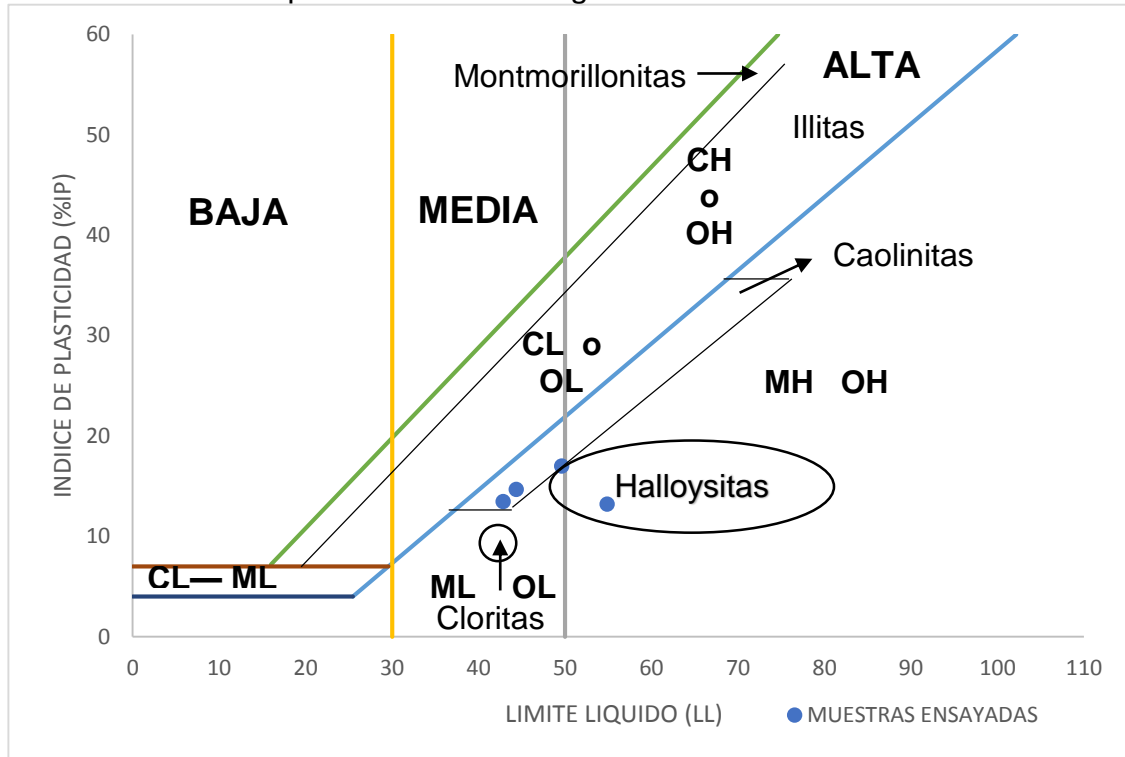


Fuente: Autor

Ya que la cantidad de finos es mayor que la cantidad de partículas gruesas presentes en suelos, este se comporta como fino y por lo tanto se decidió realizar ensayo de hidrómetro y así conocer la cantidad de arcillas y limos presentes en el suelo.

De acuerdo con el ensayo de hidrómetro realizado se encontraron los resultados mostrados en la tabla 6.

Gráfica 3. Carta de plasticidad mineralogía



Fuente: Autor

De acuerdo con los índices de plasticidad encontrados en el suelo en estado natural se puede observar minerales como kaolinitas, que dan indicios del comportamiento del suelo y que por medio de difracción de rayos x se pudo comprobar la presencia de este mineral que junto con la moscovita dan el comportamiento plástico del suelo.

Tabla 6. Resultados hidrómetro

MUESTRA	LIMOS	ARCILLAS
S1M2	57,25%	42,75%

Fuente: Autor

7.1 S1M1

Se encontró que la muestra a profundidad de 1,20 m de acuerdo con el sistema SUCS es un limo con arena, cuya parte fina se comporta como un limo de baja plasticidad MH, a partir de ensayos de corte directo se encontró una cohesión no drenada de 1,3 ton/m² y ángulo de fricción de 28°. A partir de ensayo de compresión confinada se encontró una resistencia de Qu= 12,0 ton/m² y una cohesión no

drenada de $6,0 \text{ ton/m}^2$, permeabilidad de $5,85664\text{E}-06$, es decir permeabilidades muy bajas y $\text{OCR}=1$, obtenido del ensayo de consolidación, por lo tanto, el suelo es normalmente consolidado, tiene un índice de compresibilidad de 0.157 , un índice de recompresión de 0.029 y un esfuerzo de pre-consolidación de 8.6 ton/m^2

7.2 S1M2

Se encontró que la muestra a profundidad de $2,50 \text{ m}$ de acuerdo con el sistema SUCS es un limo arenoso, cuya parte fina se comporta como un limo de alta plasticidad ML, a partir de ensayos de corte directo se encontró una cohesión no drenada de $1,06 \text{ ton/m}^2$ y un ángulo de fricción de 27° . A partir de ensayo de compresión inconfiada se encontró una resistencia $Q_u=4,1 \text{ ton/m}^2$ consistencia blanda, cohesión no drenada de $C_u=2,05 \text{ ton/m}^2$, y una permeabilidad de $2,34269\text{E}-06$, lo cual indica que es suelo tiene permeabilidades muy bajas con un $2 < \text{OCR} < 3$, obtenido del ensayo de consolidación, por lo tanto, el suelo es sobre-consolidado, tiene un índice de compresibilidad de 0.114 , un índice de recompresión de 0.051 y un esfuerzo de pre-consolidación de 16 ton/m^2

7.3 S2M2

Se encontró que la muestra a profundidad de $2,80 \text{ m}$ de acuerdo con el sistema SUCS es un limo con arena, cuya parte fina se comporta como un limo de baja plasticidad ML, a partir de ensayo de compresión inconfiada se registró que muestra una resistencia $Q_u= 8,0 \text{ ton/m}^2$ y una cohesión de $4,0 \text{ ton/m}^2$, por medio de ensayo de corte directo se encontró un ángulo de fricción de 28° y una cohesión no drenada de $1,6 \text{ ton/m}^2$ y una permeabilidad de $K= 9,72821\text{e}-06$, lo cual indica que el suelo tiene un grado de permeabilidad muy baja, y un $1 \leq \text{OCR} < 2$, obtenido del ensayo de consolidación, lo cual indica que el suelo está ligeramente consolidado, tiene un índice de compresibilidad de 0.126 , un índice de recompresión de 0.041 y un esfuerzo de pre-consolidación de 10 ton/m^2

7.4 PROPIEDADES DE LA CASCARILLA DE ARROZ Y LA CAL VIVA

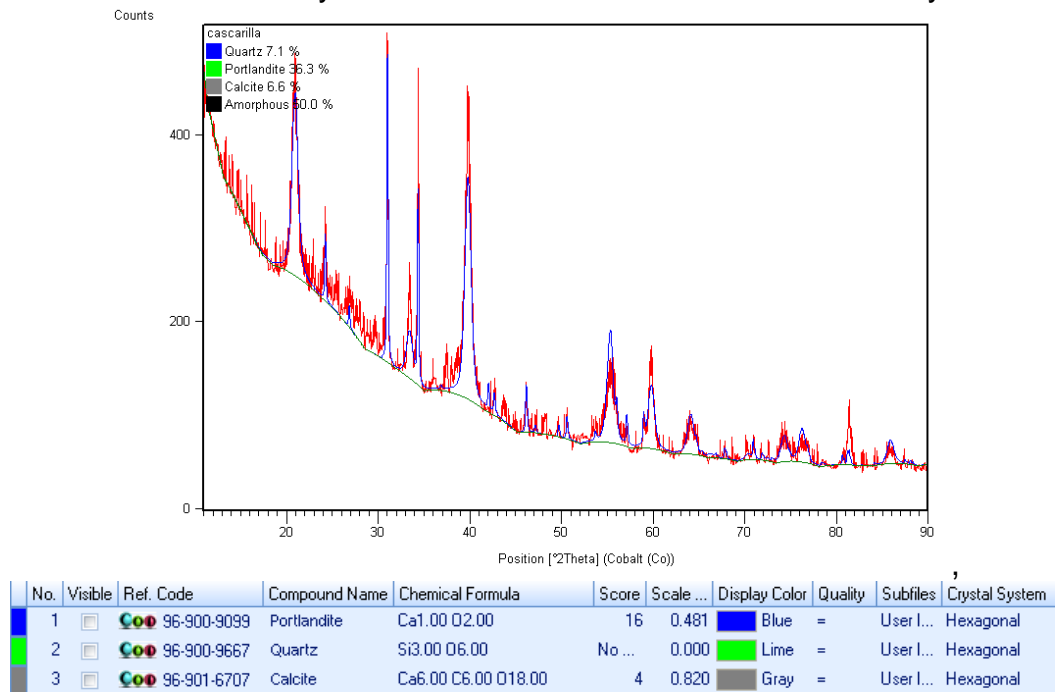
A continuación, se muestran los ensayos de difracción de rayos X realizados en las muestras de cal y cascarilla de arroz, además se presenta la distribución granulometría respectiva.

Tabla 7. Propiedades de la ceniza de arroz + cal

DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA	
PASA TAMIZ N°40 (0,4 μm)	95,54%
PAS TAMIZ N° 200 (75 μm)	58,68%

Fuente: Autor

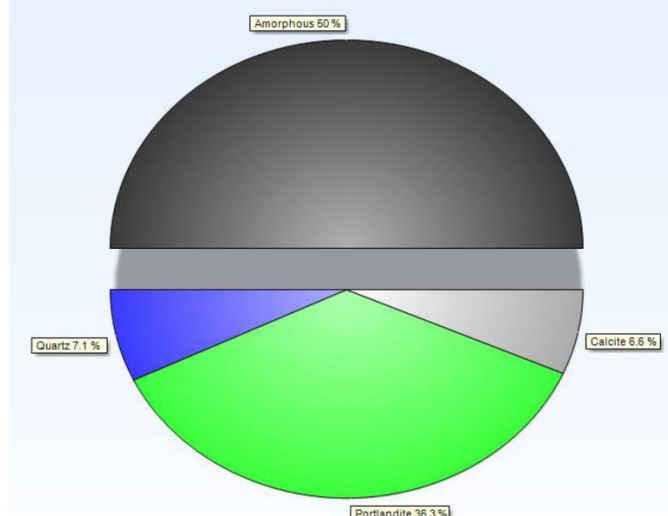
Gráfica 4. Difracción de rayos x de la ceniza de la cascarilla de arroz y la cal



Fuente: Incitema

En la Gráfica 4 se puede apreciar las curvas obtenidas, del ensayo de difracción de rayos x, muestra que los componentes principales de este material son portlandita, cuarzo y calcita, adicionalmente la muestra tiene silicatos de calcio, que son los buscados en esta tesis.

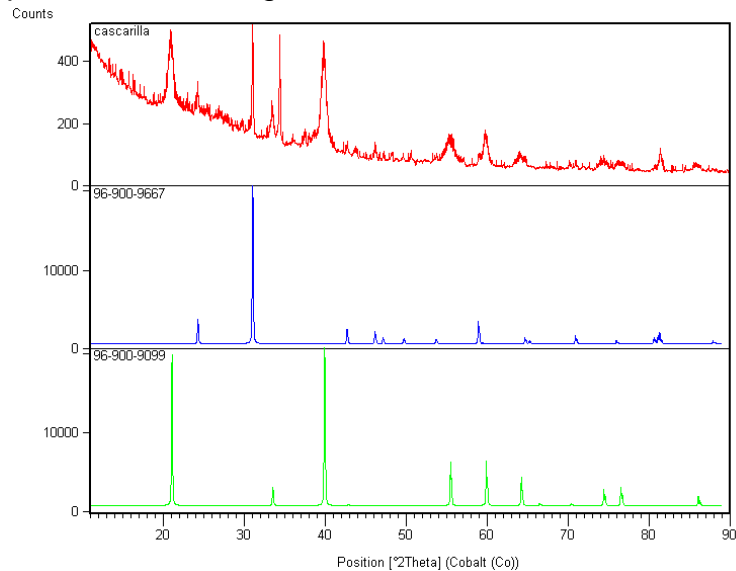
Gráfica 5. Composición Porcentual De La Cascarilla De Arroz+Cal



Fuente: Incitema

En la Gráfica 5 se puede apreciar que en la muestra predomina el mineral portlantita, que se puede relacionar con materiales cementantes y por lo tanto se esperaría que se aumentaran propiedades de resistencia en el suelo o en la mezcla a aplicar.

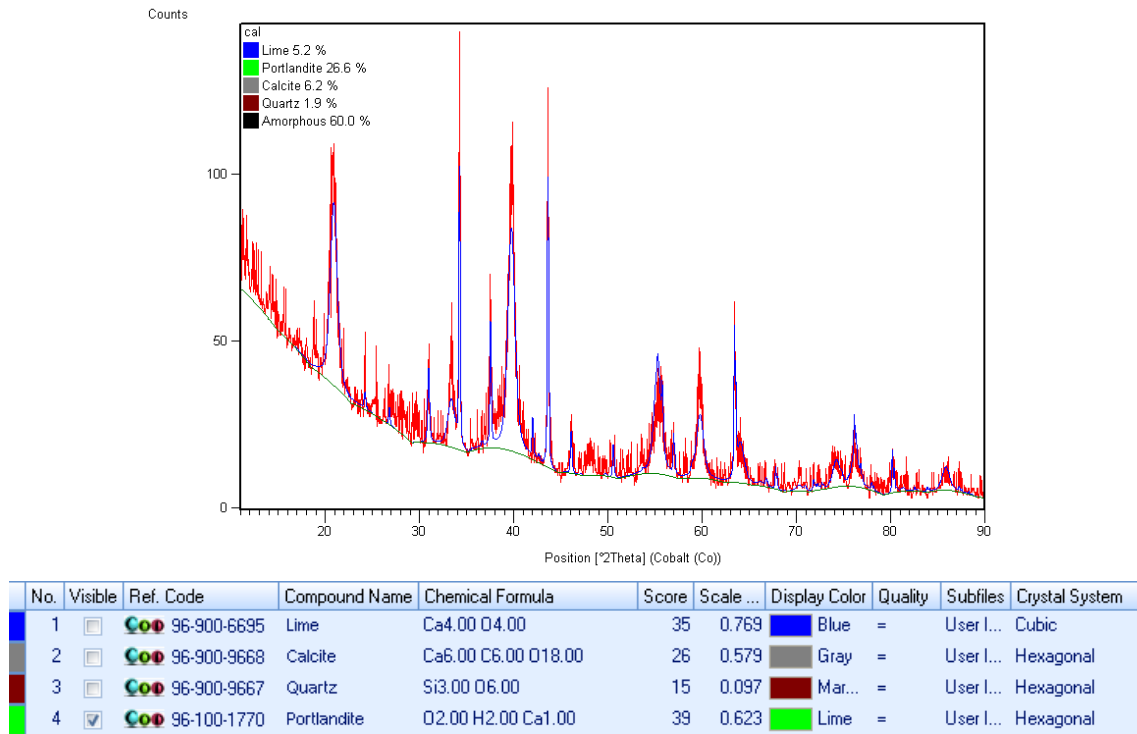
Gráfica 6. Comparación mineralógica de la cascavilla de arroz+ cal



Fuente: Incitema

En la Gráfica 6 se puede comparar la curva arrojada para el análisis de la mezcla de cca+cal, comparada con los minerales de los que se encontró un mayor porcentaje de cuarzo y portlantita, los cuales al reaccionar formaron silicato de calcio, se esperaba que la formación de estos minerales aumentara la resistencia del suelo, ya que se encuentran relacionados con la cementación del suelo y por lo tanto con el aumento de propiedades mecánicas del mismo.

