



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE UN CEMENTO  
HÍBRIDO EN LA ESTABILIDAD DE UN SUELO  
DE LA REGION DE URABÁ COMO  
ALTERNATIVA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE  
OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA**

Autor

Isabel Cristina López Genes

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela ambiental

Turbo, Colombia

2019



Estudio de la influencia de un cemento híbrido en la estabilidad de un suelo de la región de Urabá como alternativa para la construcción de obras de protección costera

Isabel Cristina López Genes

Informe de trabajo de grado como requisito para optar al título de:  
Ingeniera Oceanográfica

Asesores

Rosalyn Hoyos Gutiérrez

Ecóloga de zonas costeras

Edwin Fabián García Aristizábal

Ingeniero Civil, PhD

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela ambiental.

Turbo, Colombia

2019

## CONTENIDO

0. INTRODUCCIÓN.....	9
1 OBJETIVOS.....	11
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	11
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
2 MARCO TEÓRICO .....	11
2.1 PLAYA.....	11
2.2 OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA.....	12
2.3 GEOPOLÍMEROS COMO ESTABILIZADORES ALTERNATIVOS DE SUELOS EN LA CONSTRUCCIÓN .....	12
3 METODOLOGÍA.....	13
3.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE SUELO POR VÍA SECA PARA ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO Y DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES FÍSICAS (INV E- 106-13) <sup>17</sup> .....	13
3.2 DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS DE LOS SUELOS Y DEL LLENANTE MINERAL, EMPLEANDO UN PICNÓMETRO CON AGUA (INV E-128-13) <sup>16</sup> .....	14
3.3 DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (INV E-123-13) <sup>18</sup> .....	17
3.3.1 Corrección por temperatura.....	18
3.3.2 Corrección por defloculante y punto cero. ....	18
3.3.3 Corrección por menisco.....	19
3.4 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS (INV E-125-13) <sup>19</sup> 23	
3.5 LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS (INV E-126- 13) <sup>20</sup> 25	
3.6 RELACIONES HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN – PROCTOR MODIFICADO) (INV E – 142 – 13) <sup>21</sup> .....	26
3.7 PRUEBA DE EROSIÓN .....	28
4 RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	33
4.1 RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA.....	33

4.2	RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE LAS PARTÍCULAS.....	35
4.3	RESULTADOS DEL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD.....	37
4.4	RESULTADOS DE RELACIONES HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN) (INV E – 142 – 13).	39
4.5	RESULTADOS DE PRUEBA DE EROSIÓN .....	40
4.5.1	Cálculo de densidad. ....	40
4.5.2	Registro fotográfico de los bloques durante la prueba erosión. ....	41
4.5.3	Resultados de absorción .....	51
4.5.4	Resultados de tracción indirecta .....	52
5	CONCLUSIONES .....	53
6	RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS .....	54
7	AGRADECIMIENTOS .....	54
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
9	ANEXOS.....	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. A) Delimitación del área para la toma de muestra. B) Retiro de capa superior del suelo.....	13
Figura 2. A) Secado. B) Pesaje de la muestra .....	14
Figura 3. A) Calibración del picnómetro. B) Toma de temperatura. C) Llenado del picnómetro. D) Vertimiento de lechada en el beaker. E) Secado de lechada.....	16
Figura 4. A) Cilindro de sedimentación. B) Hidrómetro .....	17
Figura 5. Reactivos para realizar la solución de hexametáfosfato de sodio .....	19
Figura 6. Dispersión de muestra. A) Cantidad de muestra utilizada. B) Mezcla de muestra con 125 ml de solución. C) Saturación de muestra por 16 horas .....	19
Figura 7. Preparación de muestra para iniciar lecturas con el hidrómetro. A) Transferencia de la lechada al cilindro de sedimentación. B) Adición de agua destilada hasta marca de 1000 ml. C) Agitación del cilindro. D) Muestra lista para iniciar lecturas con hidrómetro .....	20
Figura 8. Preparación de muestra para determinación de límite líquido. A) Toma de muestra utilizada. B) Cazuela de Casagrande y ranurador. C) Muestra cubierta para evitar pérdidas de humedad .....	23
Figura 9. Procedimiento de límite líquido. A) Disposición de muestra sobre cazuela de Casagrande. B) División con ranurador. C) Ranura cerrada .....	24
Figura 10. Procedimiento de límite plástico. A) Método manual de enrollamiento. B) Desmoronamiento. C) Secado de submuestras .....	25
Figura 11. A) Desintegración de las agregaciones. B) Compactación .....	26
Figura 12. A) Enrasado. B) Masa del molde con base y suelo compactado .....	27
Figura 13. A) Extracción de la probeta. B) División. C) Probeta dividida.....	29
Figura 14. Bloques .....	30
Figura 15. Montaje prueba de erosión.....	30
Figura 16. Caras de cada bloque. A) Cara superior. B) Cara intermedia. C) Cara inferior .....	31
Figura 17. Bloques sumergidos en agua .....	32
Figura 18. Montaje en el equipo de compresión.....	32
Figura 19. Curva granulométrica del suelo.....	36
Figura 20. Curva de fluidez del suelo .....	37
Figura 21. Carta de plasticidad. Fuente: Das, 2001 .....	38
Figura 22. Curva de compactación y saturación del suelo .....	40
Figura 23. Bloque deshecho.....	41
Figura 24. Desgaste del bloque 0-0-1. A) Inicio de prueba. B) 5 minutos después del inicio. C) 36 minutos después del inicio.....	42
Figura 25. Desgaste del bloque 0-10-1. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio .....	42

Figura 26. Desgaste del bloque 0-10-2. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio .....	43
Figura 27. Reacción en el bloque 10-0-1,3-1 .....	43
Figura 28. Desgaste del bloque 10-0-1,3-1. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio .....	44
Figura 29. Reacción en el bloque 10-0-1,3-2 .....	44
Figura 30. Desgaste del bloque 10-0-1,3-2. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio .....	44
Figura 31. Desgaste del bloque 10-0-1,8-1. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio .....	45
Figura 32. Desgaste del bloque 10-0-1,8-2. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio .....	45
Figura 33. Desgaste del bloque 7-3-1,3-1. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio .....	46
Figura 34. Desgaste del bloque 7-3-1,3-2. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio .....	46
Figura 35. Desgaste del bloque 7-3-1,8-1. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio .....	47
Figura 36. Desgaste del bloque 7-3-1,8-2. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio .....	47
Figura 37. Desgaste del bloque 4-6-1,3-1. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio .....	48
Figura 38. Desgaste del bloque 4-6-1,3-2. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio .....	48
Figura 39. Desgaste del bloque 4-6-1,8-1. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio .....	49
Figura 40. Desgaste del bloque 4-6-1,8-2. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio .....	49
Figura 41. Imagen SEM y mapa de composición del suelo estabilizado con cemento híbrido de composición 4% GP - 6% OCP con la relación Si/Al = 1,3.....	57
Figura 42. Morfología mediante SEM y mapa de composición de la muestra de suelo estabilizado con geopolímero 10% GP - 0% OCP con la relación Si/Al = 1,3 .....	58
Figura 43. Imagen SEM y mapa de composición del suelo estabilizado con cemento híbrido de composición 4% GP - 6% OCP con la relación Si/Al = 1,8.....	59
Figura 44. Resultados DRX del suelo sin estabilizar (blanco) .....	60
Figura 45. DRX del suelo estabilizado con cemento portland únicamente, suelo 0% GP - 10% OCP .....	61
Figura 46. Resultados DRX del suelo estabilizado con geopolímero únicamente, suelo 10% GP - 0% OCP con la relación Si/Al = 1,3.....	61
Figura 47. Difractograma del suelo estabilizado con cemento híbrido 4% GP - 6% OCP con la relación Si/Al = 1,3.....	62

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Densidad de agua y coeficiente de corrección por temperatura "K". Fuente: INV E 128-13.....	15
Tabla 2. Valores de corrección temperatura en cada lectura del hidrómetro. Fuente: INV E 123-13.....	18
Tabla 3. Valores del factor de corrección "a" para diferentes gravedades específicas de las partículas de suelos. Fuente: INV E 123-13 .....	21
Tabla 4. Valores de "K" para el cálculo del diámetro de las partículas. Fuente: INV E 123-13 .....	22
Tabla 5. Valores de profundidad efectiva "L" para el hidrómetro 152H. Fuente: INV E 123-13 .....	22
Tabla 6. Cantidad de agua agregada a cada submuestra .....	26
Tabla 7. Cantidades de los componentes utilizados en cada una de las mezclas .....	29
Tabla 8. Índice de erodabilidad de la prueba de erosión. Fuente: NZS 4298.....	31
Tabla 9. Nomenclatura de los bloques .....	32
Tabla 10. Masa promedio del picnómetro vacío .....	33
Tabla 11. Volumen calibrado de cada picnómetro "V <sub>p</sub> ". * de la Tabla 1. ** de la Ecuación 1 .....	34
Tabla 12. Resultados ensayo de gravedad específica. * de la Tabla 1. ** de las ecuaciones 2,3 y 4 respectivamente. ....	34
Tabla 13. Especificaciones para el ensayo de hidrometría del suelo. * valor dado por la Tabla 3 .....	35
Tabla 14. Resultados ensayo de hidrometría. * de la Tabla 5.....	35
Tabla 15. Resultados de límite líquido del suelo .....	37
Tabla 16. Resultados del límite plástico del suelo.....	38
Tabla 17. Resultados puntos de compactación. * de la Ecuación 11. ** de la Ecuación 12. *** de la Ecuación 13.....	39
Tabla 18. Humedad de los puntos de compactación.....	39
Tabla 19. Cálculo de densidad de los bloques .....	41
Tabla 20. Resultados prueba de erosión.....	50
Tabla 21. Porcentaje de agua absorbida por cada bloque .....	51
Tabla 22. Valores de resistencia máxima de los bloques.....	52

# ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE UN CEMENTO HÍBRIDO EN LA ESTABILIDAD DE UN SUELO DE LA REGION DE URABÁ COMO ALTERNATIVA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA

---

## Resumen

La evolución de las zonas costeras depende en gran medida de la carga sedimentaria que aportan los ríos incidentes desde el continente. Para el caso del Caribe Colombiano se tiene un aporte de 168 Megatoneladas/año de sedimentos en suspensión<sup>1</sup>, a pesar del gran aporte sedimentario que tienen estas costas, se ha visto un retroceso de las playas locales en parte por la disminución de sedimentos formadores de playa<sup>2</sup>. En las últimas cuatro décadas han ocurrido retrocesos de línea de costa en Antioquia que representan más de 4.5 km<sup>2</sup> de terreno perdido, siendo los puntos más críticos el sector de Punta Rey en Arboletes y el sector delta del río Turbo-Punta las Vacas en Turbo<sup>2</sup>. Para “minimizar” el proceso de erosión y así evitar que el mar siga haciendo retroceder playas y acantilados, se ha implementado la construcción de obras de protección costera que se pueden realizar de manera artesanal con materiales como la madera o de manera estructural con materiales como roca, hormigón, cemento, etc<sup>3</sup>. Una de las características que se deben tener en cuenta al momento de diseñar una obra es el material con el que se realiza, debido a que este garantiza una completa funcionalidad de la construcción. De acuerdo con lo anterior, este trabajo pretende plantear una posible solución para el problema de erosión costera, por medio del estudio de un suelo de la región de Urabá mejorado con un estabilizador compuesto por un cemento híbrido que tiene como precursor desecho de fibra de lana mineral combinado con cemento portland, realizando diferentes combinaciones de sus componentes para conocer si este puede ser una alternativa para la construcción de obras de protección costera. Esto se determinó por medio de ensayos de laboratorio que permitieron caracterizar el material físicamente y medir su respuesta a las fuerzas erosivas. Se determinó que con varias combinaciones de cemento híbrido (geopolímero y cemento portland) se obtuvieron suelos resistentes a la erosión, esto trae beneficios económicos ya que se reducen los costos de compra y transporte de materiales y beneficios medio ambientales porque se reduce la producción de gases de efecto invernadero por la fabricación de cemento portland para su uso como estabilizador de suelos. Además, se comprobó el incremento de la resistencia del suelo a través del ensayo de tracción indirecta.

## 0. INTRODUCCIÓN

La erosión costera es un fenómeno natural que se produce cuando un sistema litoral pierde sedimento. En una playa, la erosión empieza a actuar a partir de la zona intermareal. Como resultado, el sedimento removido en la zona afectada se acumula en otras zonas<sup>4</sup>. Este fenómeno es generado principalmente por dos factores: factores naturales y factores antrópicos. Entre los factores naturales se encuentran los que actúan de manera inmediata como son los huracanes y el oleaje. Sin embargo, hay otros factores que generan una respuesta a largo plazo como son el deshielo y la tectónica de placas<sup>5</sup>. Se calcula que en el pasado la velocidad en la que ocurría la erosión era mucho más lenta en comparación con la velocidad en la actualidad, esto es debido a que las intervenciones antropogénicas han acelerado este proceso haciendo que el suelo se erosione con mayor facilidad<sup>1</sup>, entre estas intervenciones se encuentran las actividades de desarrollo industrial como la extracción de líquidos del subsuelo que genera subsidencia, la elevación del nivel del mar debido al calentamiento global (escala global), el represamiento de ríos (escala regional), construcción de obras marítimas (escala local), entre otros<sup>5,6</sup>. Estos factores antrópicos se evidencian cada vez más porque alrededor del 53% de la población mundial vive a menos de 200 kilómetros de la orilla de una costa debido a las oportunidades de sostenimiento que esta ofrece<sup>7</sup>, esta cifra aumenta exponencialmente<sup>6</sup>, produciendo pérdidas de vidas humanas e impactos sociales, económicos y políticos<sup>5</sup>.

Para saber si una playa está siendo afectada por el fenómeno de erosión o por el contrario, presenta ganancia de sedimento es necesario conocer el concepto de balance sedimentario, que se define como la suma de entrada y salida de material en un sistema litoral, cuando el resultado de esta suma es negativa se da erosión y por tanto la playa se hace más delgada, cuando el resultado es positivo se presenta depósito y en este caso la playa se hace más ancha y cuando el resultado es cero, se tiene una playa en equilibrio, es decir, no hay ganancia ni pérdida de material<sup>8,9</sup>.

La evolución de las zonas costeras depende en gran medida de la carga sedimentaria que aportan los ríos incidentes desde el continente. Para el caso del Caribe Colombiano se tiene un aporte de 168 Megatoneladas/año de sedimentos en suspensión<sup>1</sup>. A pesar del gran aporte sedimentario que tienen estas costas, se ha visto un retroceso de las playas locales en parte por la disminución de sedimentos formadores de playa<sup>2</sup>. Antioquia cuenta con 145 km de línea de costa que representa el margen oriental del golfo de Urabá y se encuentra sujeto a erosión generalizada, la cual ha impactado la infraestructura física de los asentamientos naturales. En las últimas cuatro décadas han ocurrido retrocesos de línea de costa que representan más de 4.5 km<sup>2</sup> de terreno perdido, siendo los puntos

más críticos el sector de Punta Rey en Arboletes y el sector delta del río Turbo-Punta las Vacas en Turbo<sup>2</sup>.

Las poblaciones que habitan cerca de la línea de costa alteran con su presencia las condiciones de equilibrio y en el Caribe Colombiano existen decenas de asentamientos de este tipo<sup>10</sup> aumentando la problemática. La franja costera que va desde Arboletes hasta Turbo en la subregión de Urabá hace parte del denominado “Cinturón del Sinú” el cual está caracterizado por la presencia de estructuras diapíricas<sup>11</sup>, esto produce que haya muchas fallas locales y alta densidad de fracturas que predisponen la roca a los procesos de erosión<sup>10</sup>. A lo largo de los acantilados que se encuentran entre Arboletes y la desembocadura del río Mulatos afloran principalmente arcillolitas y lodolitas, plegadas y fracturadas con eventual presencia de areniscas y conglomerados<sup>2</sup>. Las terrazas y colinas del terciario están compuestas principalmente por arcillolitas en su base y areniscas en su tope con poca consolidación, este tipo de material presenta poca resistencia a la acción del oleaje, generando que la base de los acantilados sea más propensa a desplomarse, dando como resultado un retroceso acelerado de la zona<sup>10</sup>.

Para “minimizar” el proceso de erosión y así evitar que el mar siga haciendo retroceder playas y acantilados, se ha implementado la construcción de obras de protección costera. Comúnmente estas obras pueden ser construidas de manera artesanal con materiales como la madera o de manera estructural con materiales como roca, hormigón, cemento o elementos artificiales como los tetrápodos, cubos, etc.<sup>3</sup>, sin embargo, la falta de estudios no ha permitido que la situación mejore<sup>2</sup>. En este contexto, una de las características que se deben tener en cuenta al momento de diseñar una obra es el material con el que se realiza, debido a que este garantiza una completa funcionalidad de la construcción; Correa y Vernet (2004)<sup>2</sup> indican que gran parte de la culpa del fracaso de los espolones que se construyeron en Urabá estuvo en la repetición de errores en la construcción, entre los que se incluye el uso de materiales inadecuados porque no cumplen el mínimo de resistencia.

