

**ESTUDIO Y ANALISIS DE TECNICAS PARA EL MEJORAMIENTO DE  
PROPIEDADES GEOTECNICAS EN SUELOS**

**NELSON FERNANDO MORENO VILLALOBOS**

**NUBIA PAMELA SOTO DUARTE**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2012**

**ESTUDIO Y ANALISIS DE TECNICAS PARA EL MEJORAMIENTO DE  
PROPIEDADES GEOTECNICAS EN SUELOS**

**NELSON FERNANDO MORENO VILLALOBOS**

**NUBIA PAMELA SOTO DUARTE**

**Trabajo de grado para optar por el título de**

**Ingeniero Civil**

**Director**

**VLADIMIR E. MERCHAN JAIMES**

**Ingeniero Civil, PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-MECANICAS**

**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

**BUCARAMANGA**

**2012**

## DEDICATORIA

*A Dios gracias, por ser el quien en todo momento se convirtió en mi guía, y quien nos permitió vivir esta experiencia tan maravillosa.*

*A mis padres, quienes me han visto crecer, llorar y reír y que a lo largo de toda mi vida siempre fueron y serán mi mayor orgullo y motivación.*

*A mis hermanos que siempre han sido un ejemplo a seguir, recuerdo sus consejos y anécdotas con nostalgia.*

*En realidad, muchas gracias a esta gran institución y a todos aquellos que fueron partícipe de este proceso, amigos, compañeros, docentes, por su compromiso y palabras alentadoras.*

*Gracias a Ti, Pamela, Por darme la oportunidad de ser tu compañero de tesis de grado, por tu paciencia y compromiso en todo momento, esto también es un triunfo tuyo!!*

*NELSON FERNANDO MORENO VILLALOBOS*

*Quiero dar gracias a Dios, mi guía, por permitirme vivir la mejor  
etapa de mi vida hasta el momento,  
por permitirme con este paso empezar a dar fin a  
la academia y esperar un futuro lleno de éxitos.*

*A mi familia, a mi mamá por su optimismo, inmenso amor,  
por ser madre y amiga.*

*A mi papí por el tiempo compartido  
y las demostraciones de cariño.*

*A mis hermanos Luis y Hugo, muchas gracias  
por apoyarme y por estar en mi vida, los quiero mucho.*

*A mis tíos, a mi familia más cercana por la compañía,  
los consejos y la buena actitud.*

*A mi compañero Fernando por el trabajo que logramos juntos,  
por su ánimo y su incansable disposición,  
este proceso se hizo más sencillo con él.*

*A mis amigos...aquellos que estuvieron conmigo a lo largo de  
mi carrera, a Camilo, Diana, Edgar, Fabián, Gustavo, Malory,  
por tantos años de amistad,  
de momentos que perdurarán en mis recuerdos  
y que espero seguir viviendo con ustedes a lo largo de mi vida.*

*NUBIA PAMELA SOTO DUARTE*

## **AGRADECIMIENTOS.**

A nuestra universidad, a la escuela de ingeniería civil, a nuestros profesores por brindarnos conocimiento y amistad a lo largo de la carrera lo que hoy permiten culminar esta etapa. A nuestro director de proyecto el Ing. Vladimir Merchán, por el apoyo y seguimiento constante en la realización de nuestro proyecto.

A nuestras familias y amigos que de manera incondicional nos brindaron compañía y optimismo.

## CONTENIDO

|                                                               | Pág.      |
|---------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>                                     | <b>20</b> |
| <b>OBJETIVOS .....</b>                                        | <b>21</b> |
| <b>OBJETIVO GENERAL .....</b>                                 | <b>21</b> |
| <b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>                            | <b>21</b> |
| <b>1. ESTABILIZACIÓN Y PROPIEDADES DEL SUELO .....</b>        | <b>22</b> |
| 1.1 GENERALIDADES DE LAS ESTABILIZACIONES .....               | 22        |
| 1.1.1. Parámetros para la estabilización de suelos .....      | 22        |
| 1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS .....                         | 23        |
| <b>1.3 CASOS QUE JUSTIFICAN ESTABILIZAR UN SUELO .....</b>    | <b>23</b> |
| <b>1.4 RAZONES PARA ESTABILIZAR UN SUELO .....</b>            | <b>24</b> |
| <b>1.5 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE ESTABILIZACIÓN .....</b>       | <b>24</b> |
| 1.5.1 Relación tiempo-costo.....                              | 25        |
| 1.5.2 Limitaciones de costo. ....                             | 25        |
| <b>1.6 CONSIDERACIONES EN LA PRÁCTICA DE ESTABILIZAR.....</b> | <b>25</b> |
| <b>2. TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN .....</b>                    | <b>26</b> |
| <b>2.1 ESTABILIZACIÓN TÉRMICA .....</b>                       | <b>27</b> |
| <b>2.2 ESTABILIZACIÓN ELÉCTRICA .....</b>                     | <b>27</b> |

|                                                                                                                                                          |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2.3 ESTABILIZACIÓN FÍSICA.....</b>                                                                                                                    | <b>27</b> |
| <b>2.4 ESTABILIZACIÓN QUÍMICA .....</b>                                                                                                                  | <b>28</b> |
| <b>2.5 MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA DEL SUELO. ....</b>                                                                                                | <b>28</b> |
| <b>3. TÉCNICAS AVANZADAS E IMPLEMENTADAS DE ESTABILIZACIÓN FÍSICA</b>                                                                                    | <b>29</b> |
| <b>3.1 ESTABILIZACIÓN DE SUELO CON CENIZA DE CASCARA DE ARROZ (CCA) Y CAL USADO PRINCIPALMENTE PARA PAVIMENTOS COMPUESTOS POR MATERIAL ARENOSO .....</b> | <b>29</b> |
| 3.1.1 Descripción del método.....                                                                                                                        | 29        |
| 3.1.2 Materiales usados, descripción del suelo estudiado y de la ceniza de cascara de arroz (CCA). ....                                                  | 30        |
| 3.1.3 Muestras de materiales en laboratorio. ....                                                                                                        | 32        |
| 3.1.4 Ensayos aplicados en laboratorio. ....                                                                                                             | 33        |
| 3.1.5 Análisis de resultados de acuerdo a las pruebas de laboratorio .....                                                                               | 33        |
| 3.1.6 Conclusiones del método.....                                                                                                                       | 35        |
| 3.1.7 Análisis cuantitativo y cualitativo .....                                                                                                          | 36        |
| <b>3.2 ESTABILIZACIÓN DE SUELO CON YESO RECICLADO Y DESECHOS PLÁSTICOS .....</b>                                                                         | <b>39</b> |
| 3.2.1 Descripción del método.....                                                                                                                        | 39        |
| 3.2.2 Muestra de materiales en laboratorio .....                                                                                                         | 40        |
| 3.2.3 Ensayos aplicados en laboratorio. ....                                                                                                             | 42        |
| 3.2.4 Análisis de resultados de acuerdo a las pruebas de laboratorio. ....                                                                               | 42        |
| 3.2.5 Conclusiones del método.....                                                                                                                       | 44        |
| 3.2.6 Análisis cuantitativo y cualitativo .....                                                                                                          | 45        |

|                                                                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4. TÉCNICAS AVANZADAS E IMPLEMENTADAS DE ESTABILIZACIÓN QUÍMICA .....</b>                                                     | <b>48</b> |
| <b>4.1 CARACTERIZACIÓN Y TRATAMIENTO DE SUELOS CONTAMINADOS POR ACTIVIDADES MINERAS MEDIANTE MATERIALES REACTIVOS .....</b>      | <b>48</b> |
| 4.1.1 Descripción del método.....                                                                                                | 49        |
| 4.1.2 Localización de los residuos y drenajes mineros .....                                                                      | 49        |
| 4.1.3 Descripción del suelo estudiado, descripción de los métodos utilizados y materiales utilizados.....                        | 50        |
| 4.1.4 Análisis de resultados de acuerdo a las pruebas de laboratorio. ....                                                       | 52        |
| 4.1.5 Análisis de resultados - Ensayos de Lixiviación .....                                                                      | 54        |
| 4.1.6 Análisis de resultados- modelización geoquímica.....                                                                       | 56        |
| 4.1.7 Conclusiones del método.....                                                                                               | 56        |
| 4.1.8 Análisis cuantitativo y cualitativo.....                                                                                   | 58        |
| <b>4.2 BIOMINERALIZACION APLICADA A LA MITIGACION DE PROCESOS EROSIVOS SUPERFICIALES .....</b>                                   | <b>61</b> |
| 4.2.1 Descripción del método.....                                                                                                | 61        |
| 4.2.2 Ensayos aplicados en laboratorio .....                                                                                     | 64        |
| 4.2.3 Análisis de resultados de acuerdo a las pruebas de laboratorio. ....                                                       | 64        |
| 4.2.4 Conclusiones del método.....                                                                                               | 66        |
| 4.2.5 Análisis cuantitativo y cualitativo.....                                                                                   | 69        |
| <b>5. TECNICAS AVANZADAS E IMPLEMENTADAS DE ESTABILIZACION TERMINCA.....</b>                                                     | <b>72</b> |
| <b>5.1 ESTABILIZACION DE SUELOS DE GRANO FINO CON GEOFIBRA Y FLUJO SINTETICO EN ESTADOS DE CONGELACION Y DESCONGELACION.....</b> | <b>72</b> |
| 5.1.1 Descripción del método.....                                                                                                | 72        |
| 5.1.2 Materiales usados.....                                                                                                     | 73        |

|                                                |           |
|------------------------------------------------|-----------|
| 5.1.3 Ensayos aplicados en laboratorio.....    | 75        |
| 5.1.4 Análisis de resultados.....              | 76        |
| 5.1.5 Conclusiones del método.....             | 78        |
| 5.1.6 Análisis cuantitativo y cualitativo..... | 79        |
| <b>6. CONCLUSIONES</b>                         | <b>82</b> |
| <b>7. BIBLIOGRAFIA</b>                         | <b>83</b> |
| <b>8. ANEXOS</b>                               | <b>85</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                               | <b>Pág.</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Figura 1. Muestras tipo de la cáscara de arroz, a medio quemar y ceniza ..... | 31          |
| Figura 2. Vista general de la columna.....                                    | 52          |
| Figura 3. Principio de la formación de Biosealing y Biogrout en arena .....   | 62          |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                           | Pág. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabla 1. Métodos para mejorar la resistencia del suelo.....                               | 28   |
| Tabla 2. Distribución porcentual de los granos y propiedades de la muestra .....          | 31   |
| Tabla 3. Propiedades de la ceniza de la cáscara de arroz .....                            | 32   |
| Tabla 4. Propiedades de la cal.....                                                       | 32   |
| Tabla 5. Composición de las muestras de laboratorio .....                                 | 33   |
| Tabla 6. Composición de las muestras de laboratorio II .....                              | 33   |
| Tabla 7. Análisis de resultados .....                                                     | 34   |
| Tabla 8. Análisis cuantitativo del tratamiento .....                                      | 36   |
| Tabla 9. Análisis cualitativo del tratamiento .....                                       | 38   |
| Tabla 10. Propiedades de la muestra de suelo.....                                         | 40   |
| Tabla 11. Contenido de yeso reciclado por masa de suelo .....                             | 41   |
| Tabla 12. Contenido de tiras de poli-estireno .....                                       | 41   |
| Tabla 13. Análisis de resultados pruebas de suelo y basanita .....                        | 42   |
| Tabla 14. Análisis de resultados pruebas de suelo, basanita y bandas de plástico<br>..... | 43   |
| Tabla 15. Análisis cuantitativo del tratamiento .....                                     | 45   |
| Tabla 16. Análisis cualitativo del tratamiento .....                                      | 47   |
| Tabla 17 Resumen y descripción de ensayos realizados .....                                | 48   |
| Tabla 18. 6Elementos determinados por medio de activación neutrónica .....                | 50   |
| Tabla 19. Composición Oxido de magnesio. Calidad “L” .....                                | 53   |

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 20. Composición geoquímica de los suelos de referencia .....                          | 53 |
| Tabla 21. Parámetros “In situ” medidos en los ensayos .....                                 | 54 |
| Tabla 22. Parámetros “In situ” medidos en los ensayos II .....                              | 55 |
| Tabla 23. Resultados de inmovilización .....                                                | 56 |
| Tabla 24. Análisis cuantitativo del tratamiento .....                                       | 58 |
| Tabla 25. Análisis cualitativo del tratamiento .....                                        | 60 |
| Tabla 26. Valores de cohesión y ángulo de fricción, Muestras saturadas y no saturadas ..... | 64 |
| Tabla 27. Análisis cuantitativo del tratamiento .....                                       | 69 |
| Tabla 28. Análisis cualitativo del tratamiento .....                                        | 71 |
| Tabla 29. Propiedades de la muestra de suelo .....                                          | 73 |
| Tabla 30. Propiedades y tipo de geo-fibra .....                                             | 74 |
| Tabla 31. Propiedades del líquido sintético .....                                           | 75 |
| Tabla 32. Mejora a través del uso de la geo-fibra .....                                     | 76 |
| Tabla 33. Mejora a través del uso de fluido sintético .....                                 | 76 |
| Tabla 34. Mejora a través del uso de geo-fibra y fluido sintético .....                     | 77 |
| Tabla 35. Análisis cuantitativo del tratamiento .....                                       | 79 |
| Tabla 36. Análisis cualitativo del tratamiento .....                                        | 81 |

## LISTA DE ANEXOS

|                                                                                                                                                                                 | Pág. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ANEXO ¡Error! Marcador no definido.                                                                                                                                             |      |
| ANEXO 2. TIPOS DE ESTABILIZACION ELECTRICA .....                                                                                                                                | 87   |
| ANEXO 3. TIPOS DE ESTABILIZACION FISICA Y QUIMICA .....                                                                                                                         | 88   |
| ANEXO 4. ENSAYOS DE LABORATORIO .....                                                                                                                                           | 94   |
| ANEXO 5. GRAFICAS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CCA Y CAL                                                                                                                     | 98   |
| ANEXO 6. GRAFICAS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS BASANITA Y TIRAS<br>DE RESIDUOS DE PLASTICO.....                                                                                 | 100  |
| ANEXO 7. GRAFICAS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS<br>CARACTERIZACION Y TRATAMIENTO DE LOS SUELOS<br>CONTAMINADOS POR ACTIVIDADES MINERAS MEDIANTE<br>MATERIALES<br>REACTIVOS.....  | 104  |
| ANEXO 8. GRAFICAS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE<br>BIOMINERALIZACION APLICADA A LA MITIGACION DE PROCESOS<br>EROSIVOS SUPERFICIALES.....                                      | 109  |
| ANEXO 9. GRAFICAS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBS DE<br>ESTABILIZACION DE SUELOS DE GRANO FINO CON GEOFIBRA Y<br>FLUJO SINTETICO EN ESTADOS DE CONGELACION Y<br>DESCONGELACION..... | 116  |

## RESUMEN

**TITULO:** ESTUDIO Y ANALISIS DE TECNICAS PARA EL MEJORAMIENTO DE PROPIEDADES GEOTECNICAS EN SUELOS\*

**AUTOR:** NELSON FERNANDO MORENO VILLALOBOS  
NUBIA PAMELA SOTO DUARTE\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Estabilización, Técnicas, Tratamiento, Mejora, Propiedades de Suelo.

### CONTENIDO:

En ocasiones el suelo no presenta las propiedades ingenieriles adecuadas que cumplan condiciones de resistencia y estabilidad para ser utilizado en la construcción, es de uso común que al presentarse un problema de suelo su solución se plantee desde el diseño y no desde un estudio geotécnico el cual permite acudir a múltiples técnicas de estabilización con el fin de mejorar las características del terreno, hacerlo apto y seguro para una posterior obra.

Múltiples métodos están siendo aplicados a lo largo del progreso de la ingeniería civil, existen tipos de estabilizaciones que a su vez presentan una gran variedad de soluciones particularizadas para cada tipo de suelo y el proyecto que se tenga planeado, existen desde procesos sencillos y prácticos pasando a otros mucho más complejos y estructurados todos con el fin de corregir las fallas y hacerlo capaz de resistir las distintas solicitaciones a las que estará sometido. Este trabajo no sólo se logra con la utilización de herramientas y materiales habituales que se encuentran directamente en las propias obras, sino con la utilización de otros tipos como residuos que pueden ser empleados como estabilizantes.

El presente trabajo analiza y expone el estado del arte de las técnicas de tratamientos y estabilizaciones de suelos, tiene por objetivo ampliar y difundir el conocimiento de las diferentes metodologías de mejoramiento de terrenos con características deficientes para la construcción de obras civiles mediante la recopilación de información de procedimientos empleados, haciendo énfasis en aquellos que permiten encontrar un equilibrio en cuanto a la magnitud del proyecto, la viabilidad del mismo, su contribución con el medio ambiente, el tiempo y el dinero.

---

\*Proyecto de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánica. Escuela de Ingeniería Civil. Director Ing. PhD Vladimir E. Merchan Jaimes.

## **ABSTRACT**

**TITLE:** STUDY AND ANALYSIS TECHNIQUES FOR IMPROVING SOIL GEOTECHNICAL PROPERTIES\*

**AUTHOR:** NELSON FERNANDO MORENO VILLALOBOS  
NUBIA PAMELA SOTO DUARTE\*\*

**KEY WORD:** Stabilization, Techniques, Treatment, Improvement, Soil Properties.

## **CONTENT:**

Occasionally ground has not the right engineering properties which satisfy strength and stability conditions for use in construction. Currently, this situation has become a problem. Besides, many times when a soil shows geotechnical troubles, the solution for those troubles is modify the design's soil instead of do a geotechnical study which allows us choose multiples improvement techniques, in order to improve soil's characteristics, and make it much safety and suitable for any civil construction.

Multiple methods are being applied throughout the progress of civil engineering; there are stabilization types which at the same time have a variety of particularized solutions for each type of soil and the planned project has, existed since the process was simple and practical to much more complex and structured; all to correct the flaws and make it capable of withstanding various stresses, which will be submitted. This work not only achieved with the use of regular tools and materials that are located directly in the works themselves, but also with the use of other types as residues that can be used as stabilizers.

The present work analyzes and exposes the art's state of the treatment techniques and soil stabilization, in order to expand and distribute the knowledge of the different methods to improve poor land features for civil constructions, through collecting information on procedures used, emphasizing those that allow a balance in terms of magnitude of the project, feasibility, contribution to the environment, time and money.

---

\* Grade Project

\*\*Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director Ing. PhD Vladimir E. Merchan Jaimes.

## INTRODUCCIÓN

Colombia es un país que presenta una gran variedad de suelos cada uno particular por sus características geológicas, geotécnicas y por sus factores ambientales. En muchos casos, las propiedades mecánicas presentan serias deficiencias y por lo tanto, se tiene como consecuencia procesos de inestabilidad, baja capacidad de carga, levantamientos, hundimientos. Por lo general cuando se tienen situaciones en las que las propiedades de los materiales en los suelos son bajas, se ataca el problema desde el punto de vista del diseño, y pocas veces se acude a utilizar técnicas para el mejoramiento de tales propiedades mecánicas.

Las técnicas de mejoramiento del terreno han sido implementadas en muchos países como aspecto complementario al diseño de las obras, proporciona diversos mecanismos para afrontar múltiples tipos de problemas en cuanto a estabilidad y mejoramiento del terreno y cubre desde métodos físicos hasta químicos. Siendo Colombia un país que trabaja este tipo de técnicas en tan baja escala hacemos énfasis en las ya conocidas y presentamos múltiples procedimientos ya aplicados en otros lugares desde sus bases teóricas hasta la aplicación, en que circunstancia se debe emplear y bajo qué restricciones, que tan viable es el método identificado en cuanto a medio ambiente, tiempo y desde el punto de vista económico, en aras de conocerlas en primera instancia y lograr que se implementen en el país.

El mejoramiento de suelos promete grandes avances en la evolución de la construcción dando un enfoque práctico desde la academia para aplicarlo a nivel profesional, trabaja y mejora el terreno desde la Geotecnia permitiendo aprovechar al máximo las características de cada lugar.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

- ✓ Proponer técnicas alternas para el mejoramiento de las propiedades mecánicas y estabilización de suelos, haciendo énfasis en los diferentes métodos geotécnicos de uso actual.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Realizar una investigación bibliográfica de las diferentes técnicas de mejoramiento de suelos.
- ✓ Analizar la información obtenida desde el punto de vista de aplicabilidad, ventajas, desventajas y costos aproximados de algunas de ellas.
- ✓ Determinar la relación beneficio-costos de los métodos de uso común en el mejoramiento y estabilización de suelos colombianos frente al uso de técnicas alternas en el tratamiento de estos.

## 1. ESTABILIZACIÓN Y PROPIEDADES DEL SUELO

El desarrollo de investigaciones de las condiciones de un terreno indican si se requiere mejorar o estabilizar, a continuación se exponen definiciones preliminares indispensables en el estudio del suelo.

### 1.1 GENERALIDADES DE LAS ESTABILIZACIONES

La estabilización es un proceso mediante el cual se manipula un suelo para mejorar sus características y aprovechar sus cualidades. Como menciona Fratelli<sup>1</sup>, no todos los terrenos son naturalmente adecuados para resistir una determinada carga impuesta por cualquier tipo de estructura que se construirá sobre este.

**1.1.1. Parámetros para la estabilización de suelos.** Los principales aspectos para los cuales se aplica el mejoramiento del terreno son:

- **Compresibilidad.** Los cambios de volumen tienen influencia en las propiedades de los suelos, modificación en la permeabilidad, alteración de las fuerzas existentes entre las partículas tanto en magnitud como en el sentido, lo que influye en la modificación de la resistencia del suelo a esfuerzos cortantes.
- **Resistencia Mecánica.** Es la capacidad del suelo para soportar cargas aplicadas sin deformarse y sin afectar las cualidades de este.
- **Permeabilidad.** Consiste en la capacidad inherente de los suelos en permitir el flujo de líquidos. Dependen del tamaño de sus partículas, es decir la resistencia que opone a la filtración.

---

<sup>1</sup> FRATELLI, Maria. Suelos, Fundaciones y Muros. Venezuela: Astrom, 1993. p. 93

- **Cohesión.** Máxima resistencia del suelo a la tensión, se da por la adhesión coloidal de las superficies de las partículas. El valor de cohesión que se utiliza para diseñar depende directamente del drenaje del suelo y del método a emplear.
- **Estabilidad Volumétrica.** Capacidad del suelo para no presentar cambios volumétricos como expansión y contracción debido a los cambios de humedad.
- **Durabilidad.** Se puede definir como la propiedad del suelo en resistir la acción del ambiente, el ataque químico y otros factores que puedan afectar sus características mecánicas, manteniendo sus propiedades.

## 1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

“Agrupar los suelos por la semejanza de sus propiedades y comportamiento, así como correlacionar propiedades con los grupos de un sistema de clasificación, aunque se considere un proceso empírico, permite resolver problemas aparentemente sencillos” <sup>2</sup>.

## 1.3 CASOS QUE JUSTIFICAN ESTABILIZAR UN SUELO

Según Díaz <sup>3</sup>, existen unos casos puntuales que justifican una estabilización:

- Suelo de desfavorable, o muy arenoso o muy arcilloso.
- Materiales en el límite de las especificaciones.
- Condiciones de humedad desfavorable.
- Suelo con baja resistencia y poca capacidad de carga.

---

<sup>2</sup> BRAJA M, DAS .Principios de Ingeniería de Cimentaciones. México: Thompson Learning, 2001. Ed 4. 880. P.

<sup>3</sup> DÍAZ, Caridad. Estabilización de un suelo de la formación Toledo con Cemento Portland y Sistema Rocamix Liquido. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Habana: Instituto Superior politécnico “José Antonio Echeverría”. Facultad de Ingeniería Civil. 2010. 102 p.

## **1.4 RAZONES PARA ESTABILIZAR UN SUELO**

“Si el suelo natural no cumple con las características geotécnicas requeridas se hace necesaria una técnica de mejoramiento, en la que se logre”<sup>4</sup>:

- Reducir el asentamiento de las estructuras y la compresibilidad.
- Incrementar o disminuir la permeabilidad.
- Mejorar o aumentar la resistencia cortante del suelo e incrementar así la capacidad de carga de las cimentaciones superficiales.
- Reducir el levantamiento debido a heladas o expansión de arcilla.
- Reducir el índice e vacíos y el contenido de humedad, limitar posibilidades de licuefacción.
- Aumentar la rigidez, lo cual ayuda a evitar la licuefacción.
- Inmovilizar y estabilizar los contaminantes en el suelo.

## **1.5 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE ESTABILIZACIÓN**

De acuerdo con Fratelli <sup>5</sup>, a partir del diseño y la elección del método de mejoramiento y estabilización, se debe tener presente factores como:

- El tipo de suelo y sus características geotécnicas.
- Las propiedades del que el suelo posee y las que carece.
- El área y la profundidad del tratamiento requerido.
- El tipo de estructura y la forma en la que se distribuyen las cargas.
- La magnitud de los asentamientos permisibles.
- La disponibilidad de materiales, equipo, mano de obra y factor económico.

---

<sup>4</sup> BRAJA M, DAS, Op. Cit., p. 764.

<sup>5</sup> Fratelli, Op. Cit., p. 98.

**1.5.1 Relación tiempo-costo.** Cuando se hace el estudio y factores de estabilización de un suelo, la economía y el tiempo de desarrollo del proyecto son factores relevantes en la selección de la técnica a aplicar. Suarez <sup>6</sup> la define como: El objetivo es lograr un diseño efectivo, económico y que se pueda llevar a cabo dentro del tiempo establecido.

**1.5.2 Limitaciones de costo.** El mejoramiento se considera efectivo cuando es llevado a cabo en su totalidad. “Partiendo de que en la ejecución de toda obra hay limitaciones de costos, se hace conveniente plantear diferentes alternativas y evaluar sus costos totales, de modo que esta evaluación sea una de las razones que nos permitan tomar la decisión adecuada”<sup>7</sup>.

## **1.6 CONSIDERACIONES EN LA PRÁCTICA DE ESTABILIZAR**

Díaz <sup>8</sup> menciona que las diferentes técnicas para la estabilización y mejoramiento de suelos, han sido agrupadas considerando el diseño y concepción de cada una de estas:

- In situ: Incluye los métodos de mejoramiento de suelos en el lugar de origen para realizar la estabilización sobre ellos.
- Métodos mediante sustitución: Consiste en el retiro de cierto espesor de suelo y sustituirlo por otro suelo de mejores características.

---

<sup>6</sup> SUAREZ, Jaime. Deslizamientos. Tomo II: Técnicas de remediación. En: Métodos de manejo y remediación. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2009. p. 44

<sup>7</sup> Ibid., p. 45.

<sup>8</sup> DÍAZ, Caridad. Estabilización de un suelo de la formación Toledo con Cemento Portland y Sistema Rocamix Liquido. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Habana: Instituto Superior politécnico “José Antonio Echeverría”. Facultad de Ingeniería Civil. 2010. 102 p.

## 2. TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN

Existen técnicas que potencian propiedades del suelo. Según Díaz, Mejía <sup>1</sup>, en ocasiones estos generan aumentos proporcionados de los costos de materiales, por lo tanto se deben considerar ciertas soluciones previas mencionadas a continuación al momento de escoger la definitiva:

- Considerar como parte del proceso constructivo, la remoción total o parcial del suelo natural y realizar una sustitución por un suelo que cumpla con las condiciones requeridas.
- Determinar la calidad del suelo natural, y contemplar la posibilidad de traer suelo con mejores características geotécnicas, y compactarlo sobre el suelo natural de tal forma que dicho suelo pueda ofrecer los requerimientos de estabilidad para la obra.
- Alterar y modificar las condiciones del suelo, estas modificaciones pueden incluir alteración de sus propiedades mecánicas o químicas, mediante una técnica de estabilización y mejoramiento de tal forma que a través de este proceso permita adecuar las condiciones geotécnicas de la exigencia del proyecto.

Este trabajo considerará solamente la tercera opción, el mejoramiento o la estabilización de suelos.

---

<sup>1</sup> DIAZ, Jesús. y MEJIA, Julio. Estabilización de suelos mediante el uso de un aditivo químico a base de compuestos orgánicos. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: UIS. Facultad de Ingenierías físico- mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. 2004. 362 p.

## **2.1 ESTABILIZACIÓN TÉRMICA**

Esta estabilización es de tipo experimental, es costosa y su aplicación se limita a aquellas condiciones que no son apropiadas para otros métodos. Suarez <sup>2</sup> ilustra un ejemplo de este tipo de estabilización, podría tratarse, de un tratamiento térmico de arcillas expansivas donde se concluye una reducción del potencial de variación de volumen del material frente a una temperatura de 200°C. Se presenta tipos de estabilización térmica. Ver anexo 1.

## **2.2 ESTABILIZACIÓN ELÉCTRICA**

De la Rosa-Pérez <sup>3</sup>, refiere dicha estabilización al uso de procesos físico-químicos en el mejoramiento de suelos. En los métodos de estabilización eléctrica podemos encontrar métodos representativos. Ver anexo 2.

## **2.3 ESTABILIZACIÓN FÍSICA**

Es la mejora del suelo con cambios físicos sin alterar su composición química, donde se redistribuyen, añaden o remueven partículas del suelo. Merritt <sup>4</sup> resalta, que en gran parte el objetivo radica en aumentar la densidad del suelo, disminuir el contenido de agua o mejorar la graduación, para así hacerlo resistente al tipo de carga que se pretende soporte. Ver anexo 3.

---

<sup>2</sup> SUAREZ. Jaime. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander, 1998. 548 p.

<sup>3</sup> DE LA ROSA- PÉREZ, David. Revista Internacional de contaminación ambiental. EN: Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo. México. Vol.23, No. 3 (jul.-sep.2007); p. 5.

<sup>4</sup> MERRITT. Frederick. Manual del ingeniero civil. En: Estabilización física. 3 ed. México: McGraw-Hill. Tomo 1, 1996.

## 2.4 ESTABILIZACIÓN QUÍMICA

Valdez <sup>5</sup> afirma que es la alteración de las propiedades del suelo agregando un producto o estabilizador, el cual se debe mezclar de manera homogénea y curar el suelo de modo que se produzca intercambios iónicos entre partículas logrando una modificación de las relaciones estructurales. Ver anexo 3.

## 2.5 MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA DEL SUELO.

Muchas de las estabilizaciones realizadas en la práctica contemplan el mejoramiento de la resistencia del suelo, así mismo “se incluyen procesos físicos y químicos que aumentan la cohesión y fricción del suelo modificado o de la mezcla suelo producto estabilizante. De tal modo, las obras pueden ser definitivas o pueden ser temporales de acuerdo al método de la estabilización” <sup>6</sup>. Tabla.1.

**Tabla 1. Métodos para mejorar la resistencia del suelo.**

| MÉTODO                                     | VENTAJAS                                                                                       | DESVENTAJAS                                                           |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Inyecciones.                               | Endurecen el suelo y pueden cementar la superficie de falla.                                   | Posible disminución de permeabilidad                                  |
| Magnificación.                             | Convierte el suelo en roca dura.                                                               | Uso experimental.                                                     |
| Congelación.                               | Endurece el suelo.                                                                             | Efectos no permanentes.                                               |
| Explosivos.                                | Fragmentan la superficie de falla.                                                             | Efecto limitado.                                                      |
| Compactación profunda o columnas de grava. | Mejora el suelo en la zona de superficie de falla, los equipos alcanzan grandes profundidades. | Equipos costosos. En el proceso se pueden generar presiones de poros. |

*Fuente: Clasificación de suelos. “Manual Del Ingeniero Civil”. Frederick S. Merritt. Tercera edición.*

<sup>5</sup> VALDEZ, Carlos. Estudio comparativo de estabilización de un suelo arcilloso altamente expansivo, utilizando un co-polímero multienzimático. Trabajo de grado maestría en ingeniería civil. México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de ingeniería civil. 2008. 165 p.

<sup>6</sup> SUAREZ, Jaime. Deslizamientos. Tomo II: Técnicas de remediación, Op. Cit., p. 26.

### **3. TÉCNICAS AVANZADAS E IMPLEMENTADAS DE ESTABILIZACIÓN FÍSICA**

#### **3.1 ESTABILIZACIÓN DE SUELO CON CENIZA DE CASCARA DE ARROZ (CCA) Y CAL USADO PRINCIPALMENTE PARA PAVIMENTOS COMPUESTOS POR MATERIAL ARENOSO**

El tratamiento de suelo con ceniza de cáscara de arroz y cal se implementa principalmente en pavimentos donde el volumen tránsito es medio o bajo con el fin de optimizar las propiedades del suelo y hacerlo apto para la construcción de subrasante, sub-base y base en este caso en particular.

La aplicación del método genera no solo beneficios económicos sino ambientales, la cáscara de arroz es el mayor residuo resultante de la producción agrícola de granos y su disposición final es uno de los mayores problemas existentes en los países productores. Ali: “Cada cuatro toneladas de arroz producidas generan una tonelada es cáscara de arroz, en los países productores” <sup>1</sup>, la cual es quemada para reducir su volumen y ser utilizada como energético en calderas para proceso de parbolización, como combustible en la producción de cemento portland, en la generación de energía eléctrica y múltiples usos.

**3.1.1 Descripción del método.** Durante el proceso de quema de la cáscara se volatilizan los componentes orgánicos (celulosa y lignina) quedando como sobrante la ceniza.

---

<sup>1</sup> ALI, F.H., ADNAN, A. y CHOY, C.K. Geotechnical and Geological Engineering. EN: Geotechnical Properties of a Chemically Stabilized Soil from Malaysia with Rice Husk Ash as an Additive. Malasia. Vol.10, 1992; p. 117-134, citado por BEHAK, Leonardo.

“La constitución de la ceniza de cáscara de arroz (CCA) es aproximadamente un 20% en peso de la cáscara de la cual fue quemada” <sup>2</sup>.

Los suelos arenosos o limosos muchas veces no presentan propiedades adecuadas como materiales de capas de base o sub-base de pavimentos y por lo general son frecuentes en las regiones de cultivo de arroz.