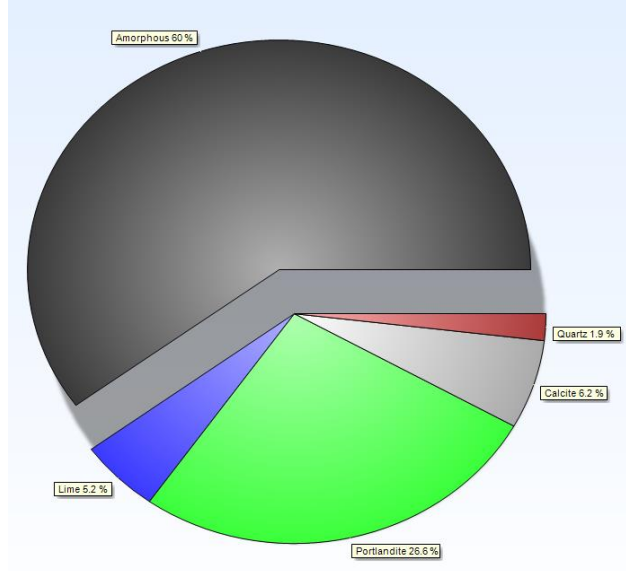
Gráfica 7. Composición mineralógica de la cal



Fuente: Incitema

La Gráfica 7, muestra la composición mineralógica de la cal, que posee dentro de su estructura principalmente, cal, calcita, cuarzo y portlantita.

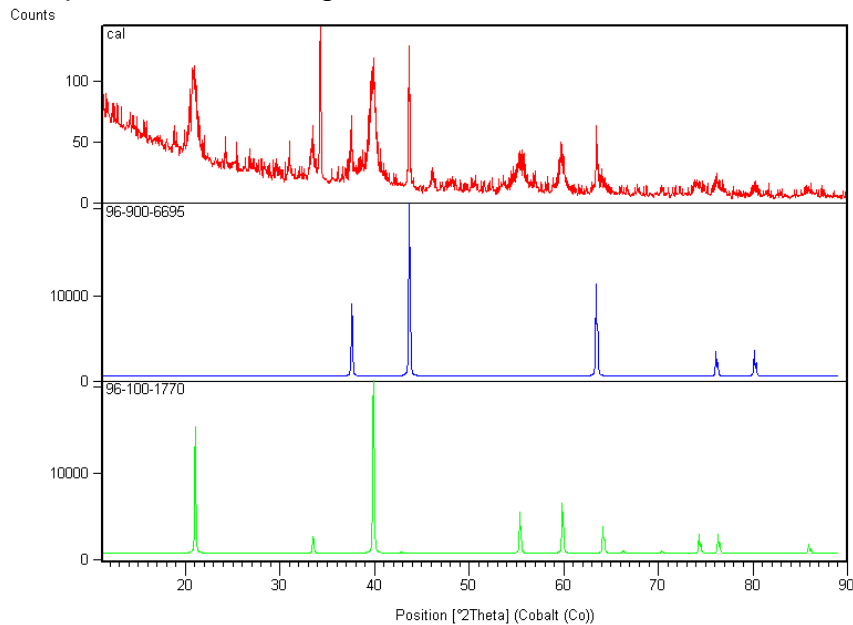
Gráfica 8. Composición Porcentual de la Cal viva



Fuente: Incitema

En la Gráfica 8, se puede ver la composición porcentual de cal, el mayor componente de la cal es la portlantita, lo que aporta la propiedades de resistencia, en este material, que al ser aplicado en el suelo reacciona y mejora su comportamiento.

Gráfica 9. Comparación mineralógica de la cal



Fuente: Incitema

En la Gráfica 9. Se puede apreciar la comparación entre las curvas patrón de cuarzo, cal y portlantita.

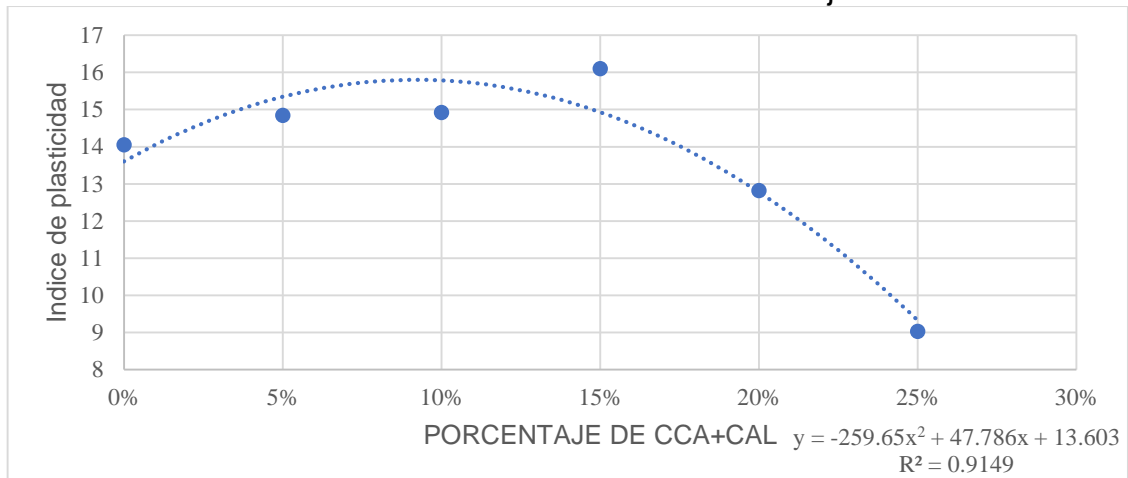
7.5 ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE MEJORAMIENTO

En el siguiente capítulo se realiza un consolidado y análisis de los resultados mecánicos y químicos obtenidos para verificar la efectividad de la mezcla de cca+cal en suelos finos.

7.5.1 Variación de las propiedades mecánicas.

A continuación, se obtienen las correlaciones para la realización de modelos matemáticos que permitan correlacionar las propiedades físicas de los suelos junto con las propiedades mineralógicas y los porcentajes de cca+cal.

Gráfica 10. Variación Del Índice De Plasticidad Vs Porcentaje De cca+cal



Fuente: Autor

Ecuación 9. Índice de plasticidad en función de porcentaje de cca+cal

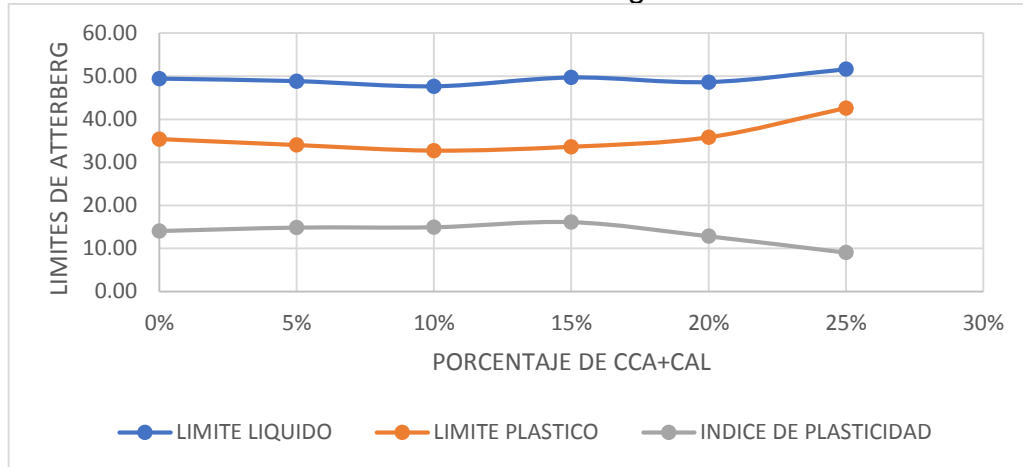
$$IP = -259.65(\%cca+cal)^2 + 47.786(\%cca+cal) + 13.603$$

Fuente: Autor

La Gráfica 10, mostrada anteriormente representa la variación de la plasticidad en función de los porcentajes de sílice aplicados al suelo, se observa que, con porcentajes bajos de sílice, el suelo tiende a mantener su índice de plasticidad con

proporciones más grandes de sílice la muestra se presenta una disminución en la plasticidad del suelo.

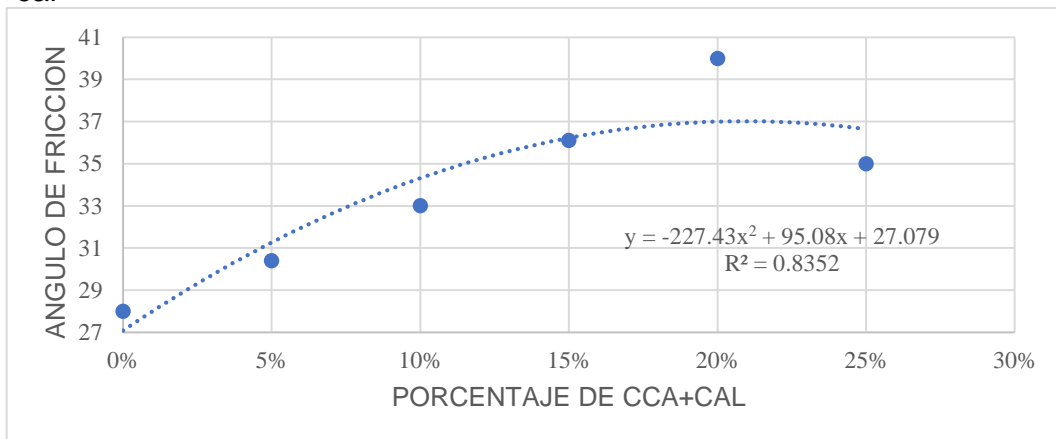
Gráfica 11. Variación De Los Límites De Atterberg



Fuente: Autor

En la Gráfica 11, se puede observar la variación del límite plástico y límite líquido del suelo y como se afecta el índice de plasticidad, que directamente indica el rango en que el suelo está presentando cambios ante la presencia de agua, de acuerdo con la gráfica se observa que en al ir aumentando la cantidad de sílice en el suelo de estudio, este disminuye su plasticidad, hasta en un 36%, se observa que se necesita más del 20% de cca+cal, respecto al peso del suelo para disminuir la plasticidad del suelo.

Gráfica 12. Variación del ángulo de fricción del suelo a diferentes porcentajes de cca+cal



Fuente: Autor

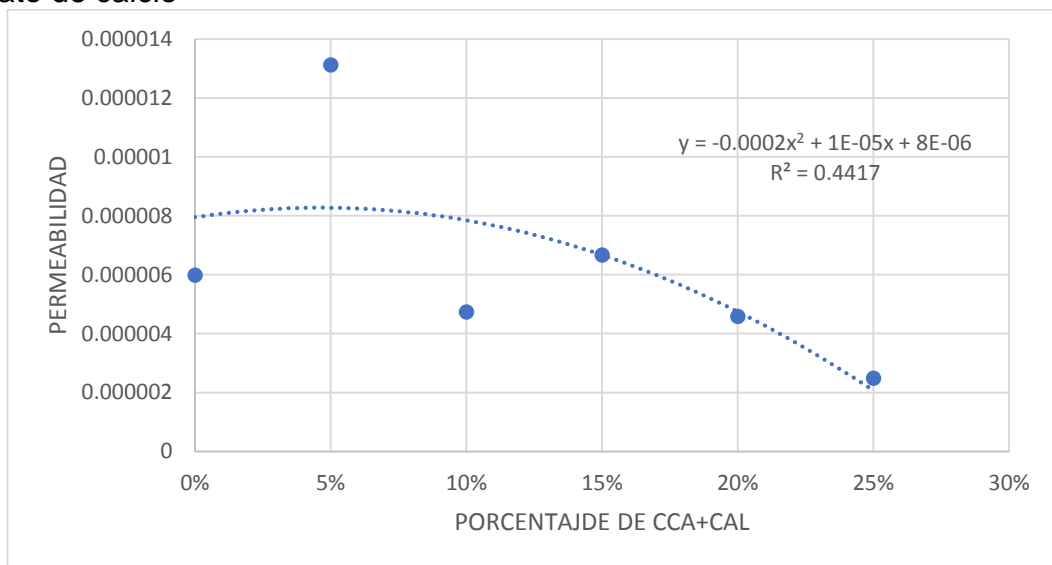
Ecuación 10. Modelo matemático para ángulo de fricción en función del porcentaje de cca+cal

$$\Phi = -227.43(\%cca+cal)^2 + 95.08(\%cca+cal) + 27.079$$

Fuente: Autor

En la Gráfica 12, se puede observar la variación que presenta el ángulo de fricción en presencia de silicato de calcio, tiene una tenencia lineal al aumentar el porcentaje aplicado, hasta el 20% después de este porcentaje se presenta una disminución en su resistencia al corte, esto coincide con los presentado por distinto autores que indican que por encima del 20% además de aumentar los costos de aplicación de cales, el ángulo de fricción a pesar de que aumenta pierde efectividad en comparación con otros porcentajes, es importante resaltar que se realizaron distintas regresiones, para evaluar la que mejor se adaptará a los resultados obtenidos

Gráfica 13. Variación de la permeabilidad del suelo a diferentes porcentajes de silicato de calcio



Fuente: Autor

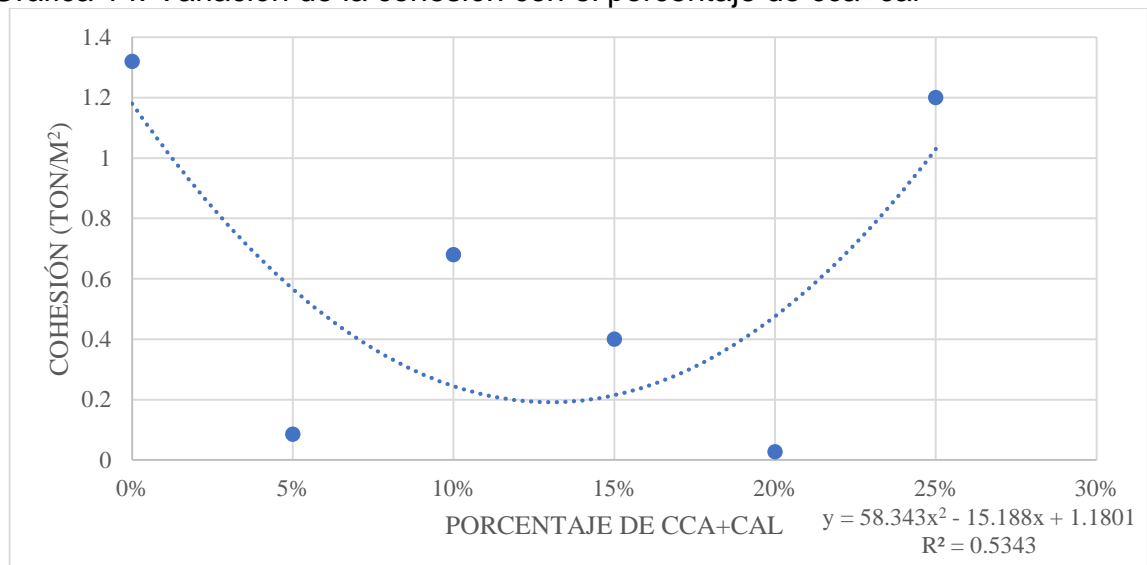
Ecuación 11. Permeabilidad en función del porcentaje de cca+cal

$$K = -0.0002(\%cca+cal)^2 + 0.000001(\%cca+cal) + 8E-06$$

Fuente: Autor

De acuerdo con la Gráfica 13 se puede observar que si bien con cantidades bajas (5%) de silicato de calcio se aumenta la permeabilidad del suelo en un 119,4% haciendo que este mejore en condiciones de humedad ya que al dejar pasar el agua evita futuros hinchamiento y asentamientos a largo plazo, es importante destacar que al aumentar la cantidad de silicato de calcio en el suelo la permeabilidad aumenta en tan solo un 6,10%, se puede notar que la permeabilidad disminuye al aumentar la cantidad de cca+cal presente en la muestra, algunos autores como el ingeniero Jaime Díaz, de la Universidad Industrial de Santander, en un seminario realizado en 2005 sobre rellenos, indica que con el aumento de este tipo de estabilizadores se disminuye la permeabilidad del suelo, ya que, la cal forma cristales penetrando en estos vacíos y rellenándolos impidiendo el paso de agua.