De acuerdo con lo anterior, este trabajo pretende plantear una posible solución para el problema de erosión costera, por medio del estudio de un suelo de la región de Urabá mejorado con un estabilizador compuesto por un cemento híbrido (geopolímero y cemento portland) para conocer si este puede ser una alternativa para la construcción de obras de protección costera. Esto se determinó por medio de ensayos de laboratorio que permitieron caracterizar el material físicamente y medir su respuesta a las fuerzas erosivas.

## **1 OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Conocer la influencia de un estabilizador que tiene como precursor desecho de fibra de lana mineral combinado con cemento portland en un suelo de la región de Urabá para determinar si puede ser una alternativa en la construcción de obras de protección costera.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar el tamaño de grano, los límites de atterberg y la humedad óptima del suelo natural.
- Hallar la tasa de erosión de bloques fabricados con el material estabilizado por medio de un ensayo en laboratorio.
- Determinar si la influencia del estabilizador permite su uso como alternativa en la construcción de obras de protección costera.

## **2 MARCO TEÓRICO**

A continuación, se realiza una descripción de los conceptos referentes a lo que es una playa, alternativas de protección costera, materiales que comúnmente se utilizan para la construcción de estas y finalmente los geopolímeros como estabilizadores alternativos de suelos en la construcción.

### **2.1 PLAYA**

Una playa es una acumulación de sedimentos no cohesivos, tamaño arena, que se extiende de manera paralela a la línea de costa<sup>10</sup>. Una playa no es un elemento aislado, esta hace parte de una unidad mayor denominada sistema litoral, que está limitado hacia el mar hasta la profundidad de cierre máxima, la cual es una profundidad donde los sedimentos son puestos en suspensión debido a los factores climáticos, especialmente el oleaje<sup>4</sup>. Las playas son afectadas por la dinámica litoral, esta dinámica abarca una serie de factores climáticos que modifican a las playas y hacen que estas cambien. Cuando las olas inciden oblicuamente sobre la costa mueven el material y lo transportan por medio de dos corrientes, una paralela y otra perpendicular a la línea de costa<sup>12</sup>.

## **2.2 OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA**

Para tratar de mitigar los problemas de erosión o proteger las costas de este fenómeno se han empleado muchas técnicas tanto en Colombia como en el mundo. Las obras de protección costera que se disponen de manera perpendicular a la línea de costa tienen como objetivo principal retener los sedimentos llevados por la corriente de deriva litoral. Las obras de protección se dividen en dos grupos: obras de protección blandas y obras de protección duras. Las obras de protección blandas son obras no estructurales entre las cuales se encuentran la regeneración de playas, el perfilamiento de acantilados y otros. Por otro lado, en el grupo de las obras de protección duras están los rompeolas que son estructuras ubicadas en forma paralela a la línea de costa con una distancia determinada, normalmente se construyen con bloques sueltos o estructuras prefabricadas como tetrápodos y con filas de tablestacado y concreto. Otro tipo son los gaviones, geotextiles y bolsacretos que se construyen comúnmente con una combinación de arena y cemento. Las baterías de espolones suelen ser usadas de pentápodos, bolsacretos o bloques rocosos. Los revestimientos suelen ser construidos con hormigón o bloques de piedra y finalmente los muros de contención que se construyen de concreto<sup>10</sup>.

## **2.3 GEOPOLÍMEROS COMO ESTABILIZADORES ALTERNATIVOS DE SUELOS EN LA CONSTRUCCIÓN**

Como se mencionó en el apartado anterior, en la mayoría de los materiales que se utilizan para la construcción de obras de protección costera duras se encuentra el cemento portland, el acero y la madera, estos constituyen los materiales de mayor demanda a nivel mundial para la construcción de obras civiles. Los procesos de fabricación de estos materiales son nocivos para el medio ambiente debido a los gases tóxicos que se emiten y contribuyen a la contaminación del aire<sup>13</sup>. En el proceso de fabricación del cemento portland, por cada kilogramo (kg) que se obtiene de este se emite otro kg de CO<sub>2</sub> a la atmósfera<sup>14</sup>, esto ha generado muchas preocupaciones ecológicas que han conllevado a que los científicos vean el suelo como una alternativa para la construcción y por otro lado se han generado controversias y se ha visto muy limitado su uso por sus propiedades físico-mecánicas, es por esto, que en los últimos años se han agregado al suelo estabilizadores para mejorar estas condiciones<sup>13</sup> entre los que se encuentran los geopolímeros que son aluminosilicatos que consisten en unidades tetraédricas de aluminio y silicio, condensadas a temperatura ambiente, estos se encuentran actualmente considerados como los cementos del futuro debido a la gran reducción de los impactos ambientales generados en su fabricación y la similitud que presenta con las características del cemento portland<sup>14,15</sup>.

### 3 METODOLOGÍA

Para determinar si el geopolímero mejora las características de resistencia del suelo natural, primero se tomó una muestra de suelo del sector de Punta de Piedra del Distrito de Turbo en la región de Urabá. Para la toma de la muestra se delimitó un área de 1 metro x 1 metro como se muestra en la Figura 1, luego se retiró la capa superior de suelo que contenía materia orgánica (aproximadamente 50 cm de profundidad), posteriormente se tomó el material y se trasladó a los laboratorios de la Universidad de Antioquia Seccional Urabá y Sede Medellín para ser procesada y analizada por medio de ensayos de laboratorio que corresponden a la sección 100 de las normas del Instituto Nacional de Vías “INVIAS” 2012<sup>16</sup>, estas fueron tomadas originalmente de las normas American Society for Testing and Materials “ASTM”. Se realizaron los ensayos de laboratorio para determinar las características de gravedad específica, análisis granulométrico, límites de Atterberg y relaciones de humedad – peso unitario seco de la muestra de suelo natural. Finalmente, se agregó el estabilizador en diferentes concentraciones a la muestra de suelo natural y se construyeron bloques para someterlos a una prueba de erosión (medida de desgaste del material). Todos los ensayos de laboratorio se describen a continuación.



Figura 1. A) Delimitación del área para la toma de muestra. B) Retiro de capa superior del suelo

#### 3.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE SUELO POR VÍA SECA PARA ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO Y DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES FÍSICAS (INV E-106-13)<sup>17</sup>

Se tomó aproximadamente 100 gramos (g) de la muestra de suelo natural tal como salió del terreno y se secó en un horno a 60°C (Figura 2) durante 24 horas, luego con ayuda de un mortero se disgregó la muestra obteniendo 65 g de suelo.

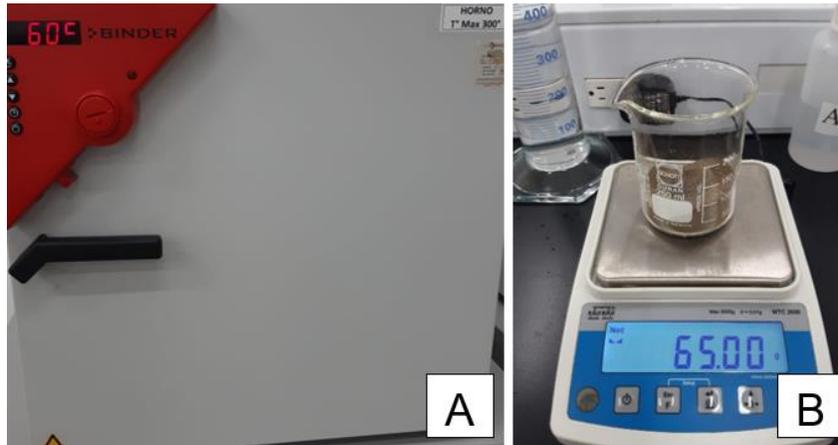


Figura 2. A) Secado. B) Pesaje de la muestra

### 3.2 DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS DE LOS SUELOS Y DEL LLENANTE MINERAL, EMPLEANDO UN PICNÓMETRO CON AGUA (INV E-128-13)<sup>16</sup>

Para este ensayo de laboratorio se utilizó el método A descrito en la norma INV E-128-13<sup>16</sup>, el cual se emplea para muestras húmedas. En este procedimiento se utilizó un balón volumétrico de 500 g de capacidad como picnómetro.

Inicialmente se realizó la calibración que consistió en tomar cinco veces la masa del picnómetro vacío para hallar el promedio de esta ( $M_p$ ), posteriormente se hirvió agua para desairearla. En un recipiente aislante (recipiente de icopor) se introdujo el picnómetro lleno de agua hervida, la tapa del picnómetro, un termómetro, un beaker de 500 ml con agua desaireada y un gotero, esto con el fin de alcanzar el equilibrio térmico durante tres horas aproximadamente. Después de las tres horas se registró la masa del picnómetro lleno de agua ( $M_{pw,c}$ ) y la temperatura del agua en él para realizar el siguiente cálculo:

Volumen calibrado de cada picnómetro “ $V_p$ ” ( $\text{cm}^3$ ):

$$V_p = \frac{M_{pw,c} - M_p}{\rho_{w,c}} \quad (1)$$

Donde:

$M_{pw,c}$ : masa del picnómetro lleno de agua a la temperatura de calibración (g).

$M_p$ : masa promedio del picnómetro seco (g).

$\rho_{w,c}$ : densidad de masa del agua a la temperatura de calibración que depende de la temperatura ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (Tabla 1).

Tabla 1. Densidad de agua y coeficiente de corrección por temperatura "K". Fuente: INV E 128-13

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Coeficiente K
20	0,99821	1,00000
21	0,99799	0,99979
22	0,99777	0,99957
23	0,99754	0,99933
24	0,99730	0,99909
25	0,99705	0,99884
26	0,99679	0,99858
27	0,99652	0,99831
28	0,99624	0,99803
29	0,99595	0,99774
30	0,99565	0,99744

En el método para muestras húmedas (método A de La Norma) se tomó aproximadamente 100 g de muestra con su humedad natural y se le agregó agua destilada hasta obtener una lechada, luego se vertió en el picnómetro y se terminó de llenar con agua destilada para desairearla hirviéndola. Una vez la lechada volvió a temperatura ambiente, se realizó el procedimiento de calibración para llegar al equilibrio térmico durante 24 horas, luego de este tiempo se tomó la masa ( $M_{pws,t}$ ) y la temperatura de la lechada y con la Tabla 1 se halló la densidad de masa y el coeficiente K. Finalmente se vertió la lechada en un beaker para llevarla al horno y obtener la masa de los sólidos secos ( $M_s$ ) (Figura 3).

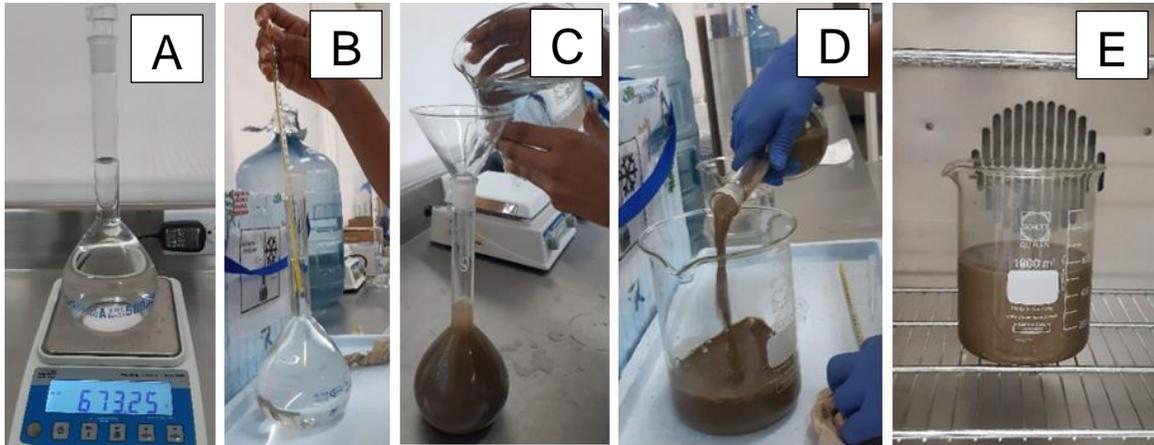


Figura 3. A) Calibración del picnómetro. B) Toma de temperatura. C) Llenado del picnómetro. D) Vertimiento de lechada en el beaker. E) Secado de lechada

En este ensayo se realizaron los siguientes cálculos:

Masa del picnómetro lleno de agua a la temperatura de ensayo “ $M_{pw,t}$ ” (g):

$$M_{pw,t} = M_p + (V_p \times \rho_{w,t}) \quad (2)$$

Donde:

$M_p$ : masa promedio del picnómetro seco (g).

$V_p$ : volumen promedio de calibración del picnómetro seco ( $\text{cm}^3$ ).

$\rho_{w,t}$ : densidad del agua a la temperatura de ensayo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (Tabla 1).

Se calculó la gravedad específica de las partículas sólidas del suelo a la temperatura de ensayo “ $G_t$ ” así:

$$G_t = \frac{M_s}{[M_{pw,t} - (M_{pws,t} - M_s)]} \quad (3)$$

Donde:

$M_s$ : masa de los sólidos del suelo secado en el horno (g).

$M_{pw,t}$ : masa del picnómetro lleno de agua a la temperatura de ensayo (g) (resultado de la Ecuación 2).

$M_{pws,t}$ : masa del picnómetro con suelo y agua a la temperatura de ensayo (g).

Finalmente se calculó la gravedad específica de las partículas sólidas del suelo a 20°C “G<sub>20°C</sub>” de la siguiente manera:

$$G_{20^{\circ}\text{C}} = K \times G_t \quad (4)$$

Donde:

G<sub>t</sub>: gravedad específica de las partículas sólidas del suelo a la temperatura de ensayo (resultado de la Ecuación 3).

K: coeficiente de corrección por temperatura (ver Tabla 1).

### 3.3 DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (INV E-123-13)<sup>18</sup>

Debido a que la muestra de suelo no presentó partículas retenidas en el tamiz de 2mm se realizó un análisis granulométrico utilizando un cilindro de sedimentación (probeta de 1000 mililitros (ml) de capacidad) y un hidrómetro 152H (Figura 4).

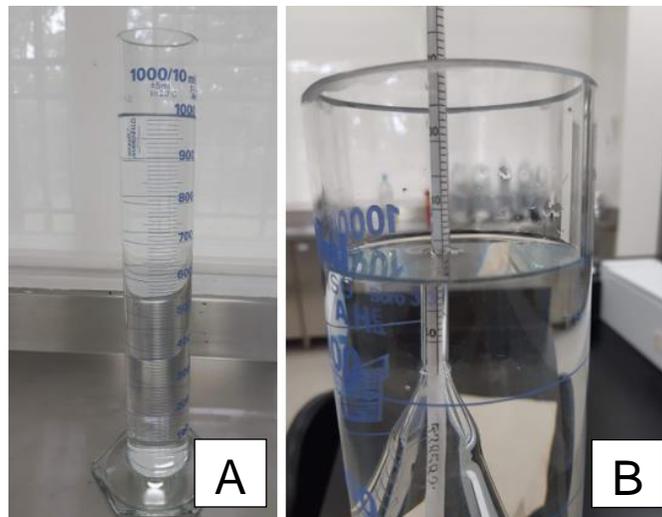


Figura 4. A) Cilindro de sedimentación. B) Hidrómetro

Inicialmente se debe encontrar una corrección conocida como corrección compuesta. El valor de esta corrección se debe hallar porque el cambio de temperatura (corrección por temperatura), el agente dispersante que se utiliza (corrección por defloculante y punto

cero) y la lectura del menisco (corrección por menisco) generan modificaciones a la lectura real del hidrómetro.

### 3.3.1 Corrección por temperatura.

El hidrómetro está fabricado para leer densidades a 20°C, cuando hay variación en la temperatura de la lechada se producen cambios de densidad que alteran la lectura real de este, en la Tabla 2 se presentan los valores de esta corrección dependiendo de la temperatura al momento de realizar la lectura.

Tabla 2. Valores de corrección temperatura en cada lectura del hidrómetro. Fuente: INV E 123-13

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Hidrómetro 152H (g/litro)</b>
20	0,0
21	0,3
22	0,6
23	0,9
24	1,3
25	1,7
26	2,0
27	2,4

### 3.3.2 Corrección por defloculante y punto cero.

Debido a que se utiliza un agente dispersante en el agua, este también cambia la densidad del líquido y por tanto la lectura real del hidrómetro. Para hallar el valor de esta corrección, inicialmente se preparó una solución de hexametáfosfato de sodio con agua destilada (40g/litro) (Figura 5), luego se tomó 125 ml de esta solución y se vertió en la probeta adicionando agua destilada hasta su máxima capacidad (1000 ml), finalmente se tomó la lectura del hidrómetro la cual es el valor de esta corrección.

### 3.3.3 Corrección por menisco.

Los hidrómetros se fabrican para tomar las lecturas debajo del menisco, pero al ser tan difícil, se toman las lecturas por encima y se le aplica una corrección. Para el hidrómetro 152H esta corrección tiene un valor de 1g/litro.



Figura 5. Reactivos para realizar la solución de hexametafosfato de sodio

Para la dispersión de la muestra de suelo, se pesaron 65 g de muestra, se dispuso la muestra en un beaker y se le agregó 125 ml de solución, finalmente se agitó con una varilla de vidrio y se dejó por 16 horas en reposo para permitir su saturación (Figura 6).