La estabilización de este tipo de suelos mencionados con adición de CCA y cal es una alternativa de interés. Juliano: “Teniendo que la CCA está compuesta entre 90 a 96% por sílice, proporcionaría a los suelos la sílice necesaria para reaccionar con la cal y formar productos puzolánicos, obteniéndose así, materiales más resistentes, menos deformables y más durables” <sup>3</sup>.

### **3.1.2 Materiales usados, descripción del suelo estudiado y de la ceniza de cascara de arroz (CCA).**

El presente estudio se desarrolló en la ciudad de Montevideo (Uruguay) y actualmente se realizan procesos semejantes en Sabanalarga (Atlántico).

- **Muestras de suelo.** Mineralógicamente presenta en la fracción gruesa de suelo cuarzo, mientras que como fracción fina predomina arcilla tipo caolinita y montmorillonita que también se considera un mineral del grupo de los silicatos. La especificación de la muestra se muestra en la Tabla.2:

---

<sup>2</sup> JULIANO, B.O. American Association of Cereal Chemists. EN: Rice: Chemistry and Technology.1985, citado por BEHAK, Leonardo.

<sup>3</sup> Ibid., p. 35, citado por BEHAK, Leonardo.

**Tabla 2. Distribución porcentual de los granos y propiedades de la muestra.**

| DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA         |       |
|-------------------------------------|-------|
| Grava                               | 1.40% |
| Arena                               | 92.1% |
| Limo                                | 0.90% |
| Arcilla                             | 5.60% |
| PROPIEDADES FÍSICAS Y CLASIFICACIÓN |       |
| I.P                                 | 0     |
| Gravedad Específica                 | 2.65  |
| SUCS                                | SW-SC |

*Fuente: “Estabilización con CCA”, Facultad de Ingeniería, Universidad De La Republica, Uruguay.*

• **Ceniza de cáscara de arroz.** La ceniza de cáscara de arroz fue obtenida de una planta de parbolización, la temperatura de quema no es controlada así que presenta un color negro, siguiendo la propuesta de Houston <sup>4</sup>. En la Fig. 1, se representan tres tipos de muestras donde hay clara variación de color y la Tabla.3 revela su distribución granulométrica.

**Figura 1. Muestras tipo de la cáscara de arroz, a medio quemar y ceniza.**



*Fuente: “Estabilización con CCA”, Facultad de Ingeniería, Universidad De La Republica, Uruguay.*

Se obtiene intensidad mayor de cristobalita y de carbón que marcan que indican que la ceniza tiene estructura cristalina, lo que afecta su actividad puzolánica.

<sup>4</sup> HOUSTON. D.F. American Association of Cereal Chemists, Rice Hulls. EN: Rice: Chemistry and Technology. 1972; p. 301-340. 1972, citado por BEHAK, Leonardo.

**Tabla 3. Propiedades de la ceniza de cáscara de arroz.**

| DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA |       |
|-----------------------------|-------|
| Pasa Tamiz N°4 (4760 µm)    | 99.6% |
| Pasa Tamiz N°200 (74 µm)    | 11.8% |
| Pasa 2 µm                   | 0.80% |
| Materia Orgánica            | 18.7% |
| Gravedad Específica         | 1.81  |

Fuente: “Estabilización con CCA”, Facultad de Ingeniería, Universidad De La Republica, Uruguay.

Sólo la sílice amorfa es capaz de reaccionar químicamente con los iones de calcio de la cal, formando productos cementantes que estabilizan el suelo arenoso.

- **Cal – tipo calcita.** La distribución granulométrica y las propiedades se muestran en la Tabla.4:

**Tabla 4. Propiedades de la cal.**

| DISTRIBUCION GRANULOMETRICA |       |
|-----------------------------|-------|
| Pasa Tamiz N°10 (2mm)       | 100%  |
| Pasa Tamiz N°200 (0.074mm)  | 92.9% |
| PROPIEDADES                 |       |
| Oxido De Calcio             | 66.0% |
| Oxido De Magnesio           | 5.30% |

Fuente: “Estabilización con CCA”, Facultad de Ingeniería, Universidad De La Republica, Uruguay.

**3.1.3 Muestras de materiales en laboratorio.** Sobre la muestra de suelo se realizaron ensayos de resistencia a la compresión inconfiada, de resistencia a la tracción por compresión diametral, Ensayo Proctor modificado y de durabilidad. La Tabla.5 presenta los tres tipos de mezclas de los materiales en porcentajes diferentes además del suelo natural.

**Tabla 5. Composición de las muestras de laboratorio.**

| MEZCLAS EN LABORATORIO |                                         |
|------------------------|-----------------------------------------|
| 1                      | Suelo Natural                           |
| 2                      | Suelo Natural + 15% De CCA + 5% De Cal  |
| 3                      | Suelo Natural + 20% De CCA + 5% De Cal  |
| 4                      | Suelo Natural + 20% De CCA + 10% De Cal |

*Fuente: “Estabilización con CCA”, Facultad de Ingeniería, Universidad De La Republica, Uruguay.*

**3.1.4 Ensayos aplicados en laboratorio.** Los ensayos realizados a la muestra fueron Compactación, Ensayo de CBR- Capacidad de soporte de california, Ensayo de resistencia a la compresión confinada (RCI), Ensayo de resistencia a la tracción por compresión diametral (RCD), Ensayo de durabilidad. Detalles de ensayos. Ver anexo 4.

**3.1.5 Análisis de resultados de acuerdo a las pruebas de laboratorio.** Ver anexo 5. Graficas de resultados de las pruebas.

- **Tablas de resultados de acuerdo a reacciones químicas.** Ver Tabla.6.

**Tabla 6. Composición de las muestras de laboratorio II.**

| RESULTADOS DE ACUERDO A LAS REACCIONES QUIMICAS |            |                                                           |
|-------------------------------------------------|------------|-----------------------------------------------------------|
| Muestra 2: Suelo + 15%CCA + 5%Cal               | Descartada | Insuficiencia de material cementante.                     |
| Muestra 3: Suelo + 20%CCA + 5%Cal               | Aceptada   | Presencia de minerales asociados a productos cementantes. |
| Muestra 4: Suelo + 20%CCA + 10%Cal              | Aceptada   | Presencia de minerales asociados a productos cementantes. |

*Fuente: “Estabilización con CCA”, Facultad de Ingeniería, Universidad De La Republica, Uruguay.*

- Tablas de resultados de acuerdo a las pruebas. Resultados en Tabla.7.

**Tabla 7. Análisis de resultados.**

| ANÁLISIS DE RESULTADOS      |                                    |                                                                                                                                               |
|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ENSAYO                      | MUESTRAS                           | CARACTERÍSTICAS                                                                                                                               |
| COMPACTACION PROCTOR NORMAL | Suelo natural                      | Curva achatada ya que el peso específico de los suelos arenosos no varía mucho entre su estado más suelto y más denso.                        |
|                             | Muestra 4: Suelo + 20%CCA + 10%Cal | La disminución en el peso específico del suelo seco máximo se debe a la suma de las bajas gravedades específicas de la cal y la CCA.          |
|                             |                                    | Para mayor eficiencia en la compactación, será necesario adicionar más agua para reducir los efectos de la succión.                           |
| CBR                         | Suelo natural                      | La razón de aumento de los valores de CBR de la mezcla disminuye al aumentar la humedad.                                                      |
|                             | Muestra 4: Suelo + 20%CCA + 10%Cal | Los valores de CBR de la mezcla son mayores que los del suelo para todas las humedades de compactación.                                       |
|                             |                                    | Presencia de reacciones puzolánicas.<br>Efecto Filler.<br>Se puede afirmar que podría ser empleado hasta como capa de sub-base en pavimentos. |
| RCI                         | Muestra 2: Suelo + 15%CCA + 5%Cal  | Tienden a estabilizarse, sugiriendo que toda la cal reaccionó con la sílice disponible en la ceniza.                                          |
|                             | Muestra 3: Suelo + 20%CCA + 5%Cal  |                                                                                                                                               |
|                             | Muestra 4: Suelo + 20%CCA + 10%Cal | Aumento de la RCI, posterior a los 56 días, debido a que habría suficiente.                                                                   |
| RCD                         | Muestra 3: Suelo + 20%CCA + 5%Cal  | Presencia de productos cementantes.                                                                                                           |
|                             | Muestra 4: Suelo + 20%CCA + 10%Cal |                                                                                                                                               |
| DURABILIDAD                 | Muestra 2: Suelo + 15%CCA + 5%Cal  | Uso de estos materiales en pavimentos de bajo a mediano volumen de tránsito.                                                                  |
|                             | Muestra 3: Suelo + 20%CCA + 5%Cal  |                                                                                                                                               |
|                             | Muestra 4: Suelo + 20%CCA + 10%Cal |                                                                                                                                               |

Fuente: "Estabilización con CCA", Facultad de Ingeniería, Universidad De La Republica, Uruguay.

### 3.1.6 Conclusiones del método

- Se observó un importante aumento del CBR de la mezcla a mayores porcentajes de materiales, con 28 días de cura, respecto al del suelo natural. Lo que permite afirmar que el material producido podría ser empleado como capa de sub-base en pavimentos.
- La RCI de las mezclas aumenta al aumentar el contenido de CCA y de cal y el tiempo de cura, siendo el valor máximo de 276 [kPa], correspondiente a la mezcla tipo con mayor contenido de estabilizantes con 56 días de cura, 20 veces mayor que para el suelo natural.
- Un mayor contenido de CCA proporcionaría suficiente sílice amorfa para las reacciones con la cal, mientras que el aumento del contenido de cal acelera las reacciones y proporciona mayor RCI en tiempos cortos.
- La RCD de las mezclas aumenta con el contenido de CCA y de cal y el tiempo de cura. El máximo valor de RCD fue de 95 [kPa]. La existencia de RCD en las mezclas de suelo con CCA y cal indica la generación de productos cementantes.
- La durabilidad determinada en las mezclas de suelo con CCA y cal, puede considerarse aceptable si se piensa en la utilización de estos materiales en pavimentos de bajo a mediano volumen de tránsito.

### 3.1.7 Análisis cuantitativo y cualitativo

**Tabla 8. Análisis cuantitativo del tratamiento.**

| ENSAYO DE SUELO SIN TRATAR |                                                                                                         |                  |                                               |                   |                   |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|-------------------|-------------------|
| Item                       | DESCRIPCION                                                                                             | UNIDAD           | CANTIDAD                                      | VR. UNITARIO      | VR. PARCIAL       |
| <b>1</b>                   | <b>PRELIMINARES</b>                                                                                     |                  |                                               |                   |                   |
| 1,1                        | Localizacion y Replanteo*                                                                               | m <sup>2</sup>   | 0,30                                          | \$ 1.400          | \$ 420            |
|                            |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>   | <b>\$ 420</b>     |
| <b>2</b>                   | <b>MOVIMIENTO DE TIERRA</b>                                                                             |                  |                                               |                   |                   |
| 2,1                        | Excavacion manual en material comun y/o conglomerado a mano, incluye transporte interno dentro del area | m <sup>3</sup>   | 0,30                                          | \$ 17.750         | \$ 5.325          |
| 2,2                        | Relleno con material de suelo comun                                                                     | m <sup>3</sup>   | 0,18                                          | \$ 17.750         | \$ 3.195          |
| 2,3                        | Retiro de material sobrante en el area                                                                  | m <sup>3</sup>   | 0,12                                          | \$ 22.300         | \$ 2.676          |
|                            |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>   | <b>\$ 11.196</b>  |
| <b>4</b>                   | <b>ENSAYOS REALIZADOS EN EL SUELO NATURAL **</b>                                                        |                  |                                               |                   |                   |
| 4,1                        | Resistencia a la compresion inconfiada                                                                  | unid.            | 1                                             | \$ 45.000         | \$ 45.000         |
| 4,2                        | Resistencia a la traccion por compresion diametral (RCD)                                                | unid.            | 1                                             | \$ 162.000        | \$ 162.000        |
| 4,3                        | Durabilidad                                                                                             | unid.            | 1                                             | \$ 135.000        | \$ 135.000        |
| 4,4                        | Compactacion Proctor Normal                                                                             | unid.            | 1                                             | \$ 105.000        | \$ 105.000        |
| 4,5                        | Capacidad Soporte de California (CBR)                                                                   | unid.            | 1                                             | \$ 240.000        | \$ 240.000        |
|                            |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>   | <b>\$ 687.000</b> |
|                            | <b>SUBTOTAL COSTO OBRA (SCO) <sup>2</sup></b>                                                           | <b>\$ 11.616</b> | <b>SUBTOTAL COSTO OBRA (SCO) <sup>1</sup></b> | <b>\$ 698.616</b> |                   |
|                            | <b>ADMINISTRACION (A = 10% SCO)</b>                                                                     | <b>\$ 1.162</b>  | <b>ADMINISTRACION (A = 10% SCO)</b>           | <b>\$ 69.862</b>  |                   |
|                            | <b>IMPREVISTOS (I = 5% SCO)</b>                                                                         | <b>\$ 581</b>    | <b>IMPREVISTOS (I = 5% SCO)</b>               | <b>\$ 34.931</b>  |                   |
|                            | <b>UTILIDAD (U = 5% SCO)</b>                                                                            | <b>\$ 581</b>    | <b>UTILIDAD (U = 5% SCO)</b>                  | <b>\$ 34.931</b>  |                   |
|                            | <b>IVA (IVA = 16% de U)</b>                                                                             | <b>\$ 93</b>     | <b>IVA (IVA = 16% de U)</b>                   | <b>\$ 5.589</b>   |                   |
|                            | <b>TOTAL COSTO OBRA (TCO=SCO+A+I+U+IVA)</b>                                                             | <b>\$ 14.032</b> | <b>TOTAL COSTO OBRA (TCO=SCO+A+I+U+IVA)</b>   | <b>\$ 843.928</b> |                   |
|                            | <b>TOTAL COSTO INTERVENTORIA (TCI= 5%TCO)</b>                                                           | <b>\$ 702</b>    | <b>TOTAL COSTO INTERVENTORIA (TCI= 5%TCO)</b> | <b>\$ 42.196</b>  |                   |
|                            | <b>TOTAL COSTO PROYECTO (TCP= TCO+TCI)</b>                                                              | <b>\$ 14.734</b> | <b>TOTAL COSTO PROYECTO (TCP= TCO+TCI)</b>    | <b>\$ 886.125</b> |                   |

Fuente: Autores.

\* Localización y replanteo se refiere a todas las actividades correspondientes a la localización y estudio de la zona.

\*\* Los ensayos realizados en la caracterización de las muestras y los de análisis y evaluación.

<sup>1</sup> Ítem Precio Subtotal de la obra, teniendo en cuenta costos agregados en los diferentes ensayos de caracterización y análisis de las diferentes muestras.

<sup>2</sup> Ítem precio Subtotal de la obra, sin incluir costos agregados de ensayos de caracterización y análisis de las diferentes muestras.

| ENSAYO DE SUELO TRATADO |                                                                                                         |                  |                                               |                   |                   |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|-------------------|-------------------|
| Item                    | DESCRIPCION                                                                                             | UNIDAD           | CANTIDAD                                      | VR. UNITARIO      | VR. PARCIAL       |
| <b>1</b>                | <b>PRELIMINARES</b>                                                                                     |                  |                                               |                   |                   |
| 1,1                     | Localizacion y Replanteo*                                                                               | m <sup>2</sup>   | 0,30                                          | \$ 1.400          | \$ 420            |
|                         |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>   | <b>\$ 420</b>     |
| <b>2</b>                | <b>MOVIMIENTO DE TIERRA</b>                                                                             |                  |                                               |                   |                   |
| 2,1                     | Excavacion manual en material comun y/o conglomerado a mano, incluye transporte interno dentro del area | m <sup>3</sup>   | 0,30                                          | \$ 17.750         | \$ 5.325          |
| 2,2                     | Relleno con material de suelo comun                                                                     | m <sup>3</sup>   | 0,18                                          | \$ 17.750         | \$ 3.195          |
| 2,3                     | Retiro de material sobrante en el area                                                                  | m <sup>3</sup>   | 0,12                                          | \$ 22.300         | \$ 2.676          |
|                         |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>   | <b>\$ 11.196</b>  |
| <b>3</b>                | <b>ADICIÓN DE MATERIALES</b>                                                                            |                  |                                               |                   |                   |
| 3,1                     | Adición de Cal (10% de la mezcla suelo)**                                                               | m <sup>3</sup>   | 0,03                                          | \$ 48.000         | \$ 1.440          |
| 3,2                     | Adición de Cascara de Arroz (20% de la mezcla suelo)**                                                  | Kg               | 9,10                                          | \$ 849            | \$ 7.721          |
|                         |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>   | <b>\$ 9.161</b>   |
| <b>4</b>                | <b>ENSAYOS REALIZADOS EN EL SUELO NATURAL ***</b>                                                       |                  |                                               |                   |                   |
| 4,1                     | Resistencia a la compresion inconfnada                                                                  | unid.            | 1                                             | \$ 45.000         | \$ 45.000         |
| 4,2                     | Resistencia a la traccion por compresion diametral (RCD)                                                | unid.            | 1                                             | \$ 162.000        | \$ 162.000        |
| 4,3                     | Durabilidad                                                                                             | unid.            | 1                                             | \$ 135.000        | \$ 135.000        |
| 4,4                     | Compactacion Proctor Normal                                                                             | unid.            | 1                                             | \$ 105.000        | \$ 105.000        |
| 4,5                     | Capacidad Soporte de California (CBR)                                                                   | unid.            | 1                                             | \$ 240.000        | \$ 240.000        |
|                         |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>   | <b>\$ 687.000</b> |
|                         | <b>SUBTOTAL COSTO OBRA (SCO) <sup>2</sup></b>                                                           | <b>\$ 20.777</b> | <b>SUBTOTAL COSTO OBRA (SCO) <sup>1</sup></b> | <b>\$ 707.777</b> |                   |
|                         | <b>ADMINISTRACION (A = 10% SCO)</b>                                                                     | <b>\$ 2.078</b>  | <b>ADMINISTRACION (A = 10% SCO)</b>           | <b>\$ 70.778</b>  |                   |
|                         | <b>IMPREVISTOS (I = 5% SCO)</b>                                                                         | <b>\$ 1.039</b>  | <b>IMPREVISTOS (I = 5% SCO)</b>               | <b>\$ 35.389</b>  |                   |
|                         | <b>UTILIDAD (U = 5% SCO)</b>                                                                            | <b>\$ 1.039</b>  | <b>UTILIDAD (U = 5% SCO)</b>                  | <b>\$ 35.389</b>  |                   |
|                         | <b>IVA (IVA = 16% de U)</b>                                                                             | <b>\$ 166</b>    | <b>IVA (IVA = 16% de U)</b>                   | <b>\$ 5.662</b>   |                   |
|                         | <b>TOTAL COSTO OBRA (TCO=SCO+A+I+U+IVA)</b>                                                             | <b>\$ 25.098</b> | <b>TOTAL COSTO OBRA (TCO=SCO+A+I+U+IVA)</b>   | <b>\$ 854.994</b> |                   |
|                         | <b>TOTAL COSTO INTERVENTORIA (TCI= 5%TCO)</b>                                                           | <b>\$ 1.255</b>  | <b>TOTAL COSTO INTERVENTORIA (TCI= 5%TCO)</b> | <b>\$ 42.750</b>  |                   |
|                         | <b>TOTAL COSTO PROYECTO (TCP= TCO+TCI)</b>                                                              | <b>\$ 26.353</b> | <b>TOTAL COSTO PROYECTO (TCP= TCO+TCI)</b>    | <b>\$ 897.744</b> |                   |

Fuente: Autores.

\* Localización y replanteo se refiere a todas las actividades correspondientes a la localización y estudio de la zona.

\*\* Los ensayos realizados en la caracterización de las muestras y los de análisis y evaluación.

<sup>1</sup> Ítem Precio Subtotal de la obra, teniendo en cuenta costos agregados en los diferentes ensayos de caracterización y análisis de las diferentes muestras.

<sup>2</sup> Ítem precio Subtotal de la obra, sin incluir costos agregados de ensayos de caracterización y análisis de las diferentes muestras.

- Análisis cualitativo.

**Tabla 9. Análisis cualitativo del tratamiento.**

| DESCRIPCION<br>METODO DE<br>ESTABILIZACION | ITEMS COMPARATIVOS |       |                                                                                                                                                     |                                                                                                     |                                                            |                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                       |                                                                                                 |
|--------------------------------------------|--------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                            | VALORACION         | SUELO | CARACTERISTICAS                                                                                                                                     | ENSAYOS REQUERIDOS                                                                                  |                                                            | EJECUCION                                                                                                                                                       | IMPACTO AMBIENTAL                                                                                                                     | EFECTIVIDAD                                                                                     |
|                                            |                    |       |                                                                                                                                                     | CARACTERIZACIÓN                                                                                     | COMPROBACION                                               |                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                       |                                                                                                 |
| CCA Y CAL<br>HIDRATADA                     | ☆☆☆☆☆              | Arena | 1. CCA proporciona a los suelos la sílice necesaria para reaccionar con la cal hidratada y forman productos cementantes.                            | 1. Analisis granulométrico: Determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas. | 1. Compactación-Proctor normal                             | 1. La base de los ensayos realizados en laboratorio es la variación de porcentajes de agentes en las muestras, para analizar si resultan productos cementantes. | 1. Alternativa sostenible y ecológica.                                                                                                | 1. Resultados óptimos, aumento de resistencia y capacidad de soporte.                           |
|                                            |                    |       |                                                                                                                                                     |                                                                                                     | 2. Capacidad de soporte de califoria. CRB                  |                                                                                                                                                                 | 2. Disminuye el impacto ambiental generado por los residuos procedentes de la biomasa alimentada por los restos de cosecha del arroz. |                                                                                                 |
|                                            |                    |       | 2. La sílice que reacciona con los iones de calcio debe ser amorfa, de no serlo se debe incluir mayores porcentajes de calcio para lograr actividad | 2. Difractometría de ratos X: Determina la composición mineralógica del suelo.                      | 3. Resistencia a la compresión inconfiada. RCI             | 2. Las practicas como tal son de ejecución sencilla y el personal a cargo debe ser mínimo.                                                                      | 3. Considera los productos de desecho como fuentes estabilizadoras de suelo y de productos cementantes.                               | 2. De acuerdo con los ensayos de durabilidad, puede considerarse óptimo para la construcción de |
|                                            |                    |       |                                                                                                                                                     |                                                                                                     | 4. Resistencia a la tracción por compresión diametral. RCD |                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                       |                                                                                                 |
|                                            |                    |       |                                                                                                                                                     |                                                                                                     | 5. Durabilidad.                                            |                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                       |                                                                                                 |

Fuente: Autores.

### 3.2 ESTABILIZACIÓN DE SUELO CON YESO RECICLADO Y DESECHOS PLÁSTICOS

En la actualidad, la mayoría de las investigaciones se centran en la determinación de una buena manera de eliminar residuos mediante usos alternativos como por ejemplo las aplicaciones de la industria y la construcción, es por eso que se hace énfasis en la reutilización de recursos como estabilizadores de suelo. Según Ugai<sup>1</sup>, millones de toneladas de desechos se generan actualmente provocando un problema a nivel económico y ambiental. Durante mucho tiempo los vertederos de desechos fue la solución más económica y adecuada pero estos también deben ser controlados ya que se generan riesgos de filtraciones en los suelos, condenan grandes áreas incluso después del cierre del sitio y del relleno posterior debido a que los residuos enterrados siguen deteriorándose durante muchos años.

**3.2.1 Descripción del método.** Existen investigaciones para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de suelo mediante el uso de diferentes tipos de materiales de desecho. Estudios con llantas, residuos de plástico, polvo de horno de cemento, cenizas volantes y de fondo, polvo de piedra, etc. son unos de los aplicados en la estabilización.

El tipo de técnica analizada usa dos tipos de materiales específicos: Yeso “basanita” que se deriva de los residuos de placas de yeso y desechos plásticos. Muntohar: “El yeso se utiliza como un agente estabilizador para mejorar la resistencia a la compresión, tiene un efecto más significativo y es utilizado

---

<sup>1</sup> UGAI K, Ahmed A. Evaluation of using gypsum waste plasterboard in ground improvement. EN: Proceeding of the workshop on recycling waste plasterboard. Memorial Hall. Tokio: Chuo University. Marzo 13, 2009, citado por AHMED, Aly., UGAI, Keizo. y KAMEI, Takeshi.

<sup>2</sup> MUNTOHAR, AS. Civ Eng Dimension J. EN: Influence of plastic waste fibers on the strength of lime-rice husk ash stabilized clay soil. No.11, 2009; p. 32-40, citado por AHMED, Aly., UGAI, Keizo. y KAMEI, Takeshi.

material de cementación, mientras que las tiras de desecho de plástico tienen el poder de resistir esfuerzos de tracción”<sup>2</sup>. Este estudio examina la viabilidad de utilizar estos tipos de materiales como uno alternativo en el mejoramiento de las propiedades de los suelos. Tam: “Esta práctica ha sido aplicada en proyectos de vías, en lugares con alta actividad sísmica y en la estabilización de grandes terraplenes”<sup>3</sup>.

**3.2.2 Muestra de materiales en laboratorio.** Esta técnica fue implementada en suelos chilenos con alta actividad sísmica y en la ciudad de Gunma Japón, donde se realizaron con resultados favorables.

- **Muestra de suelo.** El suelo se clasifica como suelo de arena mal graduada (SP) de acuerdo al SUCS y sus propiedades se presentan en la Tabla.10:

**Tabla 10. Propiedades de la muestra de suelo.**

| PROPIEDAD                       |         | VALOR |
|---------------------------------|---------|-------|
| Diámetro Efectivo (D10)         | [mm]    | 0.060 |
| Máxima Unidad De Peso Seco      | [KN/m3] | 14.28 |
| Tamaño Medio De Partícula (D50) | [mm]    | 0.150 |
| Contenido Optimo De Humedad     | %       | 20    |
| Coeficiente de uniformidad (Cu) |         | 2.720 |
| Coeficiente de curvatura (Cc)   |         | 2.670 |
| Peso específico                 |         | 1.020 |
| Pasa Tamiz N° 200 (0.074mm)     |         | 11.30 |
| SiO <sub>2</sub>                | %       | 88.80 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | %       | 6.80  |
| K <sub>2</sub> O                | %       | 4.80  |

*Fuente:” Investigación con yeso reciclado y tiras de residuos de plástico” Departamento de Civil y Desarrollo Ingenieril. Universidad de Miyazaki.*

<sup>3</sup> TAM, VWY., TAM, CM. Resour Conserve Recycl. EN: A review on the viable technology for construction waste recycling. No. 47, 2006; p. 20-21, citado por AHMED, Aly., UGAI, Keizo. y KAMEI, Takeshi.

- **Reciclado de yeso – Basanita.** Mineral compuesto de calcio hemihidratado (yeso cocido) bajo ciertas temperaturas con agua libera calor y se endurece, producido por calentamiento de residuos de yeso (sulfato de calcio hidratado). Concentración de 99.8%, con tres cuartas partes eliminadas de agua. Se consideraron cuatro porcentajes diferentes como lo muestran la Tabla.11:

**Tabla 11. Contenido de yeso reciclado por masa de suelo.**

| CONCENTRACION DE BASANITA |     |
|---------------------------|-----|
| Tipo 1                    | 5%  |
| Tipo 2                    | 10% |
| Tipo 3                    | 15% |
| Tipo 4                    | 20% |

*Fuente: "Investigación con yeso reciclado y tiras de residuos de plástico" Departamento de Civil y Desarrollo Ingenieril. Universidad de Miyazaki.*

- **Cemento portland.** Contenido 3% en masa del suelo, previene la solubilidad.
- **Desechos de plástico reciclado.** Tipo poli-estireno (PS), más económico que otro tipo de residuo plástico. Cortado en tres diferentes tamaños de anchura de banda (*B*) de 2.5, 5 y 10 [mm]. Espesor promedio de 1 [mm]. Ver Tabla.12.

**Tabla 12. Contenido de tiras de poli-estireno.**

| PORCENTAJE |       |
|------------|-------|
| Tipo 1     | 0.25% |
| Tipo 2     | 0.50% |
| Tipo 3     | 1.00% |
| Tipo 4     | 2.00% |

*Fuente: "Investigación con yeso reciclado y tiras de residuos de plástico" Departamento de Civil y Desarrollo Ingenieril. Universidad de Miyazaki.*

**3.2.3 Ensayos aplicados en laboratorio.** Se realizaron ensayos de compresión simple, ensayos (RCI), ensayos de resistencia a la tracción para probar el comportamiento de la basanita y las tiras de poli-estireno y de capilaridad. La tasa de desplazamiento al aplicar carga se aproximó a 1 [mm] / Minuto y se aplicó hasta producir falla. Las muestras fueron preparadas y extraídas de los moldes 24 horas después, se dejaron siete días curando a  $21 \pm 1^\circ \text{C}$ . Humedad relativa 98% antes de las prueba. Ver anexo 4.

### 3.2.4 Análisis de resultados de acuerdo a las pruebas de laboratorio.

Resultados en Tabla.13 y Tabla 14.

**Tabla 13. Análisis de resultados pruebas de suelo y basanita.**

| ANALISIS DE RESULTADOS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ENSAYOS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | CARACTERISTICAS                                                                                                                                                                                                                    |
| Suelo natural y Suelo natural + basanita                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                    |
| COMPACTACION                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Aumento porcentual del contenido óptimo de humedad a mayor cantidad de basanita, debido a que la basanita adquiere el agua perdida en el calentamiento o siendo una material noble requiere mayor agua en la compactación.         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Ligero aumento en la unidad seca de peso respecto al porcentaje de basanita debido a la floculación de las partículas de suelo por lo que quedan unidas entre sí o la relación de finura de las partículas de la basanita y suelo. |
| RCI                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | La resistencia a la compresión ( <i>qu</i> ) aumenta a mayor porcentaje de reciclado de yeso. Se confirman que se puede utilizar como material cementante.                                                                         |
| RESISTENCIA A LA TRACCION                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | El incremento del porcentaje de basanita no interviene de manera relevante en el aumento de la resistencia a la tracción.                                                                                                          |
| La resistencia a la compresión con 5% y 15% de contenido de basanita aumentó 2 y 7 veces en comparación con la muestra no tratada, a diferencia de la resistencia a la tracción que para los mismos contenidos aumentó solo 1.15 y 2.5 veces de la muestra no tratada. Resultado aceptable, especialmente en el caso de resistencia a la compresión. |                                                                                                                                                                                                                                    |

*Fuente: "Investigación con yeso reciclado y tiras de residuos de plástico" Departamento de Civil y Desarrollo Ingenieril. Universidad de Miyazaki.*

**Tabla 14. Análisis de resultados pruebas de suelo, basanita y bandas de plástico.**

| <b>ANALISIS DE RESULTADOS</b>                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ENSAYOS</b>                                                                                                                                                                                                                                         | <b>CARACTERISTICAS</b>                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Suelo natural y Suelo natural + 10% basanita + bandas de desecho de plástico</b>                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>OBJETIVO: Remediar la deficiencia de la resistencia a la tracción.</b>                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>RCI</b>                                                                                                                                                                                                                                             | Las tiras de plástico mejoran la resistencia a la compresión ligeramente y disminuye a mayor % de plástico. Posiblemente por deslizamiento de las partículas del suelo.                                                                                      |
| <b>INFLUENCIA DE LA RELACION DE CONTENIDOS DE BANDAS</b>                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Las resistencias aumentan con la presencia de las bandas en las muestras tratadas en comparación con las no tratadas.                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Un mayor número de bandas se traducirá en un gran número de elementos de plástico orientado en el principal esfuerzo de tracción y como tal una mejora puede ser desarrollada.                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                              |
| El aumento del área de contacto entre las tiras de plástico y las partículas del suelo aumenta la fricción. El extender la fricción entre las partículas del suelo se asocia con el aumento de la resistencia de compresión frente a cargas aplicadas. |                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>INFLUENCIA DE LA RELACION DE ASPECTO</b>                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>RCI</b>                                                                                                                                                                                                                                             | La basanita se considera el principal factor para la mejora de esta resistencia. Así que su presencia disimula el efecto de la relación de aspecto de las bandas en la mejora de resistencia a la compresión.                                                |
| <b>RESISTENCIA A LA TRACCION</b>                                                                                                                                                                                                                       | Aumenta al ampliar la relación entre dimensiones, al ser más largas las bandas hay mayor posibilidad de resistir el plano de falla de corte en comparación con pequeñas longitudes.                                                                          |
| <b>INFLUENCIA DE LA RELACION DE TAMAÑO</b>                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>RCI</b>                                                                                                                                                                                                                                             | El número de bandas de pequeño tamaño es mayor que el número de gran tamaño para la misma cantidad de muestra, así que el aumento del número daría oportunidad para incrementar el desarrollo de fricción entre las partículas del suelo y las del plástico. |
| <b>RESISTENCIA A LA TRACCION</b>                                                                                                                                                                                                                       | El aumento del número de bandas (cortas) mejora la capacidad de resistir el plano de corte de la insuficiencia de plástico y por lo tanto los resultados se optimizan.                                                                                       |

*Fuente: "Investigación con yeso reciclado y tiras de residuos de plástico" Departamento de Civil y Desarrollo Ingenieril. Universidad de Miyazaki.*

### **3.2.5 Conclusiones del método.**

- El aumento del contenido de yeso reciclado en la mezcla de suelo está asociado con el aumento del contenido de humedad óptimo y el insignificante aumento de la unidad de peso seco.
- El uso de yeso reciclado tenía un significativo efecto sobre la resistencia a la compresión en comparación con la resistencia a la tracción. Aun así las dos presentaban aumento.
- Añadir las tiras de desechos plásticos en el suelo tratado con reciclado de yeso y cemento mejora la resistencia a la tracción en comparación con la resistencia a la compresión. Las Tiras mejoran la rigidez del suelo tratado y aumenta el valor del módulo de elasticidad.
- El efecto del tiempo de curado en las muestras tratadas con reciclado de yeso es un factor en la mejora de la resistencia, especialmente en los primeros días de curado después de los 14 días no es muy representativo.
- El aumento de contenido de yeso reciclado y la edad de la muestra son asociados con la reducción del ascenso capilar. A mayor contenido de basanita mayor es el tiempo requerido para el agua a elevarse dentro de la muestra de suelo se incrementa, lo que influye en la reducción de la formación de lentes de hielo y el efecto de levantamiento por helada. El potencial de capilaridad disminuyó con el aumento del contenido y el tamaño de las bandas.

