

APLICACIÓN DE LA BIOMINERALIZACIÓN EN SUELOS DE LA CIUDAD DE MEDELLÍN PARA MITIGAR PROCESOS EROSIVOS

USE OF BIOMINERALIZATION IN SOILS OF THE CITY OF MEDELLÍN TO MITIGATE EROSIVE PROCESSES

MARCO TULLIO ARRIETA-RODRÍGUEZ

Magister en Ingeniería-Geotecnia, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, mtarriet@unal.edu.co

YAMILE VALENCIA-GONZÁLEZ

Doctora en Geotecnia, Profesora Asociada, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, yvalenc0@unal.edu.co.

OSCAR ECHEVERRI-RAMÍREZ

Magister en Geotecnia, Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, oecheve@unal.edu.co.

Recibo para evaluación: 28 Noviembre 2011/ Aceptación: 21 Septiembre: 2012 / Recibida Versión Final: 04 Diciembre 2012

RESUMEN: La biotecnología puede ser utilizada como herramienta para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos, proporcionando mayor resistencia y estabilidad ante el ataque de agentes erosivos. En esta investigación, se analizó el efecto de la aplicación de nutrientes precipitadores de carbonato de calcio sobre la microflora nativa, en la mitigación de procesos erosivos superficiales en suelos tropicales. La metodología utilizada consistió en la toma de 3 muestras de suelo, ubicadas en el Cerro Nutibara (Medellín-Colombia), las cuales mostraban claras evidencias de procesos erosivos superficiales. Sobre estas muestras en estado natural, se ejecutaron algunos ensayos de clasificación física como contenido de humedad natural, granulometría, límites de Atterberg, clasificación Miniatura Compactada Tropical (MCT) expedita; así como, ensayos de succión total y matricial, consolidación duplo-edométrica, "Pinhole test" y desagregación. Posteriormente, a estos suelos se les adicionó el nutriente B4, con el fin de generar precipitación de carbonato por medio de las bacterias nativas del suelo y se realizaron los mismos ensayos efectuados en las muestras en estado natural. La comparación de los resultados obtenidos de los ensayos del suelo sin tratamiento y con tratamiento, permitió estimar la reducción de la erodabilidad del suelo al ser tratado.

PALABRAS CLAVES: Biomineralización, desagregación, Pinhole test, erodabilidad.

ABSTRACT: The biotechnology can be used as a tool to improve the mechanical properties of soils, providing strength and stability to the erosive attack. In this paper, was examined the effect of the application of nutrients precipitation of calcium carbonate on the native microbiota, in mitigating of erosion processes in tropical soils. The methodology used consists in collecting three soil samples from the Cerro Nutibara (Medellin-Colombia), which showed clear evidence of surface erosion. On these samples in their natural state, some tests of physical classification were executed as natural moisture content, grain size, Atterberg limits, classification Miniature Compacted Tropical (MCT) expeditiously, as well as total suction and matrix suction, dual-oedometer density, Pinhole test and Slaking test. Subsequently, to these soils were added the nutrient B4, in order to generate carbonate precipitation from the native soil bacteria and the same tests were performed on undisturbed samples. The comparison of the results of tests in treated and untreated soils allow to estimate the reduction in soil erodibility.

KEYWORDS: Biomineralization, Slaking test, Pinhole test, erodibility.

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los estudios sobre biotecnología se han enfocado en el manejo de microorganismos para la restauración de obras de arte y mejoramiento de concretos. Por el contrario, pocas son las investigaciones que consideran el uso de microorganismos para el mejoramiento de las propiedades mecánicas y físicas de los suelos para obras civiles, específicamente en el control de procesos erosivos superficiales; y aún se encuentra en

fase de desarrollo, modelos y técnicas donde a partir de bacterias calcificantes se pueda lograr efectos como la estabilización de los suelos (Valencia, 2009).

En la presente investigación se trabajó con muestras de suelo residual tropical, donde se observaban procesos erosivos superficiales. Sobre las muestras de suelo se realizaron algunos ensayos de clasificación física y mecánica; así como ensayos de "Pinhole test" y desagregación, que permitieran estimar la erodabilidad

del perfil, antes y después de la adición del nutriente, para analizar así el efecto que tiene el tratamiento en la estabilización.

2. BIOMINERALIZACIÓN.

La biomineralización es un proceso mediante el cual los organismos vivos propician la precipitación de minerales, ya sean cristalinos o amorfos. Las estructuras formadas se componen en un 80% de biominerales cristalinos y un 20% de amorfos. Además se considera que el calcio constituye un elemento químico presente en aproximadamente el 50% de todos los biominerales conocidos (Soto, 2003). La biomineralización se produce a través de reacciones químicas entre iones específicos o compuestos, como resultado de la actividad metabólica de un organismo bacteriano bajo ciertas condiciones ambientales. La “carbonatogenesis” es un buen ejemplo de biomineralización, en el que se produce la precipitación de carbonato de calcio. En este proceso, el papel principal de las bacterias ha sido asociado a su habilidad de crear ambientes alcalinos (pH alto y el incremento de la concentración de carbono inorgánico diluido) por medio de varias actividades fisiológicas (Lee, 2003).