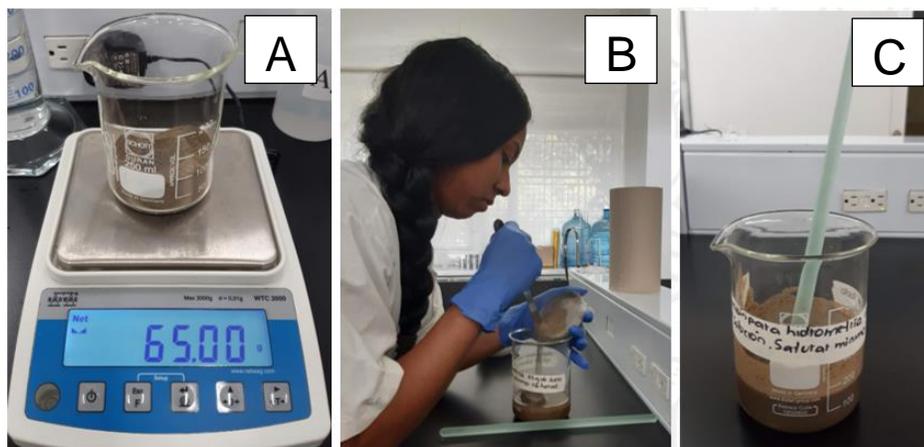


Figura 6. Dispersión de muestra. A) Cantidad de muestra utilizada. B) Mezcla de muestra con 125 ml de solución. C) Saturación de muestra por 16 horas

Terminado el periodo de saturación, se dispersó nuevamente la muestra, se transfirió la lechada al cilindro para sedimentación y se agregó agua destilada hasta alcanzar su máxima capacidad (1000 ml). Posteriormente, se agitó el cilindro tapando con la palma de la mano y finalmente, se dispuso para iniciar las lecturas con el hidrómetro (Figura 7). Luego de tomar la última lectura con el hidrómetro se realizó un lavado de la lechada en el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  para secar el material que quedó allí y determinar la cantidad retenida.



Figura 7. Preparación de muestra para iniciar lecturas con el hidrómetro. A) Transferencia de la lechada al cilindro de sedimentación. B) Adición de agua destilada hasta marca de 1000 ml. C) Agitación del cilindro. D) Muestra lista para iniciar lecturas con hidrómetro

En este ensayo se realizaron los siguientes cálculos:

Porcentaje de partículas en suspensión "P" (%):

$$P = \left[ \frac{Rxa}{W} \right] \times 100 \quad (5)$$

Donde:

R: lectura del hidrómetro con corrección compuesta aplicada.

a: factor de corrección que depende de la gravedad específica del suelo (ver Tabla 3).

$$W = \frac{\text{masa seca utilizada (g)}}{\text{porcentaje que pasa el tamiz de 2mm}} \times 100 \quad (6)$$

Tabla 3. Valores del factor de corrección "a" para diferentes gravedades específicas de las partículas de suelos. Fuente: INV E 123-13

Gravedad específica	Factor de corrección "a"
2,95	0,94
2,90	0,95
2,85	0,96
2,80	0,97
2,75	0,98
2,70	0,99
2,65	1,00
2,60	1,01
2,55	1,02
2,50	1,03
2,45	1,04

Diámetro de las partículas "D" (mm):

$$D = K \sqrt{\frac{L}{T}} \quad (7)$$

Donde:

K: constante que depende del valor de la gravedad específica del suelo y de la temperatura de la suspensión (ver Tabla 4).

L: distancia entre la superficie de la suspensión y el nivel del caudal al cual se mide su densidad "profundidad efectiva" (centímetros (cm)) (ver Tabla 5).

T: tiempo transcurrido desde el comienzo de la sedimentación hasta la toma de la lectura (minutos (min)).

Tabla 4. Valores de "K" para el cálculo del diámetro de las partículas. Fuente: INV E 123-13

Temperatura (°C)	Gravedad específica de las partículas de suelo					
	2,55	2,60	2,65	2,70	2,75	2,80
23	0,01358	0,01337	0,01317	0,01297	0,01279	0,01261
24	0,01342	0,01321	0,01301	0,01282	0,01264	0,01246
25	0,01327	0,01306	0,01286	0,01267	0,01249	0,01232
26	0,01312	0,01291	0,01272	0,01253	0,01235	0,01218
27	0,01297	0,01277	0,01258	0,01239	0,01221	0,01204

Tabla 5. Valores de profundidad efectiva "L" para el hidrómetro 152H. Fuente: INV E 123-13

Hidrómetro 152H			
Lectura real del hidrómetro	Profundidad efectiva "L" (cm)	Lectura real del hidrómetro	Profundidad efectiva "L" (cm)
10	14,7	31	11,2
11	14,5	32	11,2
12	14,3	33	10,9
13	14,2	34	10,7
14	14,0	35	10,6
15	13,8	36	10,4
16	13,7	37	10,2
17	13,5	38	10,2
18	13,3	39	9,9
19	13,2	40	9,7
20	13,0	41	9,6
21	12,9	42	9,4
22	12,7	43	9,2
23	12,5	44	9,1
24	12,4	45	8,9

Hidrómetro 152H			
Lectura real del hidrómetro	Profundidad efectiva "L" (cm)	Lectura real del hidrómetro	Profundidad efectiva "L" (cm)
25	12,2	46	8,8
26	12,0	47	8,6
27	11,9	48	8,4
28	11,7	49	8,3
29	11,5	50	8,1
30	11,4	51	7,9

Finalmente, se realizó una gráfica granulométrica, donde se muestra el diámetro de las partículas con una escala logarítmica en el eje de las abscisas y los porcentajes de las partículas menores que los diámetros correspondientes (porcentaje que pasa) en una escala aritmética en el eje de ordenadas.

### 3.4 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS (INV E-125-13)<sup>19</sup>

Este ensayo se realizó para determinar el límite líquido de la muestra que pasó por el tamiz de 425  $\mu\text{m}$ . Se utilizó el método por vía húmeda para preparar las muestras y se llevó a cabo el ensayo de varios puntos debido a que es más preciso. Se prepararon aproximadamente 200 g de la muestra con su humedad natural, agregando agua destilada para ajustar su humedad y llevarlo a una consistencia en la cual una ranura que se realiza en la cazuela de Casagrande se cierra con 25-35 golpes, posteriormente se dispuso en un recipiente cubriéndolo con film plástico para evitar pérdidas de humedad y se dejó en reposo por 16 horas (Figura 8).

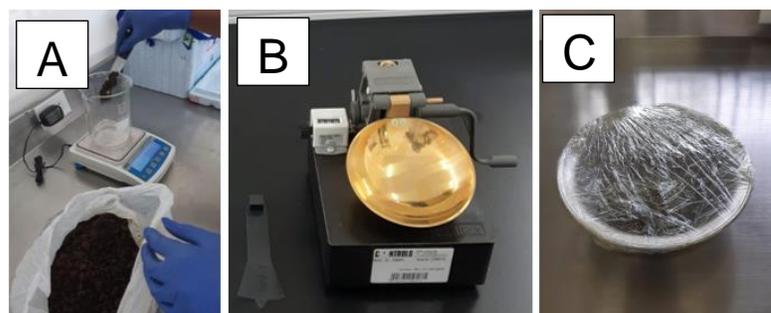


Figura 8. Preparación de muestra para determinación de límite líquido. A) Toma de muestra utilizada. B) Cazuela de Casagrande y ranurador. C) Muestra cubierta para evitar pérdidas de humedad

Luego de las 16 horas de reposo, se dispuso la muestra sobre la cazuela de Casagrande con ayuda de una espátula, se realizó la ranura y se comenzó a golpear a una velocidad de aproximadamente 2 revoluciones por segundo hasta que las dos partes de la muestra se juntaron, registrando el número de golpes efectuados. Posteriormente, se tomó una submuestra de cada lado de la ranura para determinar el porcentaje de humedad (Ecuación 8), este procedimiento (Figura 9) se realizó tres veces ajustando la humedad (agregando agua) para que fueran necesarios 25-35, 20-30 y 15-25 golpes.

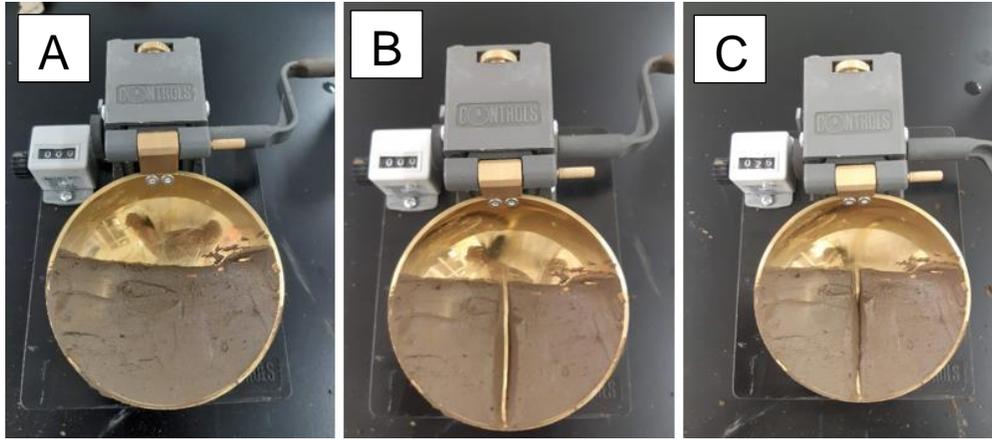


Figura 9. Procedimiento de límite líquido. A) Disposición de muestra sobre cazuela de Casagrande. B) División con ranurador. C) Ranura cerrada

Para determinar el porcentaje de humedad se debe registrar la masa de una submuestra, seguidamente se lleva a secar al horno y se registra la masa de la submuestra seca (masa de los sólidos). Luego se realiza el siguiente cálculo:

$$\% \text{ de humedad} = \frac{\text{masa del agua}}{\text{masa de los sólidos}} \times 100 \quad (8)$$

Donde:

$$\text{masa del agua} = \text{masa de submuestra húmeda} - \text{masa de submuestra seca} \quad (9)$$

Finalmente se calculó la curva de fluidez en un sistema de coordenadas con el número de golpes en escala logarítmica en el eje de abscisas y el contenido de agua en escala aritmética en el eje de ordenadas, luego se ubicaron los tres puntos que se determinaron

en el ensayo. El contenido de agua correspondiente a los 25 golpes de la curva de tendencia corresponde al límite líquido de la muestra de suelo.

### 3.5 LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS (INV E-126-13)<sup>20</sup>

Al material que sobró del ensayo de límite líquido se le redujo el contenido de humedad extendiéndolo sobre la placa de vidrio esmerilado y poniéndolo en una corriente de aire hasta que tuvo una consistencia que permitiera enrollarlo sin que se pegara en las manos. Se formaron rollos con el método manual (Figura 10 A) hasta llegar a un diámetro de aproximadamente 3 mm, luego se dividió el rollo y se volvió a hacer el procedimiento hasta que no fuera posible llegar a este diámetro por desmoronamiento de la pequeña muestra (Figura 10 B). Este procedimiento se repitió varias veces hasta obtener en un recipiente al menos 6 g de muestra. Finalmente, se realizaron todos los pasos anteriores hasta obtener dos recipientes con 6 g de muestra y así calcular un promedio de porcentajes de humedad según la Ecuación 8 (Figura 10 C).



Figura 10. Procedimiento de límite plástico. A) Método manual de enrollamiento. B) Desmoronamiento. C) Secado de submuestras

El cálculo que se realizó en este ensayo es:

$$IP = LL - LP$$

( 10)

Donde:

IP: índice de plasticidad (%).

LL: límite líquido del suelo (%).

LP: límite plástico del suelo (%).

Si el límite líquido o el límite plástico no se pueden determinar o si el límite plástico es igual o mayor al límite líquido, se informa que el suelo es no plástico (NP).

### 3.6 RELACIONES HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN – PROCTOR MODIFICADO) (INV E – 142 – 13)<sup>21</sup>

En este ensayo de laboratorio se empleó el método C de la norma con un molde de 152 mm de diámetro, se realizó la preparación por vía húmeda (se secó en el horno a 60°C) y posteriormente se desintegraron las agregaciones (Figura 11 A). Se prepararon 5 submuestras de 6000 g agregando a cada una diferentes porcentajes de humedad (Tabla 6) y dejando homogenizar el suelo por 16 horas. Luego del periodo de humedecimiento, se realizó la compactación (Figura 11 B) golpeando con el martillo 56 veces cada capa, para un total de 5 capas por punto de compactación.



Figura 11. A) Desintegración de las agregaciones. B) Compactación

Tabla 6. Cantidad de agua agregada a cada submuestra

Submuestra	Contenido de agua (%)	Contenido de agua (ml)
1	10	600
2	14	840
3	18	1080
4	22	1320
5	26	1560

Terminada la compactación, se enrasó el molde con una regla metálica (Figura 12 A), se tomó y registró la masa del molde con la base y el suelo compactado ( $M_T$ ) (Figura 12 B). Finalmente se midió la humedad de moldeo “w” de cada punto de compactación con el mismo procedimiento que se muestra en la Ecuación 8 y 9 para comparar con la humedad agregada inicialmente.

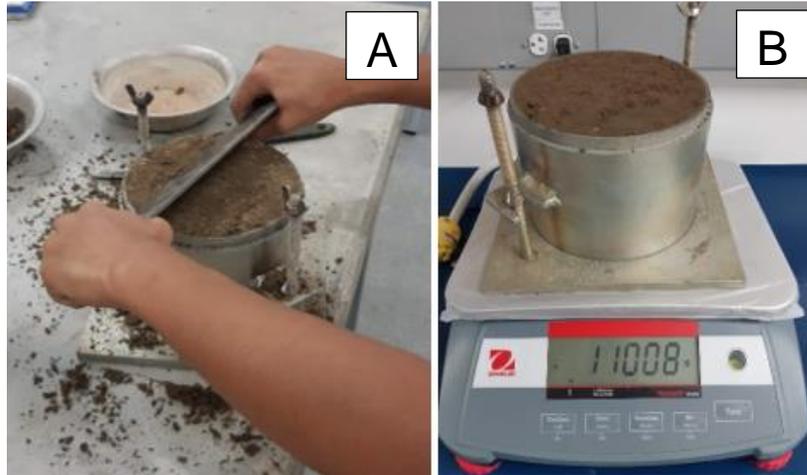


Figura 12. A) Enrasado. B) Masa del molde con base y suelo compactado

Densidad húmeda de cada submuestra “ $\rho_H$ ” (g/cm<sup>3</sup>):

$$\rho_H = K \times \frac{M_T - M_{MD}}{V} \quad (11)$$

Donde:

K: constante de conversión que depende de las unidades de densidad y de volumen. Se usa 1 para densidad en g/cm<sup>3</sup> y volumen en cm<sup>3</sup>.

$M_T$ : masa de la submuestra húmeda dentro del molde (g).

$M_{MD}$ : masa del molde de compactación (6707 g).

V: volumen del molde (2113,99 cm<sup>3</sup>).

Densidad seca de cada submuestra “ $\rho_d$ ” (g/cm<sup>3</sup>):

$$\rho_d = \frac{\rho_H}{1 + \frac{w}{100}} \quad (12)$$

Donde:

$\rho_H$ : resultado de la Ecuación 11.

w: humedad de moldeo de cada submuestra (%).

Peso unitario seco de cada submuestra “ $\gamma_d$ ” (kN/m<sup>3</sup>):

$$Y_d = K_1 \times \rho_d \quad (13)$$

Donde:

$K_1$ : constante de conversión. 9,8066 para densidad en g/cm<sup>3</sup>.

$\rho_d$ : resultado de la Ecuación 12.

Humedad de saturación “ $W_{sat}$ ” (%):

$$\frac{(Y_w)(G_s) - Y_d}{(Y_d)(G_s)} \times 100 \quad (14)$$

Donde:

$Y_w$ : peso unitario del agua a 20°C (9,789 kN/m<sup>3</sup>).

$Y_d$ : peso unitario seco del suelo (kN/m<sup>3</sup>).

$G_s$ : gravedad específica del suelo.

Finalmente se realizó la curva de compactación con los valores de la humedad de moldeo “ $w$ ” y de peso unitario seco de cada submuestra “ $Y_d$ ” y la curva de saturación. El contenido de humedad que corresponde al punto más alto de la curva de compactación es el valor de humedad óptima de la muestra.

### 3.7 PRUEBA DE EROSIÓN

Para realizar el ensayo de erosión se construyeron 16 bloques clasificados en cuatro tipos, los bloques tipo 1 fueron construidos con suelo no estabilizado, los bloques tipo 2, 3 y 4 fueron construidos con suelo estabilizado en un 10% de la totalidad del material utilizado, los tipo 2 sólo con cemento portland (OCP), los tipo 3 sólo con geopolímero (GP) y los tipo 4 con GP y OCP realizando las combinaciones que se muestran en la Tabla 7. Los bloques se construyeron ejecutando el mismo procedimiento que se realizó en el ensayo modificado de compactación. La totalidad de material utilizado para la construcción de cada bloque fue 5000 g por molde compactado (probeta). Cada molde compactado se extrajo con un extractor de muestras que trabaja con un gato hidráulico y se dividió con un serrucho para obtener dos bloques por probeta (Figura 13).