Esta investigación responde a los desafíos de la sociedad para reducir las cantidades de residuos. El uso de reciclado de yeso junto con tiras de desecho de plástico mejora la resistencia, el rendimiento y estabilizan las muestras de suelo.

### 3.2.6 Análisis cuantitativo y cualitativo.

**Tabla 15. Análisis cuantitativo del tratamiento.**

| <b>ENSAYO DE SUELO SIN TRATAR</b> |                                                                                                         |                  |                                               |                   |                   |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|-------------------|-------------------|
| Item                              | DESCRIPCION                                                                                             | UNIDAD           | CANTIDAD                                      | VR. UNITARIO      | VR. PARCIAL       |
| <b>1</b>                          | <b>PRELIMINARES</b>                                                                                     |                  |                                               |                   |                   |
| 1,1                               | Localizacion y Replanteo*                                                                               | m <sup>2</sup>   | 0,30                                          | \$ 1.400          | \$ 420            |
|                                   |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>   | <b>\$ 420</b>     |
| <b>2</b>                          | <b>MOVIMIENTO DE TIERRA</b>                                                                             |                  |                                               |                   |                   |
| 2,1                               | Excavacion manual en material comun y/o conglomerado a mano, incluye transporte interno dentro del area | m <sup>3</sup>   | 0,30                                          | \$ 17.750         | \$ 5.325          |
| 2,2                               | Relleno con material de suelo comun                                                                     | m <sup>3</sup>   | 0,18                                          | \$ 17.750         | \$ 3.195          |
| 2,3                               | Retiro de material sobrante en el area                                                                  | m <sup>3</sup>   | 0,12                                          | \$ 22.300         | \$ 2.676          |
|                                   |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>   | <b>\$ 11.196</b>  |
| <b>4</b>                          | <b>ENSAYOS REALIZADOS EN EL SUELO NATURAL **</b>                                                        |                  |                                               |                   |                   |
| 4,1                               | Difraccion de Rayos X (DRX)                                                                             | unid.            | 1                                             | \$ 85.700         | \$ 85.700         |
| 4,2                               | Resistencia a la traccion por compresion diametral (RCD)                                                | unid.            | 1                                             | \$ 162.000        | \$ 162.000        |
| 4,3                               | Resistencia a la compresion inconfnada                                                                  | unid.            | 1                                             | \$ 45.000         | \$ 45.000         |
| 4,4                               | Compactacion Proctor Normal                                                                             | unid.            | 1                                             | \$ 105.000        | \$ 105.000        |
|                                   | Ensayo de Capilaridad                                                                                   | unid.            | 1                                             | \$ 39.500         | \$ 39.500         |
|                                   |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>   | <b>\$ 397.700</b> |
|                                   | <b>SUBTOTAL COSTO OBRA (SCO) <sup>2</sup></b>                                                           | <b>\$ 11.616</b> | <b>SUBTOTAL COSTO OBRA (SCO) <sup>1</sup></b> | <b>\$ 409.316</b> |                   |
|                                   | <b>ADMINISTRACION (A = 10% SCO)</b>                                                                     | <b>\$ 1.162</b>  | <b>ADMINISTRACION (A = 10% SCO)</b>           | <b>\$ 40.932</b>  |                   |
|                                   | <b>IMPREVISTOS (I = 5% SCO)</b>                                                                         | <b>\$ 581</b>    | <b>IMPREVISTOS (I = 5% SCO)</b>               | <b>\$ 20.466</b>  |                   |
|                                   | <b>UTILIDAD (U = 5% SCO)</b>                                                                            | <b>\$ 581</b>    | <b>UTILIDAD (U = 5% SCO)</b>                  | <b>\$ 20.466</b>  |                   |
|                                   | <b>IVA (IVA = 16% de U)</b>                                                                             | <b>\$ 93</b>     | <b>IVA (IVA = 16% de U)</b>                   | <b>\$ 3.275</b>   |                   |
|                                   | <b>TOTAL COSTO OBRA (TCO=SCO+A+I+U+IVA)</b>                                                             | <b>\$ 14.032</b> | <b>TOTAL COSTO OBRA (TCO=SCO+A+I+U+IVA)</b>   | <b>\$ 494.454</b> |                   |
|                                   | <b>TOTAL COSTO INTERVENTORIA (TCI= 5%TCO)</b>                                                           | <b>\$ 702</b>    | <b>TOTAL COSTO INTERVENTORIA (TCI= 5%TCO)</b> | <b>\$ 24.723</b>  |                   |
|                                   | <b>TOTAL COSTO PROYECTO (TCP= TCO+TCI)</b>                                                              | <b>\$ 14.734</b> | <b>TOTAL COSTO PROYECTO (TCP= TCO+TCI)</b>    | <b>\$ 519.176</b> |                   |

Fuente: Autores.

\* Localización y replanteo se refiere a todas las actividades correspondientes a la localización y estudio de la zona.

\*\* Los ensayos realizados en la caracterización de las muestras y los de análisis y evaluación.

<sup>1</sup> Ítem Precio Subtotal de la obra, teniendo en cuenta costos agregados en los diferentes ensayos de caracterización y análisis de las diferentes muestras.

<sup>2</sup> Ítem precio Subtotal de la obra, sin incluir costos agregados de ensayos de caracterización y análisis de las diferentes muestras.

| ENSAYO DE SUELO TRATADO |                                                                                                         |                  |                                               |                   |                   |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|-------------------|-------------------|
| Item                    | DESCRIPCION                                                                                             | UNIDAD           | CANTIDAD                                      | VR. UNITARIO      | VR. PARCIAL       |
| <b>1</b>                | <b>PRELIMINARES</b>                                                                                     |                  |                                               |                   |                   |
| 1,1                     | Localizacion y Replanteo*                                                                               | m <sup>2</sup>   | 0,30                                          | \$ 1.400          | \$ 420            |
|                         |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>   | <b>\$ 420</b>     |
| <b>2</b>                | <b>MOVIMIENTO DE TIERRA</b>                                                                             |                  |                                               |                   |                   |
| 2,1                     | Excavacion manual en material comun y/o conglomerado a mano, incluye transporte interno dentro del area | m <sup>3</sup>   | 0,30                                          | \$ 17.750         | \$ 5.325          |
| 2,2                     | Relleno con material de suelo comun                                                                     | m <sup>3</sup>   | 0,18                                          | \$ 17.750         | \$ 3.195          |
| 2,3                     | Retiro de material sobrante en el area                                                                  | m <sup>3</sup>   | 0,12                                          | \$ 22.300         | \$ 2.676          |
|                         |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>   | <b>\$ 11.196</b>  |
| <b>3</b>                | <b>ADICION DE MATERIALES</b>                                                                            |                  |                                               |                   |                   |
| 3,1                     | Yeso Reciclado "Basanita"                                                                               | kg.              | 5                                             | \$ 636            | \$ 3.179          |
| 3,2                     | Residuos de bandeja de Plastico (Poliestireno)                                                          | unid.            | 8                                             | \$ 350            | \$ 2.800          |
| 3,3                     | Cemento Portland                                                                                        | kg.              | 3                                             | \$ 456            | \$ 1.368          |
|                         |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>   | <b>\$ 7.347</b>   |
| <b>4</b>                | <b>ENSAYOS REALIZADOS EN EL SUELO NATURAL **</b>                                                        |                  |                                               |                   |                   |
| 4,1                     | Difraccion de Rayos X (DRX)                                                                             | unid.            | 1                                             | \$ 85.700         | \$ 85.700         |
| 4,2                     | Resistencia a la traccion por compresion diametral (RCD)                                                | unid.            | 1                                             | \$ 162.000        | \$ 162.000        |
| 4,3                     | Resistencia a la compresion inconfiada                                                                  | unid.            | 1                                             | \$ 45.000         | \$ 45.000         |
| 4,4                     | Compactacion Proctor Normal                                                                             | unid.            | 1                                             | \$ 105.000        | \$ 105.000        |
|                         | Ensayo de Capilaridad                                                                                   | unid.            | 1                                             | \$ 39.500         | \$ 39.500         |
|                         |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>   | <b>\$ 397.700</b> |
|                         | <b>SUBTOTAL COSTO OBRA (SCO) <sup>2</sup></b>                                                           | <b>\$ 18.963</b> | <b>SUBTOTAL COSTO OBRA (SCO) <sup>1</sup></b> | <b>\$ 416.663</b> |                   |
|                         | <b>ADMINISTRACION (A = 10% SCO)</b>                                                                     | <b>\$ 1.896</b>  | <b>ADMINISTRACION (A = 10% SCO)</b>           | <b>\$ 41.666</b>  |                   |
|                         | <b>IMPREVISTOS (I = 5% SCO)</b>                                                                         | <b>\$ 948</b>    | <b>IMPREVISTOS (I = 5% SCO)</b>               | <b>\$ 20.833</b>  |                   |
|                         | <b>UTILIDAD (U = 5% SCO)</b>                                                                            | <b>\$ 948</b>    | <b>UTILIDAD (U = 5% SCO)</b>                  | <b>\$ 20.833</b>  |                   |
|                         | <b>IVA (IVA = 16% de U)</b>                                                                             | <b>\$ 152</b>    | <b>IVA (IVA = 16% de U)</b>                   | <b>\$ 3.333</b>   |                   |
|                         | <b>TOTAL COSTO OBRA (TCO=SCO+A+I+U+IVA)</b>                                                             | <b>\$ 22.907</b> | <b>TOTAL COSTO OBRA (TCO=SCO+A+I+U+IVA)</b>   | <b>\$ 503.329</b> |                   |
|                         | <b>TOTAL COSTO INTERVENTORIA (TCI= 5%TCO)</b>                                                           | <b>\$ 1.145</b>  | <b>TOTAL COSTO INTERVENTORIA (TCI= 5%TCO)</b> | <b>\$ 25.166</b>  |                   |
|                         | <b>TOTAL COSTO PROYECTO (TCP= TCO+TCI)</b>                                                              | <b>\$ 24.053</b> | <b>TOTAL COSTO PROYECTO (TCP= TCO+TCI)</b>    | <b>\$ 528.495</b> |                   |

Fuente: Autores.

\* Localización y replanteo se refiere a todas las actividades correspondientes a la localización y estudio de la zona.

\*\* Los ensayos realizados en la caracterización de las muestras y los de análisis y evaluación.

<sup>1</sup> Ítem Precio Subtotal de la obra, teniendo en cuenta costos agregados en los diferentes ensayos de caracterización y análisis de las diferentes muestras.

<sup>2</sup> Ítem precio Subtotal de la obra, sin incluir costos agregados de ensayos de caracterización y análisis de las diferentes muestras.

- Análisis cualitativo.

**Tabla 16. Análisis cualitativo del tratamiento.**

|                                     |       |       |                                                                                                                                                                                          |                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                |                                                                           |                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------|-------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| YESO RECICLADO Y DESECHOS PLASTICOS | ☆☆☆☆☆ | Arena | 1. La adición de yeso reciclado aumenta la capacidad de resisetncia a compresión, pero no mejora la de tracción.                                                                         | 1. Analisis granulométrico: Determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de particulas. | 1. Compactación-Estándar.                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1.Procedimientos sencillos, la base es cambiar los contenido de yeso inicialmente para analizar la mejora de las resistencias. | Medio-Bajo                                                                | Alta                                                                                                                                                                       |
|                                     |       |       | 2. Resistencia a la compresión simple.                                                                                                                                                   |                                                                                                     | 1. El incremento de contenido de materiales de desecho como resultado de la industria es un problema a nivel mundial debido a sus extensos periodos de destrucción, así que esta alternativa sostenible y ecológica permite la reutilización de productos considerados como residuos con resultados efectivos. |                                                                                                                                | 1. Resultados efectivos para los ensayos a los que fueron puestos a cabo. |                                                                                                                                                                            |
|                                     |       |       | 3. Resistencia a la compresión inconfnada. RCI                                                                                                                                           |                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                |                                                                           |                                                                                                                                                                            |
|                                     |       |       | 4. Resistencia a la tracción.                                                                                                                                                            |                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                |                                                                           |                                                                                                                                                                            |
|                                     |       |       | 5. Capilaridad.                                                                                                                                                                          |                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                |                                                                           |                                                                                                                                                                            |
|                                     |       |       | 2. Las tiras de plástico aumentan la resistencia a tracción, para un mejor estudio de este material se requiere hacer ensayos con base en sus relaciones de aspecto, tamaño y contenido. |                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                |                                                                           | 2. Debido a un bajo incremento de la resistencia a tracción, se adiciona las tiras y se analliza el mejor aumento con base en sus relaciones (Aspecto, tamaño, contenido). |

Fuente: Autores

#### 4. TÉCNICAS AVANZADAS E IMPLEMENTADAS DE ESTABILIZACIÓN QUÍMICA

##### 4.1 CARACTERIZACIÓN Y TRATAMIENTO DE SUELOS CONTAMINADOS POR ACTIVIDADES MINERAS MEDIANTE MATERIALES REACTIVOS

El área de estudio y aplicabilidad del método supone áreas de minería abandonadas, como el caso en la antigua cuenca minera de Angles (Girona), Ciudad y municipio español, en la comunidad autónoma de Cataluña. Sobre aquella cuenca existen diversas zonas afectadas por la minería del Pb, en donde se ha comprobado que la actividad minera ha causado un fuerte impacto ambiental, a causa de elevadas concentraciones de Cd, Cu, Pb, Sb, y Zn fundamentalmente. Por ello surge este método, como un estudio mediante ensayos de laboratorio de diversas técnicas de remediación, las cuales han contemplado el empleo de varios materiales reactivos, entre ellos el cemento Portland (OPC), ácido fosfórico y óxido de magnesio (Tabla.17), con el objeto único de “Inactivar” los principales contaminantes.

**Tabla 17. Resumen y descripción de ensayos realizados.**

| ENSAYOS REALIZADOS |                  |                                                                                                      |
|--------------------|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Elementos Tratados | Material Usado   | Descripción                                                                                          |
| Cd ,Zn             | Cemento Portland | Procura concentraciones bajas de dichos metales en lixiviados                                        |
| Pb                 | Acido Fosforico  | El pb resulta tener poca movilidad en fase acuosa a causa de la precipitacion de la cloropiromorfita |
| Pb, (Ph>12)        | MgO              | El Pb presenta una gran movilidad, tal vez por la formacion de complejos.                            |
| Zn                 | Acido Fosforio   | Elemento movil para Ph bajo y medio oxidante                                                         |
| Zn, (Ph>12)        | MgO              | Medio moderadamente Reductor de este elemento                                                        |
| Zn, alcalino       | Cemento+ MgO     | Se comporta de manera poco Movil                                                                     |
| Sb                 | MgO              | Mayor inmovilizacion con este material ya que precipita la valentinita y/o cervantita                |

Fuente: “Caracterización y tratamiento de suelos contaminados por actividades mineras mediante materiales reactivos”. Andrés Navarro Flores. Universidad Politécnica de Cataluña.

**4.1.1 Descripción del método.** Según Younger <sup>1</sup> el tratamiento de suelos contaminados por la acción de la actividad minera en áreas de minas abandonadas, no puede ser el mismo que para minas activas, ya que se encuentran involucradas las dimensiones de cada situación, así como el periodo de remediación empieza a jugar un papel importante. Por ende, se suelen emplear medidas de “remediación” que tienden a favorecer los procesos naturales de atenuación de la contaminación, así como de técnicas “pasivas”, principalmente de bajo costo.

Ludwig <sup>2</sup> sugiere que la remediación de suelos implica diversas técnicas y se debe:

- Reducir la concentración de metales biodisponibles en suelos y/o residuos.
- Aislar los contaminantes para prevenir su interacción con el medio.
- Impedir la dispersión de los contaminantes.

Las técnicas “In situ”, son una alternativa a las técnicas convencionales de “remediación” y son usadas para el tratamiento de minas en estado de abandono.

**4.1.2 Localización de los residuos y drenajes mineros.** El muestreo se hizo bajo el estudio de depósitos principales, destacando los lodos de flotación de la mina de Osor ubicadas en Girona, cerca del lecho natural de aguas pluviales y los lodos de la concentración gravimétrica de las minas de plomo del área de Bonmati, situadas en torrentes que desembocan en el río Ter, en Cataluña, España.

---

<sup>1</sup> YOUNGER, P.L., BANWART, S.A., HEDIN, R.S. Kluwer Academic Publ. EN: Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation. Dordrecht-Boston-London. 2002; 442 p., citado por NAVARRO, Andrés.

<sup>2</sup> LUDWIG, R.D., MCGREGOR, R.G., BLOWES, D.W. BENNER, S.G y MOUNTJOY, K. Ground Water. EN: A permeable reactive barrier for treatment of heavy metals. No. 40, 2002; p. 59-66, citado por NAVARRO, Andrés.

De igual manera, en cuanto a los drenajes que se originan de la actividad minera, el mas importante es el que se produce en la galería “Coral”, que desagua en la antigua mina de Osor por un socavón de varios kilómetros, de 800 a 1300 [m<sup>3</sup>/día] de aguas de carácter próximo a la neutralidad, pero ricas en F y Zn.

#### 4.1.3 Descripción del suelo estudiado, descripción de los métodos utilizados y materiales utilizados.

- **Descripción del suelo.** La caracterización del suelo y residuos de la zona se llevo a cabo mediante dos secciones de muestreo inalterado como alterado. Los residuos mineros y material de escombros se muestrearon mediante dos porciones de 2 [m] de profundidad, y también muestreo manual de 0.3 [m] de profundidad.
- **Identificación y análisis de las fases minerales.** La Tabla 18 revela los elementos hallados bajo el proceso activación neutrónica (INAA), el cual se entiende como la técnica nuclear por medio del cual permite la determinación cuantitativa de un gran número de elementos presentes en una muestra.

**Tabla 18. Elementos determinados por medio de activación neutrónica.**

| ELEMENTOS DETERMINADOS |                |               |              |                |               |
|------------------------|----------------|---------------|--------------|----------------|---------------|
| Oro (Au)               | Plata (Ag)     | Arsénico(As)  | Bario (Ba)   | Bromo (Br)     | Calcio (Ca)   |
| Hafnio (Hf)            | Mercurio (Hg)  | Iridio (Ir)   | Sodio (Na)   | Molibdeno (Mb) | Níquel (Ni)   |
| Estaño (Sn)            | Estroncio (Sr) | Tantalio (Ta) | Torio (Th)   | Uranio (U)     | Wolframio (W) |
| Samario (Sm)           | Europio (Eu)   | Terbio (Tb)   | Iterbio (Yb) | Lutecio (Lu)   | Hierro (Fe)   |
| Cesio (Cs)             | Escandio (Sc)  | Cerio (Ce)    | Cromo (Cr)   | Antimonio (Sb) | Lantano (La)  |
| Cobalto (Co)           | Rubidio (Rb)   | Cinc (Zn)     | Selenio (Se) | Neodimio (Nd)  |               |

*Fuente: “Caracterización y tratamiento de suelos contaminados por actividades mineras mediante materiales reactivos”. Andrés Navarro Flores. Universidad Politécnica de Cataluña.*

- **Descripción de métodos utilizados.** Para estudiar la posible inmovilización de los metales y metaloides, se han llevado a cabo dos tipos de experiencia:

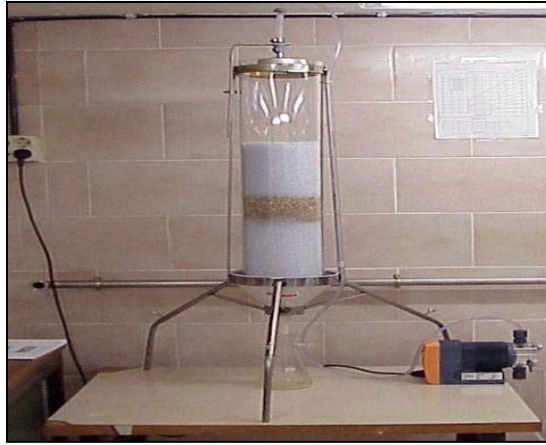
- Lixiviación del suelo minero contaminado, de forma que los eluatos (sustancia obtenida por un proceso de elución, que consiste en la extracción de una sustancia absorbida desde un lecho poroso o columna de cromatografía disolvente adecuado) sirvan como referencia.
- Lixiviación en columna, mediante el empleo de la misma cantidad de suelo contaminado, una vez tratado con los materiales reactivos.

- **Metodología.** En la ejecución de las experiencias se tomaron 7 muestras de lixiviado (liquido resultante del proceso de percolación de un fluido a través de un sólido) durante 420 minutos al final de la columna, midiéndose “In situ”, la conductividad eléctrica, Eh (Potencial Redox), y el Ph.

Los lixiviados que fueron, previamente filtrados a 45 [ $\mu$ m], se acidificaron a pH<2 y se enviaron al laboratorio para su correspondiente análisis. De la misma manera, se enviaron muestras sin acidificar para la determinación de los aniones mayoritarios presentes en cada muestra.

- **Materiales Utilizados.** En los experimentos que se llevaron a cabo en columnas (Fig.2), se contó con una metodología similar empleada en la norma Europea del ensayo de percolación “PrEN14405”, el cual se refiere, al ensayo de percolación de flujo ascendente para componentes inorgánicos, con la diferencia que para reproducir las condiciones ambientales habituales asociadas al efecto de la precipitación, el flujo de agua se produce por la parte superior de la columna.

**Figura 2. Vista General de la columna.**



*Fuente: “Caracterización y tratamiento de suelos contaminados por actividades mineras mediante materiales reactivos”. Andrés Navarro Flores. Universidad Politécnica de Cataluña.*

#### **4.1.4 Análisis de resultados de acuerdo a las pruebas de laboratorio.**

- **Análisis de resultados - Composición Mineralógica.** Para las dos muestras de referencia la mineralogía de los suelos tratados, es similar, aunque presenta variaciones una con respecto a la otra:

- Suelos mineros tratados con ácido fosfórico: Para este suelo se detecta cuarzo, calcita, barita, moscovita, cerusita y caolinita.
- Suelos mineros tratados con óxido de Magnesio: Se detecta cuarzo, barita, dickita-nacrita, szomolnoquita y perclasa.
- Suelo tratado con cemento portland: Se detectan cuarzo, calcita, albita , barita y moscovita.

- **Análisis de resultados - Composición del óxido de Magnesio.** El óxido de magnesio tiene la denominación CALIDAD “L”, su composición se muestra en la Tabla.19:

**Tabla 19. Composición Oxido de Magnesio. Calidad “L”.**

| Componentes                    | %    |
|--------------------------------|------|
| SiO <sub>2</sub>               | 8.00 |
| CaO                            | 10.1 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.90 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.00 |
| MgO                            | 77.3 |
| P.F.                           | 0.66 |
| P.F : Fracción residual        |      |

Fuente: “Caracterización y tratamiento de suelos contaminados por actividades mineras mediante materiales reactivos”. Andrés Navarro Flores. Universidad Politécnica de Cataluña.

- **Análisis de resultados - Composición Geoquímica.** Resultados en Tabla.20.

**Tabla 20. Composición geoquímica de los suelos de referencia.**

| COMPOSICION GEOQUIMICA |       |     |        |     |         |     |      |     |       |     |      |     |       |     |     |     |
|------------------------|-------|-----|--------|-----|---------|-----|------|-----|-------|-----|------|-----|-------|-----|-----|-----|
| Elemento               | Ag    |     | Cu     |     | Cd      |     | Mo   |     | Pb    |     | Ni   |     | Zn    |     | As  |     |
| Unidad                 | 0,3   | ppm | 1      | ppm | 0,3     | ppm | 1    | ppm | 3     | ppm | 1    | ppm | 1     | ppm | 0,5 | ppm |
| Limite                 |       |     |        |     |         |     |      |     |       |     |      |     |       |     |     |     |
| Deteccion              |       |     |        |     |         |     |      |     |       |     |      |     |       |     |     |     |
| Suelo                  | 30,4  |     | >10000 |     | 14,6    |     | 5    |     | >5000 |     | 141  |     | 38600 |     | 218 |     |
| Minero                 |       |     |        |     |         |     |      |     |       |     |      |     |       |     |     |     |
| Mina                   | 1,7   |     | 42     |     | 0,5     |     | 2    |     | >5000 |     | 5    |     | 26    |     | 9   |     |
| Carlota                |       |     |        |     |         |     |      |     |       |     |      |     |       |     |     |     |
| Mina de                | 66,2  |     | 88     |     | 68,5    |     | 1    |     | >5000 |     | 31   |     | 34000 |     | 164 |     |
| Osor                   |       |     |        |     |         |     |      |     |       |     |      |     |       |     |     |     |
| Cemento                | 0,5   |     | 13     |     | < 0,355 |     | 8    |     | 123   |     | 18   |     | 18    |     | 4   |     |
| Portland               |       |     |        |     |         |     |      |     |       |     |      |     |       |     |     |     |
| NC                     | //    |     | 1000   |     | 55      |     | 70   |     | 550   |     | 1000 |     | 1000  |     | 30  |     |
| Elemento               | Ba    |     | Co     |     | Cr      |     | Fe   |     | Sb    |     | Se   |     | Hg    |     |     |     |
| Unidad                 | 50    | ppm | 1      | ppm | 2       | ppm | 0    | %   | 0,1   | ppm | 3    | ppm | 1     | ppm |     |     |
| Limite                 |       |     |        |     |         |     |      |     |       |     |      |     |       |     |     |     |
| Deteccion              |       |     |        |     |         |     |      |     |       |     |      |     |       |     |     |     |
| Suelo                  | 35000 |     | 17     |     | 244     |     | 2,98 |     | 143   |     | < 3  |     | < 1   |     |     |     |
| Minero                 |       |     |        |     |         |     |      |     |       |     |      |     |       |     |     |     |
| Mina                   | 1600  |     | 2      |     | 30      |     | 5,14 |     | 4     |     | < 3  |     | < 1   |     |     |     |
| Carlota                |       |     |        |     |         |     |      |     |       |     |      |     |       |     |     |     |
| Mina de                | 2190  |     | 15     |     | 119     |     | 0,96 |     | 208   |     | < 3  |     | 5     |     |     |     |
| Osor                   |       |     |        |     |         |     |      |     |       |     |      |     |       |     |     |     |
| Cemento                | 200   |     | 2      |     | 152     |     | 1,02 |     | 1,1   |     | < 3  |     | < 1   |     |     |     |
| Portland               |       |     |        |     |         |     |      |     |       |     |      |     |       |     |     |     |
| NC                     | 1000  |     | 90     |     | 1000    |     | //   |     | 30    |     | 70   |     | 30    |     |     |     |

Fuente: “Caracterización y tratamiento de suelos contaminados por actividades mineras mediante materiales reactivos”. Andrés Navarro Flores. Universidad Politécnica de Cataluña.

**4.1.5 Análisis de resultados - Ensayos de Lixiviación.** En relación al pH indican un incremento del mismo en las distintas experiencias realizadas, excepto en el caso del ácido fosfórico. La Tabla.21 y Tabla 22. Presenta los parámetros “in situ”:

**Tabla 21. Parámetros “In situ” medidos en los ensayos.**

| MUESTRA | TIEMPO (min) | Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | pH    | Eh (mV) |
|---------|--------------|-------------------------------------------|-------|---------|
| M-1     | 0            | 1571                                      | 7,99  | -36,4   |
| M-2     | 30           | 860                                       | 8,08  | -45,5   |
| M-3     | 60           | 580                                       | 8,36  | -56     |
| M-4     | 120          | 410                                       | 8,35  | -55,6   |
| M-5     | 180          | 350                                       | 8,1   | -41,1   |
| M-6     | 300          | 310                                       | 8,11  | -42,1   |
| OCM-1   | 0            | 1490                                      | 11,51 | -235    |
| OCM-2   | 30           | 1170                                      | 11,52 | -235    |
| OCM-3   | 60           | 940                                       | 11,52 | -235,1  |
| OCM-4   | 120          | 810                                       | 11,51 | -235,1  |
| OCM-5   | 180          | 750                                       | 11,47 | -232,9  |
| OCM-6   | 300          | 740                                       | 11,46 | -232,4  |
| PM-1    | 0            | 8720                                      | 3,85  | 252     |
| PM-2    | 30           | 4730                                      | 4,95  | 246     |
| PM-3    | 60           | 2760                                      | 5,17  | 293     |
| PM-4    | 120          | 1510                                      | 5,36  | 294     |
| PM-5    | 180          | 1001                                      | 5,6   | 285     |
| PM-6    | 300          | 620                                       | 5,81  | 268     |
| MGM-1   | 0            | 5730                                      | 12,6  | -26     |
| MGM-2   | 30           | 5980                                      | 12,61 | -70     |
| MGM-3   | 60           | 5860                                      | 12,6  | -66     |
| MGM-4   | 120          | 5340                                      | 12,55 | -68     |
| MGM-5   | 180          | 4840                                      | 12,5  | -71     |
| MGM-6   | 300          | 4240                                      | 12,43 | -64     |
| MGM-7   | 420          | 3800                                      | 12,35 | -61     |

M-1 a M-6: Suelo minero sin tratar.

OCM-1 a OCM-7: Suelo tratado con OPC, PM-1 a M-7: suelo tratado con ácido fosfórico.

MGM-1 a MGM-7: Suelo tratados con MgO.

*Fuente: “Caracterización y tratamiento de suelos contaminados por actividades mineras mediante materiales reactivos”. Andrés Navarro Flores. Universidad Politécnica de Cataluña.*

**Tabla 22. Parámetros “In situ” medidos en los ensayos II.**

| <b>LIXIVIACIÓN CON SUELO MINERO</b>                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Materiales inmovilizadores: LIX, Cemento, Fosfórico, MgO.</b>                                                                                                                                                                                                            |
| <b>ANÁLISIS DE RESULTADOS LIXIVIACIÓN DEL COBRE Cu</b>                                                                                                                                                                                                                      |
| Se produce una movilización del metal con cualquiera de los materiales empleados para la inmovilización, mientras que únicamente se moviliza poca cantidad con el “puro” suelo minero.                                                                                      |
| El cemento es el que presenta mejor comportamiento<br>El ácido fosfórico provoca la lixiviación de concentraciones por encima del límite y el MgO también.                                                                                                                  |
| <b>ANÁLISIS DE RESULTADOS LIXIVIACIÓN DEL CADMIO Cd</b>                                                                                                                                                                                                                     |
| Todos los materiales empleados consiguen una buena inmovilización, excepto el ácido fosfórico que moviliza al contaminante                                                                                                                                                  |
| El mejor resultado se obtiene con el cemento, para datos estabilizados el 95.2%                                                                                                                                                                                             |
| <b>ANÁLISIS DE RESULTADOS LIXIVIACIÓN DEL PLOMO Pb</b>                                                                                                                                                                                                                      |
| El mejor resultado se obtiene con el ácido fosfórico que produce eliminaciones de 96.8%. Por el contrario, el óxido de magnesio moviliza grandes cantidades de Pb                                                                                                           |
| <b>ANÁLISIS DE RESULTADOS LIXIVIACIÓN DEL ANTIMONIO Sb</b>                                                                                                                                                                                                                  |
| Los mejores resultados se obtienen con el óxido de magnesio, mientras que el ácido fosfórico y el cemento producen cierta movilización.                                                                                                                                     |
| <b>ANÁLISIS DE RESULTADOS LIXIVIACIÓN DEL ZINC Zn</b>                                                                                                                                                                                                                       |
| El zinc queda eliminado por el cemento, que resulta ser el mejor material para el control de este metal. Por el contrario los demás experimentos muestran la movilización del zinc en cantidades muy altas y por encima de lo que lixivia el suelo minero de forma natural. |

*Fuente: “Caracterización y tratamiento de suelos contaminados por actividades mineras mediante materiales reactivos”. Andrés Navarro Flores. Universidad Politécnica de Cataluña.*

Graficas de resultados ver anexo 6.

#### 4.1.6 Análisis de resultados- modelización geoquímica. Ver Tabla 23.

**Tabla 23. Resultados de inmovilización.**

| MODELIZACION GEOQUIMICA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| INMOVILIZACION DEL Cb                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Las condiciones de los ensayos a pH alto, indican que la fase estable es un hidroxisulfato complejo de cadmio, que podría inmovilizar dicho metal, como así sucede en los ensayos con cemento y óxido de Mg. Por el contrario a pH bajo y condiciones ácidas se puede movilizar, tal y como ha sucedido con el ácido fosfórico                                                                                                                                                |
| INMOVILIZACION DEL Pb                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Para pH elevado (>12) y condiciones reductoras, como las de los ensayos con MgO, el Pb presenta gran movilidad, tal vez por la formación de complejos. En ese sentido, y en el caso del cemento con pH= 10 -11 y condiciones muy reductoras podría producirse la precipitación de hidróxido de Pb. Únicamente a pH muy ácido (< 3) y en condiciones oxidantes parece posible la movilización del plomo.                                                                       |
| INMOVILIZACION DEL Sb                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Las condiciones con MgO indicarían que las fases más estables son dos minerales: valentinita y cervantita, que al precipitar eliminarían al Sb. Por otro lado, para condiciones oxidantes y pH muy bajo (ensayo con fosfórico) el Sb no debería moverse, aunque sí lo hace. Por el contrario, en condiciones reductoras y pH>11, tal y como sucede con las experiencias con cemento, se produciría la movilización del antimonio en forma de Sb <sub>2</sub> S <sub>4</sub> . |
| INMOVILIZACION DEL ZN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| En el caso del Zn el metal debería comportarse como un elemento claramente móvil para pH bajo y medio oxidante (ensayo con fosfórico) y para pH muy alto (pH>12) y medio moderadamente reductor (ensayo con MgO)                                                                                                                                                                                                                                                              |

*Fuente: "Caracterización y tratamiento de suelos contaminados por actividades mineras mediante materiales reactivos". Andrés Navarro Flores. Universidad Politécnica de Cataluña.*

#### 4.1.7 Conclusiones del método.

Las experiencias realizadas muestran la dificultad de encontrar un material reactivo que sirva para inmovilizar todos los metales presentes en los suelos

contaminados estudiados. Por ello, en situaciones complejas como ésta, deberán emplearse posiblemente, varios materiales en sucesivas etapas del tratamiento.