Gráfica 14. Variación de la cohesión con el porcentaje de cca+cal



Fuente: Autor

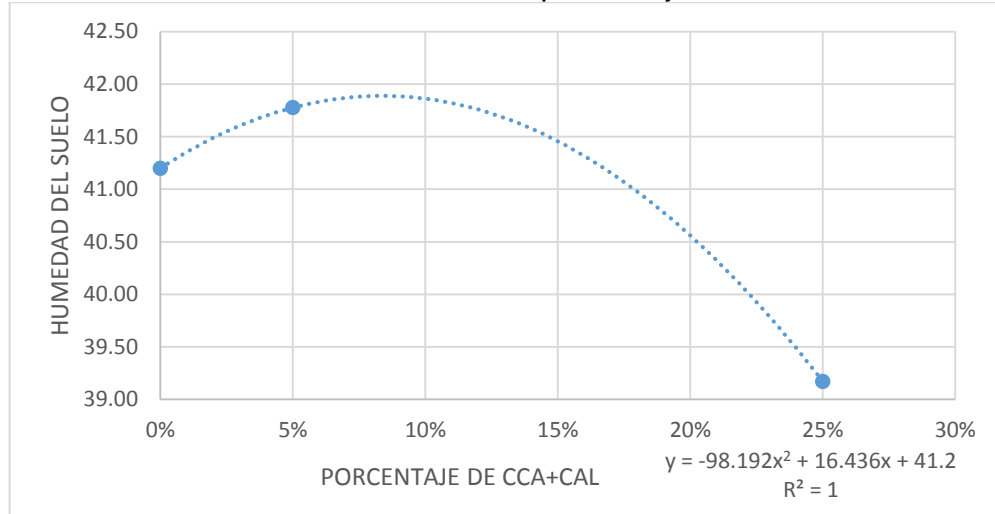
En la Gráfica 14, se puede observar la variación que tiene la cohesión, del suelo que por definición es la unión que poseen sus partículas, en porcentajes altos se observa que, si bien disminuye la cohesión en un porcentaje de 9,09%, esta disminuye en un porcentaje del 93,56% con cantidades bajas de silicato de calcio, lo cual se relaciona con la permeabilidad del suelo, ya que a menores cohesiones las partículas tienen a disgregarse y por lo tanto a dejar pasar el agua. En cantidades grandes la mezcla de cca+cal tiende a formar terrones de suelo y unirlos, pero en presencia de agua son disgregados junto con los iones de calcio que aumentan la permeabilidad del suelo, se realizaron diferentes regresiones para evaluar la que mejor se adecuara a los resultados

Ecuación 12. Modelo matemático entre la cohesión y el porcentaje de cca+cal

$$C = 58.343(\%cca+cal)^2 - 15.188(cca+cal) + 1.1801$$

Fuente: Autor

Gráfica 15. Variación de la humedad con el porcentaje de silicato de calcio



Fuente: Autor

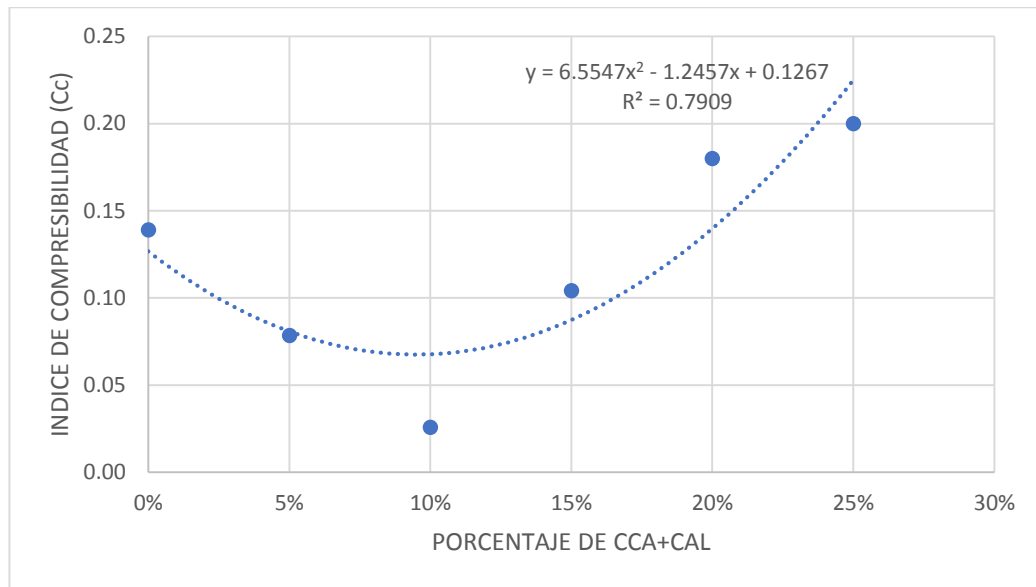
Ecuación 13. Humedad en función del porcentaje de cca+cal

$$w = -98.192(\%cca+cal)^2 + 16.436(\%cca+cal) + 41.2$$

Fuente: Autor

En la Gráfica 15, se puede observar que al aplicar cantidades bajas de cca+cal la humedad aumenta en un porcentaje menor del 1% lo cual no es significativo, ya que, a la muestra se le adiciono una cantidad de agua para que el suelo simulara las condiciones de humedad iniciales, debido a que en el laboratorio se dificulta que el suelo quede 100% homogéneo, la muestra pudo verse alterada, por este fenómeno, considerando en este caso que la cantidad de cal adicionada no es suficiente para reaccionar y por lo tanto la humedad del suelo se conserva; al aumentar el porcentaje de silicato de calcio en el suelo a 25% de mezcla, se observa una disminución significativa del 5% de la humedad, ya que, en este caso la cantidad de cal aplicada es lo suficientemente grande para reaccionar con los iones presentes en el suelo, hidratando así la cal viva aplicada, se absorbe parte de la humedad del suelo.

Gráfica 16. Variación del índice de compresibilidad (Cc) con el porcentaje de cca+cal



Fuente: Autor

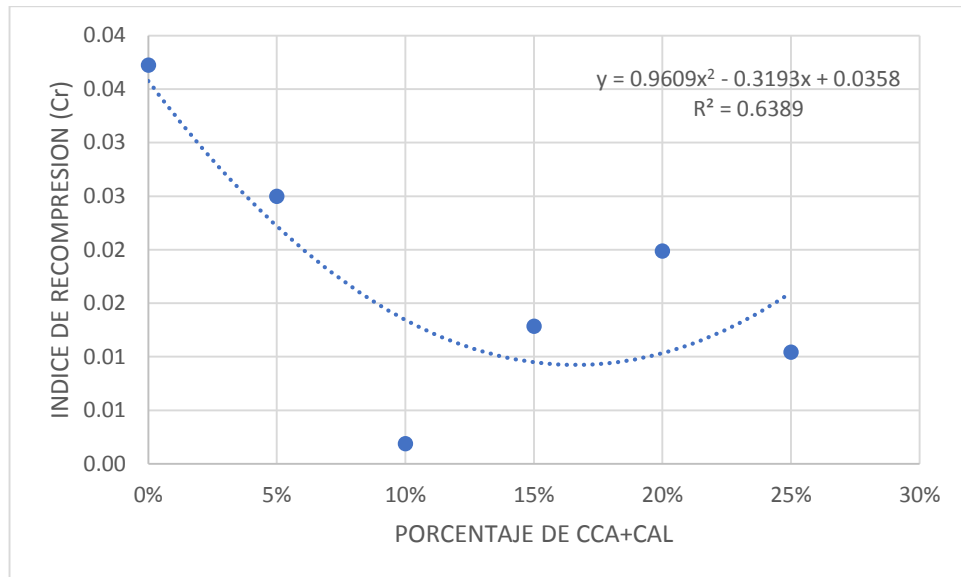
De acuerdo la Gráfica 16, se puede inducir que el índice de compresibilidad tiene un comportamiento parabólico, ya que el Coeficiente de compresibilidad es un indicador de la variación que se está produciendo en los vacíos respecto a la presión que se está ejerciendo, entre más grande este indica que hay un reacomodo mayor en sus partículas, lo cual se muestra claramente en la Gráfica 16, ya que, la muestra al 25% de cca+cal, es menos plástica, pero conserva cohesión, en presencia de agua sus partículas se reacomodan y por lo tanto la variación en su relación de vacíos es mucho mayor, lo cual indica que esta muestra presenta relaciones de vacíos más grandes y asentamientos por consolidación mayores, adicionalmente se encuentra una correlación fuerte entre el índice de plasticidad y el índice de compresibilidad, con dispersión de datos baja.

Ecuación 14. Modelo matemático entre Cc en función del porcentaje de cca+cal

$$C_c = 6.5547(\%cca+cal)^2 - 1.2457(\%cca+cal) + 0.1267$$

Fuente: Autor

Gráfica 17. Variación del índice de recompresión con el porcentaje de cca+cal



Fuente: Autor

Ecuación 15. Índice de recompresión en función del porcentaje de cca+cal

$$Cr = 0.9609(\%cca+cal)^2 - 0.3193(\%cca+cal) + 0.0358$$

Fuente: Autor

En la gráfica 17, Se muestra la variación del índice de recompresión con diferentes porcentajes de cca+cal, se puede apreciar que el valor de este parámetro está relacionado directamente con la recuperación del suelo presentada después de la descarga del suelo, se observa que al aumentar el porcentaje de cca+cal hasta el 15%, el suelo se encuentra en estado plástico, es decir no recupera su forma al descargarlo, lo cual es importante ante procesos de asentamientos ya que después de que el suelo alcance asentamientos considerables ante precargas este dejará de asentarse evitando problemas estructurales, se muestra una correlación de 0.6389, lo cual indica que las variables presentan un comportamiento con desviaciones medias, esto debido a los errores de precisión que se presentan al desarrollar los ensayos de laboratorio, adicionalmente se muestra la tendencia a un comportamiento polinómico de segundo grado, entre las dos variables.

7.5.2 Variación de las propiedades mineralógicas

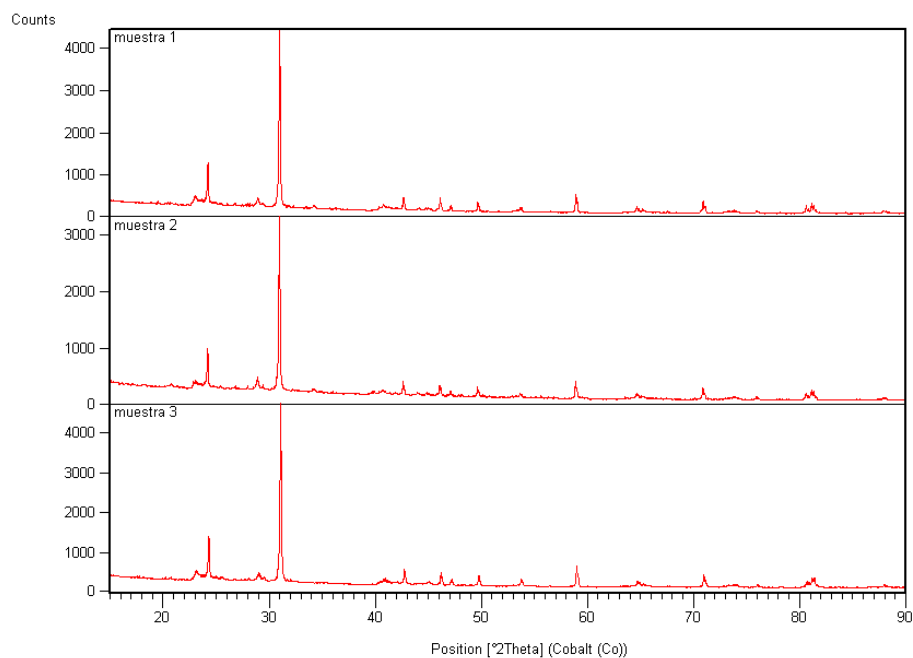
En este subcapítulo se puede apreciar los ensayos mineralógicos realizados a las muestras evaluadas, en cada gráfica se aprecia en la parte superior izquierda, el nombre correspondiente para cada muestra evaluada, cada uno de estos nombres identifica una muestra con un porcentaje diferente de ceniza de cascarilla de arroz+cal; a estos nombres se les asignó un porcentaje de la siguiente manera:

Muestra 1: 5%

Muestra 2: 25%

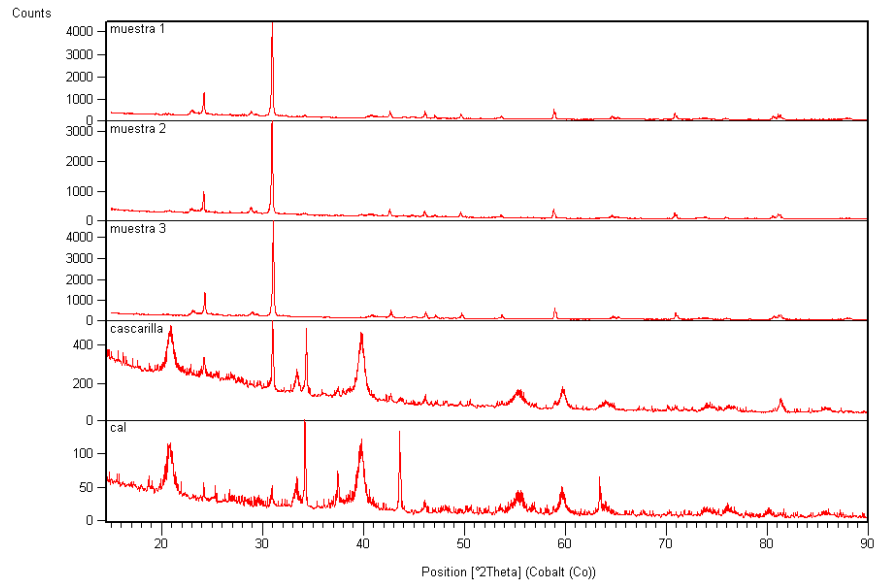
Muestra 3: 0%

Gráfica 18. Difracción de rayos x porcentajes 5, 25, 0



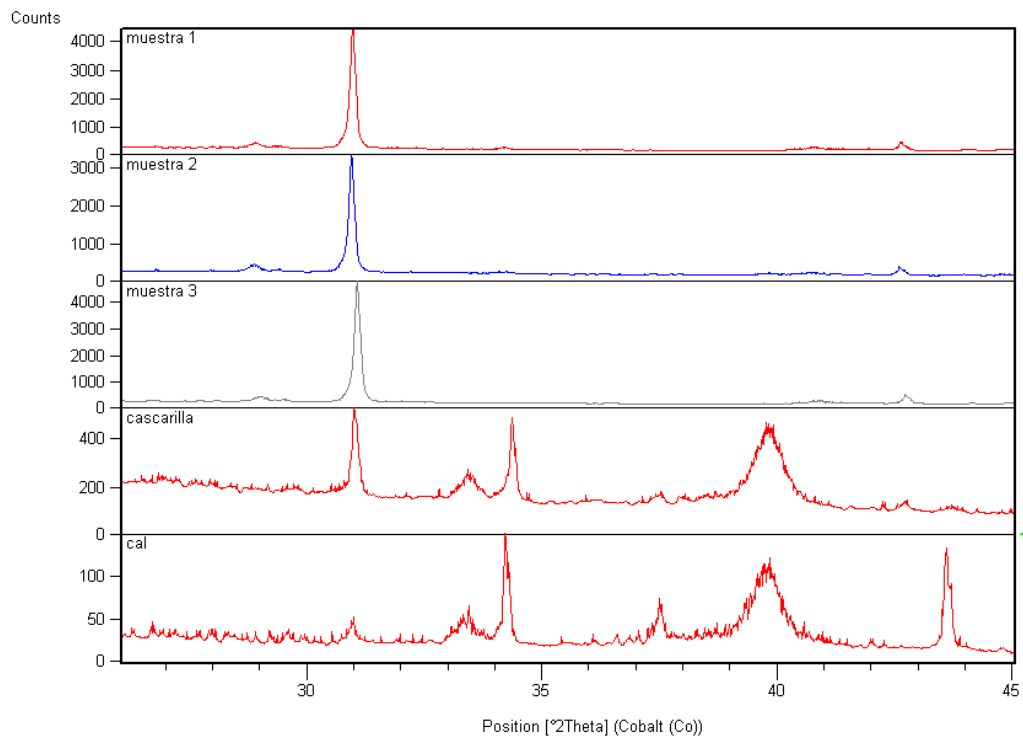
Fuente: Incitema

Gráfica 19. Comparación mineralógica entre las tres muestras (5,25,0) y la adición de ceniza de cascarilla de Arroz+Cal



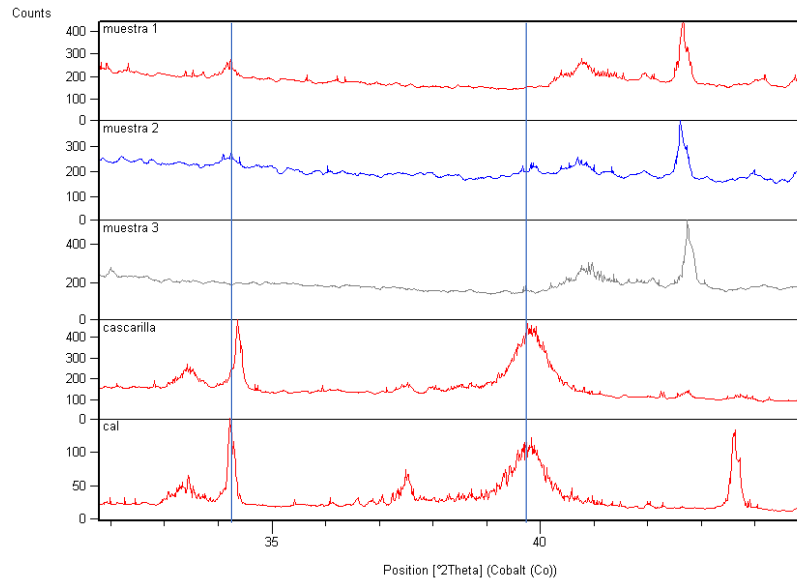
Fuente: Autor

Gráfica 20. Cambios mineralógicos en las tres muestras



Fuente: Incitema

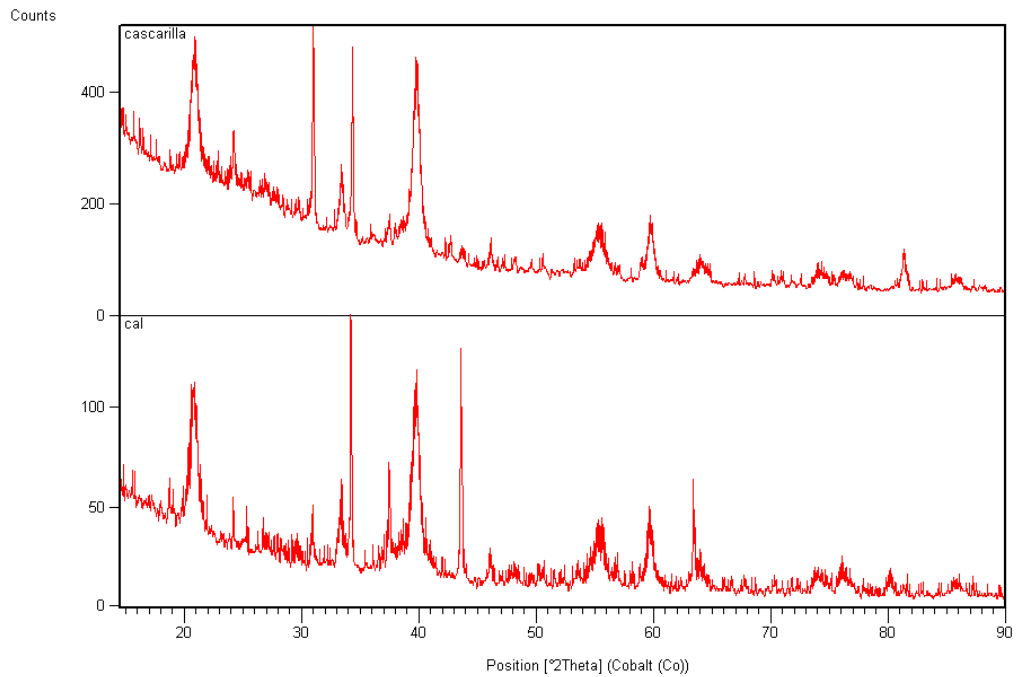
Gráfica 21. Cambios mineralógicos en las 3 muestras, entre 0° y 43°



Fuente: Incitema

En la Gráfica 18 a 21 se puede observar la reacción y los cambios mineralógicos que posee la muestra ante la presencia de cca+cal, se denotan cambios en las curvas que corresponden a la adición de materiales cementantes como la calcita y la portlantita, no se observan cambios notorios por la escala de la gráfica, estos cambio son notorios por debajo de los 30°, con porcentajes bajos de adición de cca+cal no se observa reacción ya que el porcentaje de cal es demasiado bajo para reaccionar con los iones de calcio y produce una variación, el mayor aumento se registra con el 25% de la mezcla ya que aparece una curva hacia los 30° correspondientes a cuarzo y más adelante a la aparición de materiales como calcitas y portlantitas

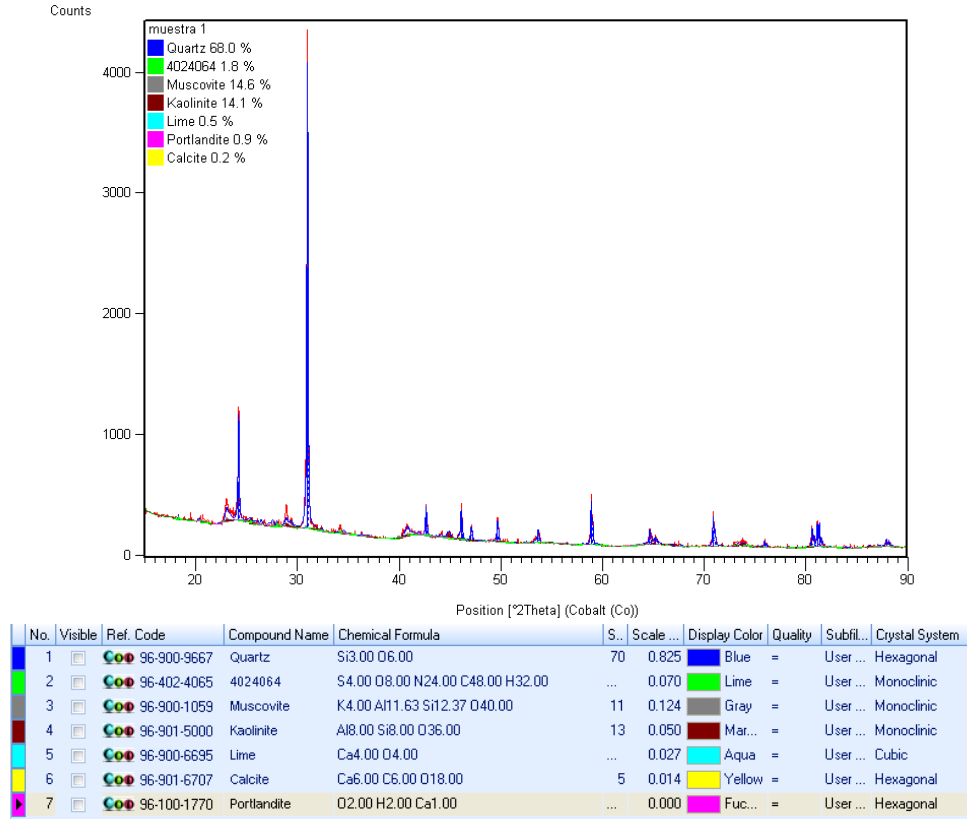
Gráfica 22. Variación mineralógica entre la cal y la cca+cal



Fuente: Incitema

Se observa en la Gráfica 22 una composición similar entre la cal y la cca+cal, ya que se produce una reacción entre los componentes de la cal, como lo son el cuarzo, la calcita y la portlantita y el silicio de la cascarilla de arroz, adicionalmente se observa la formación de silicato de calcio e hidróxidos de calcio, lo cual indica que se logró el objetivo, pues se buscaba la formación de estos silicatos para aumentar la resistencia del suelo, adicionalmente se observa el aumento de cuarzo puro, asociado a propiedades de resistencia.

Gráfica 23. Difracción de rayos x muestra con 5% de cca+cal

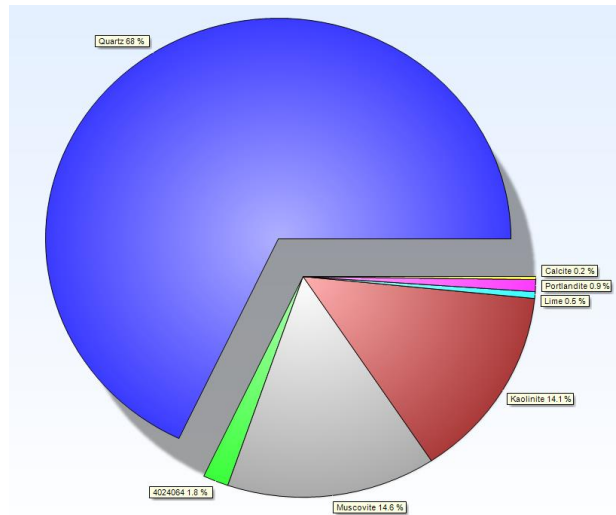


Fuente: Incitema

Al aplicar un 5% de cca+cal a la muestra, se observa un cambio en la composición mineralógica, se encuentran otros minerales presentes diferentes a los originales, entre ellos se encuentran la calcita, la cal y la portlantita, que aumentan la resistencia del suelo y altera su composición química, adicionalmente se observa una disminución del porcentaje de cuarzo paso de un 70,5% a un 68%, es decir, se presenta un disminución del 3,56%, eso indica que el cuarzo en estado puro ya no se encuentra presente y por lo tanto que en la muestra se presenta un reorganización mineralógica y química.

La kaolinita se mantiene constante mientras que la moscovita disminuye en un porcentaje de 4,6%

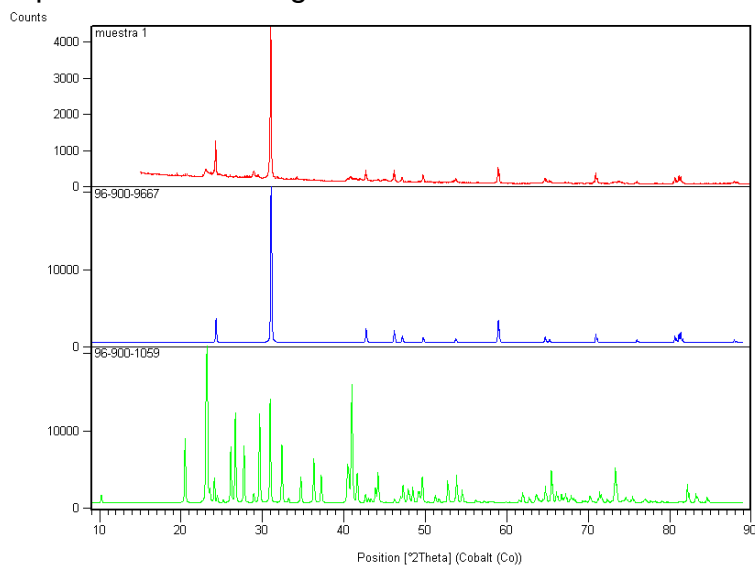
Gráfica 24. Comparación porcentual de la composición mineralógica del suelo con 5% de cca+cal



Fuente: Incitema

La grafica 24. Muestra el porcentaje de minerales presentes en la muestra de suelo estudiada, el mayor porcentaje encontrado es cuarzo y el menor es calcita, está en menor por la baja cantidad de cal aplicada (2.5%), el cuarzo da las propiedades de resistencia del suelo, ya que, es un mineral con características de dureza elevadas y poco reactivo.

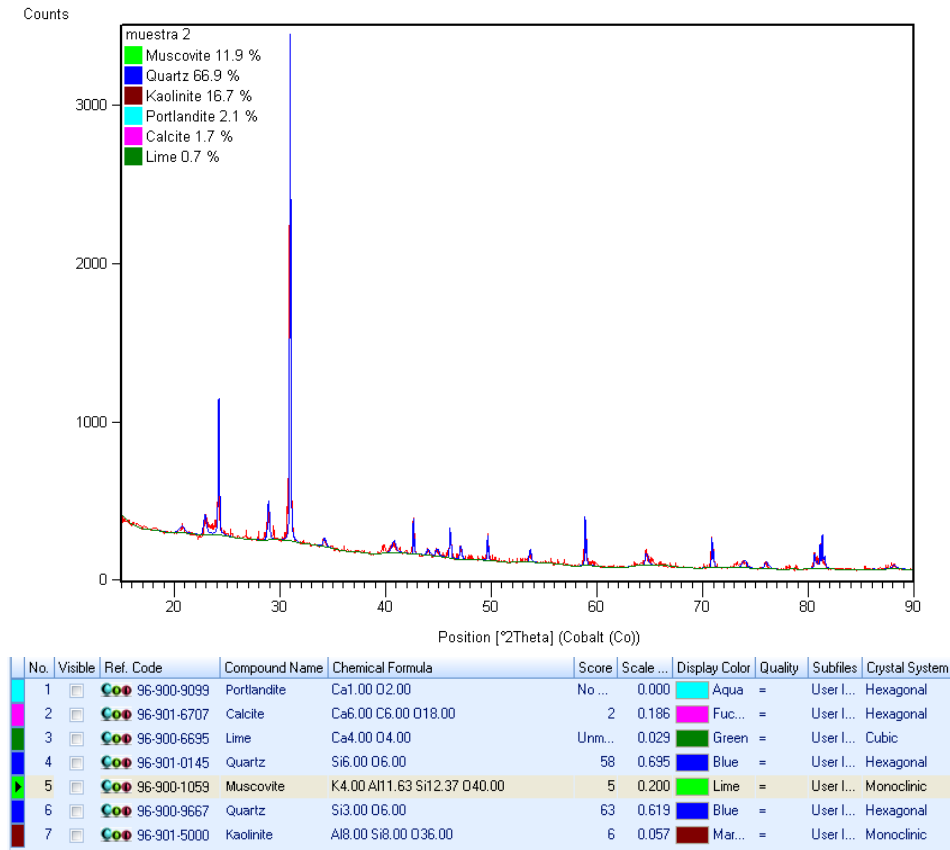
Gráfica 25. Comparación mineralógica de suelo con 5% de cca+cal



Fuente: Incitema

En la Gráfica 25 se generó un grafica comparativa, para evaluar las curvas correspondientes a la cristalización de cuarzo y la moscovita, y los patrones correspondientes a cada uno de estos minerales.