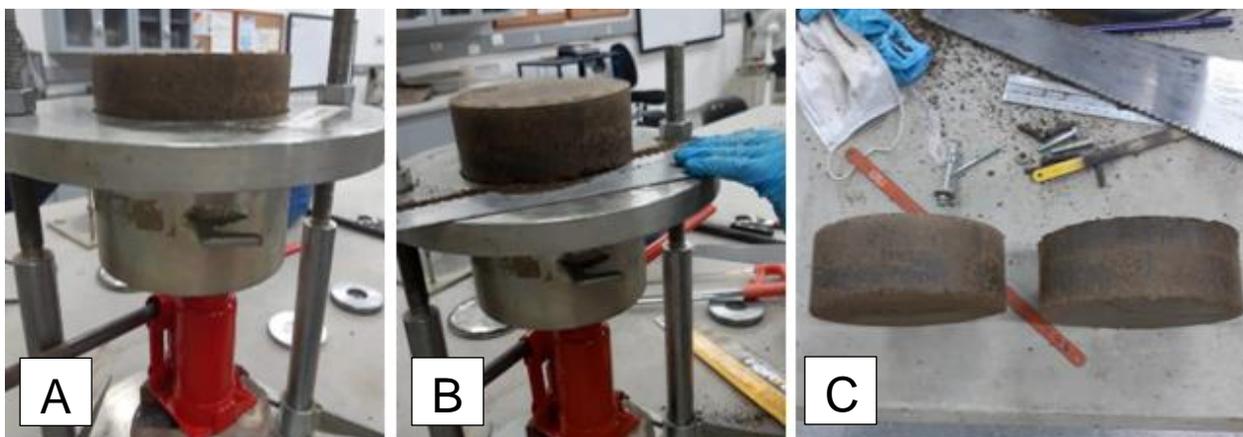


Figura 13. A) Extracción de la probeta. B) División. C) Probeta dividida

El geopolímero que se utilizó es un cemento compuesto de desecho de fibra de lana mineral (LM) activado alcalinamente con una solución de aluminato de sodio ( $\text{NaAlO}_2$ ), hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Para cada combinación con GP se hicieron dos soluciones con relaciones silicio-aluminio ( $\frac{\text{Si}}{\text{Al}}$ ) 1,3 y 1,8.

Tabla 7. Cantidades de los componentes utilizados en cada una de las mezclas

CANTIDADES PARA PROBETAS (90% masa suelo, 10% combinaciones GP y OCP)										
En total 5000 g de material utilizado en cada probeta										
% suelo	%GP	% OCP	Relación Si/Al	Aluminato de Sodio "NaAlO <sub>2</sub> " (ml)	Hidróxido de Sodio "NaOH" (g)	Agua "H <sub>2</sub> O" (ml)	Cantidad de suelo (g)	Cantidad de lana mineral "LM" (g)	Cantidad de cemento portland "OCP" (g)	Número de bloques
100	0	0	No aplica	No aplica	No aplica	650	5000	0	0	2
90	0	10	No aplica	No aplica	No aplica	650	4500	0	500	2
90	10	0	1,3	346,21	322,78	474	4500	500	0	2
90	10	0	1,8	34,04	269,78	786,1	4500	500	0	2
90	7	3	1,3	242,34	225,94	577,8	4500	350	150	2
90	7	3	1,8	23,82	188,84	796,3	4500	350	150	2
90	4	6	1,3	138,48	129,11	681,7	4500	200	300	2
90	4	6	1,8	13,61	107,91	806,5	4500	200	300	2
Total de bloques										16

Terminada la construcción de los bloques, se cubrieron con film plástico (Figura 14) y se llevaron a un cuarto de curado que tiene temperatura promedio de 23°C y porcentaje de humedad de un 92% por 28 días. Seguidamente se tomó la masa seca y densidad de cada bloque.



Figura 14. Bloques

Siguiendo la norma *materials and workmanship for earth buildings* de Nueva Zelanda (NZS 4298 de 1998)<sup>22</sup>, cada bloque se dispuso en un soporte (Figura 15) que expone una cara de este en un área de 12,5 cm de diámetro a un chorro de agua con una presión de 50 kPa (kilopascales) durante 1 hora tomando registros fotográficos cada 20 minutos para comparar el desgaste que tuvo cada bloque, adicionalmente, se tomaron medidas con un pie de rey de los desgastes más notables al inicio y al final de la prueba para determinar si hubo variación en las profundidades registrando el cambio más pronunciado.

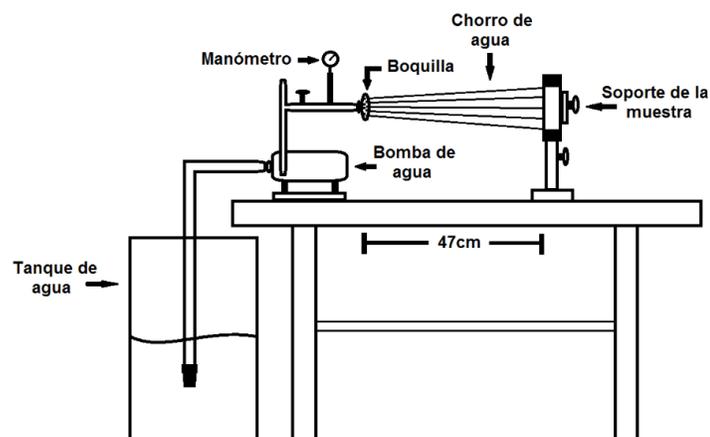


Figura 15. Montaje prueba de erosión

Finalmente, se realizó la evaluación para determinar la validez o invalidez de los bloques de acuerdo con los estándares de la norma NZS 4298 de Nueva Zelanda, el cual indica que para aceptar un material para construcción debe tener un índice de erodabilidad de la prueba de erosión inferior a 5 o una profundidad de erosión inferior a 120 mm (Tabla 8). Además, se tuvo en cuenta la cara del bloque que estuvo expuesta (Figura 16) al chorro de agua para determinar si ésta influenciaba en el resultado.

Tabla 8. Índice de erodabilidad de la prueba de erosión. Fuente: NZS 4298

Índice de erodabilidad	Profundidad de erosión "D" (mm)	Resultado
1	$0 \leq D < 20$	Pasa
2	$20 \leq D < 50$	Pasa
3	$50 \leq D < 90$	Pasa
4	$90 \leq D < 120$	Pasa
5	$D \geq 120$	Falla

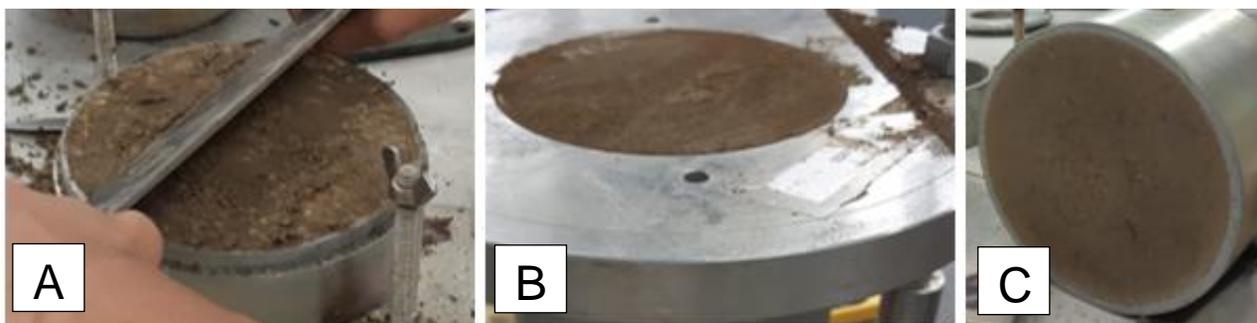


Figura 16. Caras de cada bloque. A) Cara superior. B) Cara intermedia. C) Cara inferior

Se realizó la nomenclatura de cada cara teniendo en cuenta la posición del bloque en el molde. La cara superior es la cara del bloque que se enrasó manualmente con la regla metálica (rugosidad media), la cara intermedia es la cara que se cortó con un serrucho para dividir el bloque (rugosidad alta) y la cara inferior es la cara que quedó en la parte inferior del molde (rugosidad baja).

A continuación, los bloques se dejaron sumergidos en agua durante 50 horas (Figura 17) para tomar la masa húmeda de cada uno y así hallar el valor de absorción de agua que tuvo cada bloque. Posteriormente, se sometió cada bloque a tracción directa (Figura 18) para determinar el esfuerzo en el que falla.



Figura 17. Bloques sumergidos en agua



Figura 18. Montaje en el equipo de compresión

Para facilitar la identificación de cada bloque, se asignó una nomenclatura de acuerdo con el porcentaje de GP, OCP, relación  $\frac{Si}{Al}$  y número de bloque (Tabla 9).

Tabla 9. Nomenclatura de los bloques

% GP	% OCP	Relación Si/Al	Número	Nomenclatura
0	0	No aplica	1	0-0-1
0	0	No aplica	2	0-0-2

% GP	% OCP	Relación Si/Al	Número	Nomenclatura
0	10	No aplica	1	0-10-1
0	10	No aplica	2	0-10-2
10	0	1,3	1	10-0-1,3-1
10	0	1,3	2	10-0-1,3-2
10	0	1,8	1	10-0-1,8-1
10	0	1,8	2	10-0-1,8-2
7	3	1,3	1	7-3-1,3-1
7	3	1,3	2	7-3-1,3-2
7	3	1,8	1	7-3-1,8-1
7	3	1,8	2	7-3-1,8-2
4	6	1,3	1	4-6-1,3-1
4	6	1,3	2	4-6-1,3-2
4	6	1,8	1	4-6-1,8-1
4	6	1,8	2	4-6-1,8-2

## 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA

Los valores de masa del balón volumétrico tomados con la balanza para la calibración del picnómetro se muestran en la Tabla 10, el valor de la masa promedio " $M_p$ " es 176,58 g.

Tabla 10. Masa promedio del picnómetro vacío

Masa de picnómetro vacío (g)	
	176,58
	176,58
	176,59
	176,58
	176,57
Masa promedio " $M_p$ " (g)	176,58
Desviación	0,01

El procedimiento para alcanzar el equilibrio térmico se realizó seis veces y los valores de la masa del picnómetro con agua " $M_{pw,c}$ ", temperatura " $T_c$ ", densidad de masa " $\rho_{w,c}$ " y volumen calibrado " $V_p$ " para cada vez que se realizó el procedimiento se ven en la Tabla 11. El promedio de  $V_p$  es 498,557 cm<sup>3</sup>.

Tabla 11. Volumen calibrado de cada picnómetro "V<sub>p</sub>". \* de la Tabla 1. \*\* de la Ecuación 1

Picnómetro lleno de agua			
Masa de picnómetro con agua "M <sub>pw,c</sub> " (g)	Temperatura "T <sub>c</sub> " (°C)	Densidad de masa "ρ <sub>w,c</sub> " (g/cm <sup>3</sup> ) *	Volumen calibrado "V <sub>p</sub> " (cm <sup>3</sup> ) **
673,25	28	0,99624	498,545
673,61	26	0,99679	498,631
673,67	24	0,99730	498,436
673,63	24	0,99730	498,396
673,81	26	0,99679	498,831
673,74	24	0,99730	498,506
Promedio de V <sub>p</sub>			498,557

Finalmente, en la Tabla 12 se muestran los resultados del procedimiento de determinación de la gravedad específica. Para la muestra de suelo tomado del sector punta de piedra en el distrito de Turbo – Antioquia, la gravedad específica del suelo es 2,70.

Tabla 12. Resultados ensayo de gravedad específica. \* de la Tabla 1. \*\* de las ecuaciones 2,3 y 4 respectivamente.

Parámetro	Valor
Masa del picnómetro con suelo y agua "M <sub>pw,t</sub> "	733,83 g
Temperatura suelo y agua "T <sub>t</sub> "	26 °C
Densidad de agua a la temperatura T <sub>t</sub> "ρ <sub>w,t</sub> "	0,99679 g/cm <sup>3</sup> *
Coefficiente de corrección por temperatura T <sub>t</sub> "K"	0,99858 *
Masa seca del suelo "M <sub>s</sub> "	95,77 g
Masa del picnómetro lleno de agua a la temperatura T <sub>t</sub> "M <sub>pw,t</sub> "	673,54 g **
Gravedad específica de partículas sólidas del suelo a la temperatura T <sub>t</sub> "G <sub>t</sub> "	2,70 **
Gravedad específica de partículas sólidas del suelo a 20°C "G <sub>20°C</sub> "	2,70 **

Braja Das (2001)<sup>23</sup> menciona que los suelos arcillosos y limosos tienen una gravedad específica que varía entre 2,6 y 2,9 por lo que el resultado de 2,70 es un valor consistente para el caso del suelo estudiado.

## 4.2 RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE LAS PARTÍCULAS

Para el procedimiento realizado con el hidrómetro, se utilizaron las especificaciones que se muestran en la Tabla 13. Durante el ensayo se obtuvieron valores de temperatura de 23, 24 y 25°C lo que sugiere una corrección por temperatura "C<sub>t</sub>" de 0,9; 1,3; 1,7 (de la Tabla 2) y constante "K" de 0,01297; 0,01282; 0,01267 (de la Tabla 4) respectivamente.

Tabla 13. Especificaciones para el ensayo de hidrometría del suelo. \* valor dado por la Tabla 3

Parámetro	Valor
Tipo de hidrómetro utilizado	152H
Gravedad específica	2,70
Factor de corrección "a"	0,99 *
Peso de la muestra "W"	65 g
Corrección por menisco "C <sub>m</sub> "	1 g/L
Corrección por defloculante y punto cero "C <sub>d</sub> "	6 g/L

En la Tabla 14 se muestran los resultados obtenidos con el hidrómetro. Con la columna de porcentaje de suelo en suspensión y diámetro de la partícula se realizó la gráfica de la Figura 19.

Tabla 14. Resultados ensayo de hidrometría. \* de la Tabla 5

Tiempo (min)	Lectura de hidrómetro (g/L)	Temperatura (°C)	L efectivo "L" (cm) *	Corrección compuesta	Lectura del hidrómetro con corrección compuesta aplicada "R"	Porcentaje de suelo en suspensión "P" (%)	Diámetro de la partícula "D" (mm)
0						97,58	0,07500
1	46	25	8,8	8,7	37,3	56,81	0,03759
2	45	25	8,9	8,7	36,3	55,29	0,02673
4	43	25	9,2	8,7	34,3	52,24	0,01922
8	41	24	9,6	8,3	32,7	49,80	0,01404
17	40	24	9,7	8,3	31,7	48,28	0,00968

Tiempo (min)	Lectura de hidrómetro (g/L)	Temperatura (°C)	L efectivo "L" (cm) <sup>*</sup>	Corrección compuesta	Lectura del hidrómetro con corrección compuesta aplicada "R"	Porcentaje de suelo en suspensión "P" (%)	Diámetro de la partícula "D" (mm)
30	38	24	10,1	8,3	29,7	45,24	0,00744
60	36	24	10,4	8,3	27,7	42,19	0,00534
250	33	23	10,9	7,9	25,1	38,23	0,00271
1431	29	24	11,5	8,3	20,7	31,53	0,00115
5776	26	24	12	8,3	17,7	26,96	0,00058

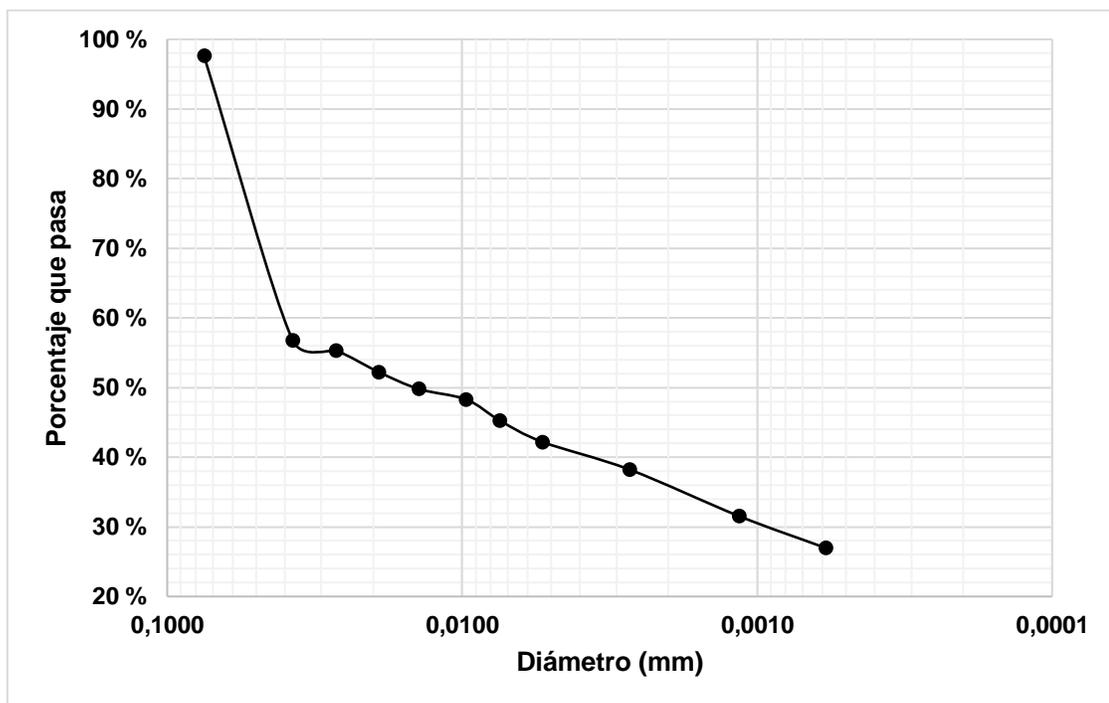


Figura 19. Curva granulométrica del suelo

En la Figura 19 se puede observar que el 97,58% de las partículas pasaron el tamiz No. 200 (0,075 mm de abertura), según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)<sup>24</sup>, si más del 50% de la muestra pasa este tamiz se tiene un suelo de grano fino.