- En relación con el Cd y en las condiciones de los ensayos se podría inmovilizar dicho metal, como así sucede en los ensayos con cemento y óxido de Mg. Por el contrario a pH bajo y condiciones ácidas se puede movilizar, tal y como ha sucedido con el empleo de ácido fosfórico.
- En relación con el Cu y para las condiciones de pH bajo de los ensayos con ácido fosfórico, y unos contenidos de sulfatos y cloruros apreciables, las fases más estables son especies solubles de Cu, lo que indica que dicho metal tenderá a moverse tal y como así sucede. También, para valores de pH: 10-12 y condiciones reductoras (ensayos con cemento y MgO), podría moverse en forma de complejo  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ , tal y como sucede salvo para el caso del suelo minero tratado con cemento portland.
- En las condiciones experimentales de los ensayos con ácido fosfórico, el Pb es un elemento claramente poco móvil a causa de la posible precipitación de la cloropiromorfita, que controla las concentraciones de plomo en la fase acuosa, cuando hay concentraciones significativas de P y cloruros. Por el contrario, para pH elevado (>12) y condiciones reductoras, como las de los ensayos con MgO, el Pb presenta una gran movilidad, tal vez por la formación de complejos.
- Para medio alcalino y un potencial redox bajo (ensayos con cemento y MgO) es poco móvil, por la posible precipitación de óxidos e hidróxidos de Zn.

#### 4.1.8 Análisis cuantitativo y cualitativo.

**Tabla 24. Análisis cuantitativo del tratamiento.**

| ENSAYO DE SUELO SIN TRATAR |                                                                                                         |                  |                                               |                   |                   |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|-------------------|-------------------|
| Item                       | DESCRIPCION                                                                                             | UNIDAD           | CANTIDAD                                      | VR. UNITARIO      | VR. PARCIAL       |
| <b>1</b>                   | <b>PRELIMINARES</b>                                                                                     |                  |                                               |                   |                   |
| 1,1                        | Localizacion y Replanteo*                                                                               | m <sup>2</sup>   | 0,30                                          | \$ 1.400          | \$ 420            |
|                            |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>   | <b>\$ 420</b>     |
| <b>2</b>                   | <b>MOVIMIENTO DE TIERRA</b>                                                                             |                  |                                               |                   |                   |
| 2,1                        | Excavacion manual en material comun y/o conglomerado a mano, incluye transporte interno dentro del area | m <sup>3</sup>   | 0,30                                          | \$ 17.750         | \$ 5.325          |
| 2,2                        | Relleno con material de suelo comun                                                                     | m <sup>3</sup>   | 0,18                                          | \$ 17.750         | \$ 3.195          |
| 2,3                        | Retiro de material sobrante en el area                                                                  | m <sup>3</sup>   | 0,12                                          | \$ 22.300         | \$ 2.676          |
|                            |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>   | <b>\$ 11.196</b>  |
| <b>4</b>                   | <b>ENSAYOS REALIZADOS EN EL SUELO NATURAL **</b>                                                        |                  |                                               |                   |                   |
| 4,1                        | Conductividad Electrica                                                                                 | unid.            | 1                                             | \$ 24.300         | \$ 24.300         |
| 4,2                        | Ph                                                                                                      | unid.            | 1                                             | \$ 58.000         | \$ 58.000         |
| 4,3                        | Eh (Potencial redox)                                                                                    | unid.            | 1                                             | \$ 135.000        | \$ 135.000        |
| 4,4                        | Ensayos de Lixiviacion (E. Percolación)                                                                 | unid.            | 1                                             | \$ 165.000        | \$ 165.000        |
|                            |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>   | <b>\$ 382.300</b> |
|                            | <b>SUBTOTAL COSTO OBRA (SCO) <sup>2</sup></b>                                                           | <b>\$ 11.616</b> | <b>SUBTOTAL COSTO OBRA (SCO) <sup>1</sup></b> | <b>\$ 393.916</b> |                   |
|                            | <b>ADMINISTRACION (A = 10% SCO)</b>                                                                     | <b>\$ 1.162</b>  | <b>ADMINISTRACION (A = 10% SCO)</b>           | <b>\$ 39.392</b>  |                   |
|                            | <b>IMPREVISTOS (I = 5% SCO)</b>                                                                         | <b>\$ 581</b>    | <b>IMPREVISTOS (I = 5% SCO)</b>               | <b>\$ 19.696</b>  |                   |
|                            | <b>UTILIDAD (U = 5% SCO)</b>                                                                            | <b>\$ 581</b>    | <b>UTILIDAD (U = 5% SCO)</b>                  | <b>\$ 19.696</b>  |                   |
|                            | <b>IVA (IVA = 16% de U)</b>                                                                             | <b>\$ 93</b>     | <b>IVA (IVA = 16% de U)</b>                   | <b>\$ 3.151</b>   |                   |
|                            | <b>TOTAL COSTO OBRA (TCO=SCO+A+I+U+IVA)</b>                                                             | <b>\$ 14.032</b> | <b>TOTAL COSTO OBRA (TCO=SCO+A+I+U+IVA)</b>   | <b>\$ 475.851</b> |                   |
|                            | <b>TOTAL COSTO INTERVENTORIA (TCI= 5%TCO)</b>                                                           | <b>\$ 702</b>    | <b>TOTAL COSTO INTERVENTORIA (TCI= 5%TCO)</b> | <b>\$ 23.793</b>  |                   |
|                            | <b>TOTAL COSTO PROYECTO (TCP= TCO+TCI)</b>                                                              | <b>\$ 14.734</b> | <b>TOTAL COSTO PROYECTO (TCP= TCO+TCI)</b>    | <b>\$ 499.643</b> |                   |

Fuente: Autores.

\* Localización y replanteo se refiere a todas las actividades correspondientes a la localización y estudio de la zona.

\*\* Los ensayos realizados en la caracterización de las muestras y los de análisis y evaluación.

<sup>1</sup> Ítem Precio Subtotal de la obra, teniendo en cuenta costos agregados en los diferentes ensayos de caracterización y análisis de las diferentes muestras.

<sup>2</sup> Ítem precio Subtotal de la obra, sin incluir costos agregados de ensayos de caracterización y análisis de las diferentes muestras.

| ENSAYO DE SUELO TRATADO |                                                                                                         |                  |          |                                               |                   |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------|-----------------------------------------------|-------------------|
| Item                    | DESCRIPCION                                                                                             | UNIDAD           | CANTIDAD | VR. UNITARIO                                  | VR. PARCIAL       |
| <b>1</b>                | <b>PRELIMINARES</b>                                                                                     |                  |          |                                               |                   |
| 1,1                     | Localizacion y Replanteo*                                                                               | m <sup>2</sup>   | 0,30     | \$ 1.400                                      | \$ 420            |
|                         |                                                                                                         |                  |          | <b>SUBTOTAL</b>                               | <b>\$ 420</b>     |
| <b>2</b>                | <b>MOVIMIENTO DE TIERRA</b>                                                                             |                  |          |                                               |                   |
| 2,1                     | Excavacion manual en material comun y/o conglomerado a mano, incluye transporte interno dentro del area | m <sup>3</sup>   | 0,30     | \$ 17.750                                     | \$ 5.325          |
| 2,2                     | Relleno con material de suelo comun                                                                     | m <sup>3</sup>   | 0,18     | \$ 17.750                                     | \$ 3.195          |
| 2,3                     | Retiro de material sobrante en el area                                                                  | m <sup>3</sup>   | 0,12     | \$ 22.300                                     | \$ 2.676          |
|                         |                                                                                                         |                  |          | <b>SUBTOTAL</b>                               | <b>\$ 11.196</b>  |
| <b>3</b>                | <b>ADICIÓN DE MATERIALES</b>                                                                            |                  |          |                                               |                   |
| 3,1                     | Cemento Portland                                                                                        | kg               | 5,00     | \$ 456                                        | \$ 2.280          |
| 3,2                     | Acido Fosfórico                                                                                         | lt               | 0,05     | \$ 138.600                                    | \$ 6.930          |
| 3,3                     | Óxido de Magnesio                                                                                       | kg               | 3,50     | \$ 611                                        | \$ 2.137          |
|                         |                                                                                                         |                  |          | <b>SUBTOTAL</b>                               | <b>\$ 11.347</b>  |
| <b>4</b>                | <b>ENSAYOS REALIZADOS EN EL SUELO NATURAL ***</b>                                                       |                  |          |                                               |                   |
| 4,1                     | Conductividad Electrica                                                                                 | unid.            | 1        | \$ 24.300                                     | \$ 24.300         |
| 4,2                     | Ph                                                                                                      | unid.            | 1        | \$ 58.000                                     | \$ 58.000         |
| 4,3                     | Eh (Potencial redox)                                                                                    | unid.            | 1        | \$ 135.000                                    | \$ 135.000        |
| 4,4                     | Ensayos de Lixiviacion (E. Percolación)                                                                 | unid.            | 1        | \$ 165.000                                    | \$ 165.000        |
|                         |                                                                                                         |                  |          | <b>SUBTOTAL</b>                               | <b>\$ 382.300</b> |
|                         | <b>SUBTOTAL COSTO OBRA (SCO) <sup>2</sup></b>                                                           | <b>\$ 22.963</b> |          | <b>SUBTOTAL COSTO OBRA (SCO) <sup>1</sup></b> | <b>\$ 405.263</b> |
|                         | <b>ADMINISTRACION (A = 10% SCO)</b>                                                                     | <b>\$ 2.296</b>  |          | <b>ADMINISTRACION (A = 10% SCO)</b>           | <b>\$ 40.526</b>  |
|                         | <b>IMPREVISTOS (I = 5% SCO)</b>                                                                         | <b>\$ 1.148</b>  |          | <b>IMPREVISTOS (I = 5% SCO)</b>               | <b>\$ 20.263</b>  |
|                         | <b>UTILIDAD (U = 5% SCO)</b>                                                                            | <b>\$ 1.148</b>  |          | <b>UTILIDAD (U = 5% SCO)</b>                  | <b>\$ 20.263</b>  |
|                         | <b>IVA (IVA = 16% de U)</b>                                                                             | <b>\$ 184</b>    |          | <b>IVA (IVA = 16% de U)</b>                   | <b>\$ 3.242</b>   |
|                         | <b>TOTAL COSTO OBRA (TCO=SCO+A+I+U+IVA)</b>                                                             | <b>\$ 27.739</b> |          | <b>TOTAL COSTO OBRA (TCO=SCO+A+I+U+IVA)</b>   | <b>\$ 489.557</b> |
|                         | <b>TOTAL COSTO INTERVENTORIA (TCI= 5%TCO)</b>                                                           | <b>\$ 1.387</b>  |          | <b>TOTAL COSTO INTERVENTORIA (TCI= 5%TCO)</b> | <b>\$ 24.478</b>  |
|                         | <b>TOTAL COSTO PROYECTO (TCP= TCO+TCI)</b>                                                              | <b>\$ 29.126</b> |          | <b>TOTAL COSTO PROYECTO (TCP= TCO+TCI)</b>    | <b>\$ 514.035</b> |

Fuente: Autores.

\* Localización y replanteo se refiere a todas las actividades correspondientes a la localización y estudio de la zona.

\*\* Los ensayos realizados en la caracterización de las muestras y los de análisis y evaluación.

<sup>1</sup> Ítem Precio Subtotal de la obra, teniendo en cuenta costos agregados en los diferentes ensayos de caracterización y análisis de las diferentes muestras.

<sup>2</sup> Ítem precio Subtotal de la obra, sin incluir costos agregados de ensayos de caracterización y análisis de las diferentes muestras.

- Análisis cualitativo.

**Tabla 25. Análisis cualitativo del tratamiento.**

| DESCRIPCION<br>METODO DE<br>ESTABILIZACION                                                         | ITEMS COMPARATIVOS |                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                 |                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                     |                                                                 |                                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                    | VALORACION         | SUELO                                                                                 | CARACTERISTICAS                                                                                                                                                                                                  | ENSAYOS REQUERIDOS                                                                                                                                              |                                                                                               | EJECUCION                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | IMPACTO AMBIENTAL                                                                                                   | EFFECTIVIDAD                                                    |                                                                                |
| MEJORA DE SUELOS<br>CONTAMINADOS<br>POR ACTIVIDADES<br>MINERAS MEDIANTE<br>MATERIALES<br>REACTIVOS | ☆☆☆☆☆              | Suelos con<br>presencia de<br>materiales<br>contaminantes<br>(Cd, Cu, Pb, Sb<br>y Zn) | 1. El proceso de lixiviado<br>(liquido que resulta de la<br>percolación de un liquido<br>a través de un sólido)<br>mide la conductividad<br>eléctrica, el potencial<br>Redox y el Ph de la<br>muestra "in situ". | CARACTERIZACIÓN                                                                                                                                                 | COMPROBACION                                                                                  | 1. Las pruebas de<br>composición mineralógica<br>y composición geoquímica<br>muestran el tipo de<br>elementos en las muestras<br>y la proporción.<br><br>2. Los resultados<br>obtenidos de las pruebas<br>de lixiviación permiten<br>visualizar el<br>comportamiento del<br>material a inmovilizar frente<br>a los tipos de reactivos, lo<br>que permite diferenciar el<br>mejor | Medio-Bajo                                                                                                          | Alta                                                            |                                                                                |
|                                                                                                    |                    |                                                                                       | 2. Los materiales<br>reactivos usados<br>dependen del tipo de<br>contaminante, los<br>estabilizantes aplicados<br>son: Ácido fosfórico,<br>oxido de magnesio y<br>cemento portland.                              | 1. Microscopia electrónica<br>de barrido con sistema de<br>identificación acoplado<br>(SEM-EDS), determina la<br>distribución de los<br>elementos en las fases. | Los siguientes procesos se usan<br>para estudiar la posible<br>inmovilización de los metales: |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 1. Alternativa ecológica.<br><br>2. Reduce la concentración<br>de residuos y permite la<br>reutilización del suelo. | Impide la<br>dispersión de los<br>contaminantes y<br>los aísla. |                                                                                |
|                                                                                                    |                    |                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                  | 2. Difractometría de rayos<br>X: Determina la<br>composición mineralógica<br>del suelo.                                                                         | 1. Lixiviación del suelo<br>contaminado donde los elautos<br>sean la referencia.              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                     |                                                                 |                                                                                |
|                                                                                                    |                    |                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                 |                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                     |                                                                 | 3. Activación neutrónica:<br>Determina la composición<br>geoquímica del suelo. |

Fuente: Autores.

## 4.2 BIOMINERALIZACION APLICADA A LA MITIGACION DE PROCESOS EROSIVOS SUPERFICIALES

Los estudios de biotecnología, entendido como el uso de organismos vivos o de compuestos obtenidos de organismos vivos para obtener productos de valor para el uso de la humanidad. Para el mejoramiento de las propiedades mecánicas y físicas de los suelos para obras civiles son escasos, específicamente del uso de microorganismos para el control de un proceso erosivo superficial.

**4.2.1 Descripción del método.** El presente método se trabajo con muestras de un perfil de suelo residual tropical, las cuales se tomaron de tres puntos diferentes del cerro de Nutibara, en la ciudad de Medellín, en donde se observan procesos erosivos actuantes.

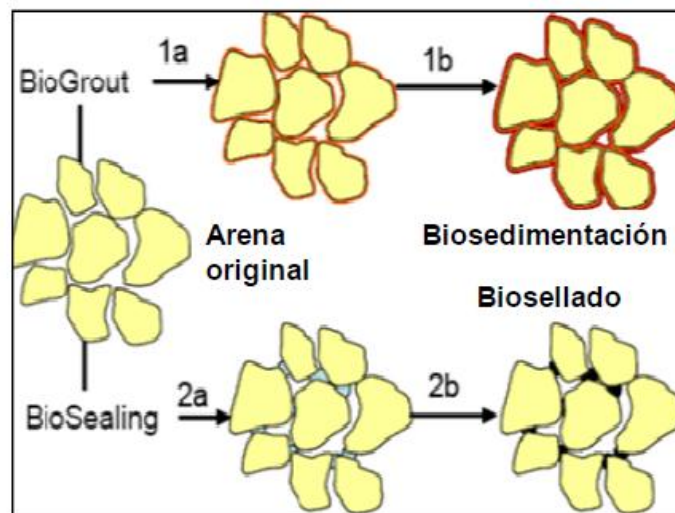
- **Aplicación de las bacterias en la ingeniería.** Se pueden mencionar algunas de las aplicaciones más importantes de las bacterias en la ingeniería:

**Bio-remediación.** Es una herramienta efectiva para mejorar la degradación de contaminantes en el suelo. Consiste en adicionar nutrientes inorgánicos (ejemplo: fosforo y nitrógeno), un aceptador del electrón típicamente oxígeno y posiblemente un donador de electrones puesto que en la superficie que estimule el crecimiento de los micro-organismos y degrade los contaminantes, con el objeto de obtener productos no tóxicos como agua y CO<sub>2</sub>.

Estas técnicas son aplicables especialmente en las arenas por su alta permeabilidad y no se aplica en arcillas por su baja permeabilidad.

**Bio-sellado y biosedimentación.** Para estas dos aplicaciones, las bacterias pueden reducir la conductividad hidráulica de los suelos o rocas fracturadas, alterar la migración de finos, taponar los poros, entre otras. Palmir: “La bio-actividad puede desarrollarse naturalmente o puede ser promovida y controlada por la disponibilidad de nutrientes en condiciones ambientales”<sup>1</sup>. Whiffin <sup>2</sup> denomina a esta técnica de sellado de poros del suelo como Biosealing. Fig.3.

**Figura 3. Principio de la formación de Biosealing y Biogrout en arenas.**



Fuente: “Biomíneralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales”. Marco Tulio Arrieta Rodríguez. Universidad Nacional de Colombia.

**Bio-mineralización.** Proceso común en la naturaleza, donde se realiza el estudio de la estructura, propiedades, formación y precipitación de minerales, ya sean cristalinos o amorfos.

<sup>1</sup> Ibid., p. 4203, citado por ARRIETA, Marco.

<sup>2</sup> WHIFFIN, V. y otros. Biogrout and Biosealing. EN: Pore space engineering with Bacteria. 2005, citado por ARRIETA, Marco.

Soto: “Las estructuras formadas se componen en un 80% de bio-minerales cristalinos y 20% de amorfos. Se considera que la contribución de calcio, es alrededor del 50% de todos los bio-minerales conocidos” <sup>3</sup>. Según Valencia <sup>4</sup>, la Bio-mineralización ocurre por reacciones químicas entre iones específicos o compuestos, como resultado de las actividades metabólicas de un organismo en ciertas condiciones ambientales.

**Precipitación de carbonato de calcio.** La bio-estabilización consiste en la mejoría de las propiedades geotécnicas de los suelos mediante la precipitación de carbonato de calcio. Valencia <sup>5</sup>, menciona los factores principales:

- La concentración de calcio ( $Ca^{+2}$ ) y de carbonato disuelto (*DIC*)
- El Ph.
- La disponibilidad de sitios de nucleación.

La precipitación de carbonato de calcio ocurre fácilmente en ambientes alcalinos y medios abundantes en calcio e iones de carbonato.

• **Recolección de Muestras de Campo.** Tomadas dos estados:

- Muestras alteradas (bolsas) e inalteradas (Muestras de cajón).

Las muestras alteradas se tomaron de manera manual fueron tomadas a 1m de profundidad teniendo en cuenta que estas no presentan contenido de materia orgánica. Adicionalmente se realizó la recolección de muestras inalteradas, las cuales fueron colectadas por medio de cajones.

---

<sup>3</sup> SOTO, A. Introducción a los Biominerales y Biomateriales. Universidad de Chile. 2003; 31 p, citado por ARRIETA, Marco.

<sup>4</sup> Valencia, Op. Cit., p. 12, citado por ARRIETA, Marco.

<sup>5</sup> Valencia, Op. Cit., p. 12, citado por ARRIETA, Marco.

**4.2.2 Ensayos aplicados en laboratorio.** Determinación de contenido de humedad, peso específico de los sólidos, límites de Atterberg, miniatura compacta tropical (MCT) expedita, análisis granulométrico, microscopia electrónica de barrido (MEB), resistencia al corte directo, succión total y matricial, consolidación, “Pinhole Test” o ensayo de aguja. Ver anexo 4.

**4.2.3 Análisis de resultados de acuerdo a las pruebas de laboratorio.** Se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio ejecutados, de los cuales se efectuaron tanto en el suelo en su estado natural, como en el suelo tratado con el Nutriente B4. Con el objeto de evaluar la influencia que tiene la adición del nutriente en las propiedades del suelo.

Se hace referencia al suelo tal cual fue tomado en el sitio de muestreo como suelo original (SN). Así mismo, se hace referencia al suelo con nutriente (CN).

- **Resistencia al corte directo.** Con el fin de determinar la influencia de la adición del nutriente en la resistencia al corte, se analizaron los parámetros de cohesión y ángulo de fricción, para cada una de las muestras, cuyos resultados están plasmados en la Tabla.26.

**Tabla 26. Valores de cohesión y ángulo de fricción, Muestras saturadas y no saturadas.**

| MUESTRA | SIN NUTRIENTE |               |          |               | CON NUTRIENTE |               |          |               |
|---------|---------------|---------------|----------|---------------|---------------|---------------|----------|---------------|
|         | NATURAL       |               | SATURADO |               | NATURAL       |               | SATURADO |               |
|         | C (Kpa)       | $\varphi$ (°) | C (Kpa)  | $\varphi$ (°) | C (Kpa)       | $\varphi$ (°) | C (Kpa)  | $\varphi$ (°) |
| M1      | 60            | 54            | 49       | 54            | 70            | 60            | 55       | 60            |
| M2      | 30            | 19            | 26       | 19            | 43            | 25            | 37       | 25            |
| M3      | 20            | 18            | 14       | 18            | 31            | 29            | 24       | 29            |

Fuente: “Biomíneralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales”. Marco Tulio Arrieta Rodríguez. Universidad Nacional de Colombia. (Tomado de Arrieta, 2011).

Este aumento en la fricción y cohesión se refleja en un incremento de la resistencia al corte para esfuerzos verticales entre 50 [kPa] y 200 [kPa], el porcentaje de aumento para la muestra M1 estuvo entre un 18% y 22%, para la muestra M2 entre 21% y 33% para la muestra M3 entre 40% y 41%, tanto para el suelo con la humedad natural, como en la condición saturada. Ver anexo 7.

- **Succión total y matricial.** El tratamiento tiende a aumentar la succión total y matricial. Este cambio indica una reducción de la macro-porosidad y micro-porosidad del suelo, debida en gran parte a la formación de concreciones entre granos de suelo provocadas por la precipitación de carbonatos y/o a la agregación generada por el nutriente, lo que reduce de manera considerable el tamaño de poros en las muestras. Ver anexo 7.

- **“Pinhole test”.** Sherard <sup>6</sup>. Para analizar el potencial erosivo que posee el suelo y su variación al momento de adicionarle el nutriente se realizó dicho ensayo. A medida que las curvas de carga y descarga se encuentran separadas una de otra los suelos se consideran como dispersivos y altamente erodables tal como se ve en las figuras del suelo sin nutriente.

- **Desagregación.** Esta investigación muestra claramente, que el tratamiento logró disminuir la erodabilidad de los suelos estudiados cuando son sumergidos en agua, dada la nula desagregación que presentaron estos. Ver anexo 7.

---

<sup>6</sup> SHERARD, J.L., DUNNIGAN L.P, Decker. Y STEEL E.F. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. EN: “Pinhole Test for Identifying Dispersive Soils”. Vol. 102, No. GT-01, 1976; P. 69-85, citado por ARRIETA, Marco.

#### **4.2.4 Conclusiones del método.**

En la actualidad se vienen implementando técnicas comunes de estabilización a costos muy elevados y en algunos casos con gran impacto ambiental. Por esta razón y dada la naturaleza innovadora de esta investigación, los costos asociados con el uso de la biomineralización como técnica propuesta pueden llegar a ser bajos, si se piensa en el menor impacto que causa en relación con los tratamientos convencionales.

Es de resaltar el hecho de que en esta investigación se trabajo con bacterias inherentes del suelo, metodología que fue propuesta por Valencia (2009) y no con bacterias calcificantes del medio, logrando de manera significativa la disminución del impacto ambiental, dado que no es considerado un agente externo en la aplicación del tratamiento, evitando una alteración al equilibrio del ecosistema bacteriano. Si bien no se puede considerar los resultados de este trabajo como contundentes, es un aporte importante en la biotecnología aplicada a la geotecnia y que esta encaminado a resultados en general satisfactorios, tales como:

Los resultados obtenidos en las pruebas índices, mostraron una reducción de la plasticidad del suelo y del índice de vacíos, probablemente debido a las agregaciones entre partículas causada por el tratamiento o a la precipitación de los carbonatos de calcio.

- El tratamiento generó una disminución en la contracción del suelo. Este resultado puede considerarse positivo, dado que se minimiza el riesgo degeneración de grietas, contribuyendo a la estabilidad del suelo.
- Los cambios producidos por la adición del nutriente en la clasificación del perfil, donde se observa que a pesar de no haberse evidenciado ningún cambio en la clasificación por el método SUCS, se tiene una reducción en la plasticidad. Es

de anotar que aunque no se evidencia cambio algún en la clasificación no necesariamente significa que el tratamiento no influyó en el comportamiento del suelo, más bien refleja la baja sensibilidad de los métodos utilizados para evaluar los niveles de cambio en las muestras.

- Del ensayo de clasificación MCT rápida se analizó, la variación de la contracción en función del contenido de finos del suelo tratado y no tratado, mostrando que la adición del nutriente provoca disminución de la contracción, debido a la estabilización del suelo. Aspecto que desde el punto de vista geotécnico se considera como una mejora en la respuesta del suelo, ya que se puede minimizar el riesgo de retracción lo que contribuye a la estabilidad del suelo.
- En los suelos con tratamiento mediante la técnica de MEB, se observó que en todas las muestras se generaron precipitados en forma de fibras, que al analizarlas químicamente indican la presencia de calcio asociada a la precipitación de carbonato de calcio; adicionalmente el tratamiento aglomeró las partículas de suelo, aspectos que generan una reducción en sus vacíos, lo cual se ve reflejado en una mejoría de las propiedades mecánicas del suelo tratado.
- En lo que se refiere a la resistencia al corte de la muestra, se presentó una mejora de hasta un 41% en los parámetros geomecánicos, mejora debida a la adición del nutriente, tanto para las muestras saturadas como no saturadas.

El tratamiento tiende a aumentar la succión total y matricial. Este cambio indica una reducción de la macroporosidad y microporosidad del suelo, debida en gran parte a la formación de concreciones entre granos de suelo provocadas por la precipitación de carbonatos y/o a la agregación generada por el nutriente, lo que reduce de manera considerable el tamaño de poros en las muestras.

- A partir de los ensayos de consolidación realizados se observa una menor deformación en los suelos tratados (disminución de los índices de colapso), reflejando una mejoría en el comportamiento de los materiales por el tratamiento.
- Con relación a los resultados de los ensayos del “Pinhole test” y de desagregación, se verificó claramente que el tratamiento consiguió disminuir la erodibilidad de los suelos estudiados, indicando así la eficiencia de la técnica en la mitigación de los procesos erosivos.

## 4.2.5 Análisis cuantitativo y cualitativo.

Tabla 27. Análisis cuantitativo del tratamiento.

| ENSAYO DE SUELO SIN TRATAR |                                                                                                         |                  |                                               |                     |                   |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|---------------------|-------------------|
| Item                       | DESCRIPCION                                                                                             | UNIDAD           | CANTIDAD                                      | VR. UNITARIO        | VR. PARCIAL       |
| <b>1</b>                   | <b>PRELIMINARES</b>                                                                                     |                  |                                               |                     |                   |
| 1,1                        | Localizacion y Replanteo*                                                                               | m <sup>2</sup>   | 0,3                                           | \$ 1.400            | \$ 420            |
|                            |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>     | <b>\$ 420</b>     |
| <b>2</b>                   | <b>MOVIMIENTO DE TIERRA</b>                                                                             |                  |                                               |                     |                   |
| 2,1                        | Excavacion manual en material comun y/o conglomerado a mano, incluye transporte interno dentro del area | m <sup>3</sup>   | 0,3                                           | \$ 17.750           | \$ 5.325          |
| 2,2                        | Relleno con material de suelo comun                                                                     | m <sup>3</sup>   | 0,18                                          | \$ 17.750           | \$ 3.195          |
| 2,3                        | Retiro de material sobrante en el area                                                                  | m <sup>3</sup>   | 0,12                                          | \$ 22.300           | \$ 2.676          |
|                            |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>     | <b>\$ 11.196</b>  |
| <b>4</b>                   | <b>ENSAYOS REALIZADOS EN EL SUELO NATURAL **</b>                                                        |                  |                                               |                     |                   |
| 4,1                        | <b>Caracterizacion fisica del perfil</b>                                                                |                  |                                               |                     |                   |
| 4,1,1                      | Determinacion del contenido de humedad                                                                  | unid.            | 1                                             | \$ 10.000           | \$ 10.000         |
| 4,1,2                      | Peso Especifico de los solidos                                                                          | unid.            | 1                                             | \$ 47.200           | \$ 47.200         |
| 4,1,3                      | Analisis Granulometrico                                                                                 |                  |                                               |                     |                   |
|                            | Tamizado sin lavado                                                                                     | unid.            | 1                                             | \$ 55.000           | \$ 55.000         |
|                            | Hidrometro                                                                                              | unid.            | 1                                             | \$ 90.000           | \$ 90.000         |
| 4,1,4                      | Limite de consistencia (Atterberg)                                                                      | unid.            | 1                                             | \$ 58.900           | \$ 58.900         |
| 4,1,5                      | Ensayo Miniatura Compactada Tropical (MCT) Expedita                                                     | unid.            | 1                                             | \$ 65.000           | \$ 65.000         |
|                            |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>     | <b>\$ 326.100</b> |
| 4,2                        | <b>Caracterizacion Quimica del perfil</b>                                                               |                  |                                               |                     |                   |
| 4,2,1                      | Difraccion de Rayos X (DRX)                                                                             | unid.            | 1                                             | \$ 85.700           | \$ 85.700         |
| 4,2,2                      | Microscopia electronica de barrido (MEB)                                                                | unid.            | 1                                             | \$ 59.000           | \$ 59.000         |
|                            |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>     | <b>\$ 144.700</b> |
| 4,3                        | <b>Caracterizacion Mecanica del Perfil</b>                                                              |                  |                                               |                     |                   |
| 4,3,1                      | Resistencia al corte directo CD                                                                         | unid.            | 1                                             | \$ 220.000          | \$ 220.000        |
| 4,3,2                      | Succion total y matricial                                                                               | unid.            | 1                                             | \$ 57.400           | \$ 57.400         |
| 4,3,3                      | Ensayo de Consolidacion                                                                                 | unid.            | 1                                             | \$ 210.000          | \$ 210.000        |
| 4,3,4                      | Pinhole Test                                                                                            | unid.            | 1                                             | \$ 155.000          | \$ 155.000        |
| 4,3,5                      | Desgregacion                                                                                            | unid.            | 1                                             | \$ 38.000           | \$ 38.000         |
|                            |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>     | <b>\$ 680.400</b> |
|                            | <b>SUBTOTAL COSTO OBRA (SCO) <sup>2</sup></b>                                                           | <b>\$ 11.616</b> | <b>SUBTOTAL COSTO OBRA (SCO) <sup>1</sup></b> | <b>\$ 1.162.816</b> |                   |
|                            | <b>ADMINISTRACION (A = 10% SCO)</b>                                                                     | <b>\$ 1.162</b>  | <b>ADMINISTRACION (A = 10% SCO)</b>           | <b>\$ 116.282</b>   |                   |
|                            | <b>IMPREVISTOS (I = 5% SCO)</b>                                                                         | <b>\$ 581</b>    | <b>IMPREVISTOS (I = 5% SCO)</b>               | <b>\$ 58.141</b>    |                   |
|                            | <b>UTILIDAD (U = 5% SCO)</b>                                                                            | <b>\$ 581</b>    | <b>UTILIDAD (U = 5% SCO)</b>                  | <b>\$ 58.141</b>    |                   |
|                            | <b>IVA (IVA = 16% de U)</b>                                                                             | <b>\$ 93</b>     | <b>IVA (IVA = 16% de U)</b>                   | <b>\$ 9.303</b>     |                   |
|                            | <b>TOTAL COSTO OBRA (TCO=SCO+A+I+U+IVA)</b>                                                             | <b>\$ 14.032</b> | <b>TOTAL COSTO OBRA (TCO=SCO+A+I+U+IVA)</b>   | <b>\$ 1.404.682</b> |                   |
|                            | <b>TOTAL COSTO INTERVENTORIA (TCI= 5%TCO)</b>                                                           | <b>\$ 702</b>    | <b>TOTAL COSTO INTERVENTORIA (TCI= 5%TCO)</b> | <b>\$ 70.234</b>    |                   |
|                            | <b>TOTAL COSTO PROYECTO (TCP= TCO+TCI)</b>                                                              | <b>\$ 14.734</b> | <b>TOTAL COSTO PROYECTO (TCP= TCO+TCI)</b>    | <b>\$ 1.474.916</b> |                   |

Fuente: Autores.