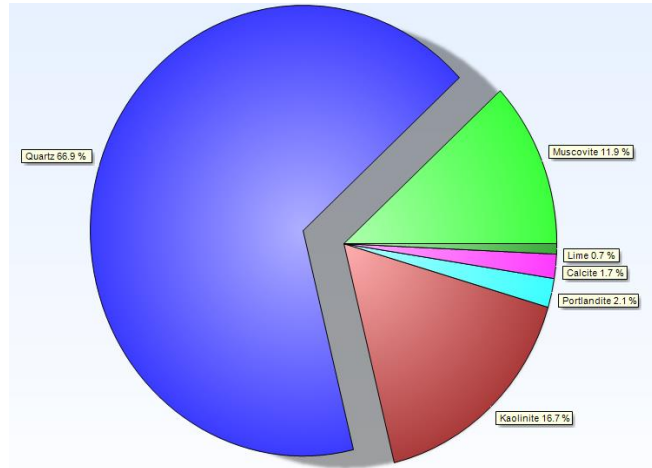
Gráfica 26. Difracción de rayos x muestra con 25% de cca+cal



Fuente: Incitema

La difracción de rayos x presentada en la gráfica 26, muestra un incremento de cal, calcita y portlantita, adicionalmente muestra una disminución en la moscovita del 26,14% y una disminución del cuarzo en estado puro de 5,9%, adicionalmente se observa la reorganización del mineral, ya que se encuentra otro tipo de cuarzo.

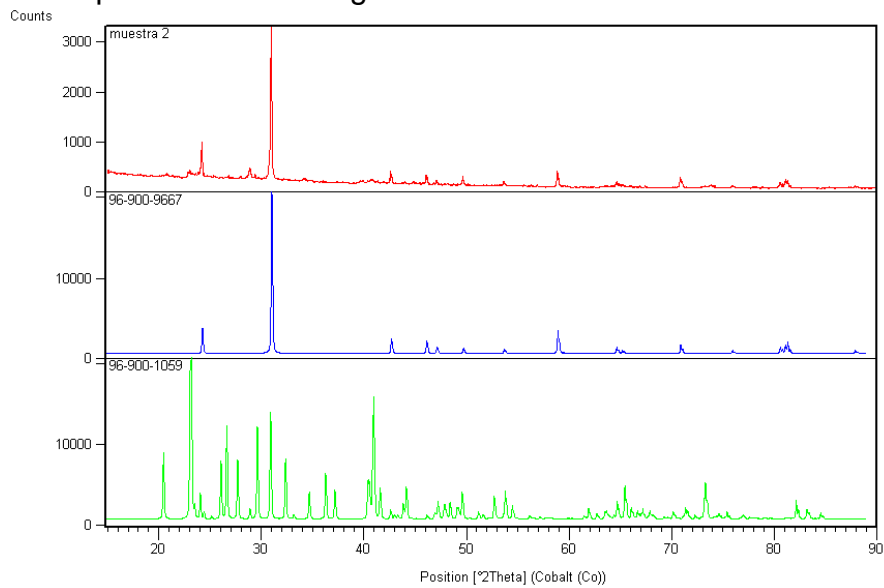
Gráfica 27. Comparación porcentual de la composición mineralógica del suelo con 25% de cca+cal



Fuente: Incitema

En la gráfica 27, se puede apreciar que el mayor mineral encontrado en la muestra es el cuarzo, seguido de la kaolinita y la moscovita respectivamente, estas al estar en contacto con agua dan la plasticidad del suelo.

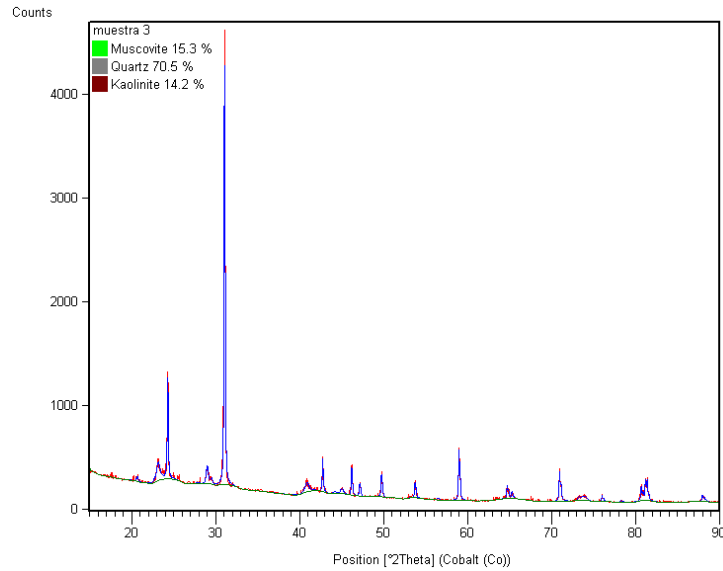
Gráfica 28. Comparación mineralógica de suelo con 25% de cca+cal



Fuente: Incitema

La grafica 28, muestra la comparación mineralógica para las curvas patrón del cuarzo y la moscovita, del estado natural del suelo.

Gráfica 29. Difracción de rayos x para muestra de suelo en estado natural

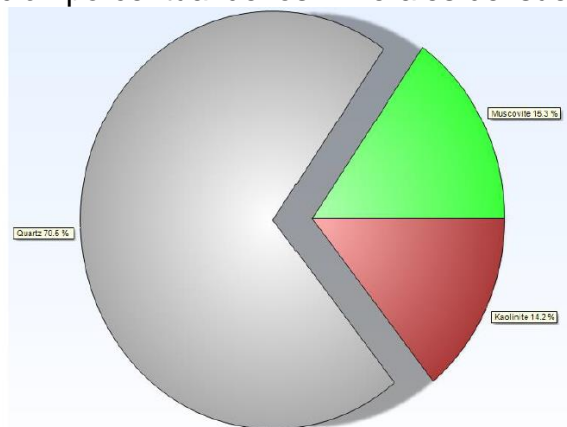


No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale ...	Display Color	Quality	Subfiles	Crystal System
1	<input checked="" type="checkbox"/>	96-900-1059	Muscovite	K4.00 Al11.63 Si12.37 O40.00	11	0.061	Lime	=	User I...	Monoclinic
2	<input checked="" type="checkbox"/>	96-900-9667	Quartz	Si3.00 O6.00	82	0.925	Gray	=	User I...	Hexagonal
3	<input checked="" type="checkbox"/>	96-901-5000	Kaolinite	Al8.00 Si8.00 O36.00	8	0.134	Mar...	=	User I...	Monoclinic

Fuente: Incitema

La muestra en estado natural, de acuerdo con la difracción de rayos x mostrada presenta como minerales predominantes kaolinitas, moscovitas y cuarzos, el cuarzo por ser un mineral duro presente principalmente en arenas, da la resistencia a la fricción del suelo, la moscovita por su parte en presencia de agua se transforma a illitas, presentando comportamientos plásticos, junto con las kaolinitas que también son minerales plásticos.

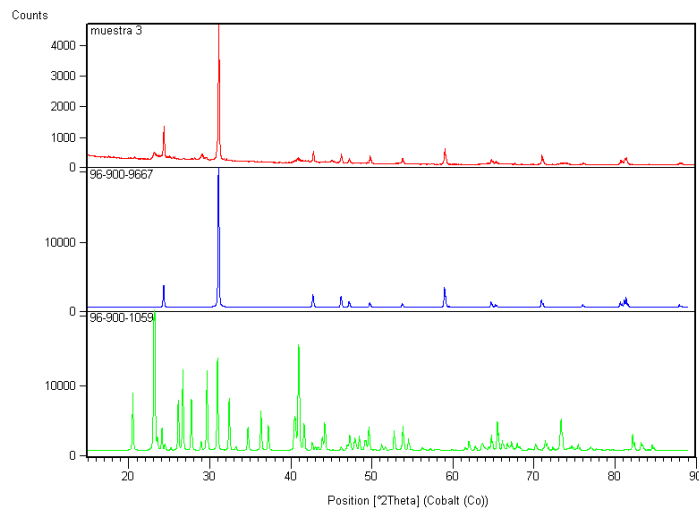
Gráfica 30. Comparación porcentual de los minerales del suelo en estado natural



Fuente: Incitema

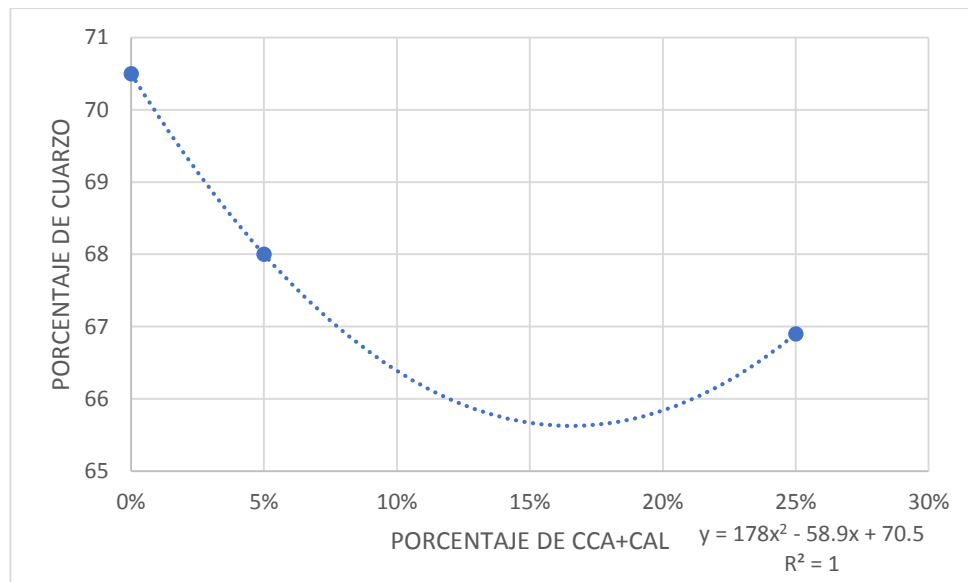
De acuerdo con la gráfica 30, se observa que la mayoría de la muestra está compuesta por cuarzo en un 70,1% y el porcentaje restante se encuentra en igual magnitud compuesto por kaolinitas y moscovitas.

Gráfica 31. Difracción de rayos x para muestra de suelo en estado natural comparación con minerales



Fuente: Incitema

Gráfica 32. Variación del cuarzo con el porcentaje de cca+cal



Fuente: Autor

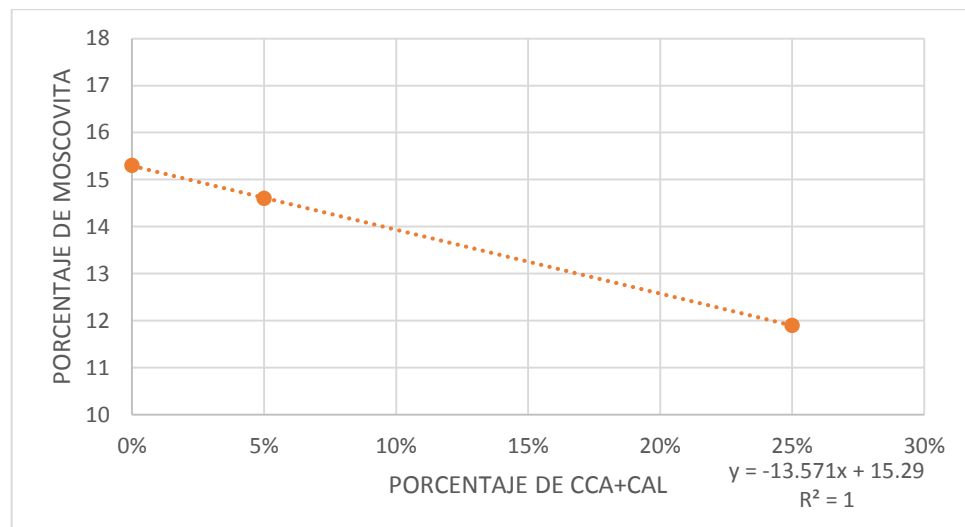
Ecuación 16. Modelo matemático %cuarzo en función del porcentaje de cca+cal

$$\%C = 178(\%cca+cal)^2 - 58.9(\%cca+cal) + 70.5$$

Fuente: Autor

De acuerdo con la gráfica 32 se observa una variación polinómica en la disminución del porcentaje de cuarzo de la muestra, se observa que a medida que se aumenta el porcentaje de cca+cal hasta un 15%, el cuarzo se transforma y hay una reorganización del mineral permitiendo así la disminución del mismo, pero logrando igualmente incrementos en la resistencia del suelo, a partir del 15% se observa que el porcentaje de cuarzo inicia aumentar. Se observa una correlación perfecta entre las dos variables.