### 4.3 RESULTADOS DEL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD

Los resultados hallados en el ensayo para determinar el límite líquido se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Resultados de límite líquido del suelo

Número de tara	Masa tara (g)	Masa tara + suelo húmedo (g)	Masa tara + suelo seco (g)	% Humedad	Número de golpes
14	23,82	27,22	25,98	57,41%	32
16	24,95	29,81	27,99	59,87%	24
21	25,35	29,26	27,72	64,98%	16

LÍMITE LÍQUIDO "LL"	Número de golpe	% humedad
	25	60,17%

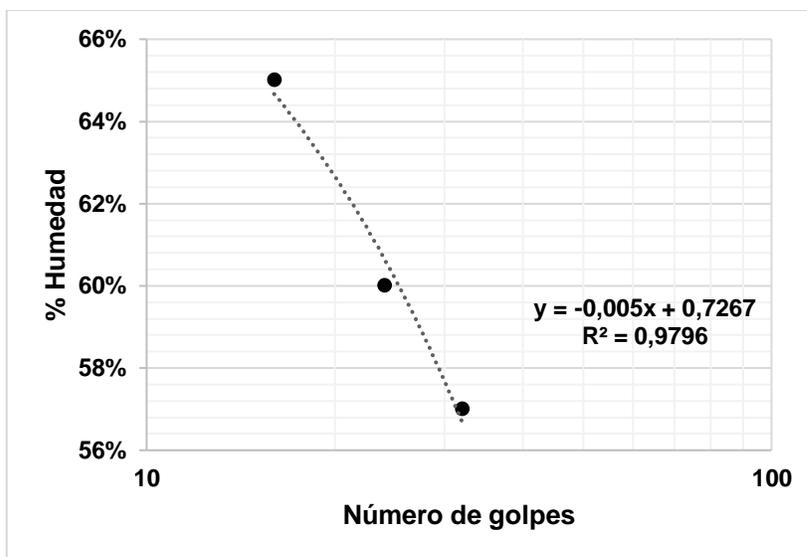


Figura 20. Curva de fluidez del suelo

La Figura 20 muestra la Ecuación de la curva que pasa por los tres puntos encontrados en el laboratorio, reemplazando el valor de x por 25 (número de golpes) se obtuvo que el límite líquido del suelo es 60,17%  $\approx$  60%.

Los porcentajes obtenidos en el ensayo de límite plástico se presentan en la Tabla 16. El promedio de los porcentajes de humedad encontrados o LP del suelo fue de 40,83%  $\approx$  41%. Una vez hecho el cálculo de la Ecuación 10 se obtuvo un índice de plasticidad de 19%.

Tabla 16. Resultados del límite plástico del suelo

Número de tara	Masa tara (T)	Masa tara + suelo húmedo	Masa tara + suelo seco	% Humedad
17	23,42	29,59	27,84	39,59%
22	24,64	31,09	29,18	42,07%
<hr/>				
LÍMITE PLÁSTICO "LP"	40,83%			

Según el SUCS<sup>24</sup>, para clasificar los suelos de grano fino de usa el símbolo M cuando se tiene un limo inorgánico (porque su índice de plasticidad se grafica debajo de la línea A de la carta de plasticidad, Figura 21) y dependiendo de su plasticidad se agrega otro símbolo que para este caso es H, el cual significa alta plasticidad (LL > 50). Finalmente, la clasificación del suelo corresponde a un MH (Limo inorgánico de alta compresibilidad).

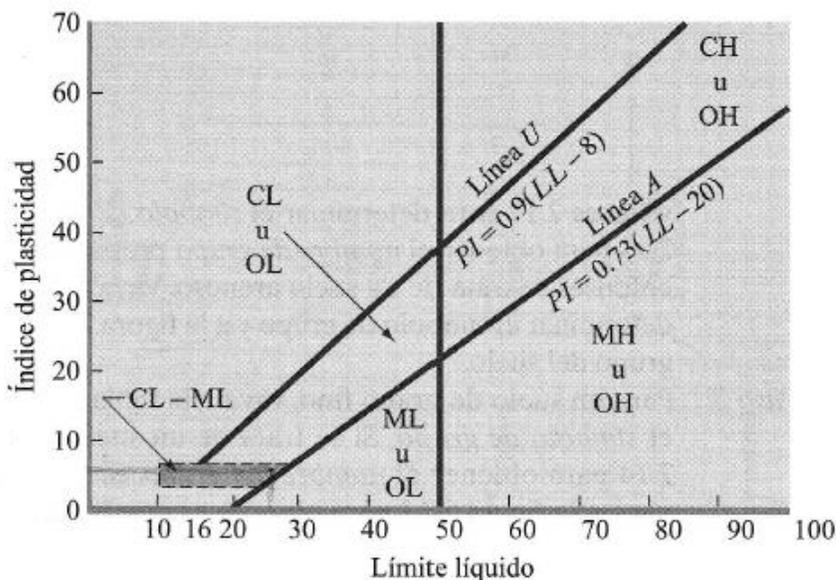


Figura 21. Carta de plasticidad. Fuente: Das, 2001

#### 4.4 RESULTADOS DE RELACIONES HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN) (INV E – 142 – 13)

Los resultados obtenidos para cada punto de compactación se ven en las tablas 17 y 18.

Tabla 17. Resultados puntos de compactación. \* de la Ecuación 11. \*\* de la Ecuación 12. \*\*\* de la Ecuación 13

Masa suelo compactado + molde + base (g)	Masa suelo compactado	Densidad húmeda " $\rho_H$ " (g/cm <sup>3</sup> ) *	Densidad seca " $\rho_d$ " (g/cm <sup>3</sup> ) **	Peso unitario seco " $\gamma_d$ " (kN/m <sup>3</sup> ) ***	Humedad de saturación " $w_{sat}$ "
10667	3960	1,873	1,871	18,35	16,251
10946	4239	2,005	2,002	19,63	12,743
11008	4301	2,035	2,030	19,91	12,026
10790	4083	1,931	1,926	18,89	14,645
10697	3990	1,887	1,882	18,46	15,850

Tabla 18. Humedad de los puntos de compactación

Submuestra	Número de tara	Masa tara (g)	Humedad		
			Masa tara + suelo húmedo compactado (g)	Masa tara + suelo seco compactado	% humedad de moldeo "w"
1	B8	64,0	410,3	373,1	12%
2	B14	66,1	422,5	370,4	17%
3	B2	59,5	428,0	362,2	22%
4	B9	68,7	481,6	397,5	26%
5	B10	80,8	736,4	589,4	29%

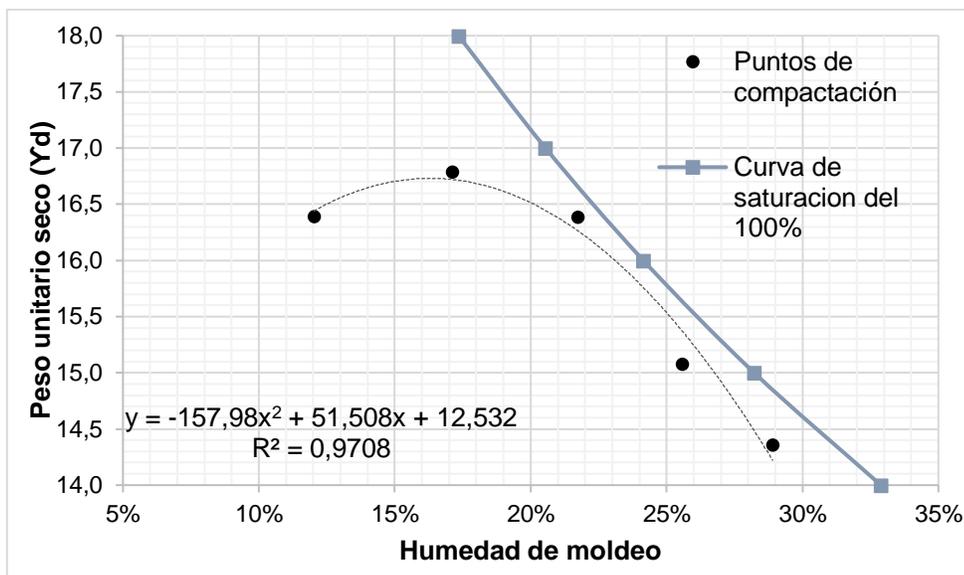


Figura 22. Curva de compactación y saturación del suelo

La curva de compactación (Figura 22) de la muestra de suelo indicó que la humedad óptima fue de aproximadamente 17% y el peso unitario seco correspondiente a esa humedad óptima fue de 16,8 kN/m³. La línea azul representa la curva de saturación del suelo. Debido a que en el laboratorio se encontró una humedad inicial del 4% para el suelo, se restó este valor a la humedad óptima y se trabajó con el 13% de agua para realizar las combinaciones del suelo con GP y OCP.

## 4.5 RESULTADOS DE PRUEBA DE EROSIÓN

En el procedimiento realizado para hallar la densidad, la profundidad de desgaste, la humedad y la resistencia a la compresión de los bloques se encontraron los siguientes resultados.

### 4.5.1 Cálculo de densidad.

Los resultados obtenidos en el cálculo de densidad de cada bloque se observan en la Tabla 19, que confirma que el bloque con mayor densidad fue el bloque tipo 4 con combinación 4% GP – 6% OCP y relación  $\frac{Si}{Al} = 1,3$ ; y el bloque con menor densidad fue el bloque tipo 1 (construido con suelo no estabilizado).

Tabla 19. Cálculo de densidad de los bloques

Muestra	Masa (g)	Volúmen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Promedio de densidad (g/cm <sup>3</sup> )
0-0-1	2012	1046,82	1,92	1,96
0-0-2	1916	956,79	2,00	
0-10-1	1966	1008,05	1,95	2,06
0-10-2	1942	893,22	2,17	
10-0-1,3-1	2035	1033,34	1,97	2,11
10-0-1,3-2	2028	902,57	2,25	
10-0-1,8-1	1951	990,31	1,97	2,03
10-0-1,8-2	2047	983,38	2,08	
7-3-1,3-1	1865	968,35	1,93	2,01
7-3-1,3-2	2018	968,35	2,08	
7-3-1,8-1	2198	959,53	2,29	2,19
7-3-1,8-2	1905	913,25	2,09	
4-6-1,3-1	2125	897,92	2,37	2,22
4-6-1,3-2	1897	920,27	2,06	
4-6-1,8-1	1900	988,11	1,92	1,97
4-6-1,8-2	2065	1027,84	2,01	

#### 4.5.2 Registro fotográfico de los bloques durante la prueba erosión.

Al someter los bloques a la prueba de erosión, se registraron los siguientes cambios:

- Bloque 0-0-1: al iniciar el ensayo de absorción en los bloques, este bloque se deshizo al sumergirse en el agua (Figura 23), por lo que se decidió que el ensayo de absorción se realizaría después de la prueba de erosión.



Figura 23. Bloque deshecho

- Bloque 0-0-2: este bloque (Figura 24) presentó desgaste inmediatamente después del inicio de la actuación el chorro de agua sobre su superficie, luego de cinco minutos del inicio de la prueba se observó mayor desgaste en las partes donde actuaba directamente la presión del agua y sobre la esquina superior derecha se presenta un desgaste total. Finalmente, a los 36 minutos se presentó una desintegración total de la muestra.



Figura 24. Desgaste del bloque 0-0-1. A) Inicio de prueba. B) 5 minutos después del inicio. C) 36 minutos después del inicio

- Bloque 0-10-1: este bloque (Figura 25) inició con pequeños desgastes en la parte central y superior izquierda. Después de 20 minutos se observó que los desgastes iniciales aumentaron un poco su profundidad. Después de finalizar la prueba se registró un cambio en la profundidad de desgaste de  $\approx 1,6$  mm.

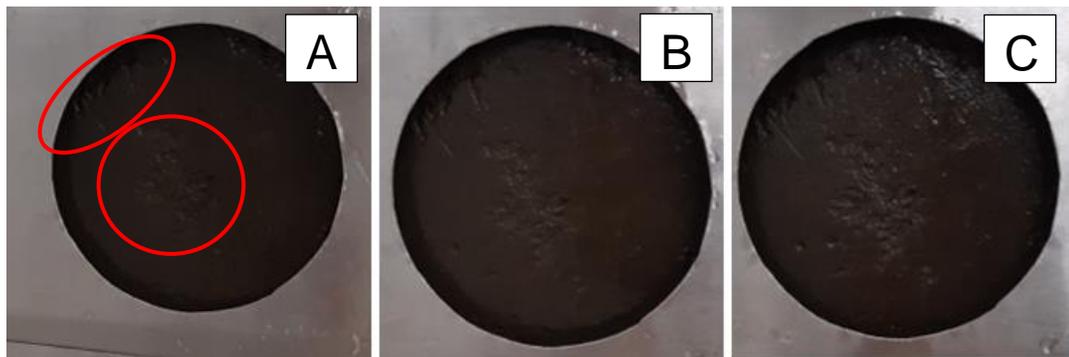


Figura 25. Desgaste del bloque 0-10-1. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio

- Bloque 0-10-2: este bloque (Figura 26) inició con desgastes sobre la parte central y superior izquierda, luego de 20 minutos del inicio de la prueba se notó mayor desgaste. Finalmente se registró un cambio en la profundidad de  $\approx 2$  mm.

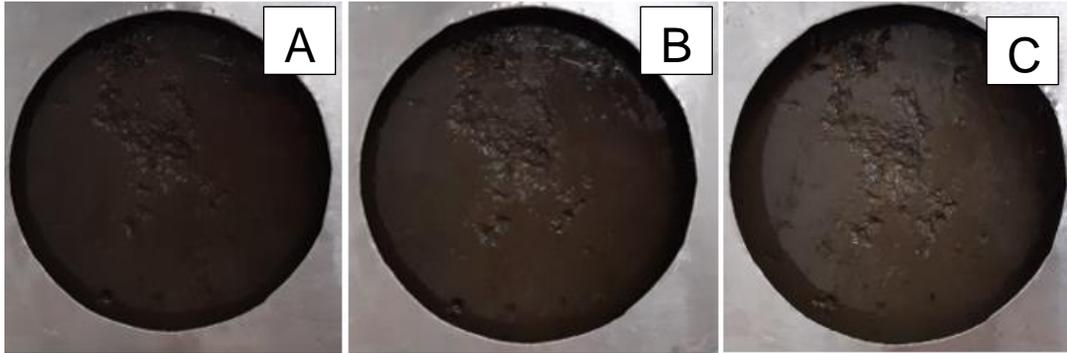


Figura 26. Desgaste del bloque 0-10-2. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio

- Bloque 10-0-1,3-1: este bloque presentó una reacción química superficial de los elementos adicionados (Figura 27) luego de dejarlo 24 horas descubierto, esto probablemente se dio por el porcentaje de GP y OCP. Al inicio de la prueba se observó mucho desgaste sobre la superficie. Finalmente se registró un cambio en la profundidad de  $\approx 1$  mm.



Figura 27. Reacción en el bloque 10-0-1,3-1

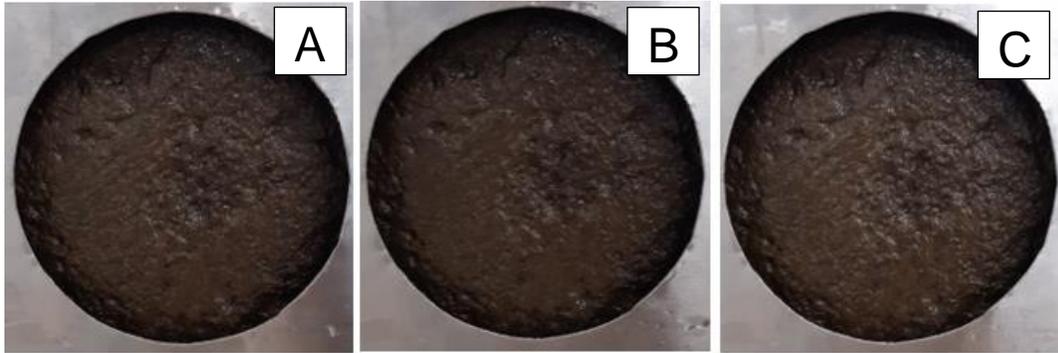


Figura 28. Desgaste del bloque 10-0-1,3-1. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio

- Bloque 10-0-1,3-2: este bloque (Figura 30) también presentó la reacción del bloque anterior como se muestra en la Figura 29 porque cuenta con los mismos porcentajes de GP y OCP. Al inicio de la prueba se observa mucho desgaste. El aumento de la profundidad de este bloque fue de  $\approx 1,3$  mm.