| ENSAYO DE SUELO TRATADO |                                                                                                         |                  |                                               |                     |                   |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|---------------------|-------------------|
| Item                    | DESCRIPCION                                                                                             | UNIDAD           | CANTIDAD                                      | VR. UNITARIO        | VR. PARCIAL       |
| <b>1</b>                | <b>PRELIMINARES</b>                                                                                     |                  |                                               |                     |                   |
| 1,1                     | Localizacion y Replanteo*                                                                               | m <sup>2</sup>   | 0,3                                           | \$ 1.400            | \$ 420            |
|                         |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>     | <b>\$ 420</b>     |
| <b>2</b>                | <b>MOVIMIENTO DE TIERRA</b>                                                                             |                  |                                               |                     |                   |
| 2,1                     | Excavacion manual en material comun y/o conglomerado a mano, incluye transporte interno dentro del area | m <sup>3</sup>   | 0,3                                           | \$ 17.750           | \$ 5.325          |
| 2,2                     | Relleno con material de suelo comun                                                                     | m <sup>3</sup>   | 0,18                                          | \$ 17.750           | \$ 3.195          |
| 2,3                     | Retiro de material sobrante en el area                                                                  | m <sup>3</sup>   | 0,12                                          | \$ 22.300           | \$ 2.676          |
|                         |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>     | <b>\$ 11.196</b>  |
| <b>3</b>                | <b>ADICIÓN DEL NUTRIENTE B4</b>                                                                         |                  |                                               |                     |                   |
| 3,1                     | Acetato de Calcio                                                                                       | gr.              | 15                                            | \$ 136              | \$ 2.040          |
| 3,2                     | Extracto de Levadura                                                                                    | gr.              | 4                                             | \$ 60               | \$ 240            |
| 3,3                     | Glucosa                                                                                                 | gr.              | 5                                             | \$ 80               | \$ 400            |
| 3,4                     | Agua Destilada                                                                                          | lt               | 1                                             | \$ 4.950            | \$ 4.950          |
|                         |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>     | <b>\$ 7.630</b>   |
| <b>4</b>                | <b>ENSAYOS REALIZADOS EN EL SUELO NATURAL **</b>                                                        |                  |                                               |                     |                   |
| 4,1                     | <b>Caracterizacion fisica del perfil</b>                                                                |                  |                                               |                     |                   |
| 4,1,1                   | Determinacion del contenido de humedad                                                                  | unid.            | 1                                             | \$ 10.000           | \$ 10.000         |
| 4,1,2                   | Peso Especifico de los solidos                                                                          | unid.            | 1                                             | \$ 47.200           | \$ 47.200         |
| 4,1,3                   | Analisis Granulometrico                                                                                 |                  |                                               |                     |                   |
|                         | Tamizado sin lavado                                                                                     | unid.            | 1                                             | \$ 55.000           | \$ 55.000         |
|                         | Hidrometro                                                                                              | unid.            | 1                                             | \$ 90.000           | \$ 90.000         |
| 4,1,4                   | Limite de consistencia (Atterberg)                                                                      | unid.            | 1                                             | \$ 58.900           | \$ 58.900         |
| 4,1,5                   | Ensayo Miniatura Compactada Tropical (MCT) Expedita                                                     | unid.            | 1                                             | \$ 65.000           | \$ 65.000         |
|                         |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>     | <b>\$ 326.100</b> |
| 4,2                     | <b>Caracterización Química del perfil</b>                                                               |                  |                                               |                     |                   |
| 4,2,1                   | Difraccion de Rayos X (DRX)                                                                             | unid.            | 1                                             | \$ 85.700           | \$ 85.700         |
| 4,2,2                   | Microscopia electronica de barrido (MEB)                                                                | unid.            | 1                                             | \$ 59.000           | \$ 59.000         |
|                         |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>     | <b>\$ 144.700</b> |
| 4,3                     | <b>Caracterización Mecánica del Perfil</b>                                                              |                  |                                               |                     |                   |
| 4,3,1                   | Resistencia al corte directo CD                                                                         | unid.            | 1                                             | \$ 220.000          | \$ 220.000        |
| 4,3,2                   | Succion total y matricial                                                                               | unid.            | 1                                             | \$ 57.400           | \$ 57.400         |
| 4,3,3                   | Ensayo de Consolidacion                                                                                 | unid.            | 1                                             | \$ 210.000          | \$ 210.000        |
| 4,3,4                   | Pinhole Test                                                                                            | unid.            | 1                                             | \$ 155.000          | \$ 155.000        |
| 4,3,5                   | Desgregacion                                                                                            | unid.            | 1                                             | \$ 38.000           | \$ 38.000         |
|                         |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>     | <b>\$ 680.400</b> |
|                         | <b>SUBTOTAL COSTO OBRA (SCO) <sup>2</sup></b>                                                           | <b>\$ 19.246</b> | <b>SUBTOTAL COSTO OBRA (SCO) <sup>1</sup></b> | <b>\$ 1.170.446</b> |                   |
|                         | <b>ADMINISTRACION (A = 10% SCO)</b>                                                                     | <b>\$ 1.925</b>  | <b>ADMINISTRACION (A = 10% SCO)</b>           | <b>\$ 117.045</b>   |                   |
|                         | <b>IMPREVISTOS (I = 5% SCO)</b>                                                                         | <b>\$ 962</b>    | <b>IMPREVISTOS (I = 5% SCO)</b>               | <b>\$ 58.522</b>    |                   |
|                         | <b>UTILIDAD (U = 5% SCO)</b>                                                                            | <b>\$ 962</b>    | <b>UTILIDAD (U = 5% SCO)</b>                  | <b>\$ 58.522</b>    |                   |
|                         | <b>IVA (IVA = 16% de U)</b>                                                                             | <b>\$ 154</b>    | <b>IVA (IVA = 16% de U)</b>                   | <b>\$ 9.364</b>     |                   |
|                         | <b>TOTAL COSTO OBRA (TCO=SCO+A+I+U+IVA)</b>                                                             | <b>\$ 23.249</b> | <b>TOTAL COSTO OBRA (TCO=SCO+A+I+U+IVA)</b>   | <b>\$ 1.413.899</b> |                   |
|                         | <b>TOTAL COSTO INTERVENTORIA (TCI= 5%TCO)</b>                                                           | <b>\$ 1.162</b>  | <b>TOTAL COSTO INTERVENTORIA (TCI= 5%TCO)</b> | <b>\$ 70.695</b>    |                   |
|                         | <b>TOTAL COSTO PROYECTO (TCP= TCO+TCI)</b>                                                              | <b>\$ 24.412</b> | <b>TOTAL COSTO PROYECTO (TCP= TCO+TCI)</b>    | <b>\$ 1.484.594</b> |                   |

Fuente: Autores.

- Análisis cualitativo

**Tabla 28. Análisis cualitativo del tratamiento.**

|                                                                                              |       |                                              |                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                 |                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BIOMINERALIZACION<br>APLICADA A LA<br>MITIGACION DE<br>PROCESOS<br>EROSIVOS<br>SUPERFICIALES | ☆☆☆☆☆ | Arcilla afectada<br>por procesos<br>erosivos | 1. El nutriente B4 compuesto por 15 [g] de acetato de calcio, 4 [g] de extracto de levadura, 5 [g] de glucosa, fue el estabilizante puesto a prueba luego de 15 días de su adición, con el fin de analizar la mejora de las propiedades. | 1. Determinación del contenido de humedad.                                                      | 1. Límites de Atterberg: Determina límite líquido y plástico.                                                        | 1. La efectividad de los resultados en las pruebas tratadas con el nutriente B4 depende fundamentalmente de la dosificación empleada de este compuesto y del agua destilada junto con el valor del Ph. | Medio-Bajo                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Alta                                                                                                                              |
|                                                                                              |       |                                              | 2. Esta metodología utiliza bacterias propias del suelo y no bacterias calcificantes del medio, lo cual evita comportamientos indeseados en el terreno tratado.                                                                          | 2. Peso específico de los sólidos.                                                              | 2. Resistencia al corte directo.                                                                                     |                                                                                                                                                                                                        | 1. Alternativa sostenible y ecológica.                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 1. El tratamiento minimiza el riesgo de grietas y contribuye a la estabilidad del suelo.                                          |
|                                                                                              |       |                                              |                                                                                                                                                                                                                                          | 3. Análisis Granulométrico.                                                                     | 3. Succión total y matricial.                                                                                        |                                                                                                                                                                                                        | 2. El uso de la biomineralización como técnica propuesta puede causar de manera significativa un menor impacto ambiental en relación con muchos tratamientos convencionales, dado que no altera el equilibrio del ecosistema bacteriano debido al origen propio de las bacterias con las que se lleva a cabo el método. | 2. Las muestras tratadas con el nutriente presentan gran mejoría en los resultados en comparación con los que no fueron tratados. |
|                                                                                              |       |                                              |                                                                                                                                                                                                                                          | 4. Ensayo Miniatura Compactada Tropical (MCT) expedita.                                         | 4. Ensayo duplo edométrico o consolidación: Determina la magnitud y el ritmo de consolidación del suelo.             |                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                   |
|                                                                                              |       |                                              |                                                                                                                                                                                                                                          | 5. Difractometría de rayos X: Determina la composición mineralógica del suelo.                  | 5. "Pinhole Test" o ensayo de aguja: Evalúa de forma directa y cualitativa la dispersión de los suelos.              |                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                   |
|                                                                                              |       |                                              |                                                                                                                                                                                                                                          | 6. Microscopia electrónica de barrido, determina la distribución de los elementos en las fases. | 6. "Slaking test" o ensayo de desagregación: Analiza la estabilidad de una muestra que se sumerge en agua destilada. |                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                   |

Fuente: Autores.

## 5. TECNICAS AVANZADAS E IMPLEMENTADAS DE ESTABILIZACION TERMICA

### 5.1 ESTABILIZACION DE SUELOS DE GRANO FINO CON GEOFIBRA Y FLUJO SINTETICO EN ESTADOS DE CONGELACIÓN Y DESCONGELACION.

Konrad<sup>1</sup> menciona que las propiedades geotécnicas de los suelos se ven afectadas por múltiples factores, uno de ellos causados a las bajas temperaturas provocando fenómenos de congelación y posteriormente descongelación los cuales disminuyen considerablemente la estabilidad del suelo. Por lo tanto, estas condiciones tienen que ser evaluadas cuidadosamente para todas las aplicaciones geotécnicas en regiones frías. Muchos suelos, especialmente de grano fino, son generalmente susceptibles a debilitamientos y levantamientos excesivos por heladas considerándolos inaceptables ya que carecen de propiedades necesarias para su uso en obras civiles como vías, edificios y diversas estructuras.

El uso de la geo-fibra en conjunto con el fluido sintético como aditivo para la estabilización, presenta un buen rendimiento sobre la mejorar de suelos marginales, ofrece una contribución positiva a la resistencia de los suelos, aumenta la capacidad de soporte de carga, mejora el módulo de cizallamiento y la licuefacción.

**5.1.1 Descripción del método.** El objetivo es analizar el comportamiento de un suelo frente a la adición de materiales estabilizantes como la geo-fibra y el fluido sintético. Se llevaron a cabo pruebas de CBR para condiciones de congelación y

---

<sup>1</sup> KONRAD, J.M. Cold Reg Sci Technol. EN: Physical processes during freeze-thaw cycles in clayey silts. Vol. 16. No. 3, 1989; p. 291-303, citado por HAZIRBABA, Kenan.

descongelación, además de no congelación, con diferentes tipos de composiciones:

- A. Muestras de suelo natural.
- B. Muestras de suelo solo con geo-fibras.
- C. Muestras de suelo solo con fluido sintético.
- D. Muestras de suelo con geo-fibras y fluido sintético.

Para representar las condiciones del suelo insaturado y saturado en las aplicaciones de campo, se sometieron algunas muestras a condiciones de humedad.

### 5.1.2 Materiales usados.

- **Muestras de suelo.** Las propiedades del suelo se dan a en la Tabla.29:

**Tabla 29. Propiedades de la muestra de suelo.**

| PROPIEDAD             | VALOR |
|-----------------------|-------|
| Gravedad especifica   | 2.73  |
| Limite liquido        | 26.0  |
| Limite plástico       | 24.0  |
| Índice de plasticidad | 2.00  |
| Clasificación SUCS    | ML    |

*Fuente: “Ciencia y tecnología en regiones frías”. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Alaska Fairbanks.*

- **Geo-fibras.** Dos tipos de geo-fibras de longitud de 51 [mm] fueron probados: Fibrilla de polipropileno y Cinta de polipropileno. Arteaga<sup>2</sup> menciona que estudios anteriores mostraron que la mejora de las propiedades del suelo variaban en

---

<sup>2</sup> ARTEAGA, C.B. The shear strength of Ottawa sand mixed with discreet short length plastic fibers. M. Sc Thesis. Mississippi: Mississippi State University.1989, citado por HAZIRBABA, Kenan.

función del tipo, longitud, contenido y orientación de la fibra. Fletcher y Humphries: “Estas fibras son resistentes a la degradación ultravioleta, químicamente estables y de alta resistencia” <sup>3</sup>. Las propiedades de las geo-fibras se presentan en la Tabla. 30:

**Tabla 30. Propiedades y tipo de geo-fibra.**

| PROPIEDAD                       | MÉTODO DE ENSAYO | FIBRA DE POLIPROPILENO           |                                |
|---------------------------------|------------------|----------------------------------|--------------------------------|
|                                 |                  | FIBRILLA                         | CINTA                          |
| Forma                           |                  | Plano – Angosto<br>Ancho: 2 [mm] | Plano - Ancho<br>Ancho: 2 [mm] |
| Color                           |                  | Negro                            | Negro                          |
| Humedad                         |                  | Nula                             | Nula                           |
| Gravedad Específica             | ASTM D792        | 0.91                             | 0.91                           |
| Contenido Carbón Negro          | ASTM D1603       | 0.5%, mínimo                     | 0.5%, mínimo                   |
| Resistencia A La Tracción [kPa] | ASTM D2256       | 206843                           | 206843                         |
| Alargamiento A La Tracción      | ASTM D2256       | 20%, máximo                      | 20%, máximo                    |
| Longitud Utilizada              | Medida           | 51 [mm]                          | 51 [mm]                        |

*Fuente: “Ciencia y tecnología en regiones frías”. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Alaska Fairbanks.*

Dosificaciones de geo-fibra usadas: 0,2%, 0,375%, 0,5%, 0,625%, 0,8%, y 1% por peso seco de la muestra de suelo. El contenido en este estudio se limitó a 1% debido a los mayores costos de geo fibra en dosis más altas.

- **Líquido sintético.** Incoloro (transparente, brillante). Las propiedades del índice del fluido sintético se dan en la Tabla.31:

<sup>3</sup> FLETCHER, C., HUMPHRIES, K. Transportation Research Record. EN: California bearing ratio improvement of remolded soils by the addition of polypropylene fiber reinforcement. No. 1295, 1991; p. 80-86, citado por HAZIRBABA, Kenan.

**Tabla 31. Propiedades del líquido sintético.**

| PROPIEDAD            | VALOR    |
|----------------------|----------|
| Color                | Incoloro |
| Gravedad específica  | 0.863    |
| Índice de viscosidad | 70.00    |
| Viscosidad a 40°C    | 10.40    |
| Viscosidad a 100°C   | 2.60     |

*Fuente: “Ciencia y tecnología en regiones frías”. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Alaska Fairbanks.*

- **Muestras de suelo A y B.** Bajo el óptimo contenido de humedad del 12%.
- **Muestras de suelo C y D.** Bajo un contenido de agua y contenido total del líquido sintético. Hazirbaba y Connor <sup>4</sup>, indican que el contenido de agua de las muestras analizadas se mantiene constante a 6% que es el porcentaje de humedad medido del limo para representar las condiciones “in situ” y para minimizar la necesidad de agua adicional en el mejoramiento del suelo. La cantidad de fluido sintético utilizado es del 4% en peso seco del suelo. Las dosis de geo-fibra usadas fueron 0,2% y 0,5%. El tratamiento con fluido sintético se investigó con tiempo de curado de 28 días.

### **5.1.3 Ensayos aplicados en laboratorio.** Ensayos de CBR, de congelación y descongelación.

---

<sup>4</sup> HAZIRBABA, K., CONNOR, B. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. EN: The use of geofiber and synthetic fluid for stabilizing marginal soils. Champaign, Illinois. 2009; p. 89-96, citado por HAZIRBABA, Kenan.

#### 5.1.4 Análisis de resultados. Ver anexo 8.

- **Mejora a través del uso de la geo-fibra.** Conclusiones en la Tabla.32.

**Tabla 32. Mejora a través del uso de la geo-fibra.**

| MEJORA A TRAVÉS DEL USO DE LA GEO-FIBRA                     |                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ENSAYO DE CBR                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Muestras insaturadas tratadas con geo-fibra fibrilada.      | El cambio en el comportamiento del suelo con inclusión de geo-fibra puede atribuirse a la distribución de la misma dentro de la estructura de la muestra, lo que puede contribuir a desarrollar más resistencia a la tracción al aumentar la profundidad de penetración. |
| Muestras insaturadas tratadas con geo-fibra                 |                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Muestras saturada tratada con geo-fibra, fibrilada y cinta. | La inclusión de geo-fibras para estas muestras aumenta el CBR con valores similares a los resultados de las muestras insaturadas, los valores de CBR de muestras saturadas mostraron una tendencia a aumentar con la profundidad de penetración.                         |

La inclusión de geo-fibra s indica aumentos en la resistencia y por lo tanto valores mayores de CBR al aumentar la profundidad de penetración, todo lo opuesto de la muestra sin tratar.

*Fuente: "Ciencia y tecnología en regiones frías". Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Alaska Fairbanks.*

- **Mejora a través del uso de fluido sintético.** Conclusiones en la Tabla.33.

**Tabla 33. Mejora a través del uso del fluido sintético.**

| MEJORA A TRAVÉS DEL USO DEL FLUIDO SINTÉTICO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ENSAYO DE CBR                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Se uso fluido sintético para rangos entre 2% y 10% por peso seco del suelo. Saturando las muestras demostró ser poco práctico, ya que resultó una pérdida significativa del aditivo; el fluido sintético se acumula en la superficie de agua poco después de que las muestras se sumergen. Así, el estudio en esta sección se limita a las pruebas sobre las muestras no saturadas. |

*Fuente: "Ciencia y tecnología en regiones frías". Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Alaska Fairbanks.*

- **Mejora a través del uso de geo-fibra y fluido sintético.** Tabla.34.

**Tabla 34. Mejora a través del uso de la geo-fibra y el fluido sintético.**

| MEJORA A TRAVÉS DEL USO DE LA GEO-FIBRA Y FLUIDO SINTETICO                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ENSAYO DE CBR                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| INSATURADAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Los mejores resultados para condiciones insaturadas se obtuvieron a partir de las muestras tratadas con la combinación de contenido geo-fibra 0,5% fibrilada y 4% de fluido sintético (Curva superior de la figura B)                                                                                                        |
| SATURADAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Sólo el 4% de fluido sintético fue probado para condiciones saturadas y el mejor valor en este caso se obtuvo con contenidos de geo fibra de 0.5% para ambos tipos (fibrilada y cinta), en comparación con el suelo natural. En general, la adición de fluido sintético y geo-fibra juntos mejora el comportamiento del CBR. |

*Fuente: "Ciencia y tecnología en regiones frías". Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Alaska Fairbanks.*

- **Análisis de resultados - procesos de congelación y descongelación.** Las pruebas de congelación y descongelación se realizan para muestras insaturadas y saturadas. En comparación con el rendimiento de suelo sin aditivos parece que todas las configuraciones de tratamiento proporcionan una resistencia contra la pérdida de fuerza causados por la congelación y descongelación. Esta resistencia cambia con respecto a la composición de la muestra.

Se observa en general que la geo-fibra fibrilada sola o junto con fluido sintético produce un mejor rendimiento que la de tipo cinta. El menor valor de  $CBR = 35\%$  frente a procesos de congelación y descongelación en condiciones insaturadas, se obtuvo a partir de las muestras tratadas con fluido sintético solo. Los resultados para las condiciones saturadas sugieren que el uso de cualquier tipo geo-fibra (cinta o fibrilada) al 0,2% o 0,5% proporciona una ganancia significativa de la resistencia contra el debilitamiento de congelación-descongelación.

### 5.1.5 Conclusiones del método

- El contenido de geo-fibra óptimo para la prueba de suelo está entre las dosificaciones de 0,2% y 0,5% en función de la muestra condición y tipo geo-fibra. Para las condiciones insaturadas puede ser recomendado porcentajes de 0,2% geo-fibra fibrilada o 0,5% geo-fibra cinta como contenido óptimo. Para las condiciones saturadas, una dosificación de 0,5% se toma como óptima.
- Los resultados óptimos de las muestras tratadas con fluido sintético se obtuvieron a una tasa de dosificación de 4%.
- Un uso combinado de 0,5% de geo-fibra y 4% de fluido sintético a lo largo con contenido de agua 6% proporcionado una mejora sustancial en el rendimiento de CBR, y por lo tanto se toma como una efectiva combinación para el tratamiento de la limo.
- Las pruebas de congelación y descongelación demostraron que el tratamiento con geo-fibra y fluido sintético, es eficaz contra los efectos del proceso de congelación-descongelación.
- Las pruebas de curado sobre muestras saturadas que fueron sometidas a ciclos de congelación-descongelación no mostraron mejoría en la fuerza, lo que implica la ineficacia y el pobre desempeño del fluido sintético en presencia de agua.

### 5.1.6 Análisis cuantitativo y cualitativo.

**Tabla 35. Análisis cuantitativo del tratamiento.**

| ENSAYO DE SUELO SIN TRATAR |                                                                                                         |                |          |                  |                     |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------|------------------|---------------------|
| Item                       | DESCRIPCION                                                                                             | UNIDAD         | CANTIDAD | VR. UNITARIO     | VR. PARCIAL         |
| <b>1</b>                   | <b>PRELIMINARES</b>                                                                                     |                |          |                  |                     |
| 1,1                        | Localizacion y Replanteo*                                                                               | m <sup>2</sup> | 0,30     | \$ 1.400         | \$ 420              |
|                            |                                                                                                         |                |          | <b>SUBTOTAL</b>  | <b>\$ 420</b>       |
| <b>2</b>                   | <b>MOVIMIENTO DE TIERRA</b>                                                                             |                |          |                  |                     |
| 2,1                        | Excavacion manual en material comun y/o conglomerado a mano, incluye transporte interno dentro del area | m <sup>3</sup> | 0,30     | \$ 17.750        | \$ 5.325            |
| 2,2                        | Relleno con material de suelo comun                                                                     | m <sup>3</sup> | 0,18     | \$ 17.750        | \$ 3.195            |
| 2,3                        | Retiro de material sobrante en el area                                                                  | m <sup>3</sup> | 0,12     | \$ 22.300        | \$ 2.676            |
|                            |                                                                                                         |                |          | <b>SUBTOTAL</b>  | <b>\$ 11.196</b>    |
| <b>4</b>                   | <b>ENSAYOS REALIZADOS EN EL SUELO NATURAL **</b>                                                        |                |          |                  |                     |
| <b>4,1</b>                 | <b>Caracterizacion fisica del perfil</b>                                                                |                |          |                  |                     |
| 4,1,1                      | Analisis Granulometrico por Hidrometro                                                                  | unid.          | 1        | \$ 90.000        | \$ 90.000           |
|                            | Contenido de humedad                                                                                    | unid.          | 1        | \$ 10.000        | \$ 10.000           |
| <b>4,2</b>                 | <b>Caracterizacion Mecanica del Perfil</b>                                                              |                |          |                  |                     |
| 4,2,1                      | Compactacion Proctor Normal                                                                             | unid.          | 1        | \$ 105.000       | \$ 105.000          |
| <b>4,3</b>                 | <b>Evaluacion de Resultados</b>                                                                         |                |          |                  |                     |
| 4,3,1                      | Capacidad soporte de California- CBR                                                                    | unid.          | 1        | \$ 240.000       | \$ 240.000          |
| 4,3,2                      | Congelacion y descongelacion                                                                            | unid.          | 1        | \$ 480.000       | \$ 480.000          |
|                            |                                                                                                         |                |          | <b>SUBTOTAL</b>  | <b>\$ 925.000</b>   |
|                            | <b>SUBTOTAL COSTO OBRA (SCO) <sup>2</sup></b>                                                           |                |          | <b>\$ 11.616</b> | <b>\$ 936.616</b>   |
|                            | <b>ADMINISTRACION (A = 10% SCO)</b>                                                                     |                |          | <b>\$ 1.162</b>  | <b>\$ 93.662</b>    |
|                            | <b>IMPREVISTOS (I = 5% SCO)</b>                                                                         |                |          | <b>\$ 581</b>    | <b>\$ 46.831</b>    |
|                            | <b>UTILIDAD (U = 5% SCO)</b>                                                                            |                |          | <b>\$ 581</b>    | <b>\$ 46.831</b>    |
|                            | <b>IVA (IVA = 16% de U)</b>                                                                             |                |          | <b>\$ 93</b>     | <b>\$ 7.493</b>     |
|                            | <b>TOTAL COSTO OBRA (TCO=SCO+A+I+U+IVA)</b>                                                             |                |          | <b>\$ 14.032</b> | <b>\$ 1.131.432</b> |
|                            | <b>TOTAL COSTO INTERVENTORIA (TCI= 5%TCO)</b>                                                           |                |          | <b>\$ 702</b>    | <b>\$ 56.572</b>    |
|                            | <b>TOTAL COSTO PROYECTO (TCP= TCO+TCI)</b>                                                              |                |          | <b>\$ 14.734</b> | <b>\$ 1.188.004</b> |

Fuente: Autores.

\* Localización y replanteo se refiere a todas las actividades correspondientes a la localización y estudio de la zona de recolección de muestras.

\*\* Dentro de los ensayos considerados se tuvieron en cuenta aquellos que fueron realizados para la caracterización de las muestras, así como aquellos ensayos que se realizaron sobre las muestras para realizar su análisis y evaluación.

<sup>1</sup> Ítem Precio Subtotal de la obra, teniendo en cuenta costos agregados en los diferentes ensayos de caracterización y análisis de las diferentes muestras.

<sup>2</sup> Ítem precio Subtotal de la obra, sin incluir costos agregados de ensayos de caracterización y análisis de las diferentes muestras.

| ENSAYO DE SUELO TRATADO |                                                                                                         |                  |                                               |                     |                   |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|---------------------|-------------------|
| Item                    | DESCRIPCION                                                                                             | UNIDAD           | CANTIDAD                                      | VR. UNITARIO        | VR. PARCIAL       |
| <b>1</b>                | <b>PRELIMINARES</b>                                                                                     |                  |                                               |                     |                   |
| 1,1                     | Localizacion y Replanteo*                                                                               | m <sup>2</sup>   | 0,30                                          | \$ 1.400            | \$ 420            |
|                         |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>     | <b>\$ 420</b>     |
| <b>2</b>                | <b>MOVIMIENTO DE TIERRA</b>                                                                             |                  |                                               |                     |                   |
| 2,1                     | Excavacion manual en material comun y/o conglomerado a mano, incluye transporte interno dentro del area | m <sup>3</sup>   | 0,30                                          | \$ 17.750           | \$ 5.325          |
| 2,2                     | Relleno con material de suelo comun                                                                     | m <sup>3</sup>   | 0,18                                          | \$ 17.750           | \$ 3.195          |
| 2,3                     | Retiro de material sobrante en el area                                                                  | m <sup>3</sup>   | 0,12                                          | \$ 22.300           | \$ 2.676          |
|                         |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>     | <b>\$ 11.196</b>  |
| <b>3</b>                | <b>ADICION DE MATERIALES</b>                                                                            |                  |                                               |                     |                   |
| 3,1                     | Geofibra de de polipropileno fibrilada                                                                  | m <sup>2</sup>   | 2,0                                           | \$ 2.805            | \$ 5.610          |
| 3,2                     | Geofibra de cinta de polipropileno                                                                      | m <sup>2</sup>   | 2,0                                           | \$ 1.980            | \$ 3.960          |
| 3,3                     | Fluido Sintetico incoloro                                                                               | lt.              | 0,3                                           | \$ 19.815           | \$ 5.945          |
|                         |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>     | <b>\$ 15.515</b>  |
| <b>4</b>                | <b>ENSAYOS REALIZADOS EN EL SUELO NATURAL **</b>                                                        |                  |                                               |                     |                   |
| <b>4,1</b>              | <b>Caracterizacion fisica del perfil</b>                                                                |                  |                                               |                     |                   |
| 4,1,1                   | Analisis Granulometrico por Hidrometro                                                                  | unid.            | 1                                             | \$ 90.000           | \$ 90.000         |
|                         | Contenido de humedad                                                                                    | unid.            | 1                                             | \$ 10.000           | \$ 10.000         |
| <b>4,2</b>              | <b>Caracterizacion Mecanica del Perfil</b>                                                              |                  |                                               |                     |                   |
| 4,2,1                   | Compactacion Proctor Normal                                                                             | unid.            | 1                                             | \$ 105.000          | \$ 105.000        |
| <b>4,3</b>              | <b>Evaluacion de Resultados</b>                                                                         |                  |                                               |                     |                   |
| 4,3,1                   | Capacidad soporte de California- CBR                                                                    | unid.            | 1                                             | \$ 240.000          | \$ 240.000        |
| 4,3,2                   | Congelacion y descongelacion                                                                            | unid.            | 1                                             | \$ 480.000          | \$ 480.000        |
|                         |                                                                                                         |                  |                                               | <b>SUBTOTAL</b>     | <b>\$ 925.000</b> |
|                         | <b>SUBTOTAL COSTO OBRA (SCO) <sup>2</sup></b>                                                           | <b>\$ 27.131</b> | <b>SUBTOTAL COSTO OBRA (SCO) <sup>1</sup></b> | <b>\$ 952.131</b>   |                   |
|                         | <b>ADMINISTRACION (A = 10% SCO)</b>                                                                     | <b>\$ 2.713</b>  | <b>ADMINISTRACION (A = 10% SCO)</b>           | <b>\$ 95.213</b>    |                   |
|                         | <b>IMPREVISTOS (I = 5% SCO)</b>                                                                         | <b>\$ 1.357</b>  | <b>IMPREVISTOS (I = 5% SCO)</b>               | <b>\$ 47.607</b>    |                   |
|                         | <b>UTILIDAD (U = 5% SCO)</b>                                                                            | <b>\$ 1.357</b>  | <b>UTILIDAD (U = 5% SCO)</b>                  | <b>\$ 47.607</b>    |                   |
|                         | <b>IVA (IVA = 16% de U)</b>                                                                             | <b>\$ 217</b>    | <b>IVA (IVA = 16% de U)</b>                   | <b>\$ 7.617</b>     |                   |
|                         | <b>TOTAL COSTO OBRA (TCO=SCO+A+I+U+IVA)</b>                                                             | <b>\$ 32.774</b> | <b>TOTAL COSTO OBRA (TCO=SCO+A+I+U+IVA)</b>   | <b>\$ 1.150.174</b> |                   |
|                         | <b>TOTAL COSTO INTERVENTORIA (TCI= 5%TCO)</b>                                                           | <b>\$ 1.639</b>  | <b>TOTAL COSTO INTERVENTORIA (TCI= 5%TCO)</b> | <b>\$ 57.509</b>    |                   |
|                         | <b>TOTAL COSTO PROYECTO (TCP= TCO+TCI)</b>                                                              | <b>\$ 34.412</b> | <b>TOTAL COSTO PROYECTO (TCP= TCO+TCI)</b>    | <b>\$ 1.207.682</b> |                   |

Fuente: Autores.

\* Localización y replanteo se refiere a todas las actividades correspondientes a la localización y estudio de la zona de recolección de muestras.

\*\* Dentro de los ensayos considerados se tuvieron en cuenta aquellos que fueron realizados para la caracterización de las muestras, así como aquellos ensayos que se realizaron sobre las muestras para realizar su análisis y evaluación.

<sup>1</sup> Ítem Precio Subtotal de la obra, teniendo en cuenta costos agregados en los diferentes ensayos de caracterización y análisis de las diferentes muestras.

<sup>2</sup> Ítem precio Subtotal de la obra, sin incluir costos agregados de ensayos de caracterización y análisis de las diferentes muestras.

- Análisis cualitativo

**Tabla 36. Análisis cualitativo del tratamiento.**

| DESCRIPCION<br>METODO DE<br>ESTABILIZACION | ITEMS COMPARATIVOS |                |                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                     |                                                                                   |                                                                                                                            |                                                                                                                                                   |                                                                                                 |
|--------------------------------------------|--------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                            | VALORACION         | SUELO          | CARACTERISTICAS                                                                                                                                                                                     | ENSAYOS REQUERIDOS                                                                                  |                                                                                   | EJECUCION                                                                                                                  | IMPACTO AMBIENTAL                                                                                                                                 | EFFECTIVIDAD                                                                                    |
| GEOFIBRA Y FLUJO<br>SINTETICO              | ☆☆☆☆☆              | Limo y Arcilla | 1. La adición de la geo-fibra a la mezcla debe hacerse en la etapa final ya que la adición de agua después puede hacer que se peguen durante la mezcla.                                             | CARACTERIZACIÓN                                                                                     | COMPROBACION                                                                      | 1. Durante los procesos existen dos factores críticos de alto cuidado: Los procedimientos propios y el control de humedad. | Medio-Bajo                                                                                                                                        | Alta                                                                                            |
|                                            |                    |                | 2. El uso del fluo sintético se limita solo para muestras insaturadas, en muestras saturadas es poco práctico ya que se acumula en la superficie de agua poco después de que la probeta se sumerge. | 1. Analisis granulométrico: Determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas. | 1. Compactación-Proctor modificado.                                               |                                                                                                                            | 2. Las pruebas de congelación se llevan a cabo bajo un sistema cerrado que se caracteriza por la ausencia de alguna fuente de agua en el proceso. | 1.Alternativa sostenible y ecológica.                                                           |
|                                            |                    |                |                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                     | 2. Capacidad de soporte de califoria. CRB. Para muestras saturadas e insaturadas. | 2. Las geo-fibras ayudan a mitigar el impacto ambiental y a promover la ecología, constituyendo así una solución integral. |                                                                                                                                                   |                                                                                                 |
|                                            |                    |                |                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                     | 3. Pruebas de congelación y descongelación.                                       | 3. El fluido sintético atenúa em impacto ambiental, prolongando la vida útil.                                              |                                                                                                                                                   | El tratamiento con estos dos estabilizantes es eficaz en zonas de congelación y descongelación. |
| 4. Pruebas de hinchamiento.                |                    |                |                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                     |                                                                                   |                                                                                                                            |                                                                                                                                                   |                                                                                                 |

## CONCLUSIONES

- La caracterización del suelo a tratar es fundamental ya que permite tener una idea del método de estabilización más efectivo para la corrección de los problemas geotécnicos y la mejora de las características. Muchas de las técnicas mencionadas son altamente viables, con ejecuciones sencillas, materiales que actúan de modo positivo frente al impacto ambiental y resultados que se consideran eficientes.
- Los materiales aplicados en las técnicas de estabilización producen diferentes comportamientos en los suelos que han sido estudiados, muchas veces un solo tipo de estabilizante solo proporciona mejora para algunas propiedades y se hace necesario el uso de dos o más agentes para lograr efectividad en toda la muestra en general.
- Los agentes estabilizantes presentaron en su mayoría un comportamiento favorable en los suelos para los que fueron ensayados, un contenido óptimo de ellos se establece bajo varias prácticas de laboratorio comparando muestras tratadas y sin tratar, determinando así un incremento considerable de sus propiedades y brindando una solución al problema que se presenta al momento de la construcción.