Gráfica 33. Variación de la moscovita con el porcentaje de cca+cal



Fuente: Autor

Ecuación 17. Modelo matemático para %moscovita en función del porcentaje de cca+cal

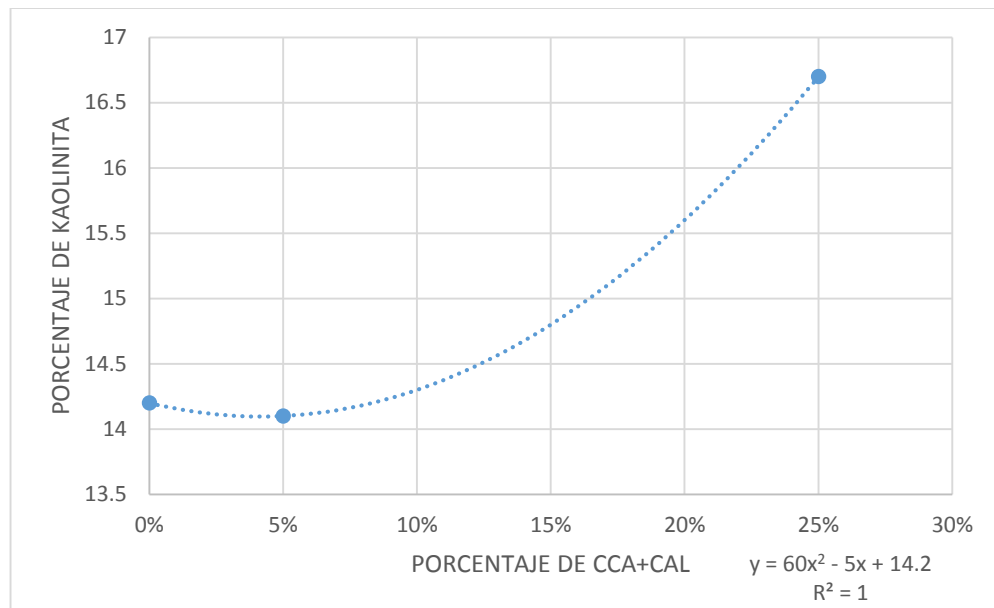
$$\%MO = -13.571(\%cca+cal) + 15.29$$

Fuente: Autor

En la Gráfica 33 observa un comportamiento lineal para la moscovita, es decir que al aumentar la cantidad de cca+cal en la muestra este mineral disminuye, este mineral está presente en limos y principalmente en arcillas de medias a altas plasticidad, al disminuir el mineral en la muestra, esta disminuye su comportamiento

plástico, se presenta un disminución del 22,2 % respecto al porcentaje de mineral encontrado en la muestra sin cascarilla de arroz y cal, existe adicionalmente una correlación de 1, que indica que las variables tiene una correlación fuerte y los datos no presentan grandes dispersiones entre ellos, por lo que el modelo seria confiable.

Gráfica 34. Variación de kaolinita con el porcentaje de cca+cal



Fuente: Autor

Ecuación 18. Modelo matemático para kaolinita en función del porcentaje de cca+cal

$$KA = 60(\%cca+cal)^2 - 5(\%cca+cal) + 14.2$$

Fuente: Autor

En la Gráfica 34 se presenta el modelo matemático observando una tendencia parabólica, con porcentajes bajos de cca+cal, no se observan cambios significativos en la muestra, la disminución en el porcentaje de kaolinita es del 0,07%, presentando un aumento considerable al aumentar la cantidad de cca+cal aplicada, esto debido a la cantidad de cal aplicada y que reacciona formando este mineral, la correlación existente entre las dos variables es de 1, lo cual indica poca dispersión entre los datos encontrados en el laboratorio.

8. CORRELACIONES Y MODELOS MATEMÁTICOS

En el siguiente capítulo se obtuvieron las correlaciones para la realización de modelos matemáticos que permitieran correlacionar las propiedades físicas de los suelos junto con las propiedades mineralógicas y los porcentajes de cca+cal.

Tabla 8. Coeficientes de correlación propiedades físicas

PROPIEDADES FÍSICAS EVALUADAS	R ²
	PORCENTAJE DE CCA+CAL
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	0,915
COHESIÓN NO DRENADA	0,534
PERMEABILIDAD	0,441
HUMEDAD	1
ANGULO DE FRICCIÓN	0,835
ÍNDICE DE COMPRESIÓN (C _c)	0,791
ÍNDICE DE RE COMPRESIÓN (C _r)	0,639

Fuente: Autor

Tabla 9. Coeficientes de correlación propiedades mineralógicas

PROPIEDADES MINERALÓGICAS EVALUADAS	R ²
	PORCENTAJE DE CCA+CAL
CUARZO	1
KAOLINITA	1
MOSCOVITA	1

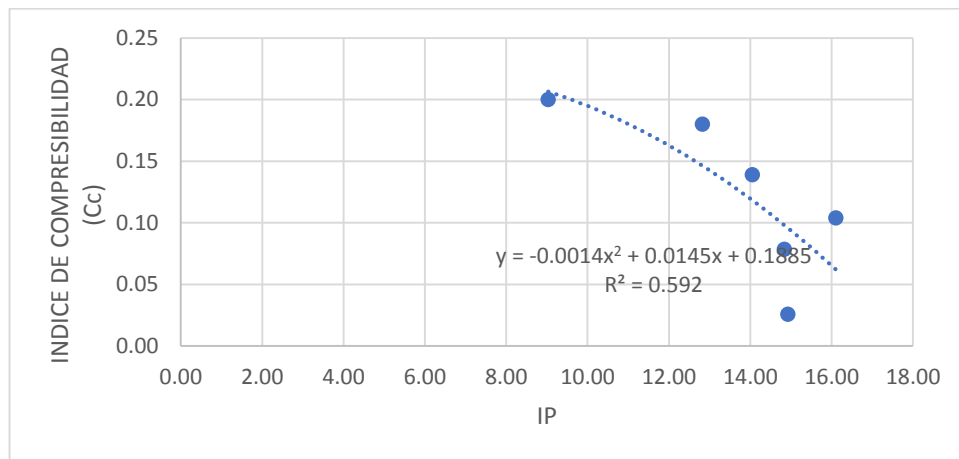
Fuente: Autor

Para la realización de las correlaciones entre las propiedades físicas y mineralógicas, se tuvo en cuenta que la propiedad que tiene más correlación y además que tiene un comportamiento más preciso respecto a los cambios presentados en las muestras al aplicar cascarilla de arroz y cal es la correspondiente al índice de plasticidad, adicionalmente para esta propiedad se tienen más datos conocidos, los resultados se muestran en las siguientes gráficas.

8.1 ÍNDICE DE COMPRESIBILIDAD

El índice de compresibilidad describe el cambio en la relación de vacíos en función del esfuerzo efectivo que se aplique a la muestra, a continuación, se presentan el modelo matemático comparan este índice con la plasticidad del suelo.

Gráfica 35. Índice de compresibilidad (Cc) en función de índice de plasticidad



Fuente: Autor

Tabla 10. Resumen estadístico

PARÁMETROS	Cc	IP
DATOS	6	6
VALOR MÍNIMO	0,03	9,03
VALOR MÁXIMO	0,20	16,100
MEDIA	0,101	13,403
VARIANZA	0,004	6,244
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,021	31,220
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	0.769	
R2 (%)	0.592	

Fuente: Autor

La Gráfica 35 presenta la correlación entre el índice de plasticidad y el índice de compresibilidad, el cual demuestra una tendencia polinómica de segundo grado, con una baja dispersión de datos y una correlación media de 0,59 con la el índice de plasticidad, por esta razón el modelo matemático obtenido es confiables y se

presenta la ecuación 19 correspondiente a la regresión entre las dos variables, se puede ver que al aumentar la plasticidad del suelo, este índice decrece, es decir se presenta una menor variación entre la relación de vacíos de la muestra analizada, esto puede explicarse debido a la formación de cristales en la muestra que impiden la deformación de la muestra, pero que en principio no modifican la plasticidad del suelo, por la hidratación de la cal.

Ecuación 19. Coeficiente de compresibilidad en función de IP

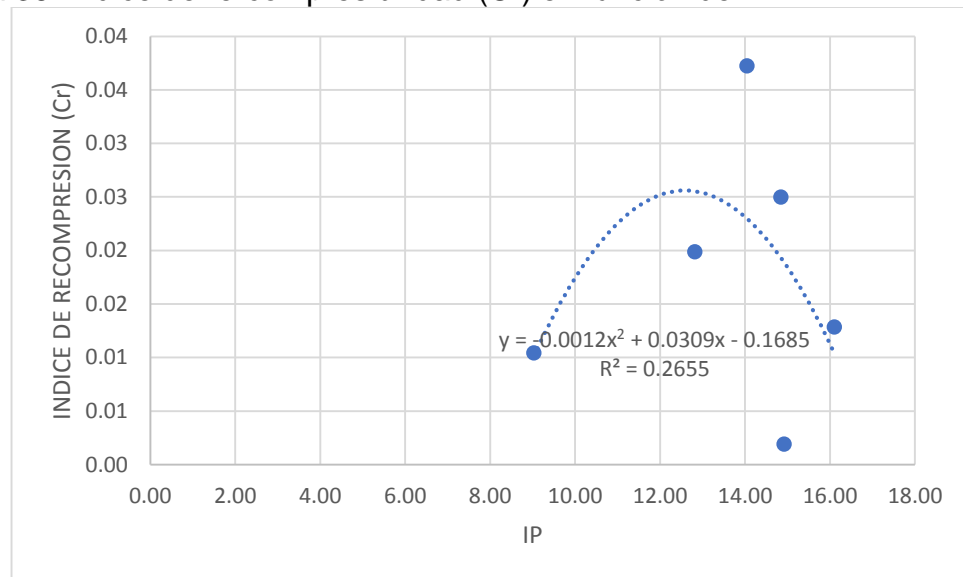
$$C_c = -0.0014(IP)^2 + 0.0145(IP) + 0.1885$$

Fuente: Autor

8.2 ÍNDICE DE RECOMPRESIÓN

El índice de recompresión indica el grado de recuperación que tiene el suelo, al retirar el esfuerzo aplicado, a continuación, se presentan un modelo matemático que muestra el comportamiento de este con el índice de plasticidad del suelo.

Gráfica 36. Índice de re-compresibilidad (Cr) en función de IP



Fuente: Autor

Tabla 11. Resumen estadístico

PARÁMETROS	Cr	IP
DATOS	6	6
VALOR MÍNIMO	0,00	9,03
VALOR MÁXIMO	0,04	16,100
MEDIA	0,0129	13,403
VARIANZA	0,0002	6,244
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,0008	31,220
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	0.512	
R2 (%)	0.265	

Fuente: Autor

En la Gráfica 36 y de acuerdo con el coeficiente de correlación obtenido se muestra un relación baja entre las dos variables, esto puede verse afectado por el porcentaje de cascarilla de arroz, ya que influye directamente en el comportamiento de estas dos variables, se ve mucha dispersión entre los datos correlacionados, esto se determina a través de la desviación estándar, que muestra que la media está lejos de la mayoría de datos, por esta razón no se obtuvo un modelo matemático 100% confiable entre estos dos parámetros, de igual manera a continuación se muestra la ecuación (ecuación 20) obtenida.

Ecuación 20. Modelo matemático para Cr en función del índice de plasticidad

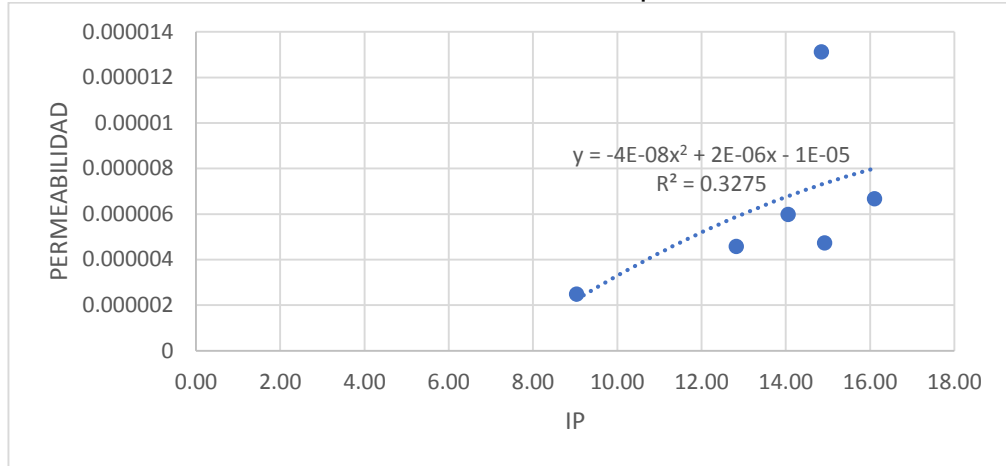
$$Cr = -0.0012(IP)^2 + 0.0309(IP) - 0.1685$$

Fuente: Autor

8.3 PERMEABILIDAD

La permeabilidad muestra la capacidad de drenaje del suelo, siendo un factor importante en el comportamiento y uso del suelo, por esta razón a continuación se presenta un modelo matemático donde se presenta la correlación entre esta y el índice de plasticidad (IP).

Gráfica 37. Permeabilidad en función de índice de plasticidad



Fuente: Autor

Tabla 12. Resumen estadístico

PARÁMETROS	PERMEABILIDAD	IP
DATOS	6	6
VALOR MÍNIMO	2,48E-06	9,03
VALOR MÁXIMO	1,31E-05	16,100
MEDIA	5,51E-06	13,403
VARIANZA	1,33E-11	6,244
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	6,67E-11	31,220
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	0.57	
R2 (%)	0.325	

Fuente: Autor

La Gráfica 37, muestra una correlación baja de 0.32 entre el índice de plasticidad y la permeabilidad, esto indica que la plasticidad no afecta directamente la permeabilidad del suelo, los datos muestra una tendencia polinómica positiva de segundo grado, la nube de puntos obtenida tiene una dispersión grande, la desviación estándar que se obtuvo está lejos de la media los datos, por lo que entre ellos se presentan grandes variaciones, esto debido a que cada una de las variables analizadas se ven afectadas por el porcentaje de cal aplicado, de igual manera se presenta la ecuación 21, como modelo matemática valido para correlacionar los datos obtenidos.

Ecuación 21. Modelo matemático para permeabilidad en función del índice de plasticidad

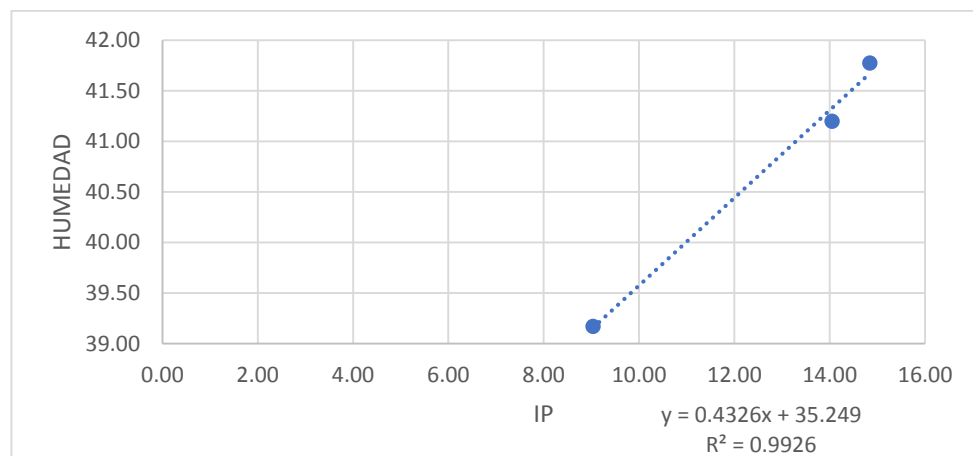
$$K = -4E-08(IP)^2 + 2E-06(IP) - 1E-05$$

Fuente: Autor

8.4 HUMEDAD

Teniendo en cuenta que la humedad natural es un factor determinante en el comportamiento del suelo se relaciona esta con el Índice de plasticidad (IP) para poder obtener un modelo que permite tener en primera instancia una ecuación de su variación respecto al tratamiento con Cal dado.

Gráfica 38. Humedad en función de índice de plasticidad



Fuente: Autor

La Gráfica 38, presenta la variación de la humedad con el índice de plasticidad, ya que la humedad se relaciona directamente con la plasticidad, se muestra un modelo matemático con un índice de correlación alto de 0.99, con tendencia lineal, al aumentar la plasticidad del suelo se aumentan la humedad del mismo y menos efectiva se hace la aplicación de silicatos de calcio.