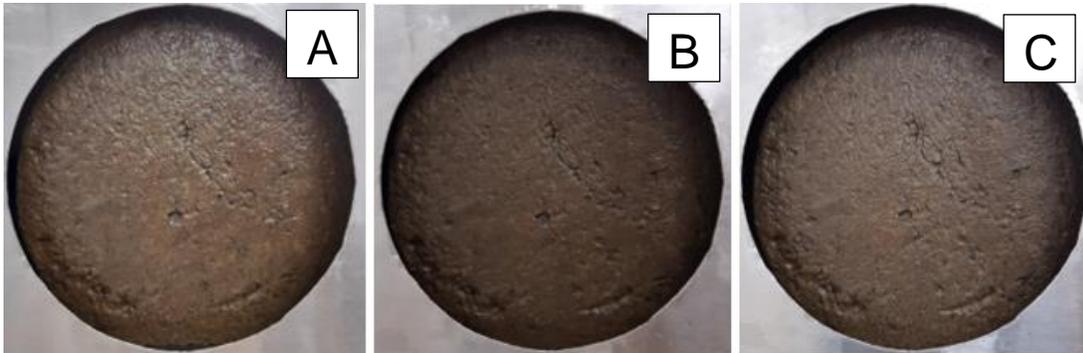


Figura 29. Reacción en el bloque 10-0-1,3-2



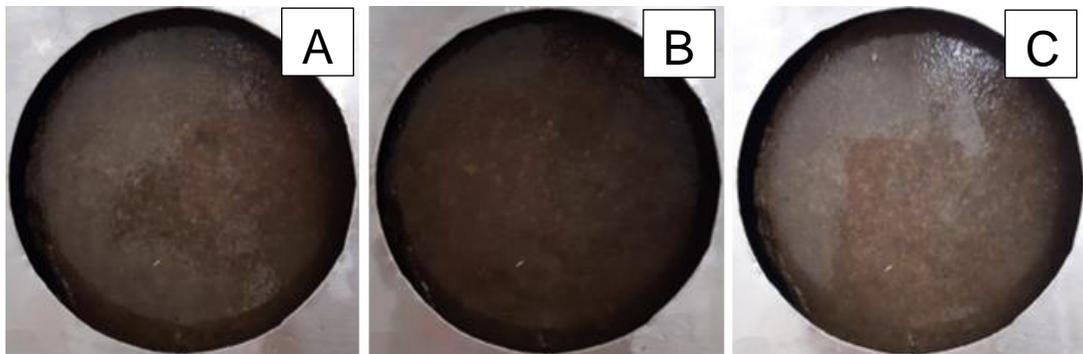
Figura 30. Desgaste del bloque 10-0-1,3-2. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio

- Bloque 10-0-1,8-1: este bloque (Figura 31) inició con pequeños desgastes y no se registró aumento en la profundidad de estos durante la ejecución de la prueba.



*Figura 31. Desgaste del bloque 10-0-1,8-1. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio*

- Bloque 10-0-1,8-2: este bloque (Figura 32) inició y finalizó con la superficie completamente lisa, no se presentó desgaste notable.



*Figura 32. Desgaste del bloque 10-0-1,8-2. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio*

- Bloque 7-3-1,3-1: este bloque (Figura 33) no presentó desgaste durante la ejecución de la prueba.

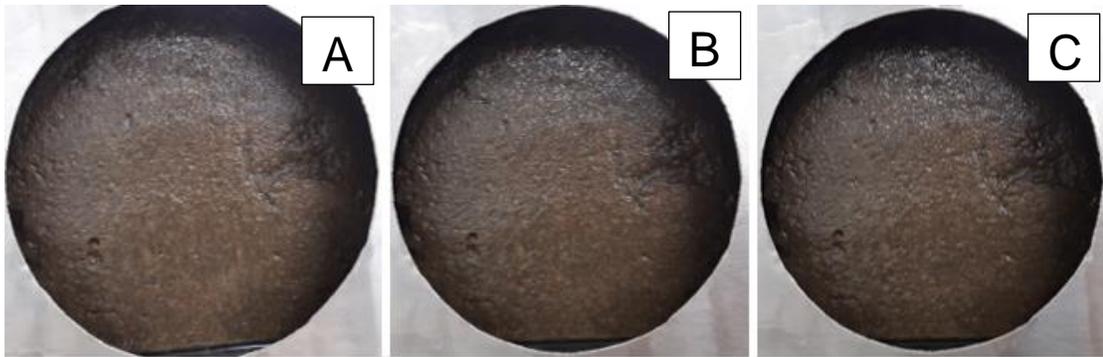


Figura 33. Desgaste del bloque 7-3-1,3-1. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio

- Bloque 7-3-1,3-2: en este bloque (Figura 34) solo se observó un pequeño cambio en la esquina superior izquierda, el aumento de profundidad fue de  $\approx 1$  mm.

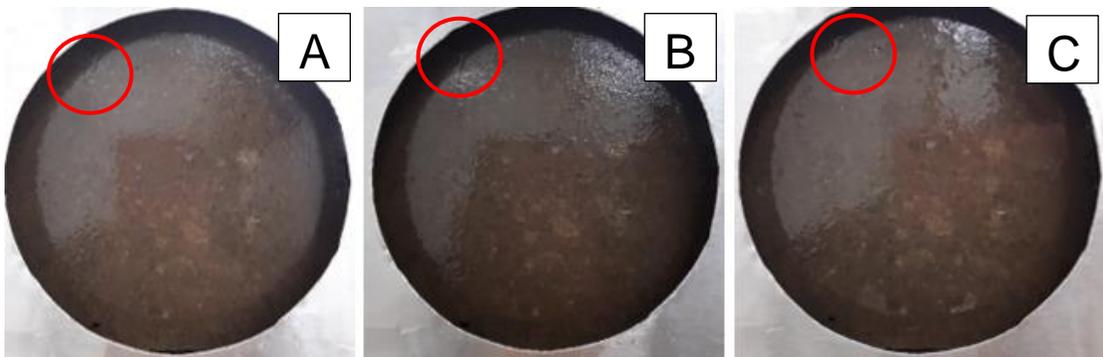


Figura 34. Desgaste del bloque 7-3-1,3-2. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio

- Bloque 7-3-1,8-1: este bloque (Figura 35) inició la prueba con tres desgastes notables sobre la esquina inferior izquierda, centro izquierda y centro. Cuando finalizó la prueba no se registró cambios en la profundidad de los desgastes notorios ni sobre toda la superficie.

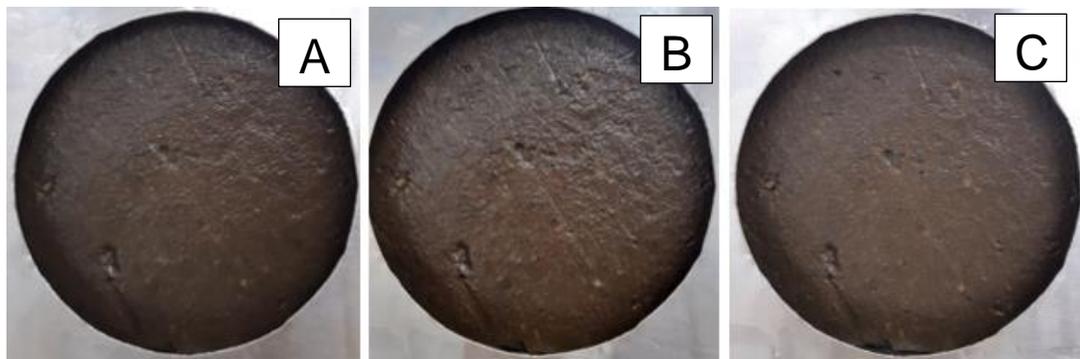


Figura 35. Desgaste del bloque 7-3-1,8-1. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio

- Bloque 7-3-1,8-2: este bloque (Figura 36) inició la prueba con la superficie en general muy lisa y un pequeño desgaste notable sobre la esquina inferior izquierda que aumentó su profundidad un 1 mm al finalizar la prueba.

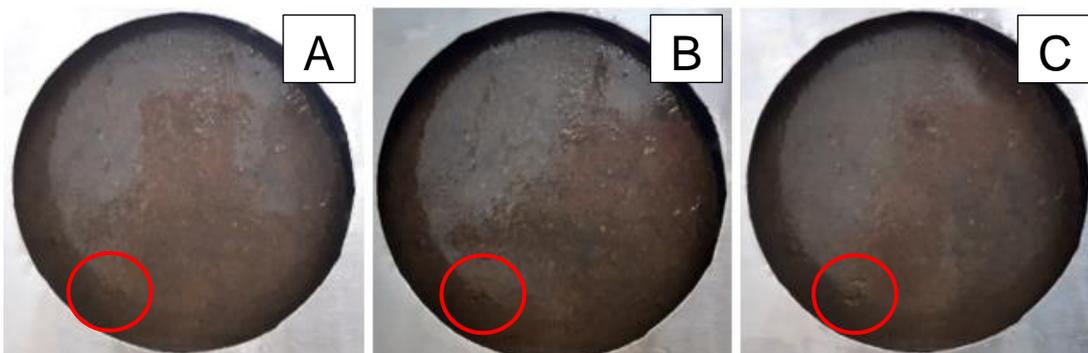


Figura 36. Desgaste del bloque 7-3-1,8-2. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio

- Bloque 4-6-1,3-1: este bloque (Figura 37) inició con un desgaste muy notable sobre toda la superficie (mucha presencia de poros) y un desgaste pronunciado sobre la esquina inferior izquierda. Al finalizar la prueba no se registra cambio en la profundidad de los desgastes iniciales.

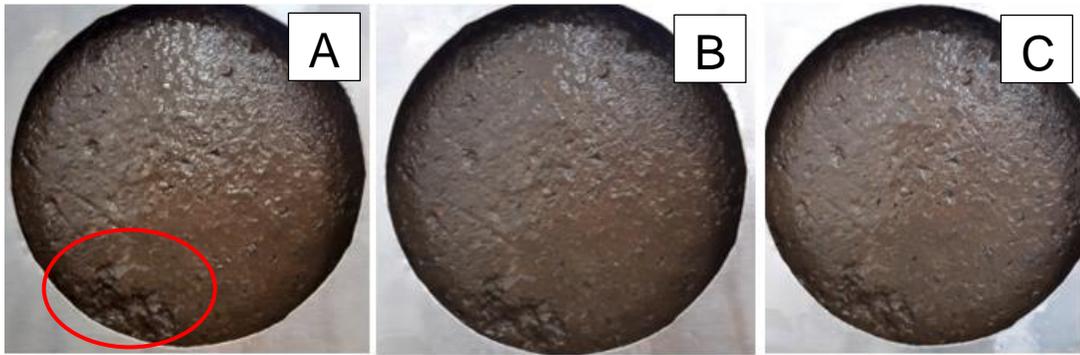


Figura 37. Desgaste del bloque 4-6-1,3-1. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio

- Bloque 4-6-1,3-2: este bloque (Figura 38) inició con una superficie muy lisa y dos desgastes un poco notables sobre la parte centro izquierda y superior izquierda. Al finalizar la prueba se registra un aumento en la profundidad de los desgastes de  $\approx 1$  mm.

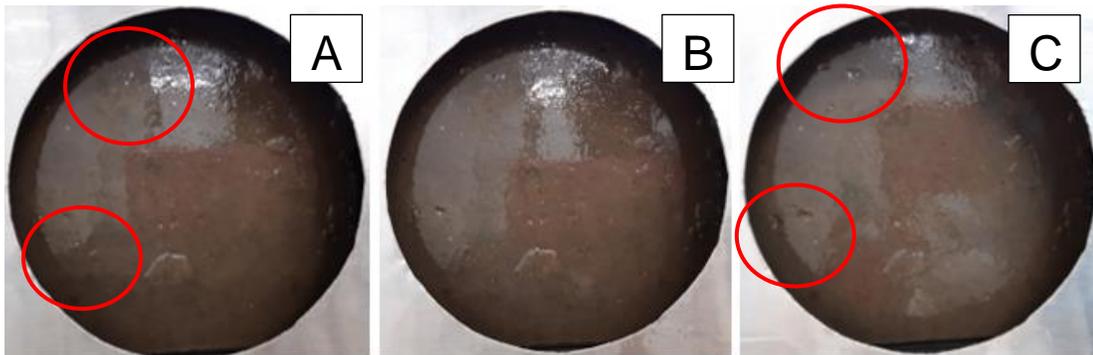


Figura 38. Desgaste del bloque 4-6-1,3-2. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio

- Bloque 4-6-1,8-1: este bloque (Figura 39) inició la prueba con varios desgastes pronunciados sobre la esquina inferior izquierda y centro derecha superior. Al finalizar la prueba se registró un mínimo aumento de la profundidad de 0,5 mm.



Figura 39. Desgaste del bloque 4-6-1,8-1. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio

- Bloque 4-6-1,8-2: este bloque (Figura 40) inició con muchos poros sobre su superficie y al finalizar la prueba se registró un aumento máximo de la profundidad de  $\approx 2,2$  mm y este fue en el desgaste de la esquina superior derecha, pero en general se ve un pequeño aumento en la profundidad de todos los desgastes.

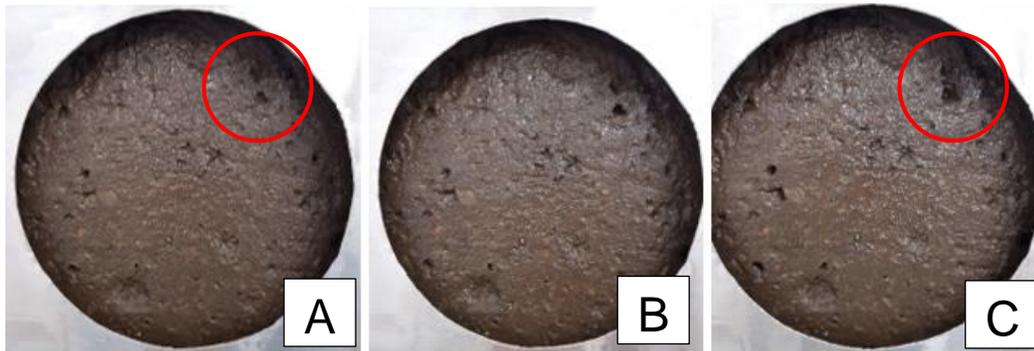


Figura 40. Desgaste del bloque 4-6-1,8-2. A) Inicio de prueba. B) 20 minutos después del inicio. C) 1 hora después del inicio

De acuerdo con los resultados anteriores, se pudo notar que el OCP y el GP tuvieron influencia en la resistencia del bloque frente a la presión del agua, ya que los bloques tipo 1 tuvieron una desintegración total al contacto con el agua y los bloques tipo 2 y 3, aunque presentaron desgaste no se desintegraron. Los bloques tipo 2 mostraron mayor desgaste que los bloques tipo 3. Entre los bloques tipo 3 tuvieron mejor resistencia los construidos con la relación  $\frac{Si}{Al} = 1,8$ , entre los bloques tipo 4, en la combinación 7% GP – 3% OCP con las relaciones  $\frac{Si}{Al}$  1,3 y 1,8 no presentaron diferencias en los desgastes y para la

combinación 4% GP - 6% OCP tuvieron mejor resistencia los bloques con relación  $\frac{Si}{Al} = 1,3$ .

Tabla 20. Resultados prueba de erosión

Tipo	Muestra	Profundidad de erosión "D" (mm)	Cara	Promedio de D (mm)	Índice de erodabilidad	Tasa de erosión (mm/min)	Resultado
1	0-0-1	Desintegración total	Superior	--	5	--	Falla
	0-0-2	Desintegración total	Inferior				
2	0-10-1	1,6	Inferior	1,8	1	0,03	Pasa
	0-10-2	2	Superior				
3	10-0-1,3-1	1	Superior	1,15	1	0,019	Pasa
	10-0-1,3-2	1,3	Intermedia				
	10-0-1,8-1	0	Superior	0	1	0,000	Pasa
	10-0-1,8-2	0	Inferior				
	7-3-1,3-1	0	Superior	0,5	1	0,008	Pasa
	7-3-1,3-2	1	Inferior				
4	7-3-1,8-1	0	Superior	0,5	1	0,008	Pasa
	7-3-1,8-2	1	Inferior				
	4-6-1,3-1	0	Superior	0,5	1	0,008	Pasa
	4-6-1,3-2	1	Inferior				
	4-6-1,8-1	0,5	Inferior	1,35	1	0,023	Pasa
	4-6-1,8-2	2,2	Superior				

En la Tabla 20, se puede observar que de acuerdo con el índice de erodabilidad, los bloques tipo 1 fallan, es decir, no tuvieron resistencia a la erosión, por el contrario, los bloques tipo 2, 3 y 4 pasan, es decir, presentaron resistencia a la erosión. Se tuvo que al adicionar el cemento híbrido al suelo fino, plástico y de baja resistencia a la erosión pasó a ser un suelo resistente bajo todas las combinaciones que se hicieron.

En términos de la resistencia del bloque aportada por el material adicionado, al comparar los bloques tipo 2 y tipo 3, se obtiene que los bloques tipo 3 (compuestos por suelo y geopolímero) presentaron menor tasa de erosión, es decir, mayor resistencia que los bloques tipo 2 (compuestos por suelo y cemento portland). En el caso de los bloques tipo 4, se presentaron dos combinaciones: en la combinación 7% GP - 3%OCP la tasa de erosión fue de 0,008 mm/min en las relaciones  $\frac{Si}{Al} = 1,3$  y 1,8; mientras que para la combinación 4%GP - 6%OCP la relación  $\frac{Si}{Al} = 1,3$  presento menor tasa de erosión que la

relación  $\frac{Si}{Al} = 1,8$  que registró el valores más alto de tasa de erosión en las combinaciones evaluadas.