## BIBLIOGRAFIA

- AHMED, Aly., UGAI, Keizo., KAMEI, Takeshi. Construction and Building Materials. EN: Investigation of recycled gypsum in conjunction with paste plastic trays for ground improvement. Tokyo. No. 25, 2011; p. 208-217.
- ARRIETA RODRIGUEZ, Marco T. Biomineralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales, en un suelo tropical de la Ciudad de Medellín. Tesis de grado para optar al título de Magister en Geotecnia. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Ingeniería, 2001. 92. p.
- BEHAK, Leonardo., PERES NUÑEZ, Washington. Ingeniería de Construcción. EN: Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cáscara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación. Vol. 23, No. 1 (Abril de 2008); 41. p.
- DIAZ ARIZA, Jesús., MEJIA VARGAS, Julio. Estabilización de suelos mediante el uso de un aditivo químico a base de compuestos inorgánicos. Tesis para optar al título de Ingeniero civil. Bucaramanga: universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil, 2004. 344 p.
- HAZIRBABA, Kenan., GULLU, Hamza. Cold Regions Science and Technology. EN: California Bearing Ratio improvement and freeze-thaw performance of fine-grained soils treated with geo-fibra and synthetic fluid. U.S.A. No. 63, 2010; p. 50-60.

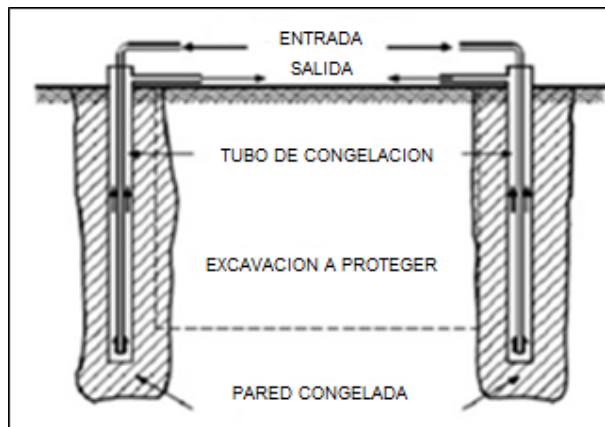
- NAVARRO FLORES, Andrés. Caracterización y tratamiento de suelos contaminados por actividades mineras mediante materiales reactivos. EN: CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE. (5o: 2010: Madrid). Desarrollo sostenible. Cataluña: Universidad politécnica de Cataluña.

## ANEXOS

### ANEXO I. TIPOS DE ESTABILIZACION TERMICA.

- **Congelación del suelo.** Según Suarez <sup>1</sup>, un método efectivo y costoso es el de congelar un suelo por lo general blando y saturado aumentando así su resistencia. Su aplicación es ideal en una excavación de área limitada y consiste en colocar en el terreno una red de tuberías por las que se hará circular una salmuera a baja temperatura, es importante que la congelación no se propague más allá del área a estabilizar ya que causaría daños por expansión, después de esto hay que mantener siempre la zona congelada. El procedimiento utilizado en campo se señala en la Fig.

*Diagrama de procedimiento de congelación del suelo.*



*Fuente: "Deslizamientos Tomo II: Técnicas de remediación". Jaime Suarez. UIS.2009.*

La congelación comprende dos etapas: La fase activa donde el suelo se congela y la pasiva donde se requiere mantener el suelo en su estado congelado.

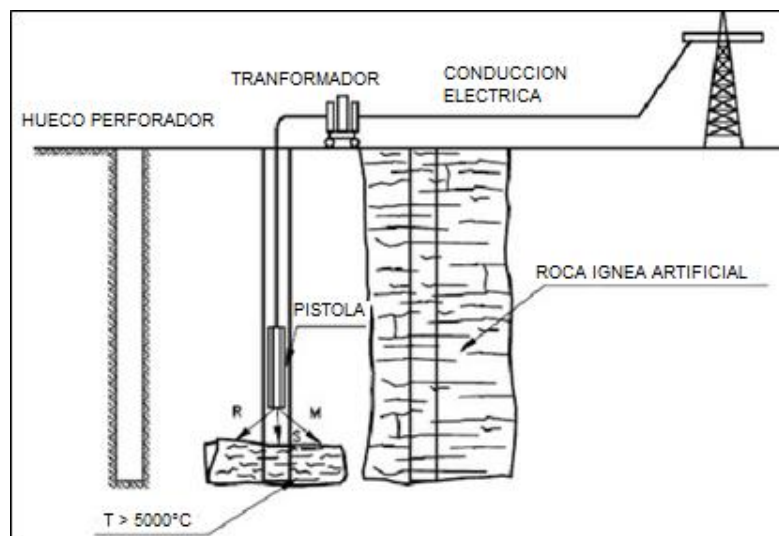
---

<sup>1</sup> SUAREZ, Jaime. Deslizamientos. Tomo II: Técnicas de remediación, Op. Cit., p. 32.

- **Magmaficación.** Suarez <sup>2</sup> menciona que este método consiste en fundir el suelo a temperaturas de más de 5.000°C, en tal forma que se produce un magma artificial, el cual se enfría y cristaliza posteriormente para convertirse en roca. El proceso incluye dos etapas, ilustrados en la Fig.

1. Perforar huecos verticales.
2. Introducir y luego retirar de la perforación, un cilindro o pistola magmaficadora accionada por corriente eléctrica, la cual convierte en magma el suelo.

***Programa de magmaficación.***



*Fuente: "Deslizamientos Tomo II: Técnicas de remediación". Jaime Suarez. UIS.2009.*

---

<sup>2</sup> Ibid., p. 31.

## ANEXO 2. TIPOS DE ESTABILIZACION ELECTRICA.

• **Estabilización Electrocinética-Electro-remediación.** De la Rosa-Pérez <sup>3</sup> los define como métodos efectivos para remover contaminantes orgánicos e inorgánicos. Incluye tres procesos diferentes:

- Electroósmosis. Es el fenómeno por medio del cual se genera arrastre hidráulico inducido por campo eléctrico que empuja el agua de los poros de suelos permeables. Por lo tanto, la electroósmosis se puede utilizar para limpiar bajo suelos contaminados por iones (cargados con carga negativa), así como sin carga (no iónico).
- Electroforesis. Es la migración de partículas o coloides con carga eléctrica (como partículas de mineral en la arcilla) de forma que los contaminantes ligados a este material pueden ser transportados por el campo eléctrico.
- Electro-migración. Es la migración de iones hacia los electrodos bajo la influencia de un potencial eléctrico. Los iones cargados positivamente migran hacia el cátodo y los iones con carga negativa migran hacia el ánodo. La velocidad de la migración depende de la cantidad de carga de los iones, la diferencia de voltaje, movilidad de los iones, y la viscosidad del fluido de los poros.

Esta técnica refleja resultados en suelos blandos como aumentar la resistencia al corte, reducir las características de plasticidad y el potencial de los suelos con alto grado de expansión.

---

<sup>3</sup> Ibid., p. 6.

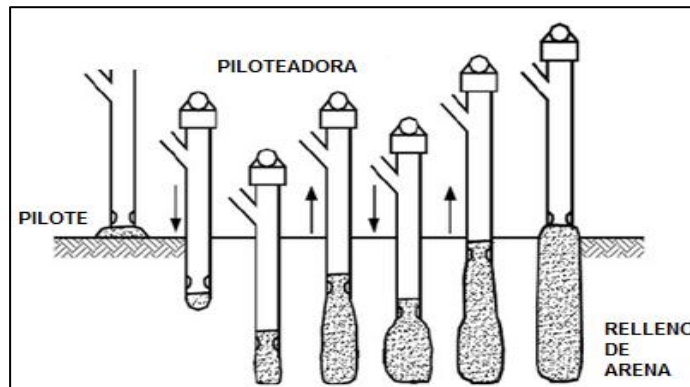
### ANEXO 3. TIPOS DE ESTABILIZACION FISICA Y QUIMICA.

- **Estabilización por compactación.** Suarez<sup>4</sup> indica que se trata de la densificación del suelo por un medio mecánico. Consiste en comprimir los granos entre si aumentando así su fricción interna, disminuyendo los vacíos entre partículas para que el suelo se haga más resistente, menos permeable y menos deformable.

Aunque mejora la calidad de los suelos, ella por sí sola no proporciona la resistencia y durabilidad necesaria. A continuación se presenta algunas técnicas de compactación aplicadas en campo:

**Pilotes de compactación.** La Fig. Representa el proceso de compactación que consta de desplazamiento del suelo al hincar un pilote, retirarlo y al mismo tiempo rellenar el espacio desplazado con material de suelo.

*Proceso de pilotes de compactación.*

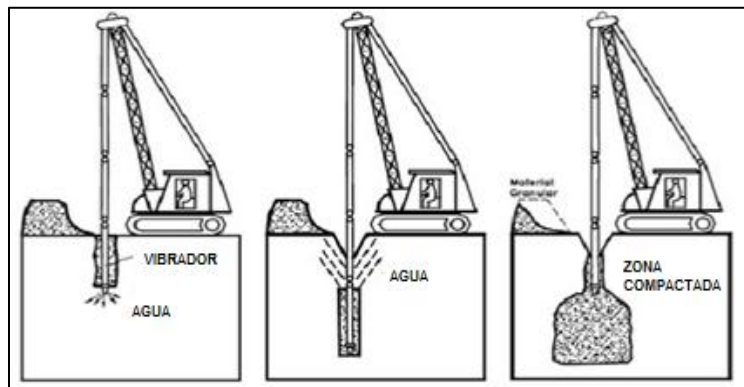


Fuente: "Deslizamientos Tomo II: Técnicas de remediación". Jaime Suarez. UIS.2009.

<sup>4</sup> SUAREZ, Jaime. Deslizamientos. Tomo II: Técnicas de remediación, Op. Cit., p. 34.

**Vibrocompactación profunda.** Se realiza por medio de vibro-flotador, el cual se suspende de una grúa, penetra el suelo por su propio peso, un sistema de vibración y la inyección de agua por su punta inferior. Al penetrar el equipo vibra con amplitudes grandes produciendo un desplazamiento horizontal de los materiales. El espacio vacío generado por la vibración se va rellenando con arena o grava. El proceso de campo se representa en la Fig.

**Proceso de vibrocompactación.**



Fuente: "Deslizamientos Tomo II: Técnicas de remediación". Jaime Suarez. UIS.2009.

**Compactación dinámica.** Consiste en dejar caer de una altura significativa un bloque metálico o de concreto el proceso repetitivo de golpeo produce una compactación del suelo. Se utilizan bloques cuyo peso puede variar entre 5 y 200 toneladas con alturas de caída entre 4 y 30 metros. Se puede utilizar en muchos suelos desde basuras y materiales orgánicos hasta arcillas y suelos granulares gruesos.

- **Estabilización por densificación.** De acuerdo con Merritt <sup>5</sup>, la densidad alcanzada con una técnica depende del tamaño de los granos del suelo, el objetivo de estas es: aumentar la densidad del suelo para hacerlo más resistente.

---

<sup>5</sup> MERRITT, Op. Cit., p. 106.

- **Estabilización por mezcla de suelos.** Es de amplio uso cuando los materiales de la superficie o cerca de esta no son adecuados, pero por si sola no logra reducir los efectos deseados, siempre se requiere de por lo menos la compactación como complemento.

Merritt <sup>6</sup>, expresa que los suelos de grano grueso como las gravas o arenas tienen una alta fricción interna lo que lo hacen soportar grandes esfuerzos, pero esto no hace que sean estables como para ser la superficie de rodamiento de una carretera ya que al no tener cohesión sus partículas se mueven libremente.

- **Estabilización por sobrecarga.** El uso de esta técnica es adecuado cuando un suelo bueno yace sobre otro como arcillas blandas compresibles que producirían asentamientos inaceptables.

Merritt: “El objetivo es utilizar el peso de la sobrecarga para consolidar las arcillas subyacentes, lo cual compensa el asentamiento que ocurriría con la estructura terminada. La sobrecarga puede retirarse cuando se observa poco o ningún asentamiento” <sup>7</sup>.

- **Estabilización por drenaje.** Según lo menciona Merritt <sup>8</sup>, es efectivo en la estabilización de suelos ya que la resistencia disminuye con un incremento en la cantidad de agua y en la presión de poros.

Algunas de estas técnicas son:

- Drenado eléctrico y drenes verticales de arena o pilotes.
- Masa de material permeable sobre la superficie.

---

<sup>6, 7</sup> Ibid., p. 105.

<sup>8</sup> Ibid., p. 107.

- **Estabilización por geo-textiles.** Son membranas usadas para estabilizar el suelo, poseen resistencia a alta tensión aún mojadas, módulos de estabilidad altos, ductilidad alta y flujos plásticos despreciables bajo carga, resistentes al desgaste, a luz ultravioleta y a productos o solventes químicos. Merritt <sup>9</sup> destaca entre sus principales aplicaciones:

Las aplicaciones más comunes son:

- En muros de contención de tierra: Para evitar el deslizamiento.
- Rellenos de sobrecarga contruidos sobre suelos blandos: En la superficie para soportar equipo ligero.
- Superficies pavimentadas: Bajo una subbase de agregados, para separarla del subsuelo y reforzar este.

- **Mejoramiento con aditivos.** Según Díaz <sup>10</sup>, este método se refiere al uso de materiales naturales y artificiales, con el objeto que a través de ellos se logre un aumento de la resistencia del suelo a tratar. De ahí que, mejorando la resistencia del suelo se logra de igual manera, una mejora en la estabilidad volumétrica y consigo una disminución de la permeabilidad. Entre los aditivos más comunes se encuentran el cemento, la cal, el asfalto, yeso, polímeros, entre otros.

- **Productos empleados en la estabilización de suelos.** En el diseño de la estabilización de suelos el uso de agentes estabilizantes intenta una sencilla clasificación, con el objeto de determinar el tipo, la cantidad de agente y el procedimiento a practicar. En la Tabla. Se presenta la respuesta de los principales tipos de suelos a la estabilización con diversos tipos de aditivos.

---

<sup>9</sup> Ibid, p. 107.

<sup>10</sup> DIAZ, Caridad, Op. Cit., p.

**Respuesta a la estabilización de los principales tipos de suelos.**

| COMPONENTE DOMINANTE | ESTABILIZANTE RECOMENDADO                     | OBJETIVO                                                |
|----------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Arena.               | Arcilla de baja plasticidad.                  | Estabilización mecánica.                                |
|                      | Cemento portland.                             | Incrementa el peso volumétrico y la cohesión.           |
| Limos.               | Asfaltos.                                     | Incrementa la cohesión.                                 |
|                      | Dependerá del tipo de minerales que contenga. | -----                                                   |
| Alófanos.            | Cal.                                          | Acción puzolánica e incremento en el peso volumétrico.  |
| Caolín.              | Arena.                                        | Estabilización mecánica.                                |
|                      | Cemento.                                      | Resistencia temprana.                                   |
|                      | Cal.                                          | Resistencia tardía.                                     |
| Montmorilonita.      | Cal.                                          | Resistencia y reducción de expansiones y contracciones. |

*Fuente: Clasificación de suelos. "Manual Del Ingeniero Civil". Frederick S. Merritt. Tercera edición.*

**Estabilización con Cal.** En la práctica el uso de la cal tiene un sinnúmero de aplicaciones en la ingeniería geotécnica, tanto para la modificación temporal como para la estabilización permanente y definitiva de un suelo.

Tiene dos incidencias sobre la aplicación al suelo, uno inmediato, que consiste en la reducción considerable de la plasticidad del suelo y la formación de grumos, y otro más gradual que aumenta la resistencia.

**Estabilización con cemento.** Mejora las propiedades del suelo desde el comportamiento mecánico. El resultado es la disminución de la plasticidad y el aumento en la resistencia de dicho suelo.

**Estabilización con sales.** Las sales se forman a partir de la neutralización de un ácido con una base. Las principales características adquiridas son:

- Incremento del peso específico del suelo.
- Mejora de la resistencia del suelo.
- Prevención de procesos de deterioro del suelo.
- Reduce el índice plástico de dicho suelo.
- Disminuye la expansión volumétrica.
- Incrementar la permanencia de agua de compactación.
- Aumenta la resistencia del disgregado.

Algunas se usan en procesos de estabilización:

- Estabilización con cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ).
  - Estabilización de suelos con silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ).
  - Estabilización con cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ).
- **Estabilización con cenizas volantes.** Este material es derivado de las plantas de energía, que presenta propiedades puzolánicas puede ser utilizado a un costo muy bajo debido al ser un subproducto y tiene una considerable disponibilidad para fines de mejorar un suelo.
  - **Inyecciones.** Suarez<sup>11</sup> afirma que hay varios tipos de inyección de diversos productos naturales o artificiales para el mejoramiento de la calidad del suelo. Las inyecciones de uno o diversos productos químicos tienen por objeto mejorar la resistencia o reducir la permeabilidad de macizos de constitución rocosa y en ocasiones de suelos permeables.

Estas pueden ser de materiales naturales cementantes, tales como el cemento y la cal (suelos gruesos o con fisuras abiertas) o de productos químicos artificiales tales como silicatos, resinas, acrilamidas y uretanos (materiales menos permeables).

---

<sup>11</sup> SUAREZ, Jaime. Deslizamientos. Tomo II: Técnicas de remediación, Op. Cit., p. 27.

#### **ANEXO 4. ENSAYOS DE LABORATORIO.**

- **Ensayo de compactación-Proctor normal.** Con el ensayo se determina la relación entre humedad y masa unitaria. Las mezclas se compactaron inmediatamente después de adicionada y homogeneizada el agua.

- **Ensayo de compactación estándar.** Se realiza compactando las pruebas estáticamente con un gato hidráulico para conocer la relación humedad-densidad de las mismas cada una con porcentajes de material estabilizante diferentes.

- **Ensayo de CBR- Capacidad de soporte de california.** El ensayo de CBR se emplea para evaluar la resistencia potencial de materiales de subrasante, subbase y base, incluyendo materiales reciclados.

El valor de CBR de un suelo es la relación que se obtiene dividiendo el esfuerzo requerido para penetrar una muestra en el suelo por un esfuerzo de penetración estándar en cada profundidad de penetración.

- **Ensayo de resistencia a la compresión inconfina (RCI).** Este ensayo se aplicó para probetas con diferentes porcentajes de materiales y a la de suelo solo, se realizaron sobre probetas curadas 7,14, 28 y 56 días.

El objetivo es determinar la resistencia a la compresión. Se adopta como valor de resistencia, la correspondiente al pico de la curva tensión-deformación.

- **Ensayo de resistencia a la tracción por compresión diametral (RCD).** El ensayo de RCD también conocido como ensayos de tracción directa por hendimiento consta de aplicar una distribución de carga la cual provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme. Las probetas se compactaron en moldes de 10,14 cm de diámetro interno y 6,39 cm de altura aproximadamente inmediatamente después de hecha la mezcla. Se hacen análisis para 14, 28 y 56 días de cura.

- **Ensayo de durabilidad.** Se realiza para evaluar el efecto del medio ambiente sobre las mezclas de suelos y el material estabilizante, mediante el método propuesto por Hoover <sup>12</sup>, que evalúa la durabilidad en ciclos de humedecimiento y secado, midiéndose la pérdida de resistencia a la compresión inconfiada.

Previamente se compactan estáticamente las probetas de 28 días de cura, se someten a 12 ciclos cada uno de 48 horas de humedecimiento y secado, (24 horas de inmersión en agua y 24 horas de secado al aire). Otras probetas de cada mezcla permanecen almacenadas en cámara húmeda durante los 12 ciclos.

Marcon: “Un material es durable frente a la acción del humedecimiento y secado cuando la resistencia de las probetas sometidas a ciclos respecto a la resistencia de las probetas no sometidas a ciclos es al menos del 80%” <sup>13</sup>.

- **Peso específico de los sólidos.** Este valor se puede utilizar para determinar el grado de saturación, la relación de vacíos de la muestra y la porosidad, entre otros.
- **Análisis Granulométrico.** El análisis del tamaño de las partículas gruesas y finas.

---

<sup>12</sup> HOOVER, J.M., HANDY, R.L. y DAVIDSON, D.T. Highway Research Board Bulletin. EN: Durability of Soil-Lime-Fly Ash Mixtures Compacted above Standard Proctor Density. No. 139. 1958; p.1-11, citado por BEHAK, Leonardo.

<sup>13</sup> MARCON, A.F. Durabilidade e Módulo de Elasticidade de Misturas Areia-Cal-Cinza volante. Tesis de Maestría. Rio de Janeiro: Universidad Federal de Rio de Janeiro.1977, citado por BEHAK, Leonardo.

- **Límites de consistencia (Atterberg).** Para determinar la humedad correspondiente al límite líquido (WL) y la humedad correspondiente al límite de plasticidad (Wp). La diferencia entre estos dos límites proporciona el índice de plasticidad del suelo.
- **Ensayo Miniatura Compactada Tropical (MCT) expedita.** Consiste en tomar una muestra de suelo que pasa por el tamiz N° 40, agregarle agua, formando una pasta. El material obtenido se deja penetrar en caída libre por un penetrómetro que pesa 10 g. Luego, con esta pasta se llenan anillos de PVC, de diámetro interno aproximado de 20 mm y 5 mm de espesor. Después de que las pastillas se secan al aire, se mide el diámetro de ellos y se determina la contracción de las pastillas por pérdida de humedad (CT).
- **Microscopia electrónica de barrido (MEB).** Determina la estructura del suelo.
- **Succión total y matricial.** Para la ejecución del ensayo se utilizó la metodología del papel filtro con el fin de tomar las medidas de succión total y matricial. Bajo esta metodología se hizo uso de una trayectoria mixta, es decir, a partir de la humedad natural se humedecen y se secan las muestras necesarias para una buena definición de la curva característica.
- **Ensayo duplo edométrico o consolidación.** Quintero <sup>14</sup> afirma; estos ensayos cubren los procedimientos para determinar la magnitud y el ritmo de consolidación del suelo cuando está sometido a un confinamiento lateral, drenado axialmente por ambos extremos y sometido a la aplicación de cargas variables en el tiempo.

---

<sup>14</sup> QUINTERO, A. Variación de las propiedades geotécnicas por los lixiviados de residuos sólidos urbanos, en un suelo tropical. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Escuela de Ingeniería Civil, 2011, citado por ARRIETA, Marco.

- **Resistencia al corte directo.** Mediante el ensayo de corte directo, se pretende obtener la tensión de corte, en el plano de falla que presente la muestra aplicándose una fuerza cortante.
- **“Pinhole Test” o ensayo de aguja.** Según Lima <sup>15</sup>, el concepto del ensayo es evaluar de forma directa y cualitativa la dispersión de los suelos arcillosos, considerando como suelos dispersivos las acillas erodables que sufren erosión por dispersión y defloculación.
- **Desagregación.** El ensayo de desagregación, también conocido como “Slaking test”, según Lima <sup>16</sup>, tiene como objetivo, verificar la estabilidad de una muestra de suelo inalterada, cuando se sumerge en agua destilada, independiente de la dispersión del material.
- **Ensayos de congelación y descongelación.** Importantes para aplicaciones en regiones frías. Los resultados proporcionan información útil sobre el potencial de levantamiento por helada, deshielo de debilitamiento y el impacto de los ciclos de congelación-descongelación en el rendimiento del CBR.

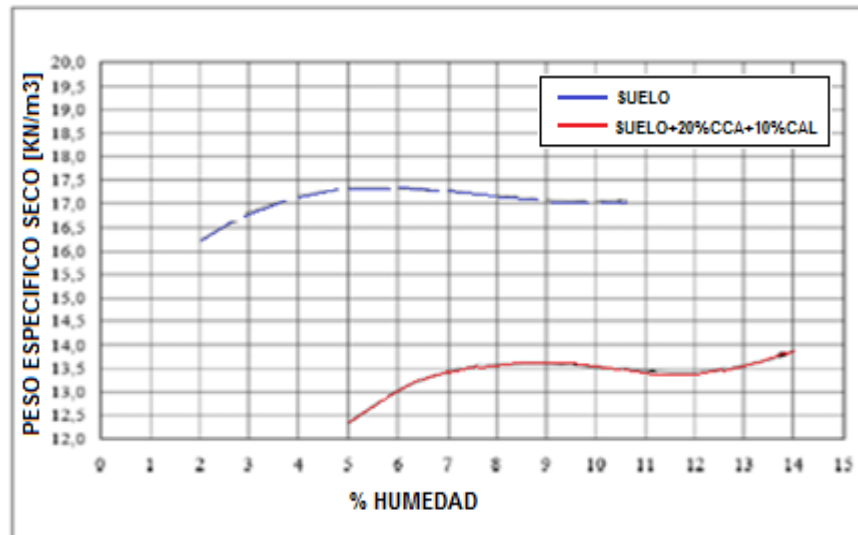
---

<sup>15</sup> LIMA, M. Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Tese de doutorado. Brasília D.F.: Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e ambiental, 2003, citado por ARRIETA, Marco.

<sup>16</sup> Ibid., p. 65, citado por ARRIETA, Marco.

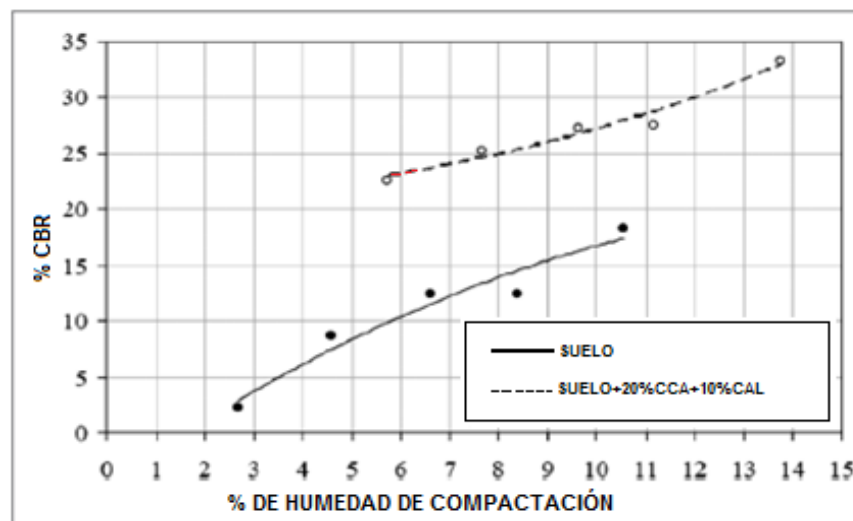
## ANEXO 5. GRAFICAS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CCA Y CAL.

### Curvas de compactación de suelo tipo 1 y tipo 4.



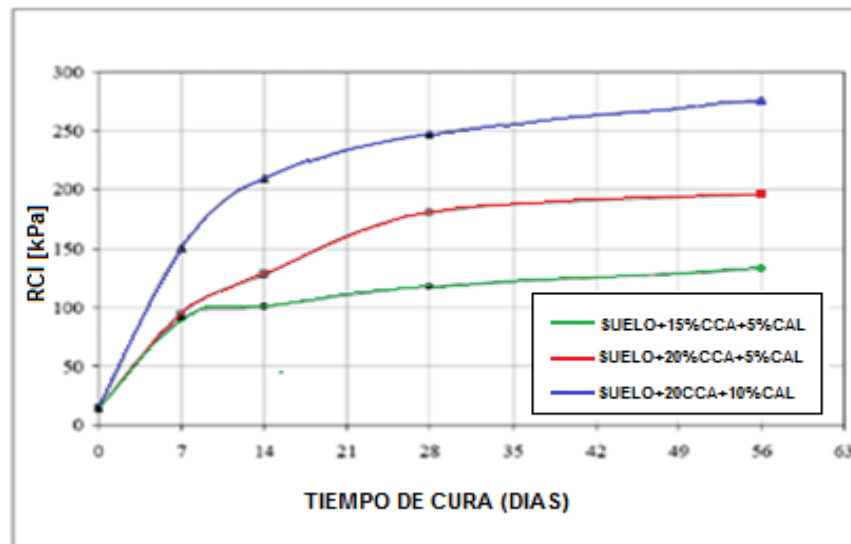
Fuente: "Estabilización con CCA", Facultad de Ingeniería, Universidad De La Republica, Uruguay

### Curvas de CBR- humedad. Compactación de suelo tipo 1 y tipo 4.



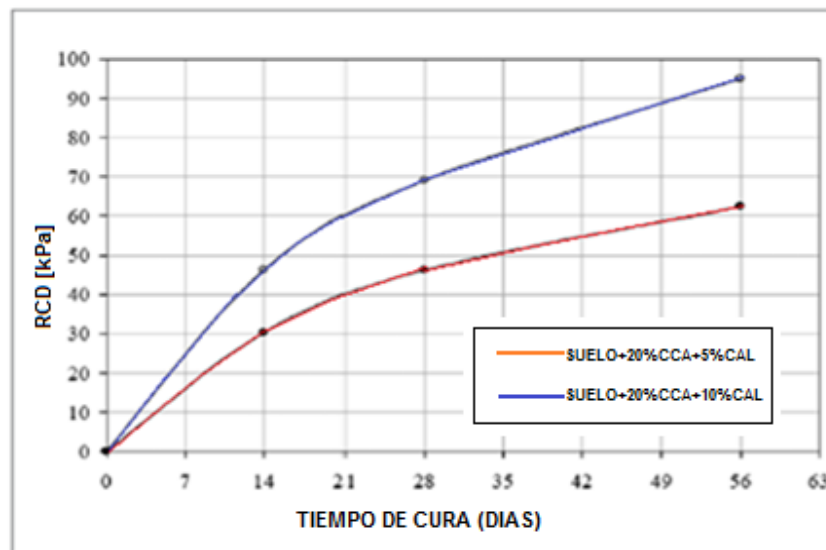
Fuente: "Estabilización con CCA", Facultad de Ingeniería, Universidad De La Republica, Uruguay.

**Curvas de RCI-tiempo de cura para diferentes tipos de mezclas.**



Fuente: "Estabilización con CCA", Facultad de Ingeniería, Universidad De La Republica, Uruguay.

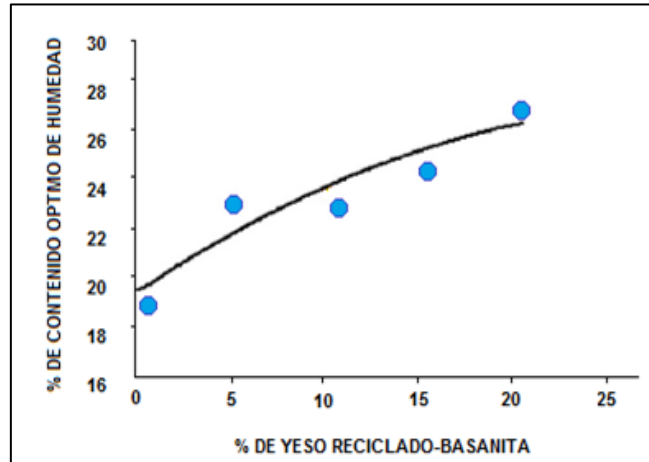
**Curvas de RCD-tiempo de cura para diferentes tipos de mezclas.**



Fuente: "Estabilización con CCA", Facultad de Ingeniería, Universidad De La Republica, Uruguay.

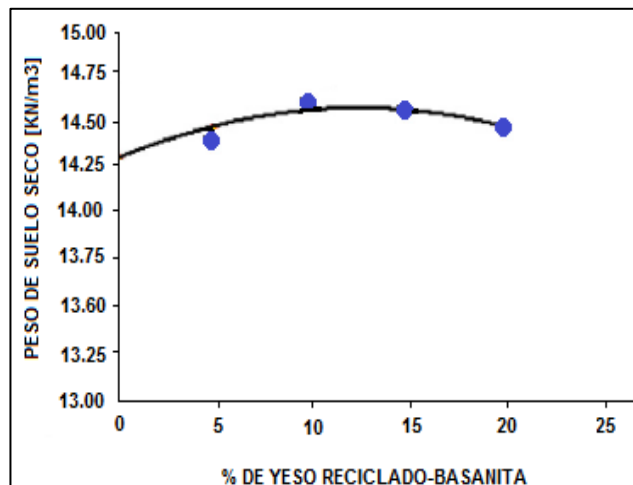
## ANEXO 6. GRAFICAS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS BASANITA Y TIRAS DE RESIDUOS DE PLASTICO.