Tabla 13. Resumen estadístico

PARÁMETROS	IP	HUMEDAD
DATOS	6	3
VALOR MÍNIMO	9,03	39,17
VALOR MÁXIMO	16,100	41,78
MEDIA	13,403	40,701
VARIANZA	6,244	1,871
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	31,220	3,743
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	1	
R2 (%)	1	

Fuente: Autor

Ecuación 22. Modelo matemático para humedad en función del IP

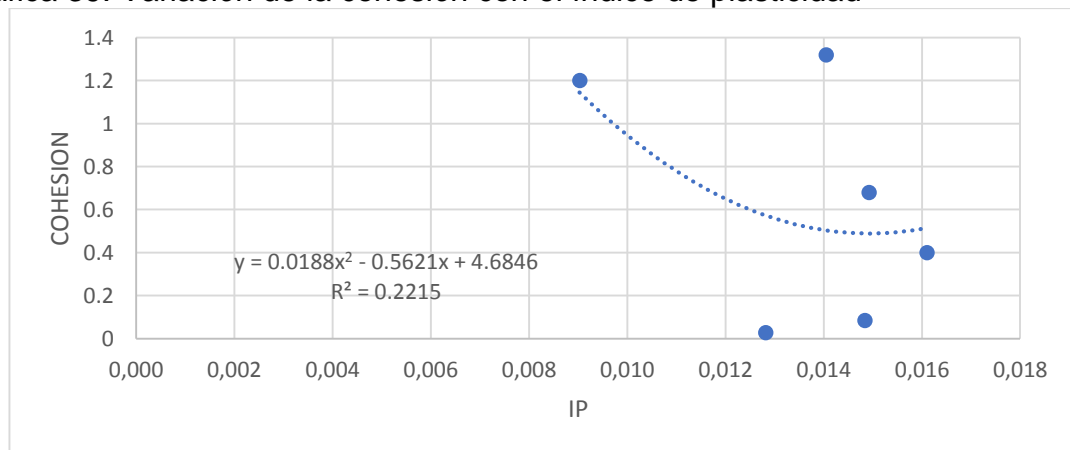
$$%w = 0.4326(IP) + 35.249$$

Fuente: Autor

8.5 COHESIÓN (Cu)

La cohesión es un parámetro importante en el comportamiento del suelo, este indica el grado de unión entre las partículas, está relacionada con la plasticidad del mismo, por esta razón a continuación se presenta un modelo matemático que permite evaluar su comportamiento en función de la plasticidad.

Gráfica 39. Variación de la cohesión con el índice de plasticidad



Fuente: Autor

Tabla 14. Resumen estadístico de la cohesión en función del índice de plasticidad

PARÁMETROS	IP	Cu
DATOS	6	6
VALOR MÍNIMO	9,03	0,027
VALOR MÁXIMO	16,1	1,32
MEDIA	13,403	0,316
VARIANZA	6,244	0,303
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	31,22	1,516
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	0,47	
R2 (%)	0,22	

Fuente: Autor

En la Gráfica 39 se muestra que la cohesión presenta gran variabilidad con respecto al índice de plasticidad, aunque son dos propiedad muy relacionadas, en este caso por la inclusión de otros materiales como lo es el silicato de calcio, el índice de correlación es bastante bajo, y el modelo matemático obtenido no tiene una confiabilidad del 100%, se requieren de más ensayos de laboratorio que permitan establecer adecuadamente estos datos y así obtener datos más precisos.

Ecuación 23. Cohesión en función del índice de plasticidad

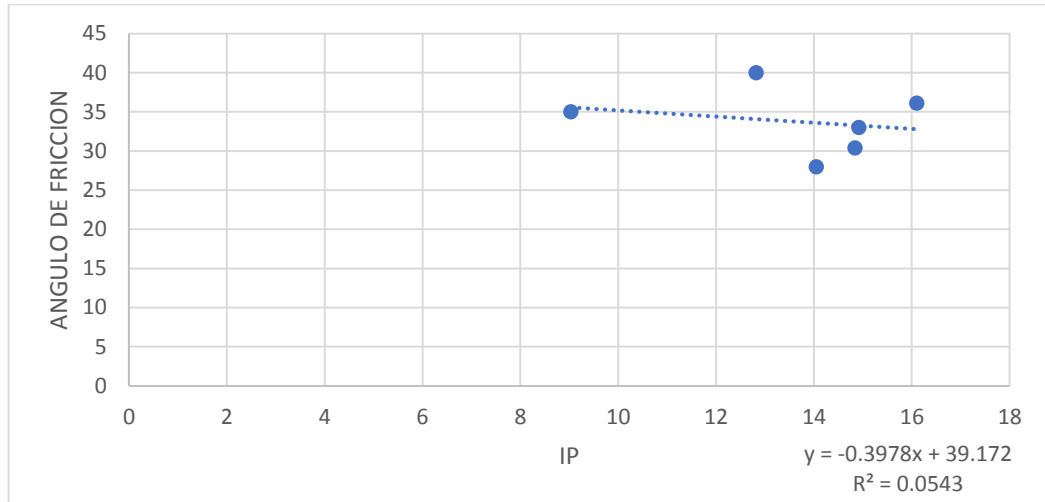
$$Cu = 0.0188(IP)^2 - 0.5621(IP) + 4.6846$$

Fuente: Autor

8.6 ANGULO DE FRICCIÓN

El ángulo de fricción es un parámetro importante para medir la resistencia del suelo, ya que la plasticidad permite conocer el grado de deformación del suelo, es importante presentar un modelo matemático que permita conocer la correlación entre estas dos variables.

Gráfica 40. Variación del ángulo de fricción con el índice de plasticidad



Fuente: Autor

Tabla 15. Resumen estadístico del ángulo de fricción en función del índice de plasticidad (IP)

PARÁMETROS	IP	ÁNGULO DE FRICCIÓN
DATOS	6	6
VALOR MÍNIMO	9,03	66,9
VALOR MÁXIMO	16,1	70,5
MEDIA	13,40	68,450
VARIANZA	6,24	3,403
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	31,22	6,807
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN		0,23
R2 (%)		0,0543

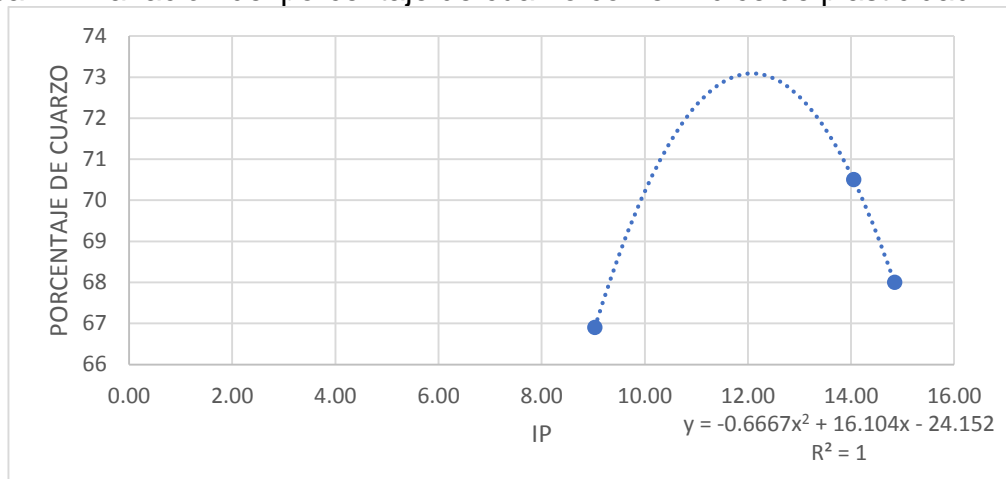
Fuente: Autor

Al analizar la variación del ángulo de fricción con el aumento o disminución de la plasticidad se encontró una correlación de baja a nula, por lo que los datos presentan una dispersión alta entre ellos por este motivo no se muestra una ecuación del modelo obtenido es ya que es poco confiable.

8.7 PORCENTAJE DE CUARZO

El cuarzo es uno de los minerales más duros por lo que se encuentra relacionado con la resistencia que presenta un suelo ante un esfuerzo, a continuación, se presenta un modelo matemático que permite correlacionarlo con el índice de plasticidad.

Gráfica 41. Variación del porcentaje de cuarzo con el índice de plasticidad



Fuente: Autor

Tabla 16. Resumen estadístico del porcentaje de cuarzo en función índice de plasticidad (IP)

PARÁMETROS	IP	%CUARZO
DATOS	6	3,0
VALOR MÍNIMO	9,03	66,9
VALOR MÁXIMO	16,1	70,5
MEDIA	13,40	68,5
VARIANZA	6,24	3,4
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	31,22	6,8
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	1	
R2 (%)	1	

Fuente: Autor

La Gráfica 41 muestra una tendencia parabólica, polinómica de segundo grado, se observa que al aumentar el índice de plasticidad hasta 12, el porcentaje de cuarzo presenten el muestra decrece, esto debido a que se analizaron porcentajes de cuarzo en estado puro, ya que el cuarzo es un mineral bastante duro y da la resistencia del suelo, se esperaría que este disminuya al aumentar el índice de plasticidad del suelo, esto sucede debido a que hay una reorganización mineralógica y una reacción química de los componentes, que hacen que el cuarzo aunque está presente en la muestra ya no se encuentra en estado puro, y por lo tanto presenta la tendencia polinómica mostrada. La ecuación 24, muestra el modelo matemático obtenido, teniendo en cuenta que se obtuvo una correlación alta entre las dos variables y por lo tanto este es confiable.

Ecuación 24. Porcentaje de cuarzo en función del índice de plasticidad

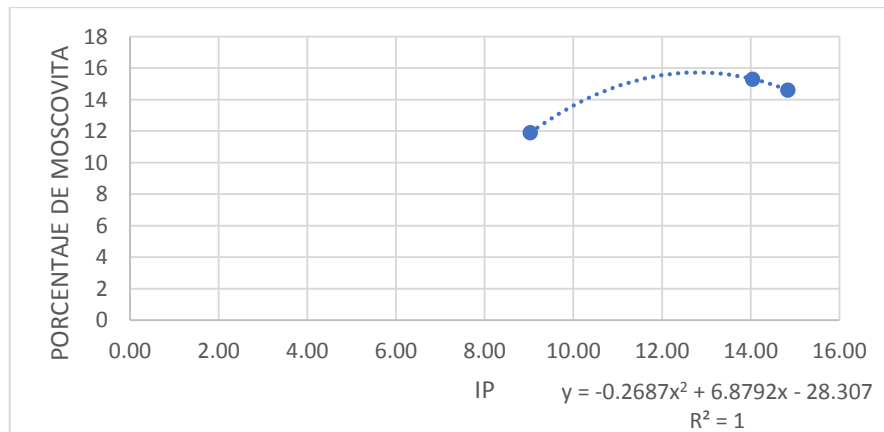
$$\% \text{CUARZO} = -0.6667(\text{IP})^2 + 16.104(\text{IP}) - 24.152$$

Fuente: Autor

8.8 PORCENTAJE DE MOSCOVITA

La moscovita es un mineral que, en presencia de agua, se transforma en illitas, dando la característica de plástica del suelo, a continuación, se presenta un modelo matemático que permite comparar el comportamiento del suelo con su índice de plasticidad y el porcentaje de moscovita encontrado en la muestra en presencia de la mezcla de cal y cascarilla de arroz aplicada.

Gráfica 42. Correlación entre índice de plasticidad y porcentaje de moscovita



Fuente: Autor

Tabla 17. Resumen estadístico del porcentaje de moscovita en función índice de plasticidad (IP)

PARÁMETROS	IP	%MOSCOVITA
DATOS	6	3
VALOR MÍNIMO	9,03	11,9
VALOR MÁXIMO	16,1	15,3
MEDIA	13,403	13,9
VARIANZA	6,244	3,2
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	31,22	6,4
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	1	
R2 (%)	1	

Fuente: Autor

La Gráfica 42 muestra una tendencia polinómica positiva, indica que al aumentar la plasticidad del suelo se aumenta el mineral conocido como moscovita, este predomina en el comportamiento del suelo y al estar en contacto con agua, da el comportamiento plástico del suelo, la ecuación 25 muestra un modelo matemático obtenido mediante regresión de tipo polinomio, con una confiabilidad alta, se prestan dispersión en los datos ya que estas variables se ven afectadas por el porcentaje de cca y cal presente en el suelo.

Ecuación 25. Índice de plasticidad en función del porcentaje de moscovita

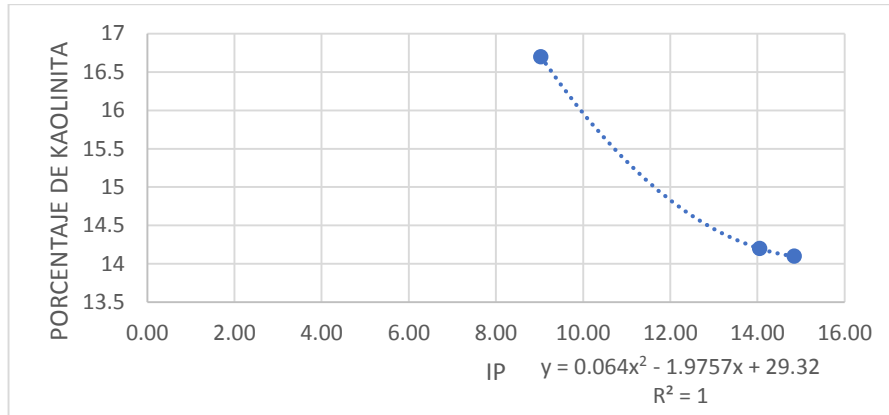
$$MO = -0.2687(IP)^2 + 6.8792(IP) - 28.307$$

Fuente: Autor

8.9 PORCENTAJE DE KAOLINITA

La kaolinita es un mineral de baja plasticidad, que se encuentra principalmente en arcillas de baja plasticidad, al aplicar cal y cascarilla de arroz este mineral se modifica y por lo tanto altera el comportamiento del suelo, a continuación, se presenta un modelo matemático que permite compara la correlación entre este y el índice de plasticidad, modificado por el tratamiento aplicado.

Gráfica 43. Correlación entre índice de plasticidad y porcentaje de kaolinita



Fuente: Autor

Tabla 18. Resumen estadístico del porcentaje de kaolinita en función índice de plasticidad (IP)

PARÁMETROS	IP	%KAOLINITA
DATOS	6	3
VALOR MÍNIMO	9,03	14,1
VALOR MÁXIMO	16,1	16,7
MEDIA	13,403	15,0
VARIANZA	6,244	2,2
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	31,22	4,3
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	1	
R2 (%)	1	

Fuente: Autor

La gráfica 43, muestra la variación del mineral kaolinita con la plasticidad del suelo, de acuerdo con el modelo matemática obtenido, se muestra una tendencia polinómica negativa, es decir que si bien al aumentar la plasticidad del suelo, la kaolinita decrece, cuando el índice de plasticidad está por encima de 13, la kaolinita no se afecta, este mineral muestra esta tendencia debido a que el suelo analizado, tiene ciertas cantidades de cal que aumentan la composición que originalmente se tenía el suelo y que pueden afectar el resultado final.

Ecuación 26. Modelo matemático para porcentaje de kaolinita en función del índice de plasticidad

$$KA = 0.064(IP)^2 - 1.9757(IP) + 29.32$$

Fuente: Autor

9. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SILICATO DE CALCIO

En la tabla 19 mostrada a continuación se pueden apreciar algunos beneficios y desventajas que se encontraron a través del desarrollo de esta investigación.