En términos de la cara expuesta del bloque, los bloques tipo 2, demostraron que al exponer la cara superior (rugosidad media) del bloque el desgaste generado por el chorro de agua fue mayor (2 mm) que al exponer la cara inferior (rugosidad baja, desgaste de 1,6 mm); esto pudo deberse a la alteración de la muestra en el proceso de corte para su preparación. Para el caso de los bloques tipo 3, los resultados en la relación  $\frac{Si}{Al} = 1,3$  indicaron que al exponer la cara intermedia (rugosidad alta) del bloque, el desgaste fue mayor (1,3 mm) que al exponer la cara superior (rugosidad media, desgaste de 1mm) y en la relación  $\frac{Si}{Al} = 1,8$  no se presentó algún desgaste en ambas caras (superior con rugosidad media e inferior con rugosidad baja). Finalmente, en los bloques tipo 4, la combinación 7% GP - 3% OCP con relación  $\frac{Si}{Al} = 1,3$  y 1,8, indicaron que la cara inferior (rugosidad baja) presento desgaste (1 mm) mientras que la cara superior (rugosidad media) no presento desgaste; y la combinación 4% GP - 6% OCP con relación  $\frac{Si}{Al} = 1,3$ , la cara inferior (rugosidad baja) presento desgaste (1 mm) y la cara superior (rugosidad media) no presento desgaste; mientras que en la relación  $\frac{Si}{Al} = 1,8$  la cara superior (rugosidad media) presentó mayor desgaste (2,2mm) que la cara inferior (rugosidad baja, desgaste de 0,5 mm). Se esperaría que la cara con más rugosidad permite que el agua penetre más el material haciéndolo más vulnerable, sin embargo, esto no se cumplió en algunos casos, los resultados mostraron que, en algunos bloques con caras más uniformes o lisas, se presentaron mayores desgastes que las caras con más rugosidad.

#### 4.5.3 Resultados de absorción

Tabla 21. Porcentaje de agua absorbida por cada bloque

Tipo	Muestra	Masa seca (g)	Masa húmeda (g)	Masa agua absorbida (g)	Absorción (%)
2	0-10-1	1966	2065	99	5%
	0-10-2	1942	2031	89	5%
3	10-0-1,3-1	2035	2061	26	1%
	10-0-1,3-2	2028	2055	27	1%
	10-0-1,8-1	1951	1988	37	2%
	10-0-1,8-2	2047	2084	37	2%
4	7-3-1,3-1	1865	1886	21	1%
	7-3-1,3-2	2018	2057	39	2%

Tipo	Muestra	Masa seca (g)	Masa húmeda (g)	Masa agua absorbida (g)	Absorción (%)
	7-3-1,8-1	2198	2237	39	2%
	7-3-1,8-2	1905	1928	23	1%
	4-6-1,3-1	2125	2163	38	2%
	4-6-1,3-2	1897	1949	52	3%
	4-6-1,8-1	1900	1934	34	2%
	4-6-1,8-2	2065	2108	43	2%

En la Tabla 21 se puede observar que los bloques tipo 2 (construidos con suelo y cemento) fueron los que más humedad absorbieron; y los bloques que menos humedad absorbió fueron los bloques tipo 3 (construidos con suelo y geopolímero), esto puede dar un indicio de que los bloques construidos con sólo geopolímero posiblemente absorban menos humedad que los bloques construidos con sólo cemento.

#### 4.5.4 Resultados de tracción indirecta

Los bloques tipo 2 no se pudieron someter al ensayo de tracción indirecta porque se presentó una falla en el instrumento utilizado, por tanto, fue necesario cambiar de instrumento para someter los bloques restantes.

Tabla 22. Valores de resistencia máxima de los bloques

Tipo	% GP	% OCP	$\frac{Si}{Al}$	Resistencia (kN)	Promedio
2	0	10	No aplica	Sin dato Sin dato	--
3	10	0	1,3	4,03 4,28	4,155
			1,8	2,44 3,41	2,925
4	7	3	1,3	6,30 4,92	5,61
			1,8	7,17 5,35	6,26
	4	6	1,3	8,44 5,37	6,905
			1,8	5,26 4,83	5,045

En la Tabla 22 se muestra que el bloque que tuvo más resistencia a la compresión es el bloque tipo 4 con combinación 4% GP - 6% OCP y relación  $\frac{Si}{Al} = 1,3$ . Se esperaría que los porcentajes de humedad de cada bloque podrían tener influencia en la resistencia a la compresión, pero en este caso no se cumple ya que en el bloque tipo 4 con combinación 7% GP y 3% OCP con relación  $\frac{Si}{Al} = 1,3$  se observa que los bloques 1 y 2 absorbieron 21 g y 39 gramos de agua y fallaron en 6,30 kN y 4,92 kN respectivamente obteniendo una relación inversa, por otro lado, en la misma combinación con relación  $\frac{Si}{Al} = 1,8$  se tuvo una humedad de 39 g y 23 g de agua con fallas en 7,17 kN y 5,35 kN obteniendo una relación directa.

## 5 CONCLUSIONES

El suelo de la región de Urabá utilizado para los ensayos es un limo inorgánico (suelo de grano fino) de alta compresibilidad.

Los bloques construidos con el material estabilizado presentaron un mejor comportamiento porque sus tasas de erosión fueron menores que los bloques construidos con suelo sin estabilizar.

Los bloques tipo 2, 3 y 4 presentaron un comportamiento positivo de resistencia a la erosión con respecto a los bloques tipo 1. Siendo los bloques tipo 4 (bloques compuestos de suelo, geopolímero y cemento portland) los que presentaron menor erosión (0 – 1 mm) en ambas relaciones  $\frac{Si}{Al}$ , excepto el bloque 4-6-1,8-2 el cual presentó el valor más alto de erosión (2,2 mm).

En términos de resistencia a la tracción indirecta, no fue posible realizar la prueba a los bloques tipo 1 y 2; sin embargo, se obtuvo que la resistencia más alta fue la del bloque estabilizado con 4% GP – 6% OCP y relación  $\frac{Si}{Al} = 1,3$ .

Es importante aclarar que no se encontró relación directa entre la cara expuesta y la tasa de erosión, ya que en algunos bloques con superficie de rugosidad alta la tasa de erosión fue baja, y en otros bloques con superficie de igual rugosidad, no se presentó ningún tipo de desgaste.

Se pudo crear con varias combinaciones suelos resistentes a la erosión, esto trae beneficios económicos ya que se reducen los costos de compra y transporte de materiales, también beneficios medio ambientales porque se reduce la producción de gases de efecto invernadero por la fabricación de cemento portland para su uso como estabilizador de suelos. Además, se comprobó el incremento de la resistencia del suelo a través del ensayo de tracción indirecta.

## 6 RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS

Aunque los ensayos en esta investigación mostraron un beneficio en la resistencia del suelo al usar el cemento híbrido como estabilizador, se recomienda lo siguiente:

- Realizar el estudio con suelos de otros puntos de la región de Urabá.
- Estudiar otras combinaciones de cemento híbrido y otras relaciones  $\frac{Si}{Al}$ .
- Someter bloques a condiciones que puedan simular mejor las condiciones naturales, por ejemplo, un canal de olas y agua salada.
- Estudiar la influencia de otros factores climáticos a los que está expuesta una obra de protección costera (temperatura, salinidad, corrientes, organismos, etc).

## 7 AGRADECIMIENTOS

A la Dirección de Regionalización, la Vicerrectoría de Extensión y a la Vicerrectoría de Docencia de la Universidad de Antioquia como instancias cofinanciadoras del proyecto.

A los profesores Rosalyn Hoyos, Edwin García y Maryory Gómez por su asesoría y dedicación durante la realización de este proyecto.

A la profesora Dina Gómez, por su disposición para aclarar dudas surgidas.

Al técnico del laboratorio de suelos y concretos de la ciudad universitaria Robert Valencia y a los auxiliares de este laboratorio. A la técnica de los laboratorios de la Sede Ciencias del Mar Yuliana Bedoya.

A Valentina y Diego, participantes de este proyecto, por su colaboración y asesoría.

A la oceanógrafa Geraldin Morelo por su indispensable apoyo.

A las personas de mi familia y círculo social que de una u otra manera hicieron parte de este proyecto.

## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Restrepo, J. *Los sedimentos del río Magdalena: un reflejo de la crisis ambiental*. (EAFIT, 2005).
2. Correa, I. & Vernet, G. Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (Sector Arboletes - Turbo) Costa Caribe Colombiana. *Boletín Investig. Mar. y Costeras - INVEMAR* 5–26 (2004).
3. Manrique, J. Estudio experimental de alternativas de protección costera, caso Chelem-Chuburná, Yucatán. (Instituto Politécnico Nacional, México, 2012).
4. Naturales, M. de M. A. y R. *Erosión Costera*. (2016).
5. Carranza, A. Causas y consecuencias de la erosión de playas. *Impactos del cambio climático sobre la Zo. costera* 37–43 (2010).
6. Cabrera, A. *et al.* Los riesgos naturales en el contexto del manejo integrado costero. *Métodos en teledetección Apl. a la prevención riesgos Nat. en el litoral* **10**, (2012).
7. Hinrichsen, D. The coastal population explosion. *Trends Futur. Challenges US Natl. Ocean Coast. Policy* 27–29 (1999).
8. Universidad Católica de Chile. Geomorfología dinámica y climática. Available at: [http://www7.uc.cl/sw\\_educ/geografia/geomorfologia/html/glosario.html](http://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/geomorfologia/html/glosario.html). (Accessed: 19th June 2019)
9. Correa, I., Alcántara, J., Lacambra, C. & Ferreira, O. Introducción a los riesgos naturales en el litoral. *II Man. métodos en teledetección Apl. a la prevención riesgos Nat. en el litoral* **10**, 28–32 (2013).
10. Posada, B. & Henao, W. *Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe Colombiano*. (INVEMAR, 2008).
11. Duque, H. Estilo estructural, diapirismo y episodios de acrecimiento del terreno Sinú-San Jacinto en el noroccidente de Colombia. *Bol. Geológico INGEOMINAS* **27**, 1–29 (1984).
12. Ovalle, J. Aplicación de obras de defensa blandas para la protección de la costa catalana. (Universidad Politécnica de Catalunya, 2012).
13. Obonyo, E., Exelbirt, J. & Baskaran, M. Durability of compressed earth bricks: Assessing erosion resistance using the modified spray testing. *Sustainability* **2**, 3639–3649 (2010).
14. Villa, C. Síntesis de geopolímeros empleando activación alcalina de aluminosilicatos minerales. (Centro de investigaciones en materiales avanzados, S.C. Posgrado, 2013).

15. Gutiérrez, B. Fabricación de morteros geopoliméricos ecoamigables a partir de residuos inorgánicos mineros como producto alternativo a morteros de cemento Portland. (Universidad Católica de San Pablo, 2018).
16. INVIAS. Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua. in *Sección 100, Normas y especificaciones 2012 invias* (2012).
17. INVIAS. Preparación de muestras de suelo por vía seca para análisis granulométrico y determinación de las constantes física INV E 106-13. in *Normas y especificaciones 2012 invias* 89–91 (2012).
18. INVIAS. Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos. in *Normas y especificaciones 2012 invias* 185–204 (2012).
19. INVIAS. Determinación de límite líquido de los suelos INV E 125-13. in *Normas y especificaciones 2012 invias* 207–223 (2012).
20. INVIAS. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos INV E 126-13. in *Normas y especificaciones 2012 invias* 227–235 (2012).
21. INVIAS. Relaciones de humedad - peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación) INV E 142-13. in *Normas y especificaciones 2012 invias* 365–383 (2012).
22. NZS 4298. Norm of New Zealand - Materials and workmanship for earth buildings. *New Zeal. Tech. Committe* **4298**, 1–91 (1998).
23. Das, B. M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. (2001). doi:10.1017/CBO9781107415324.004
24. ASTM. Unified Soil Classification System ASTM D2487. in *Standard practice for classification of soils for engineering purposes* (2017).

## 9 ANEXOS

### CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MORFOLÓGICA

#### METODOLOGÍA

Tanto las materias primas (suelo y fibra de lana mineral de roca) como las probetas de suelo cemento estabilizadas con cemento híbrido se analizaron con el fin de determinar su composición química, mineralógica y morfología. La composición mineralógica se

determinó mediante difracción de rayos X (DRX) en un equipo marca Empryiean PANalytical con radiación de cobre (Cu,  $K\alpha = 1.5419 \text{ \AA}$ ), el barrido estuvo en un rango de  $2\theta$  de  $10^\circ$  a  $100^\circ$  y a un paso de  $0.0394^\circ$ . El análisis de la morfología y la composición química elemental se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS) en un equipo JEOL 6490LV.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 41 se presenta una imagen SEM y el mapa de composición del suelo estabilizado con 4% GP - 6% OCP  $\frac{Si}{Al} = 1,3$ . Como se puede apreciar se observa la formación de productos de reacción, probablemente, sobre la superficie de la fibra. El elemento que se observa en mayor proporción es el oxígeno seguido del Si y el Al, lo cual es congruente con la composición química del suelo; en menores proporciones se observa la presencia de hierro, calcio, magnesio, sodio, potasio y titanio.

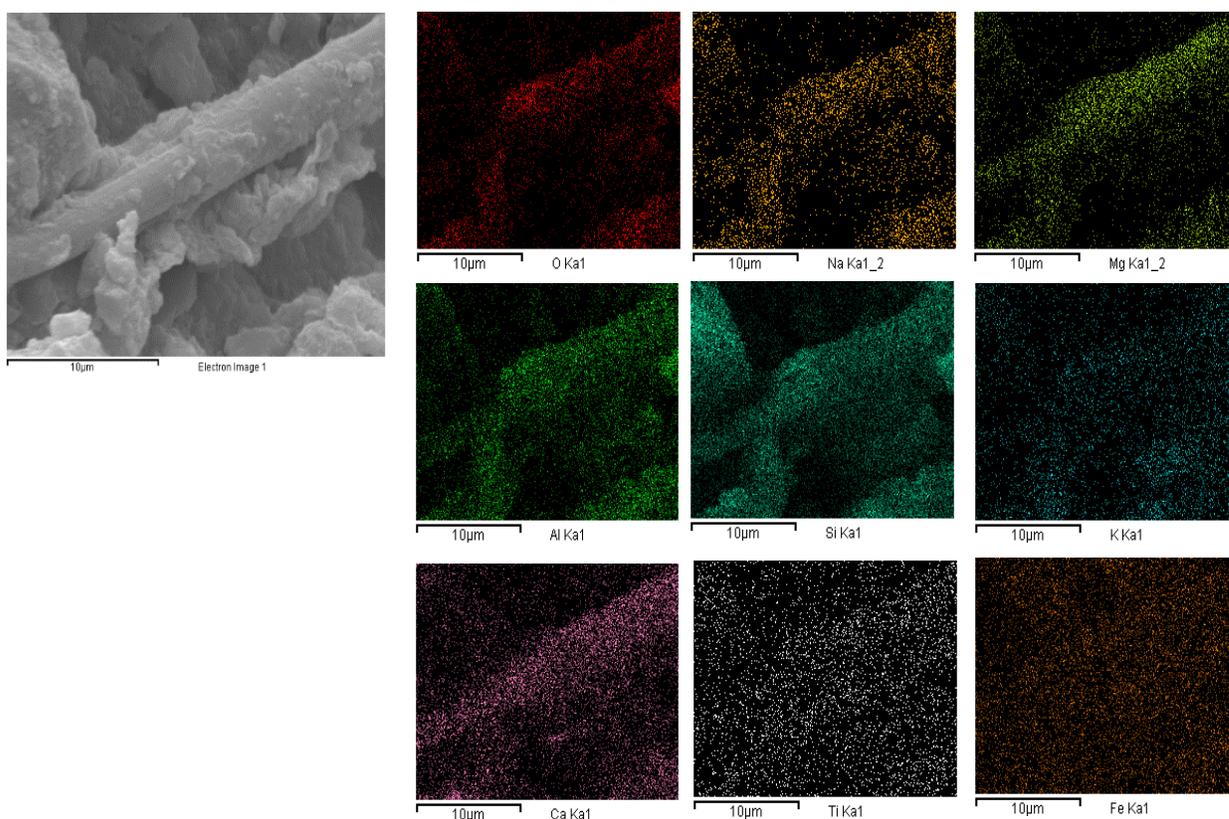
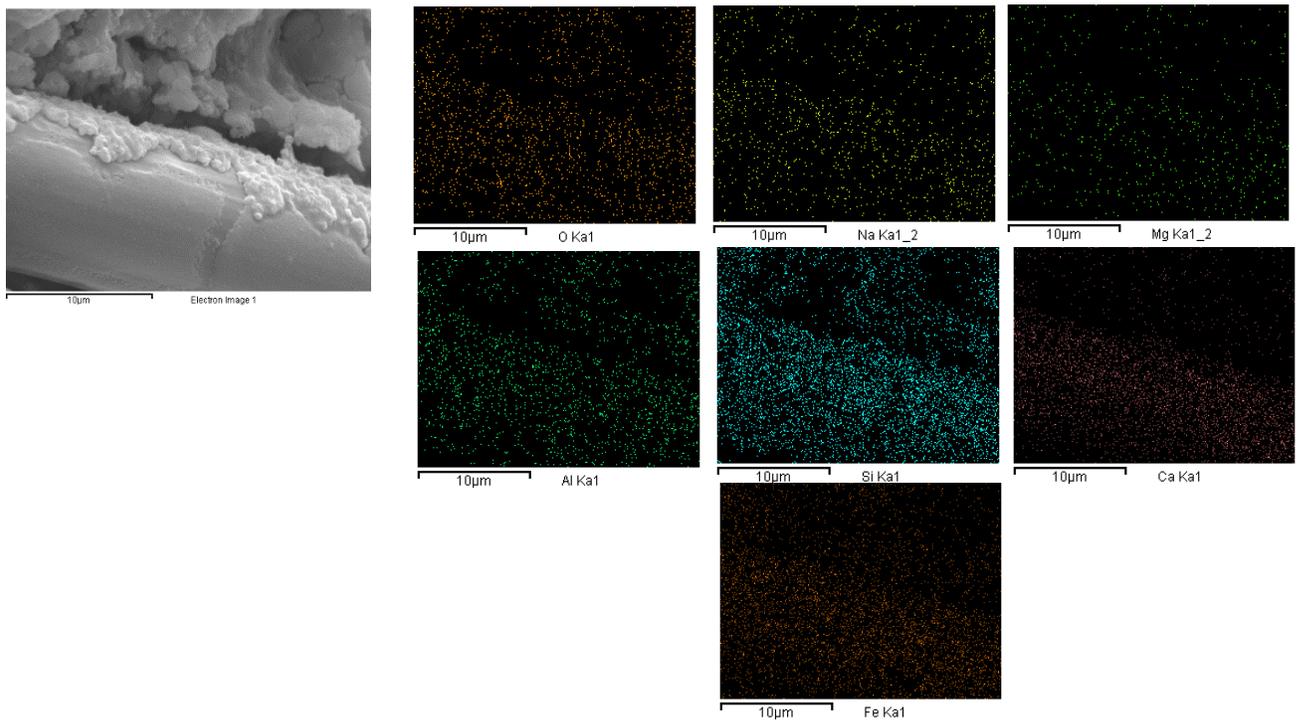