*Curvas de contenido óptimo de humedad respecto al porcentaje de basanita.*



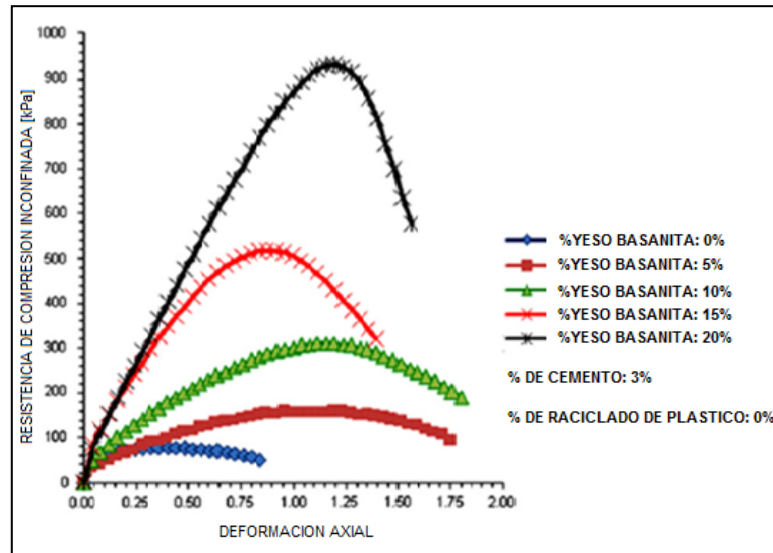
*Fuente: "Materiales reciclados para para estabilización" Departamento de Civil y Desarrollo Ingenieril. Universidad de Miyazaki.*

*Curvas de valor del peso de suelo seco respecto al porcentaje de basanita.*



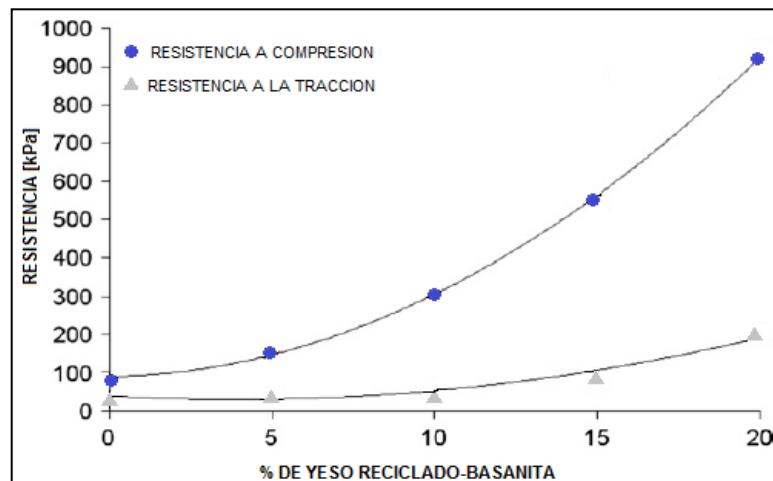
*Fuente: "Materiales reciclados para para estabilización" Departamento de Civil y Desarrollo Ingenieril. Universidad de Miyazaki.*

**Curvas de tensión-deformación de una prueba de suelo tratada con diferentes contenidos de basanita.**



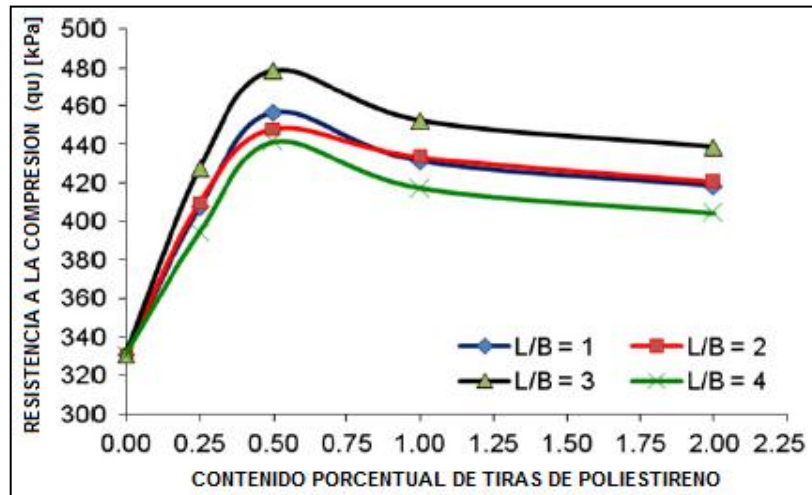
Fuente: “Materiales reciclados para para estabilización” Departamento de Civil y Desarrollo Ingenieril. Universidad de Miyazaki.

**Curvas de resistencia a compresión y a tracción para pruebas tratadas con diferentes contenidos de basanita y sin contenido de poli-estireno.**



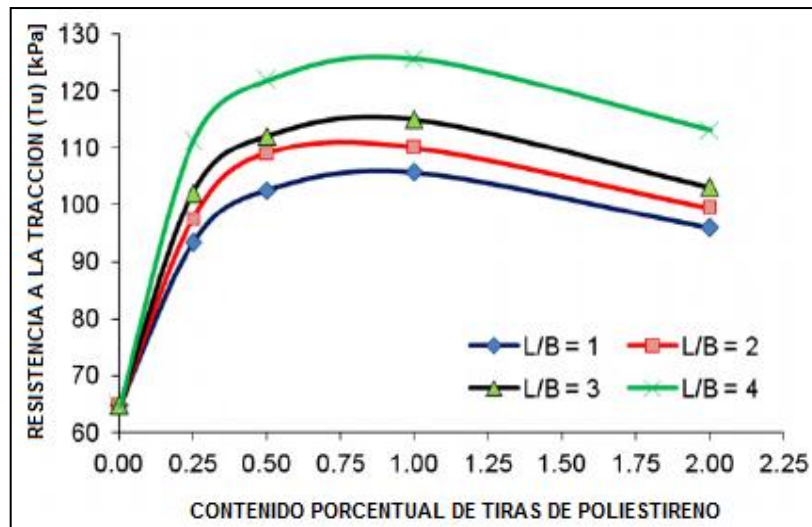
Fuente: “Materiales reciclados para para estabilización” Departamento de Civil y Desarrollo Ingenieril. Universidad de Miyazaki.

**Curvas de influencia de la relación de contenidos. Resistencia a compresión para pruebas con diferentes porcentajes de poli-estireno.**



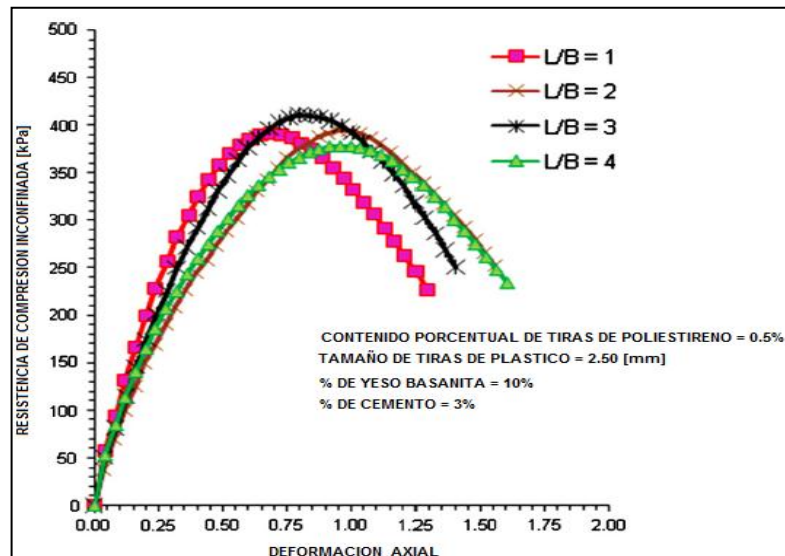
Fuente: “Materiales reciclados para para estabilización” Departamento de Civil y Desarrollo Ingenieril. Universidad de Miyazaki.

**Curvas de influencia de la relación de contenidos. Resistencia a la tracción para pruebas con diferentes porcentajes de poli-estireno.**



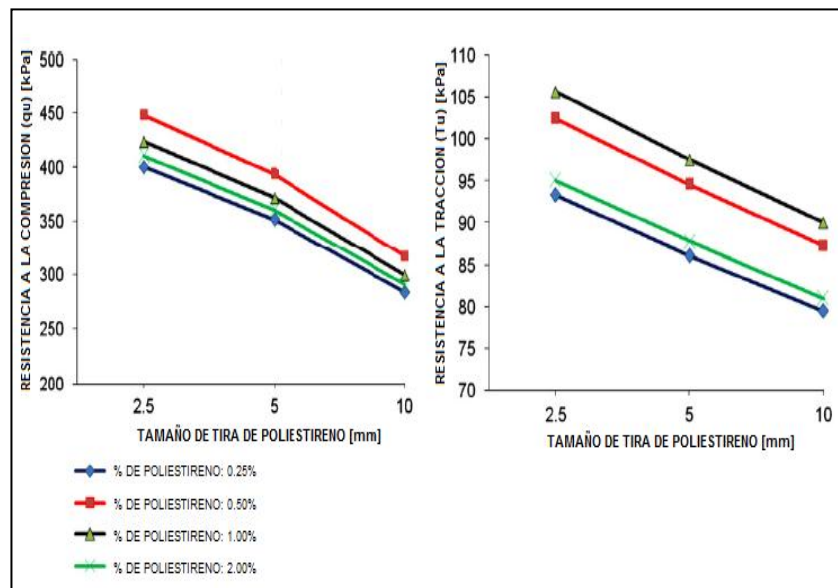
Fuente: “Materiales reciclados para para estabilización” Departamento de Civil y Desarrollo Ingenieril. Universidad de Miyazaki.

**Curvas de influencia de la relación de aspecto. Resistencia a compresión.**



Fuente: “Materiales reciclados para para estabilización” Departamento de Civil y Desarrollo Ingenieril. Universidad de Miyazaki.

**Curvas de influencia de la relación de tamaño. Resistencia a compresión y a tracción.**

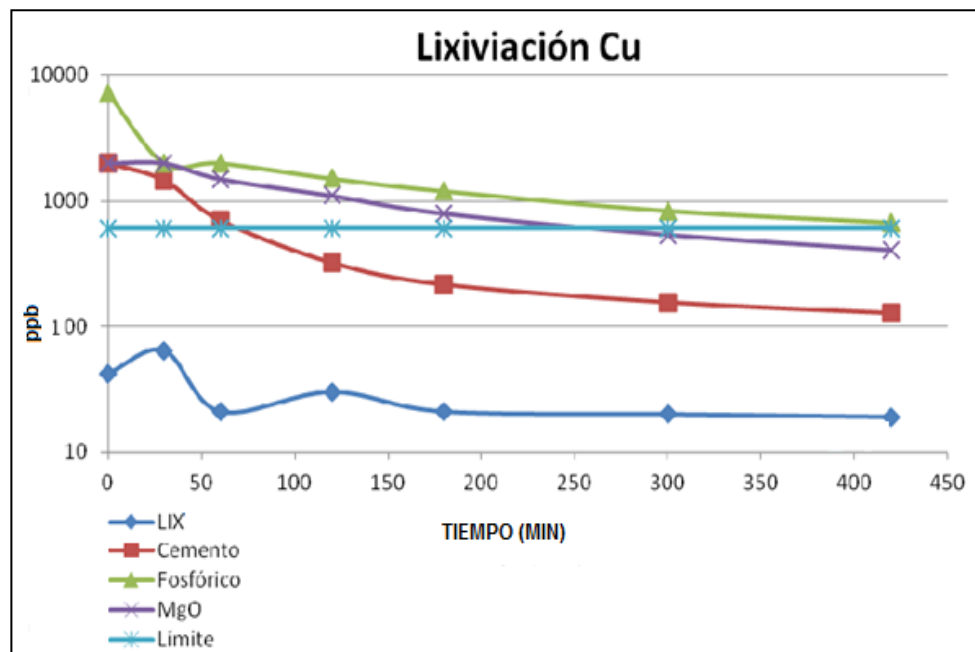


Fuente: “Materiales reciclados para para estabilización” Departamento de Civil y Desarrollo Ingenieril. Universidad de Miyazaki.

## ANEXO 7. GRAFICAS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CARACTERIZACION Y TRATAMIENTO DE SUELOS CONTAMINADOS POR ACTIVIDADES MINERAS MEDIANTE MATERIALES REACTIVOS

- **Análisis de resultados - Lixiviación del Cobre (Cu).**

*Evolución del Cu en los ensayos de lixiviación con suelo minero.*



LIX: Lixiviado suelo minero “Puro”.

Cemento: Lixiviado con suelo tratado con cemento Portland.

Fosfórico: Lixiviado con suelo tratado con ácido fosfórico.

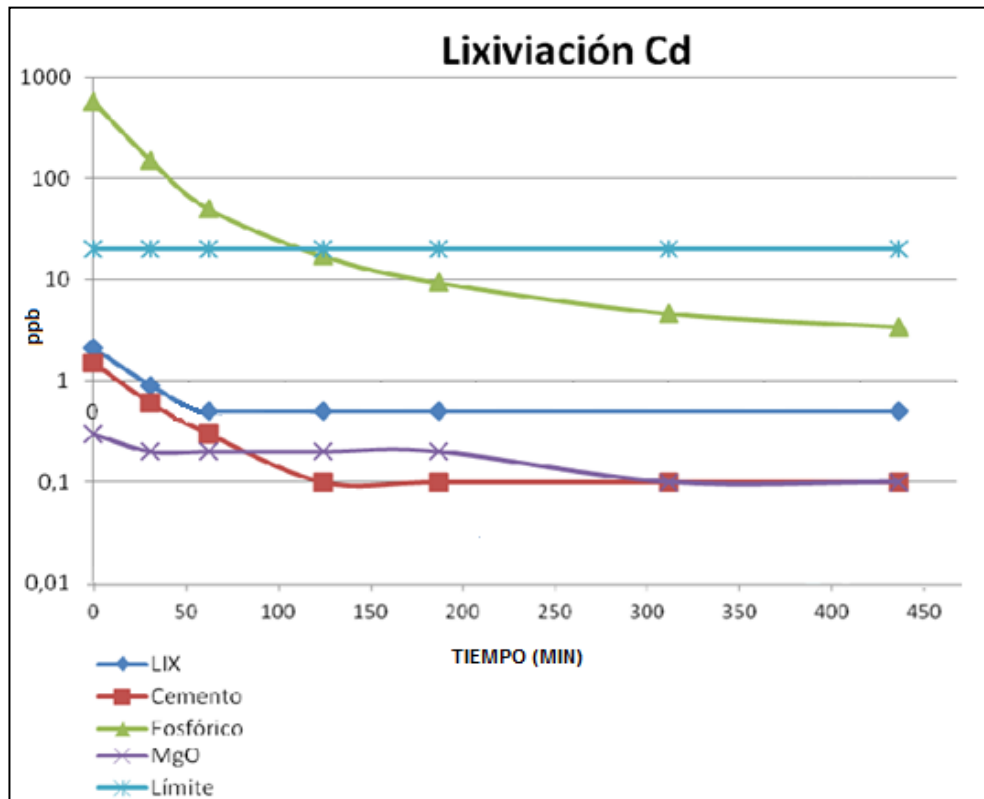
MgO: Lixiviado con suelo tratado con Oxido de Magnesio.

Límite: Valor en relación en relación con los lixiviados de los residuos admisibles en vertederos para residuos inertes de acuerdo con el ensayo de percolación.

*Fuente: “Caracterización y tratamiento de suelos contaminados por actividades mineras mediante materiales reactivos”. Andrés Navarro Flores. Universidad Politécnica de Cataluña.*

- **Análisis de resultados - Lixiviación del Cadmio (Cd).**

*Evolución del Cd en los ensayos de lixiviación con suelo minero.*



LIX: Lixiviado suelo minero “Puro”.

Cemento: Lixiviado con suelo tratado con cemento Portland.

Fosfórico: Lixiviado con suelo tratado con ácido fosfórico.

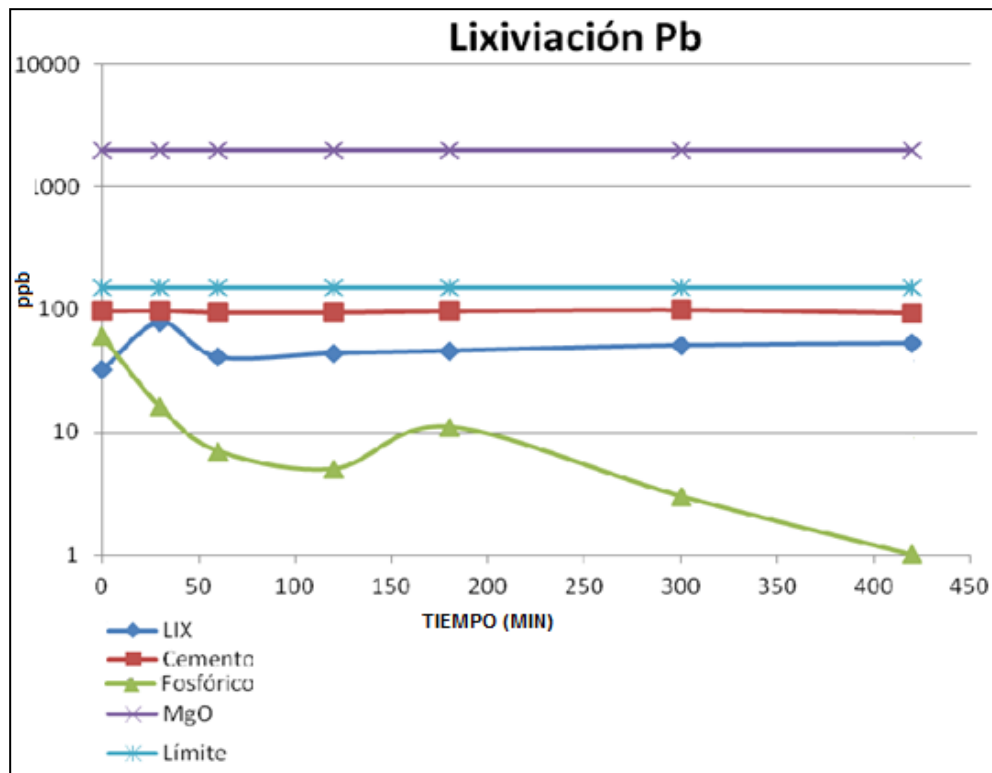
MgO: Lixiviado con suelo tratado con Oxido de Magnesio.

Límite: Valor en relación en relación con los lixiviados de los residuos admisibles en vertederos para residuos inertes de acuerdo con el ensayo de percolación.

*Fuente: “Caracterización y tratamiento de suelos contaminados por actividades mineras mediante materiales reactivos”. Andrés Navarro Flores. Universidad Politécnica de Cataluña.*

- **Análisis de resultados - Lixiviación del Plomo (Pb).**

*Evolución del Pb en los ensayos de lixiviación con suelo minero.*



LIX: Lixiviado suelo minero "Puro".

Cemento: Lixiviado con suelo tratado con cemento Portland.

Fosfórico: Lixiviado con suelo tratado con ácido fosfórico.

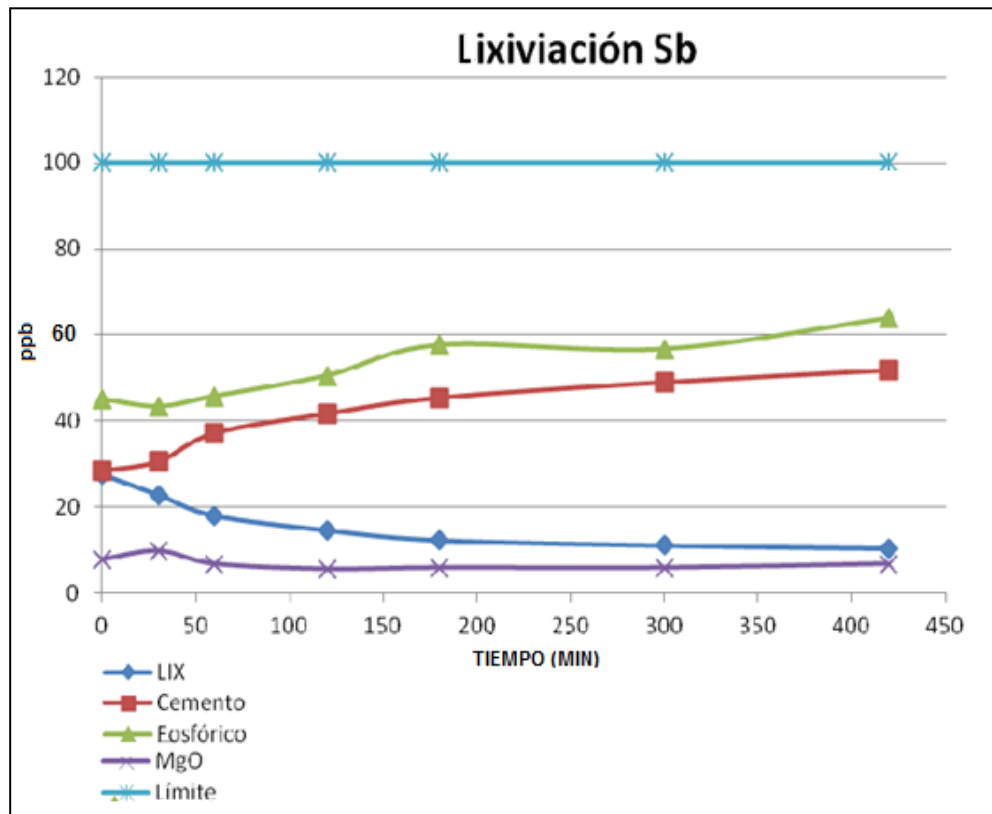
MgO: Lixiviado con suelo tratado con Oxido de Magnesio.

Límite: Valor en relación en relación con los lixiviados de los residuos admisibles en vertederos para residuos inertes de acuerdo con el ensayo de percolación.

*Fuente: "Caracterización y tratamiento de suelos contaminados por actividades mineras mediante materiales reactivos". Andrés Navarro Flores. Universidad Politécnica de Cataluña.*

- **Análisis de resultados - Lixiviación del Antimonio (Sb).**

*Evolución del Sb en los ensayos de lixiviación con suelo minero.*



LIX: Lixiviado suelo minero “Puro”.

Cemento: Lixiviado con suelo tratado con cemento Portland.

Fosfórico: Lixiviado con suelo tratado con ácido fosfórico.

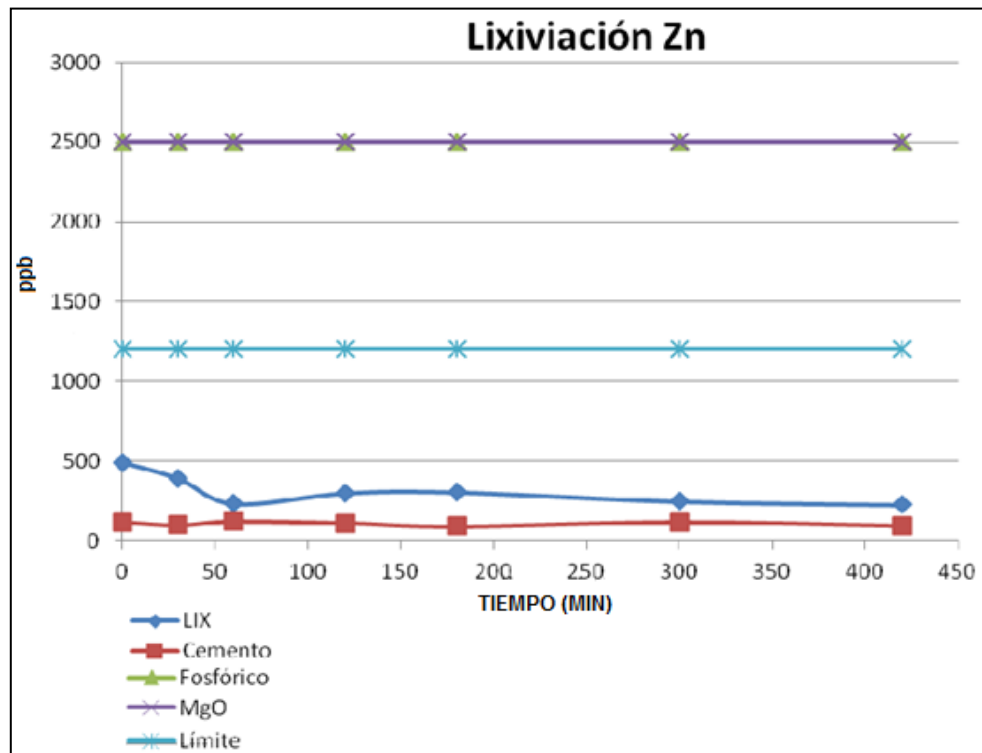
MgO: Lixiviado con suelo tratado con Oxido de Magnesio.

Límite: Valor en relación en relación con los lixiviados de los residuos admisibles en vertederos para residuos inertes de acuerdo con el ensayo de percolación.

*Fuente: “Caracterización y tratamiento de suelos contaminados por actividades mineras mediante materiales reactivos”. Andrés Navarro Flores. Universidad Politécnica de Cataluña.*

- **Análisis de resultados - Lixiviación del Cinc (Zn).**

*Evolución del Zn en los ensayos de lixiviación con suelo minero.*



LIX: Lixiviado suelo minero "Puro".

Cemento: Lixiviado con suelo tratado con cemento Portland.

Fosfórico: Lixiviado con suelo tratado con ácido fosfórico.

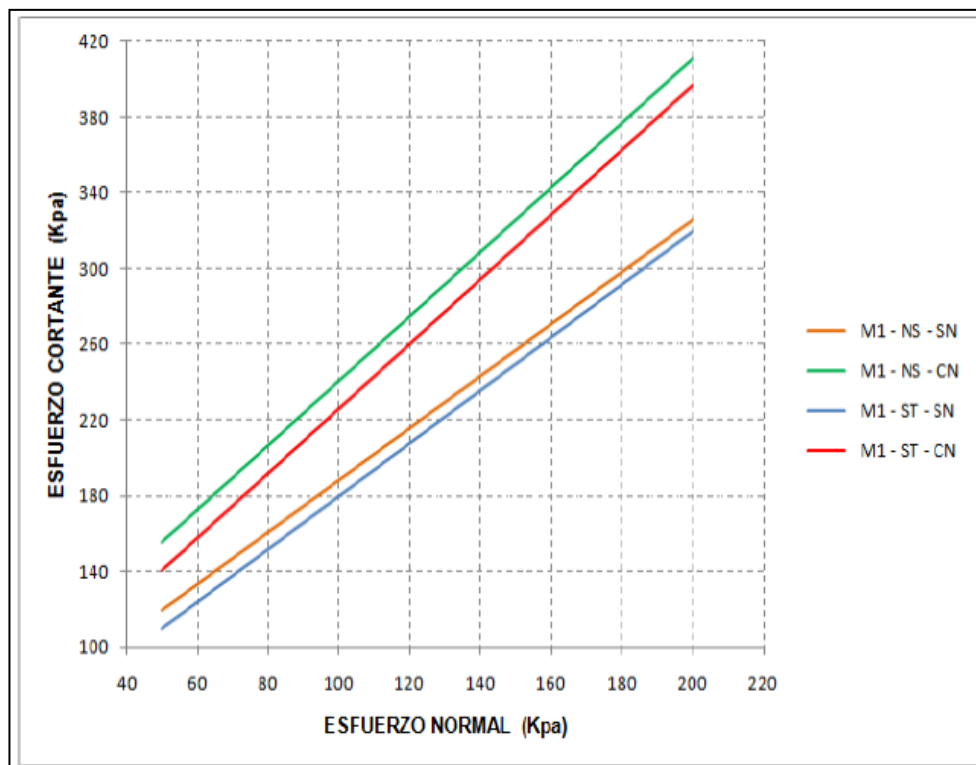
MgO: Lixiviado con suelo tratado con Oxido de Magnesio.

Límite: Valor en relación en relación con los lixiviados de los residuos admisibles en vertederos para residuos inertes de acuerdo con el ensayo de percolación.

*Fuente: "Caracterización y tratamiento de suelos contaminados por actividades mineras mediante materiales reactivos". Andrés Navarro Flores. Universidad Politécnica de Cataluña.*

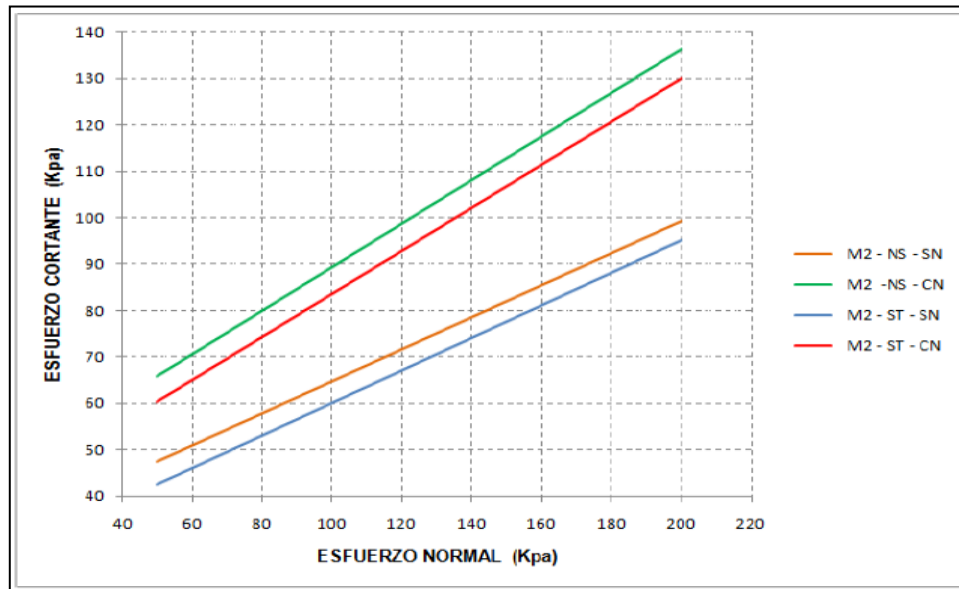
## ANEXO 8. GRAFICAS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE BIOMINERALIZACION APLICADA A LA MITIGACION DE PROCESOS EROSIVOS SUPERFICIALES.

*Análisis comparativo envolvente de falla de Mohr-Coulomb. M1- ST, SN-CN y SN.*



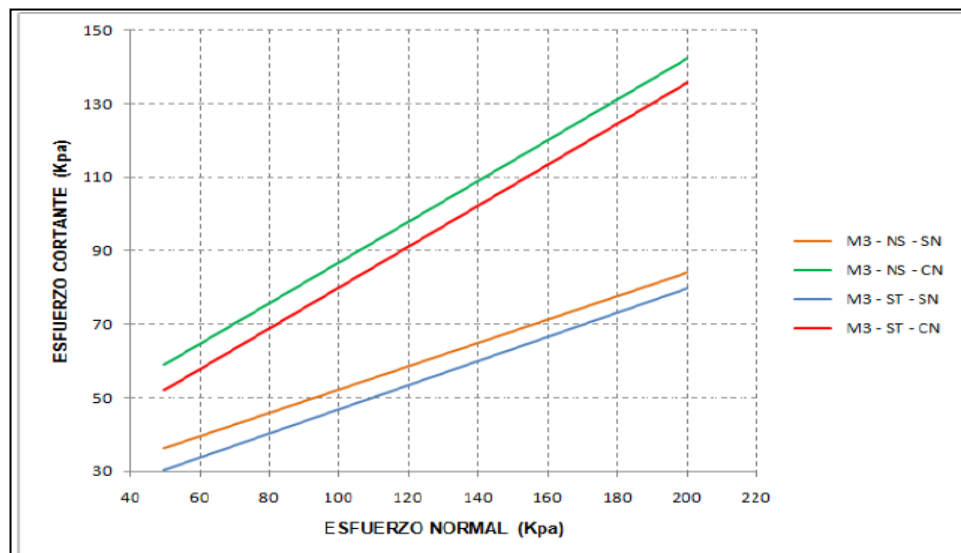
*Fuente: "Biomineralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales". Marco Tulio Arrieta Rodríguez. Universidad Nacional de Colombia. (Tomado de Arrieta, 2011).*

**Análisis comparativo envolvente de falla de Mohr-Coulomb. M2- ST, SN-CN y SN.**



Fuente: "Biomineralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales". Marco Tulio Arrieta Rodríguez. Universidad Nacional de Colombia. (Tomado de Arrieta, 2011).

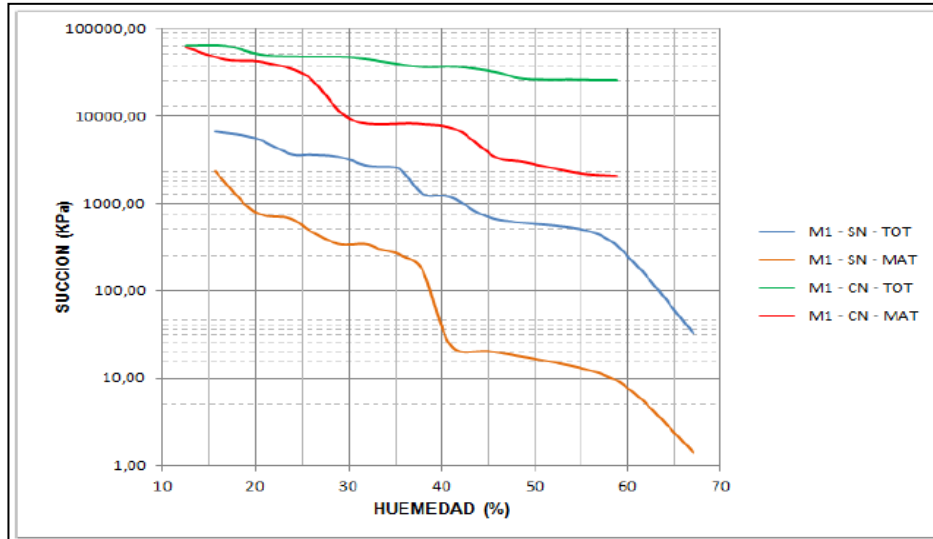
**Análisis comparativo envolvente de falla de Mohr-Coulomb. M3- ST, SN-CN y SN.**



Fuente: "Biomineralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales". Marco Tulio Arrieta Rodríguez. Universidad Nacional de Colombia. (Tomado de Arrieta, 2011).