Tabla 19. Análisis comparativo de la aplicación de silicato de calcio en el suelo

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none">• Mejora de la resistencia del suelo y aumento de las propiedades mecánicas del suelo con bajas cantidades de silicato de calcio• Disminuye la permeabilidad del suelo, llenando los vacíos que posee.• Bajo costo, ya que la cascarilla de arroz es un material producido en la región oriental del país y que es desechado• Disminución de residuos generados en botaderos e incineración descontrolada	<ul style="list-style-type: none">• Se necesita gran cantidad de ceniza de arroz y cal para disminuir la plasticidad del suelo.• De la cascarilla de arroz se obtiene un bajo porcentaje de sílice sin aplicar pretratamientos y lavados.

Fuente: Autor

10. CONCLUSIONES

- El suelo sometido a estabilización por medio de cca+cal corresponde a un limo de media plasticidad, con un alto contenido de limos y arcillas, con un porcentaje de arenas finas, con permeabilidades muy bajas y con ángulo de fricción de 27°, lo que lo hace un suelo susceptible a asentamientos a largo plazo, y buen candidato a estabilización.
- El método de estabilización usado en esta investigación se recomienda para suelos con plasticidades medias-bajas, y con un contenido de arena considerable, ya que algunos autores sugieren que, aunque en suelos finos este tipo de estabilización funciona, no se recomienda en suelos con plasticidades altas, ya que requiere de grandes cantidades de material y por lo tanto aumento de costos en obra, para modificar sus propiedades, adicionalmente la cal en suelos finos agrupa el suelo generando grumos, que en presencia de agua son disueltos.
- Se elaboraron partículas de tamaño $<75 \mu\text{m}$ por medio de calcinación de cascarilla de arroz mezclada con cal viva obtenida del comercio, se corroboró el tamaño de las partículas por medio de granulometría y tamiz No. 200.
- De acuerdo con los resultados presentados en el presente trabajo de investigación se puede decir que, al inyectar silicato de calcio en un suelo con plasticidad media, se aumentan las propiedades mecánicas del mismo, logrando que se mejore la capacidad portante del suelo, el ángulo de fricción presenta un aumento de hasta un 42,8% y los tiempos de consolidación del suelo disminuyen junto con los asentamientos evaluados por medio de consolidación unidimensional.
- Al aumentar el porcentaje de silicato de calcio en el suelo como se dijo anteriormente se aumenta la resistencia, pero con un porcentaje superior a 20%, el gel (silicato de calcio) no tiene los mismos efectos positivos, aunque se modifican igualmente las propiedades, disminuye su efectividad, además de que se aumentan los costos de producción y aplicación de acuerdo con el manual de estabilización de suelos con cal de Pablo Anaya Gómez y Sotero.
- Se observan cambios mineralógicos significativos en el suelo al observar que el material generado con la mezcla de cascarilla de arroz y cal, es cemento

Portland en estado puro, con porcentajes de 5% de cca+cal, no se observan cambios significativos en el suelo, ya que el porcentaje aplicado es demasiado bajo, para reaccionar con los iones de calcio que tiene el suelo.

- De acuerdo con los resultados mostrados en la difracción de rayos x se observa que el suelo presenta cambios mineralógicos importantes como la portlantita que está asociada con productos cementantes, se observa la disminución del cuarzo en estado puro que se asocia a cambios de estado de este mineral o a la unión de este con otros minerales, que aumentan la resistencia del suelo.
- El producto generado en esta investigación tiene la ventaja de que adicional a que aumenta las propiedades de resistencia del suelo, disminuye la generación de residuos sólidos ya que buena parte de la cascarilla de arroz termina en botaderos a cielo abierto y presenta quema indiscriminada, de acuerdo con la investigación de Aguilar Sierra.
- A pesar de que la cascarilla de arroz tiene alto contenido de sílice, al obtener este material a partir de calcinación solo se recupera el 25% del total de la cascarilla de arroz y aunque es un avance importante en la reducción de residuos sólidos producto de la industria Molinera que genera 82 ton/día, de acuerdo con Aguilar Sierra; se recomienda realizar tratamientos previos y de limpieza de la cascarilla de arroz para aumentar los porcentajes de ceniza obtenidos o directamente tratar la ceniza obtenida luego de la quema producida en el proceso de obtención del arroz. (Aguilar Sierra, 2009).
- Uno de los cambios mineralógicos más significativos se demuestra con la disminución mineralogía de la Moscovita asociada a materiales con plasticidades medias a altas, primando el comportamiento de este sobre la kaolinita que debido a la inyección de cales se ve aumentada, esto corrobora el hecho de que al realizar ensayos de límites de Atterberg y evaluar el índice de plasticidad, este haya disminuido notablemente al incrementar los porcentajes de cca+cal aplicado en el suelo de estudio.
- Para porcentajes por encima del 15% de cca+cal, aunque el suelo presenta mejoras en comparación con el suelo en estado natural, si se compara con los porcentajes por debajo de 15%, las mejoras son menores, lo cual indica una desventaja, ya que, no se logra un aumento en las propiedades mecánicas, exceptuando la plasticidad, además debido a que son porcentajes elevados económicamente también se vuelve inviable aplicar cca+cal.

- La propiedad que mejor describe el comportamiento del suelo ante la presencia de cascarilla de arroz y cal es el índice de plasticidad, propiedades como cohesión y ángulo de fricción presentan mayores variaciones ya que se hace más difícil mantener unas condiciones óptimas en el ensayo de laboratorio, además estas propiedades varían con la cantidad de humedad del suelo y la cantidad de agua que se aplique.

11. RECOMENDACIONES

- Debido a las limitaciones que se tenían en este trabajo se sugiere que para próximas investigaciones se realicen ensayos de microscopia de barrido y espectrometría de fluorescencia, para verificar y comprobar los cambios mineralógicos en el suelo y la acomodación de cristales como el cuarzo, ya que, por medio de la difracción de rayos x realizada solo se comprueba la presencia o disminución de un mineral.
- Se recomienda la adquisición y mejoramiento de equipos de laboratorio para realización de investigaciones, que permitan el aumento de la precisión en la toma de datos, ya que, los equipos pueden ser golpeados o movidos y esto varia la toma de datos y aumenta el porcentaje de error en las mediciones, es especialmente importante ya que para este tipo de investigaciones es necesario medir variaciones y comparar datos, y estas variaciones en algunas ocasiones no permiten que este procedimiento se realice adecuadamente.
- Este tipo de tratamientos de estabilización se recomiendan junto con otros como lo son compactación del suelo, para complementar a estabilización y obtener mejores resultados.
- Es importante ampliar los espectros y datos analizados, ya que, si bien los datos suministrados en esta tesis son válidos, al ampliar la cantidad de datos y puntos en cada una de las gráficas, especialmente los mineralógicos, se logran unas correlaciones mucho más precisas.
- Se sugiere la realización de ensayos triaxiales, ya que permiten ampliar el espectro y corroborar el comportamiento del suelo en distintas condiciones a las evaluadas en esta tesis, además brindan una información mucho más confiable sobre los parámetros de resistencia del suelo y los cambios que se producen al aplicar silicatos de calcio.
- Para evaluar las propiedades mineralógicas del suelo con mayor claridad se podría realizar secciones delgadas para evidenciar cambios de suelos pos-mejoramiento, además de ensayos de microscopia y transformada de Fourier para comprobar las formaciones de nuevos compuestos y cambios en la formación de cristales presentes en la muestra.

- Se recomienda poder comparar este mejoramiento con otros como inyecciones de consolidación, vibro compactación, mejoramiento con cenizas etc. para poder establecer su eficiencia,

12. BIBLIOGRAFÍA E INFOGRAFÍA

- Aguilar Sierra, J. (2009). ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DE LA CASCARILLA DE ARROZ EN COLOMBIA, 94. Retrieved from <http://www.albayan.ae>
- Anaya Gómez, P., Sotelo Cornejo, V., & Morales y Monroy, R. (2015). *Manual Práctico Para La Estabilización*. Distrito Federal México. Retrieved from http://anfagal.org/media/CONSTRUCCION/MANUALES_DE_ESTABILIZACION_Y_ASFALTOS_-_PABLO_ANAYA/SCT_Manual_Estabilizacion_de_Suelos_-May_2015.pdf
- Avellaneda Moreno, E. A., & Galindo Torres, J. C. (2016). *ANÁLISIS TÉCNICO DEL USO DE SILICATO DE SODIO PARA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS*. UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.
- Bahmani, S. H., Huat, B. B. K., Asadi, A., & Farzadnia, N. (2014). Stabilization of residual soil using SiO₂nanoparticles and cement. *Construction and Building Materials*, 64, 350–359. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.086>
- Behak, L., & Peres Núñez, W. (2008). Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cáscara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación. *Revista Ingeniería de Construcción*, 23(1), 34–41. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732008000100004>
- BERNAL GÓMEZ, C. A. (2018). *ANÁLISIS TÉCNICO DE SUELOS LIMO ARENOSOS ESTABILIZADOS CON SILICATO DE SODIO EXPUESTOS A MEDIOAMBIENTES AGRESIVOS (AGUA SALINA)*. Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Bogotá.
- Besoain, E. (1985). *MINERALOGIA DE ARCILLAS DE SUELOS*. (J. Escoto, Ed.). San Jose, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Retrieved from <https://books.google.com.ar/books?id=pfL7oUpz11QC>
- Brabston, W. N., & Hammitt, G. M. (1997). Methods of Stabilization. *Soil for Stabilization and Airfields Roads*, 5(113832), 1–81. Retrieved from

<http://www.erosion.com.co/obras-de-tierra/66-estabilizacion-de-suelos.html>

Changizi, F., & Haddad, A. (2015). Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO₂ and recycled polyester fiber. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(4), 367–378. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.03.013>

Chrysochoou, M., & Asce, A. M. (2014). Investigation of the Mineral Dissolution Rate and Strength Development in Stabilized Soils Using Quantitative X-Ray Diffraction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), 288–295. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000814](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000814).

Cohesión y Fricción Interna: Propiedades del Suelo. | APUNTES INGENIERÍA CIVIL. (n.d.). Retrieved May 11, 2017, from <http://apuntesingenierocivil.blogspot.com.co/2011/02/cohesion-y-friccion-interna-propiedades.html>

Conlee, C. T., Gallagher, P. M., Boulanger, R. W., & Kamai, R. (2012). Centrifuge Modeling for Liquefaction Mitigation Using Colloidal Silica Stabilizer, 138(November), 1334–1345. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000703](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000703).

Correa, F. (2006). Estabilización de Suelos para Pavimentos. Retrieved from <https://lultimaresistencia.weebly.com/uploads/6/8/2/7/6827657/35580425-estabilizacion-de-suelos.pdf>

Duque, G., & Escobar, C. (2016). Relaciones Gravimétricas Y Volumétricas Del Suelo. *Gromecánica*, 29–47. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/53252/11/relacionesgravimetricasyvolumetricasdelsuelo.pdf>

Ghasabkolaei, N., Janalizadeh Choobbasti, A., Roshan, N., & Ghasemi, S. E. (2017). Geotechnical properties of the soils modified with nanomaterials: A comprehensive review. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(3), 639–650. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.01.010>

González de Celis, G., De Barcia, E., Sulbaran, Y., & Ucar Navarro, R. (2014).

Determinación del parámetro de resistencia, ángulo de fricción interna, y su relación con los parámetros densidad relativa (D_r) y relación de vacíos (e) en suelos granulares. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 35(3), 135–146.

Ibañez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. (2011). Estructura general de los silicatos.

Invias. (2012). Sección 100 - suelos. *Normas de Ensayo de Materiales Para Carreteras*, 798. Retrieved from <http://labsueloscivil.upbbga.edu.co/sites/default/files/SECCI%00N%20INV%20E-13.pdf>

Juarez Badillo, E., & Rodríguez Rico, A. (2005). *MECANICA DE SUELOS*. (NORIEGA, Ed.) (Reprint). Distrito Federal México: LIMUSA. Retrieved from <https://books.google.com.ar/books?id=3OPOaDHQC8wC>

Latifi, N., Meehan, C. L., Majid, M. Z. A., & Horpibulsuk, S. (2016). Strengthening montmorillonitic and kaolinitic clays using a calcium-based non-traditional additive: A micro-level study. *Applied Clay Science*, 132–133, 182–193. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.06.004>

Mashifana, T. P., Okonta, F. N., & Ntuli, F. (2018). Geotechnical Properties and Microstructure of Lime-Fly Ash-Phosphogypsum-Stabilized Soil. *Advances in Civil Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3640868>

POLITECNICA, U. D. C. (n.d.). Estructura y propiedades básicas de los suelos . Identificación y clasificación, 1–22.

Ramirez, O. (2015). *Apuntes de geotecnia basica*. (UPTC, Ed.) (2nd ed.). TUNJA: 2015.

Retuerto, J., & Iccp, M. (n.d.). Inyecciones de gel de silicato de sodio. Retrieved from http://www.site.biz/descargas/Conferencias_pdf/Inyecciones_Impregnacion.pdf

Sadrjamali, M., Athar, S. M., & Negahdar, A. (2015). Modifying Soil Shear Strength Parameters Using Additives in Laboratory Condition, 10(1), 120–130.

Sanchez, J. C. (1998). ELASTICIDAD, 1–6. <https://doi.org/10.1021/nl034968f>
UNE-EN ISO 14689-1. (2005). Norma española, 0–2.

Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones.
Disponible en:
[https://www.researchgate.net/publication/40224138_Arcillas_ceramicas_una_revisi
on_de_sus_distintos_tipos_significados_y_aplicaciones](https://www.researchgate.net/publication/40224138_Arcillas_ceramicas_una_revisi_on_de_sus_distintos_tipos_significados_y_aplicaciones) [acceso Jun 21 2018].

Silicato de sodio neutro ficha técnica, disponible en: [http://www.conquimica.com/wp-
content/uploads/2015/06/ft_silicato_de_sodio_neutro.pdf](http://www.conquimica.com/wp-content/uploads/2015/06/ft_silicato_de_sodio_neutro.pdf) [acceso Jun 22 2018]

13.ANEXOS

Anexo1. Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos, empleando un picnómetro (INV. E 128-13)

(DISPONIBLE EN DIGITAL)

Anexo 2. Determinación del límite líquido de los suelos (INV. E 125-13, LIMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS (INV. E 126-13)

(DISPONIBLE EN DIGITAL)

Anexo 3. Diagrama de fases
(DISPONIBLE EN DIGITAL)

Anexo 4. Consolidación unidimensional de suelos (INV. E 151-13)
(DISPONIBLE EN DIGITAL)

Anexo 5. Compresión inconfiada en muestras de suelos (INV. E 152-13)
(DISPONIBLE EN DIGITAL)

Anexo 6. Ensayo de corte directo en condición no consolidada no drenada (UU)
INV. E 154-13:
(DISPONIBLE EN DIGITAL)

Anexo 7. Cantidad de material fino que pasa el tamiz de 75 μm (N° 200) en los agregados (INV. E 214-07)

(DISPONIBLE EN DIGITAL)

Anexo 8. Ensayo de hidrómetro
(DISPONIBLE EN DIGITAL)

Anexo 9. Difracción de rayos X
(DISPONIBLE EN DIGITAL)

Anexo 10. Granulometría cascarilla arroz y cal
(DISPONIBLE EN DIGITAL)

Anexo 11. Evidencias fotografías
(DISPONIBLE EN DIGITAL)