Figura 41. Imagen SEM y mapa de composición del suelo estabilizado con cemento híbrido de composición 4% GP - 6% OCP con la relación  $Si/Al = 1,3$

En la figura 42 se presenta la morfología y mapa de composición química de la muestra de suelo estabilizado con geopolímero únicamente de composición 10% GP - 0% OCP  $Si/Al = 1,3$ . En la imagen SEM se observa la fibra de lana mineral con material adherido a su superficie probablemente producto de las reacciones de geopolimerización, la composición química elemental muestra mayor porcentaje de contenido de oxígeno, silicio, hierro, calcio y aluminio respectivamente y en menores proporciones sodio y magnesio. Por el área que ocupa la fibra en la imagen analizada la composición química está fuertemente influenciada por la fibra de lana mineral.



*Figura 42. Morfología mediante SEM y mapa de composición de la muestra de suelo estabilizado con geopolímero 10% GP - 0% OCP con la relación  $Si/Al = 1,3$*

En la figura 43 se presenta una imagen SEM y el mapa de composición química del suelo estabilizado con cemento híbrido de composición 4% GP - 6% OCP y  $\frac{Si}{Al} = 1,8$ . También en esta imagen se observan productos adheridos a la superficie de las fibras, los cuales seguramente resultan de las reacciones. La composición química de esta imagen se encuentra muy influenciada por la composición de las fibras debido al área que éstas ocupan en la imagen, se puede observar como principales constituyentes oxígeno, silicio,

calcio y aluminio; en menores proporciones magnesio, hierro, sodio y titanio.

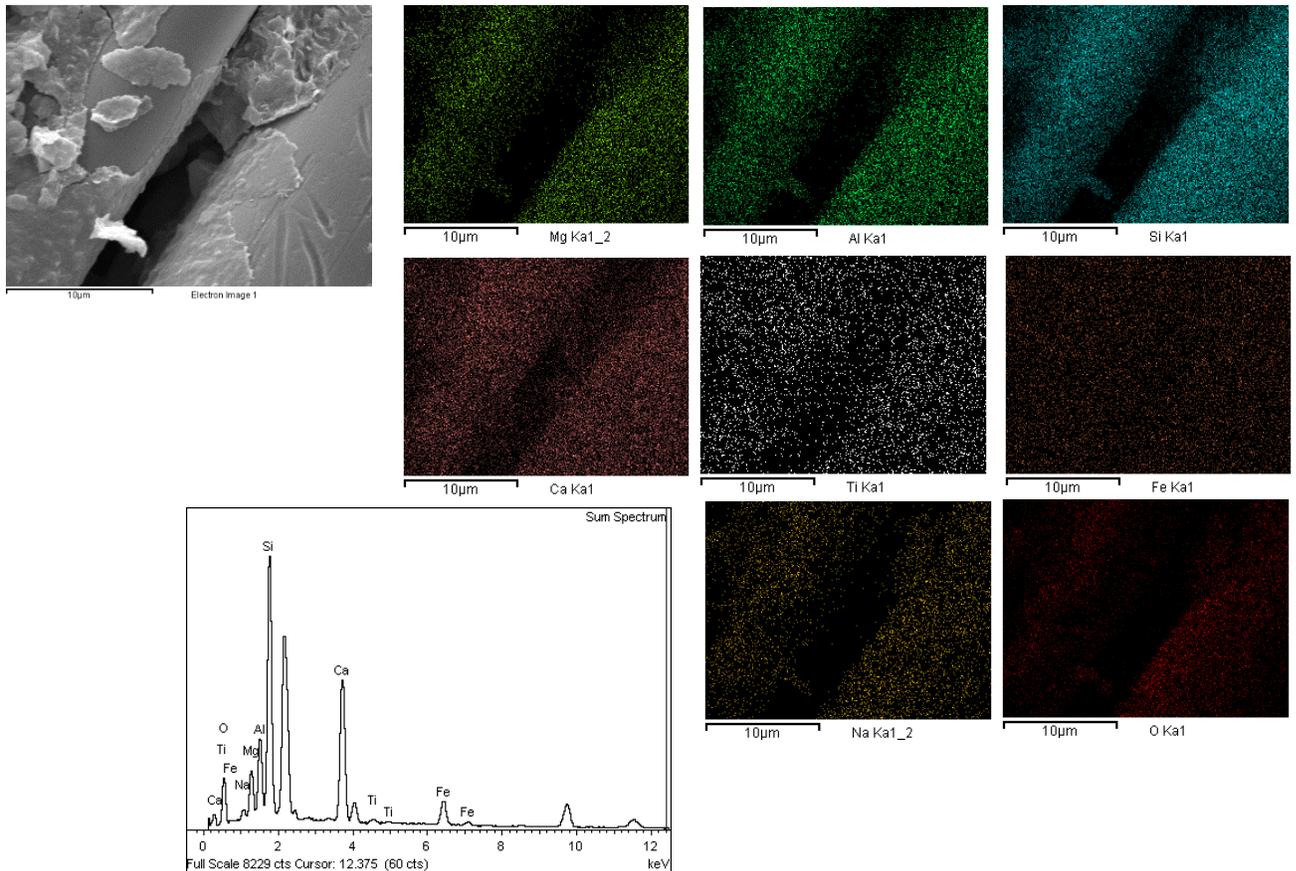


Figura 43. Imagen SEM y mapa de composición del suelo estabilizado con cemento híbrido de composición 4% GP - 6% OCP con la relación Si/Al = 1,8

En la figura 44 se observa el difractograma del suelo en su estado original (blanco), como se puede observar está constituido principalmente por cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) con pequeñas cantidades de vermiculita que es un mineral de la familia de la mica constituido por silicatos de aluminio, hierro y magnesio ( $\text{Mg}_{0,7}(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})_6(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) y montmorillonita que es un silicato perteneciente a los filosilicatos ( $(\text{Na},\text{Ca})_{0,3}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), esta última es una arcilla expansiva que cuando está en mucha cantidad en un suelo al expandirse afecta el desempeño mecánico del mismo.

La figura 45 presenta el DRX del suelo estabilizado con cemento portland únicamente. Como se puede observar la fase principal sigue siendo el cuarzo con pequeñas

cantidades de vermiculita, estas dos fases provenientes del suelo que está en un contenido del 90% en esta mezcla y también se detectó la presencia de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) proveniente del cemento portland.

Los resultados DRX del suelo estabilizado con 10% GP - 0% OCP empleando la relación  $\frac{\text{Si}}{\text{Al}} = 1,3$  se presentan en la figura 46. En el difractograma se encuentra como principal fase constituyente el cuarzo procedente del suelo, vermiculita en pequeñas cantidades y aparece la fase sodalita que es un silicato que se pudo haber formado como producto de las reacciones de polimerización ( $\text{Na}_8(\text{AlSiO}_4)_6\text{Cl}_2$ ).

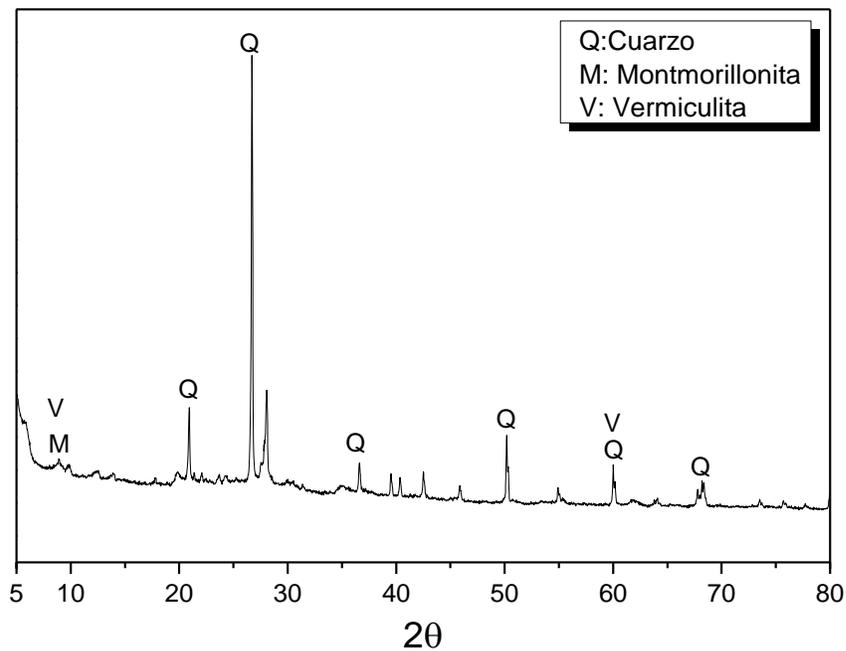


Figura 44. Resultados DRX del suelo sin estabilizar (blanco)

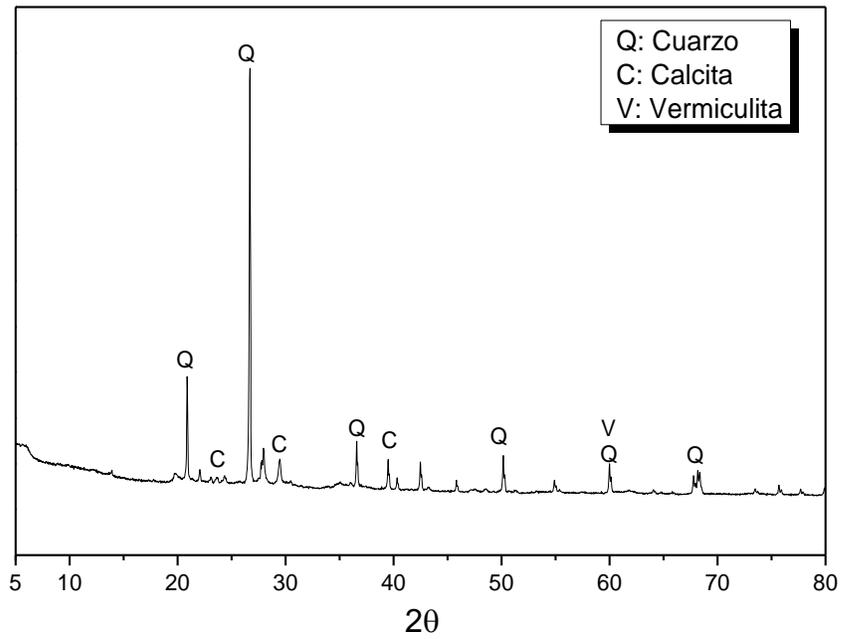


Figura 45. DRX del suelo estabilizado con cemento portland únicamente, suelo 0% GP - 10% OCP

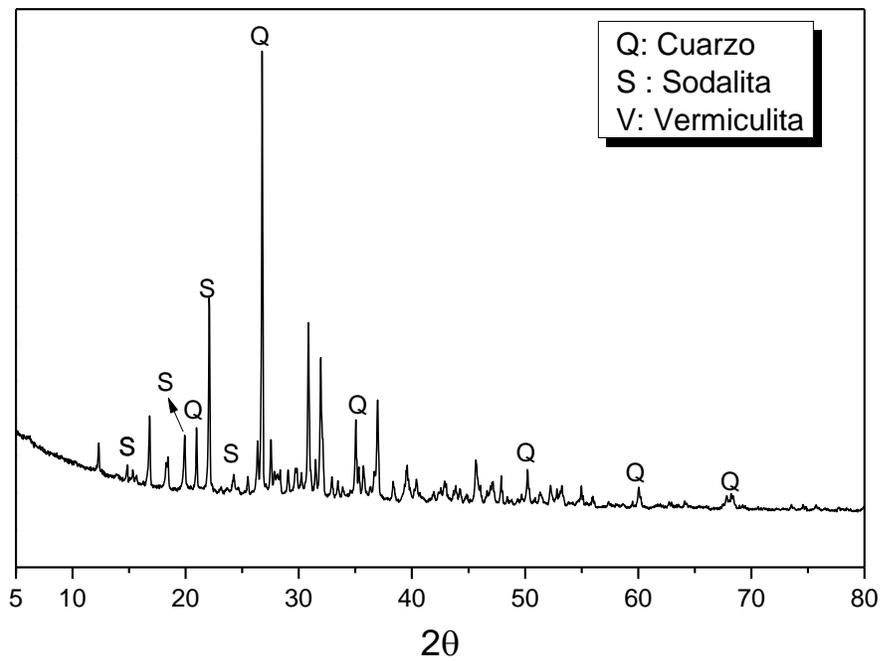


Figura 46. Resultados DRX del suelo estabilizado con geopolímero únicamente, suelo 10% GP - 0% OCP con la relación Si/Al = 1,3

La figura 47 muestra el difractograma del suelo estabilizado con cemento híbrido suelo 4% GP - 6 % OCP con relación  $\frac{Si}{Al} = 1,3$ . Como en los casos anteriores se puede observar cuarzo como constituyente principal con pequeñas cantidades de vermiculita procedentes del suelo y calcita proveniente del cemento portland.

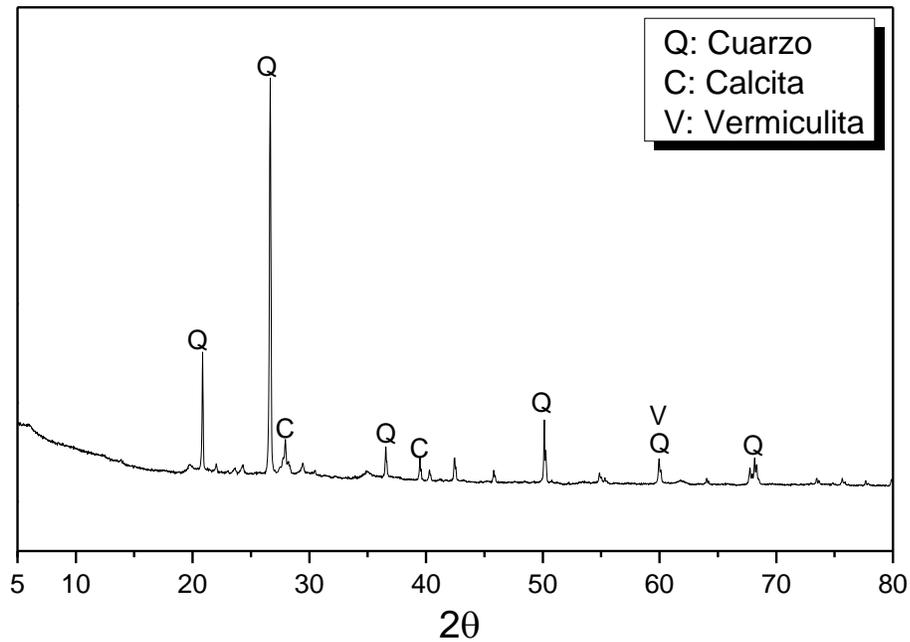


Figura 47. Difractograma del suelo estabilizado con cemento híbrido 4% GP - 6% OCP con la relación  $Si/Al = 1,3$