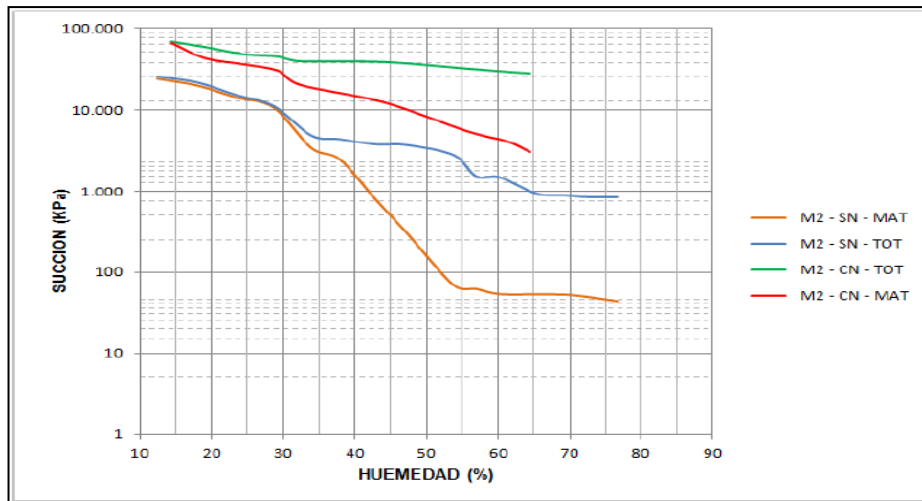
- **Succión total y matricial.**

**Variación de la succión con la humedad. Muestra M1.**



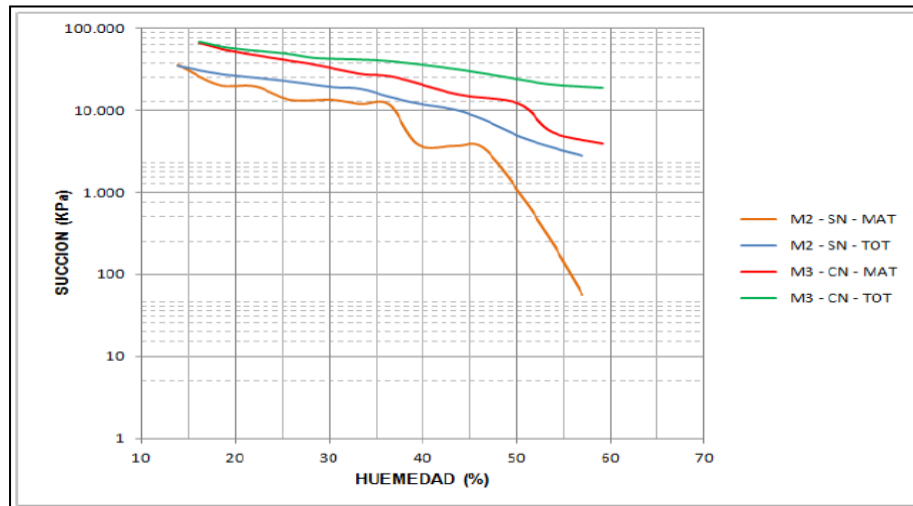
Fuente: “Biomíneralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales”. Marco Tulio Arrieta Rodríguez. Universidad Nacional de Colombia. (Tomado de Arrieta, 2011).

**Variación de la succión con la humedad. Muestra M2.**



Fuente: “Biomíneralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales”. Marco Tulio Arrieta Rodríguez. Universidad Nacional de Colombia. (Tomado de Arrieta, 2011).

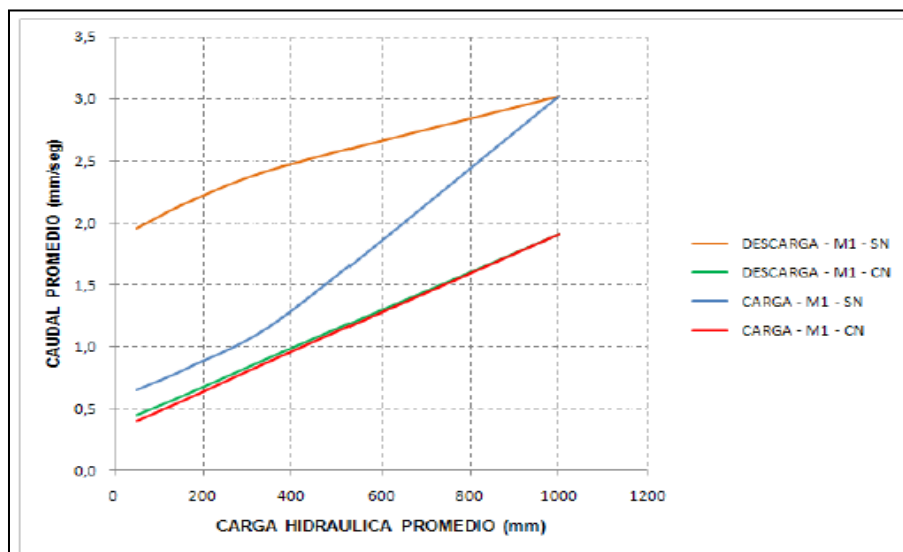
**Variación de la succión con la humedad. Muestra M3.**



Fuente: “Biomíneralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales”. Marco Tulio Arrieta Rodríguez. Universidad Nacional de Colombia. (Tomado de Arrieta, 2011).

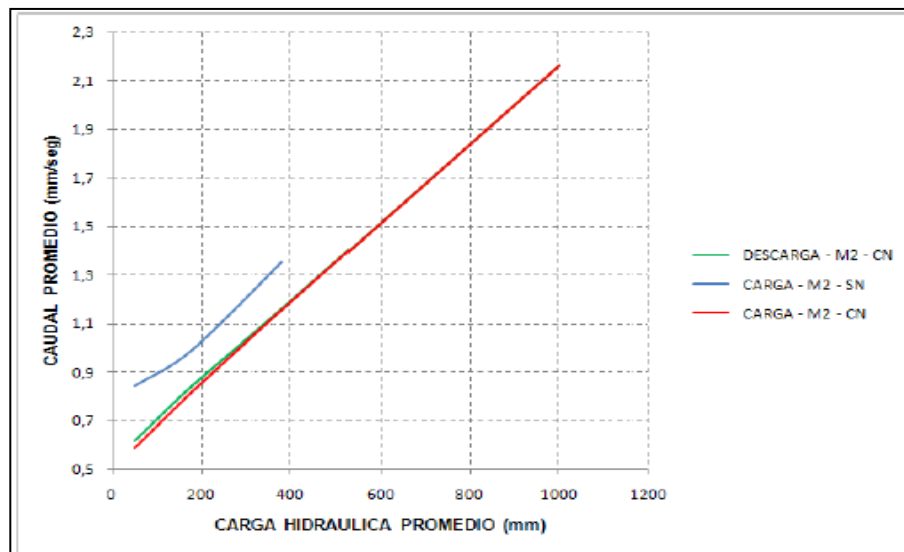
• “Pinhole test”.

**Variación del caudal con la carga hidráulica. M1 con nutriente y sin nutriente.**



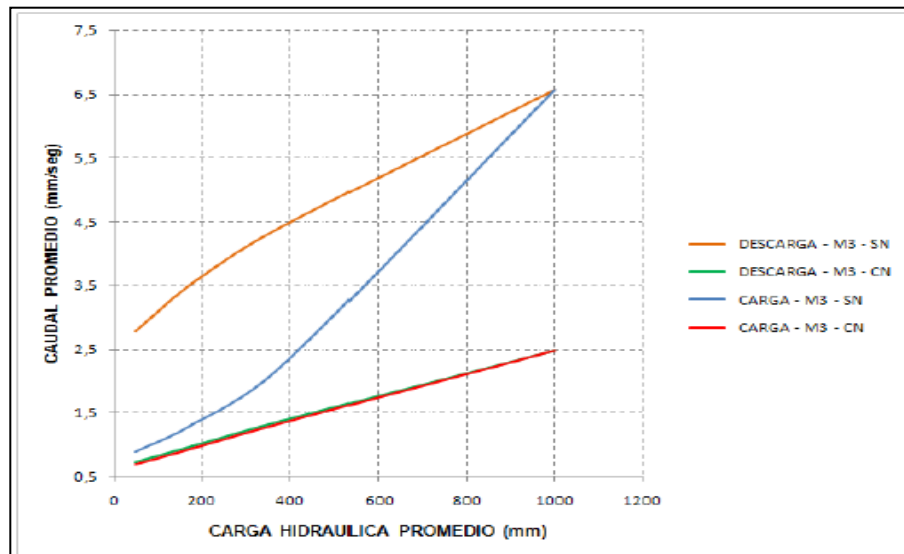
Fuente: “Biomíneralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales”. Marco Tulio Arrieta Rodríguez. Universidad Nacional de Colombia. (Tomado de Arrieta, 2011).

**Variación del caudal con la carga hidráulica. M2 con nutriente y sin nutriente.**



Fuente: "Biomíneralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales". Marco Tulio Arrieta Rodríguez. Universidad Nacional de Colombia. (Tomado de Arrieta, 2011).

**Variación del caudal con la carga hidráulica. M3 con nutriente y sin nutriente.**



Fuente: "Biomíneralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales". Marco Tulio Arrieta Rodríguez. Universidad Nacional de Colombia. (Tomado de Arrieta, 2011).

- **Desagregación**

**Resultados ensayo de desagregación inmersión total suelo SN.**

| SIN NUTRIENTE   |                              |                     |
|-----------------|------------------------------|---------------------|
| INMERSION TOTAL |                              |                     |
| MUESTRA         | ALTURA DEL AGUA EN EL ENSAYO | DESCRIPCION         |
| M1              | Inmersión total (24h)        | Desagregación total |
| M2              | Inmersión total (24h)        | Desagregación total |
| M3              | Inmersión total (24h)        | Desagregación total |

Fuente: “Biomíneralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales”. Marco Tulio Arrieta Rodríguez. Universidad Nacional de Colombia. (Tomado de Arrieta, 2011).

**Resultados ensayo de desagregación inmersión parcial suelo SN.**

| SIN NUTRIENTE     |                              |                                                 |
|-------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|
| INMERSION PARCIAL |                              |                                                 |
| MUESTRA           | ALTURA DEL AGUA EN EL ENSAYO | DESCRIPCION                                     |
| M1                | Base del cuerpo              | Intacta                                         |
|                   | 1/3 de la altura             | Desagregación en las puntas y centro de la base |
|                   | 2/3 de la altura             | Desagregación total                             |
|                   | Inmersión total (24h)        | Desagregación total                             |
| M2                | Base del cuerpo              | Intacta                                         |
|                   | 1/3 de la altura             | Desagregación en las puntas y centro de la base |
|                   | 2/3 de la altura             | Desagregación total                             |
|                   | Inmersión total (24h)        | Desagregación total                             |
| M3                | Base del cuerpo              | Intacta                                         |
|                   | 1/3 de la altura             | Desagregación en las puntas y centro de la base |
|                   | 2/3 de la altura             | Desagregación total                             |
|                   | Inmersión total (24h)        | Desagregación total                             |

Fuente: “Biomíneralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales”. Marco Tulio Arrieta Rodríguez. Universidad Nacional de Colombia. (Tomado de Arrieta, 2011).

**Resultados ensayo de desagregación inmersión total suelo CN.**

| CON NUTRIENTE   |                              |             |
|-----------------|------------------------------|-------------|
| INMERSION TOTAL |                              |             |
| MUESTRA         | ALTURA DEL AGUA EN EL ENSAYO | DESCRIPCION |
| M1              | Inmersión total (24h)        | Intacta     |
| M2              | Inmersión total (24h)        | Intacta     |
| M3              | Inmersión total (24h)        | Intacta     |

Fuente: "Biomíneralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales". Marco Tulio Arrieta Rodríguez. Universidad Nacional de Colombia. (Tomado de Arrieta, 2011).

**Resultados ensayo de desagregación inmersión parcial suelo CN.**

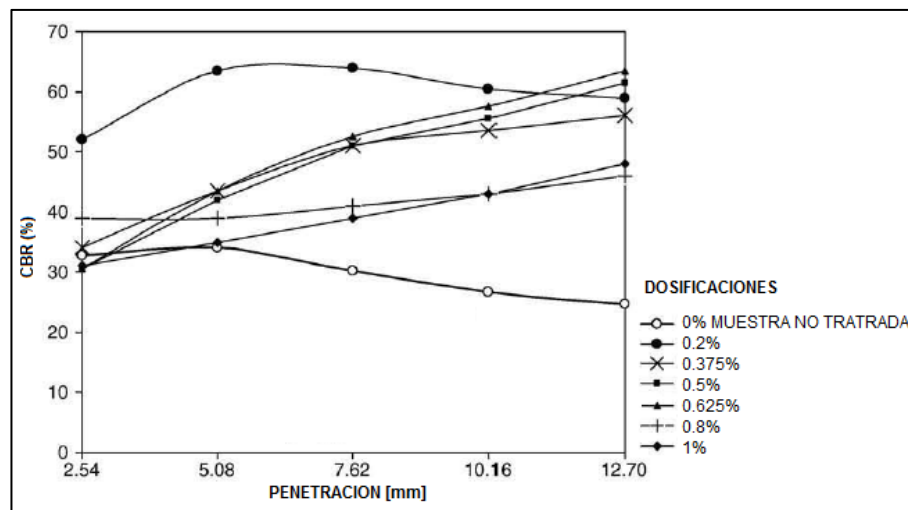
| CON NUTRIENTE     |                              |             |
|-------------------|------------------------------|-------------|
| INMERSION PARCIAL |                              |             |
| MUESTRA           | ALTURA DEL AGUA EN EL ENSAYO | DESCRIPCION |
| M1                | Base del cuerpo              | Intacta     |
|                   | 1/3 de la altura             | Intacta     |
|                   | 2/3 de la altura             | Intacta     |
|                   | Inmersión total (24h)        | Intacta     |
| M2                | Base del cuerpo              | Intacta     |
|                   | 1/3 de la altura             | Intacta     |
|                   | 2/3 de la altura             | Intacta     |
|                   | Inmersión total (24h)        | Intacta     |
| M3                | Base del cuerpo              | Intacta     |
|                   | 1/3 de la altura             | Intacta     |
|                   | 2/3 de la altura             | Intacta     |
|                   | Inmersión total (24h)        | Intacta     |

Fuente: "Biomíneralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales". Marco Tulio Arrieta Rodríguez. Universidad Nacional de Colombia. (Tomado de Arrieta, 2011).

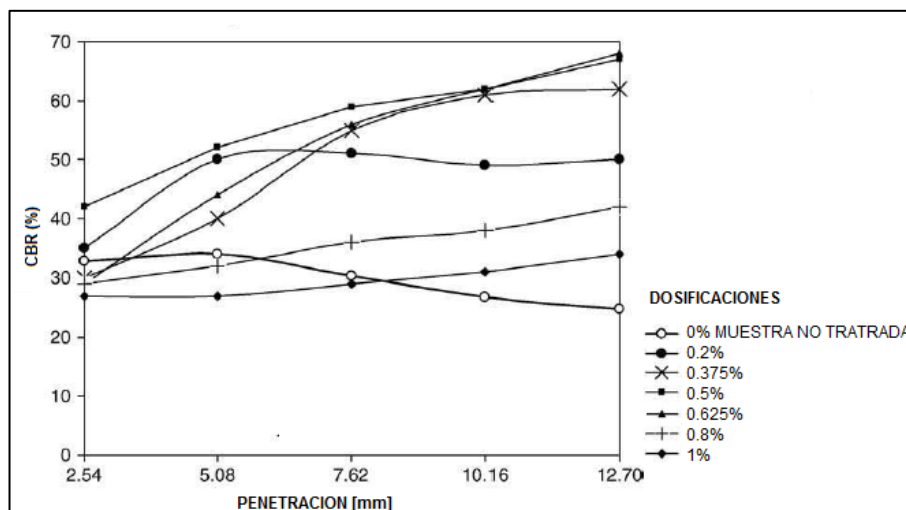
## ANEXO 9. GRAFICAS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE ESTABILIZACION DE SUELOS DE GRANO FINO CON GEOFIBRA Y FLUJO SINTETICO EN ESTADOS DE CONGELACIÓN Y DESCONGELACION.

- Mejora a través del uso de la geo-fibra.

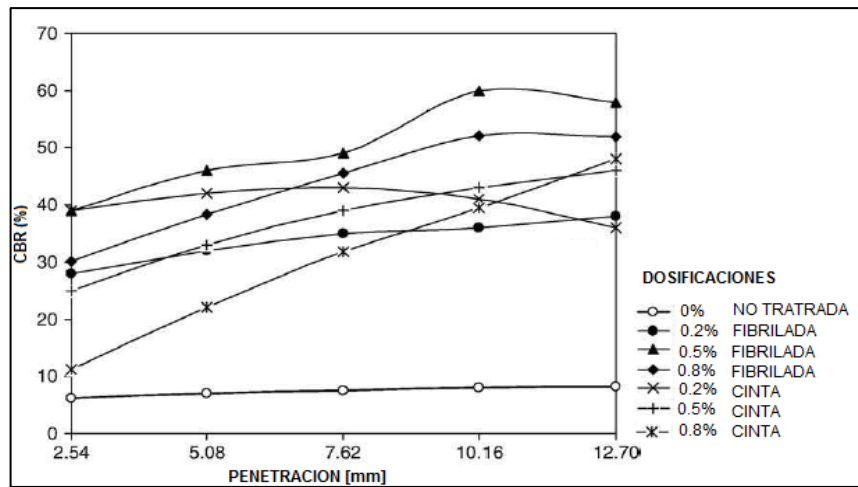
*Comportamiento de CBR bajo la penetración de muestras tratadas con geo-fibra.*



**A.** Muestras insaturadas tratadas con geo-fibra fibrilada.



**B.** Muestras insaturadas tratadas con cinta geo-fibra.

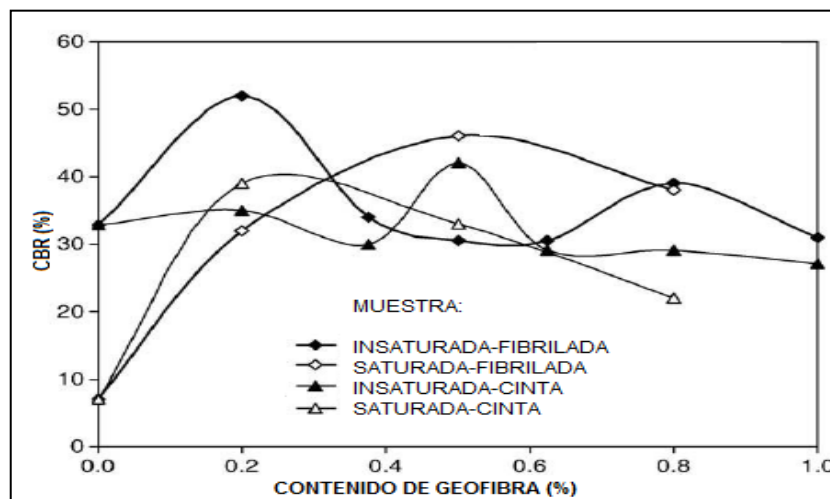


### C. Muestras saturada tratada con geo-fibra, fibrilada y cinta.

Fuente: "Ciencia y tecnología en regiones frías". Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Alaska Fairbanks.

Para identificar el contenido óptimo de geo-fibra, diversos contenidos se ensayaron, los resultados se presentan a continuación:

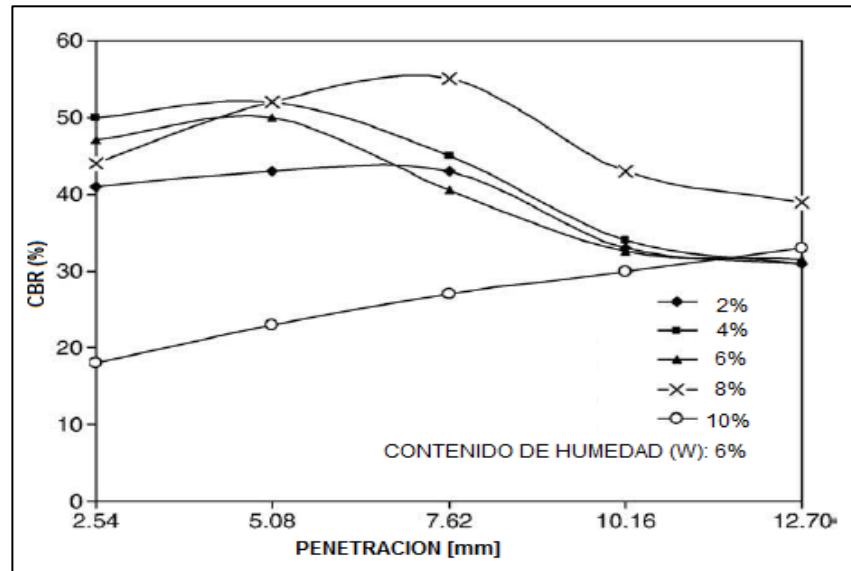
#### Comportamiento de CBR para contenidos de geo-fibra. Porcentaje óptimo.



Fuente: "Ciencia y tecnología en regiones frías". Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Alaska Fairbanks.

- Mejora a través del uso de fluido sintético.

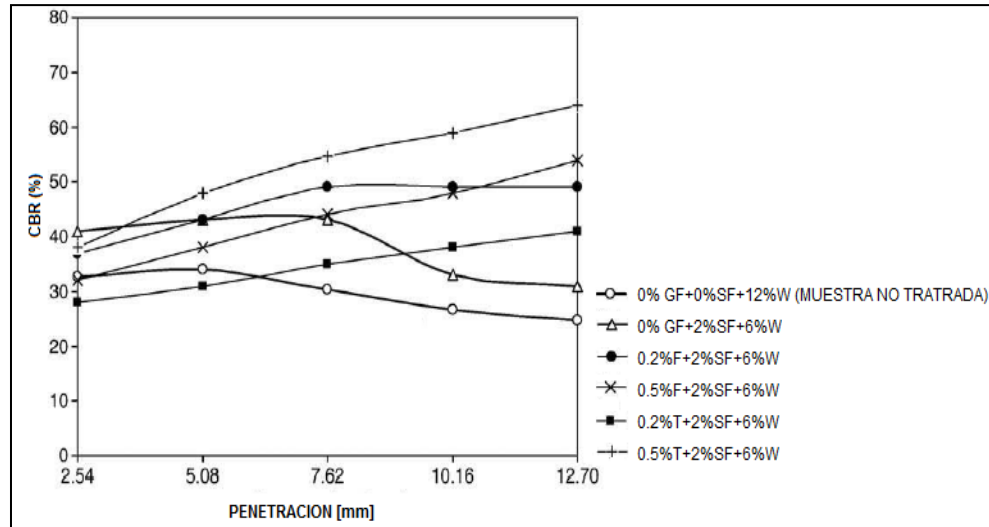
*Comportamiento de CBR para contenidos de fluido sintético en diferentes dosificaciones.*



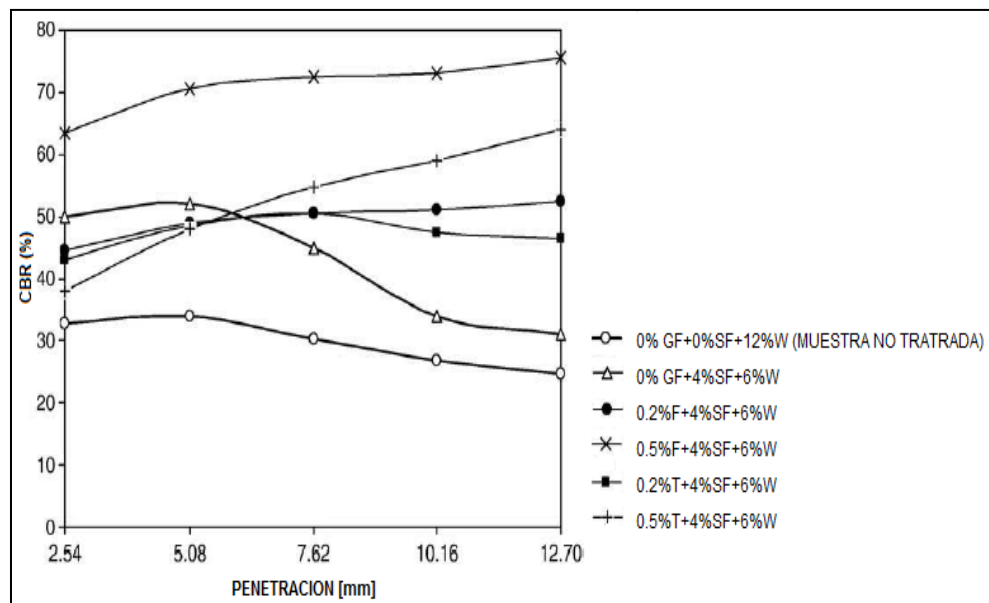
*Fuente: "Ciencia y tecnología en regiones frías". Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Alaska Fairbanks.*

- Mejora a través del uso de geo-fibra y fluido sintético.

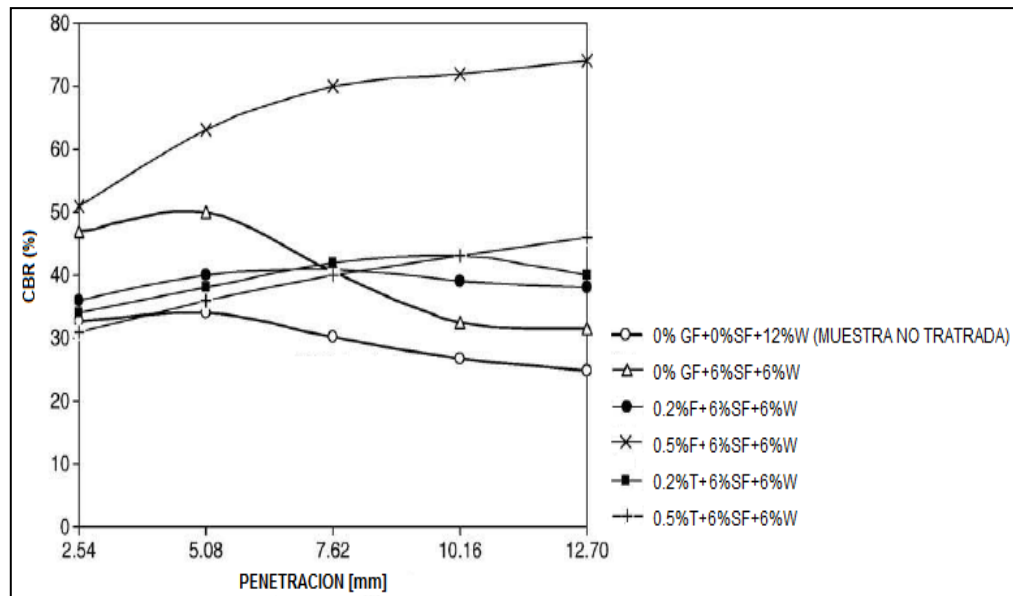
*Comportamiento de CBR contra la penetración de muestras insaturadas tratadas con geo-fibra y fluido sintético juntos.*



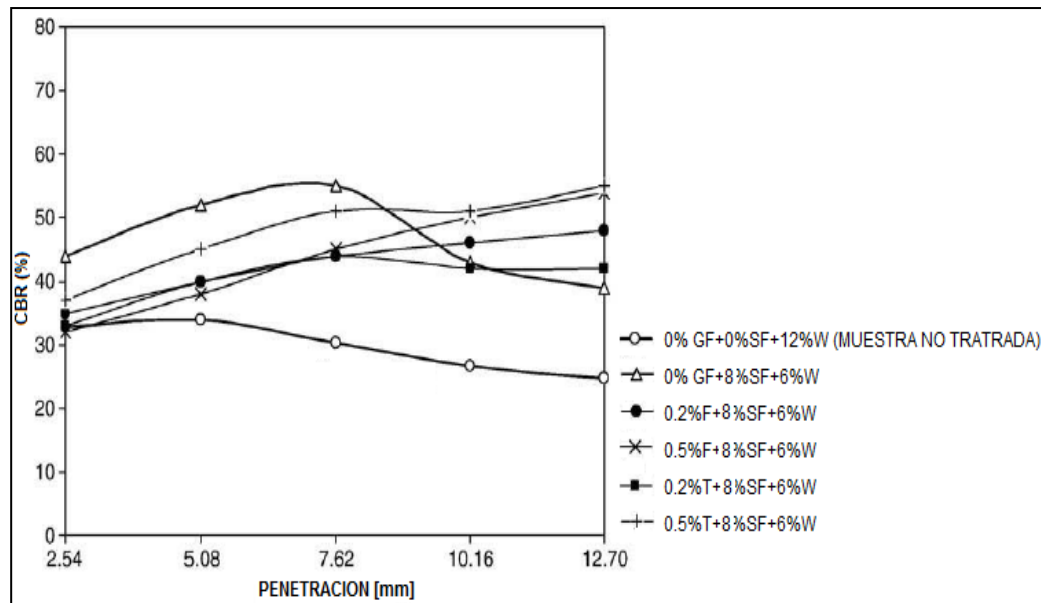
**A.** Muestra insaturada con 2% de fluido sintético.



**B.** Muestra insaturada con 4% de fluido sintético.



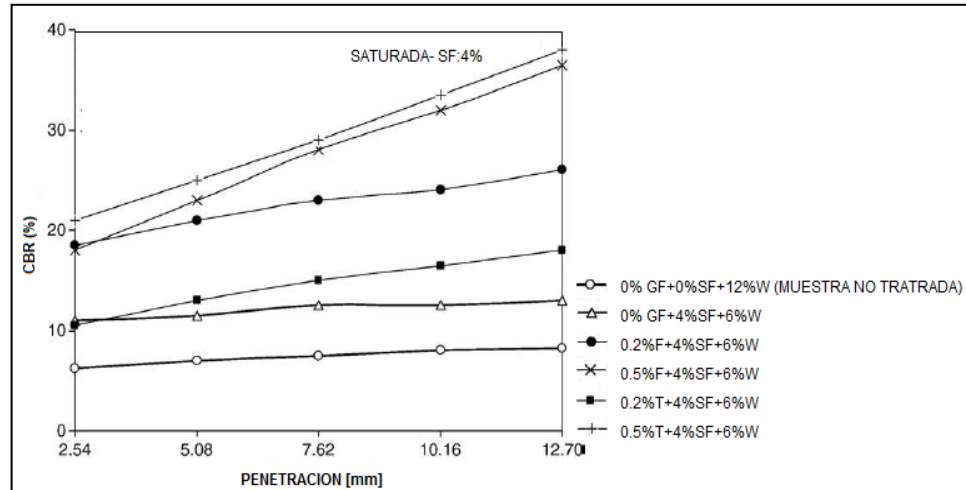
**C.** Muestra insaturada con 6% de fluido sintético.



**D.** Muestra insaturada con 8% de fluido sintético.

Fuente: "Ciencia y tecnología en regiones frías". Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Alaska Fairbanks.

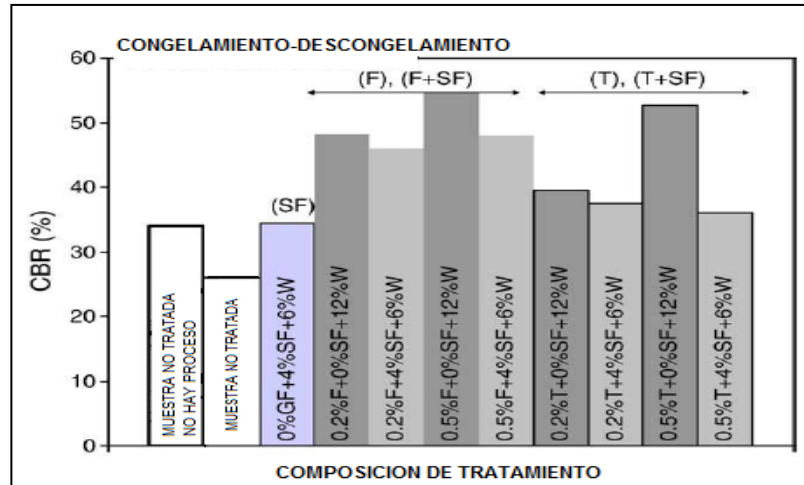
**Comportamiento de CBR contra la penetración de muestras saturadas tratadas con geo-fibra y fluido sintético a 4% de concentración.**



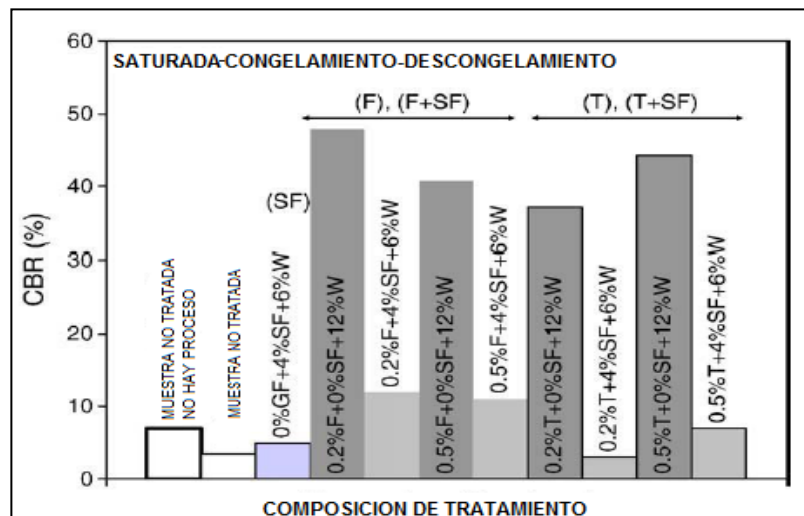
Fuente: "Ciencia y tecnología en regiones frías". Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Alaska Fairbanks.

- Análisis de resultados - procesos de congelación y descongelación.

*Comportamiento de CBR contra la penetración de muestras insaturadas tratadas con geofibra y fluido sintético juntos.*



*Comportamiento de CBR contra la penetración de muestras saturadas tratadas con geofibra y fluido sintético juntos.*



Fuente: "Ciencia y tecnología en regiones frías". Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Alaska Fairbanks.