Dado los riesgos asociados a la erosión y la importancia que tiene mitigarla, a continuación se presenta una reseña sobre los diferentes tipos de erosión.

3. EROSIÓN.

Se considera como erosión, la degradación y el transporte de material o sustrato del suelo, por medio de un agente dinámico, como el agua, el viento, el hielo o por agentes antrópicos en la naturaleza. Puede afectar a la roca o al suelo, e implica movimiento, es decir, transporte de granos, por lo que la erosión es uno de los principales agentes del ciclo geográfico (Monroe, 1986).

El material erosionado puede estar conformado por:

- Fragmentos de rocas producto de la meteorización mecánica (termoclastia, gelifracción, etc.) o formados por abrasión mecánica debida a la acción del viento, aguas o glaciares.
- Suelos, en especial aquellos que han sido despojados de su cubierta vegetal por tala, sobrepastoreo o incendio.

Zachar (1982) propone una terminología para una clasificación de los principales tipos de erosión, haciendo énfasis en el carácter combinado entre la acción de los agentes erosivos y la acción de la gravedad. La **Tabla 1** muestra esta clasificación (Camapum et al. 2006).

Tabla 1. Clasificación de erosión por factores activos (Modificado de Camapum et al., 2006).

FACTOR	TIPO DE EROSION
1. Agua	Hídrica
1.1. Lluvia	Pluvial
1.2. Flujo superficial	Laminar
1.3. Flujo concentrado	Lineal (Surco, canales, cárcavas)
1.4. Río	Fluvial
1.5. Lagos, reservas de agua	Lacustre
2. Glaciar	Glacial
3. Nieve	Nival
4. Viento	Eólica
5. Tierra o detritos	Soligenica
6. organismos	Organogenica
6.1. Plantas	Fitogenica
6.2. Animales	Zoogenica
6.3. Hombre	Antropogenica

En la geotecnia la erosión se puede clasificar en tres grandes grupos (Camapum et al., 2006):

3.1. Erosión interna o “Piping”.

El “Piping” es un fenómeno de erosión subterránea en el cual la fuerza de infiltración del agua genera la remoción de partículas al interior del suelo, formando cavidades en forma tubular, las cuales avanzan hacia el interior del suelo, tal como se muestra en la **Figura 1** (Camapum et al., 2006). Este fenómeno provoca canales que evolucionan en sentido contrario al del flujo del agua, pudiendo dar origen al colapso del terreno, provocando desprendimientos que agrandan las cárcavas o crean nuevos brazos (Oliveira 2005).

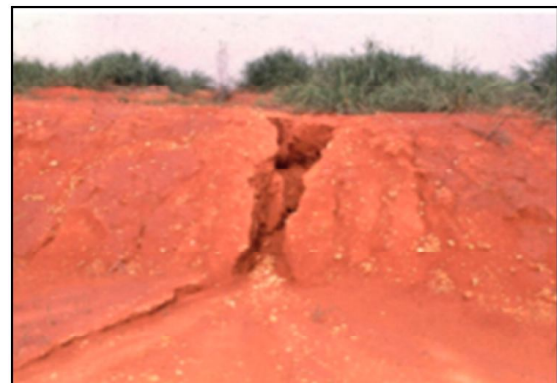


Figura 1. Erosión interna. (Tomado de Suarez, 2001).

Según Fendrich *et al.* (1997), la erosión interna no solo se da en las cercanías de los taludes, donde se producen cárcavas, esta también se puede dar a centenares de metros al interior de estos, debilitando la estructura interna del suelo y generando regiones de infiltración preferencial. También propone que este fenómeno puede ser atribuido a antiguas galerías de hormigueros, cuyos vacíos favorecen la infiltración del agua y la erosión interna. (Camapum *et al.*, 2006).

Es común que la erosión interna tenga origen en cárcavas o canales que interceptan los niveles superficiales de aguas subterráneas, provocando un aumento en el gradiente hidráulico y de las fuerzas de infiltración, generando la inestabilidad de la estructura interna y el arrastre de partículas del suelo, siendo todos estos fenómenos estudiados en laboratorio mediante del ensayo "Pinhole test". (Camapum *et al.*, 2006).

3.2. Erosión lineal (Surcos, canales y cárcavas).

La erosión lineal es el resultado de las alteraciones superficiales del suelo causadas por la concentración del flujo de las aguas lluvias, debido a la urbanización, y construcción de carreteras, entre otros, que producen incisiones en la superficie del terreno (Oliveira, 2005). Los surcos, canales y cárcavas constituyen la secuencia natural de evolución de los procesos erosivos (Camapum *et al.*, 2006).



Figura 2. Cárcavas en forma de anfiteatro (Tomado de Salvatore, 1999).

El termino canales se debe aplicar, a la profundización de los surcos (cortes poco profundo en el suelo,

que surge con la concentración de agua), con una profundidad entre 10 cm y 50 cm o limitada a aquellos canales para los cuales se comienza a manifestar inestabilidad de taludes por deficiencia en la cohesión y la cementación entre partículas (Ver **Figura 3**). El límite de 50 cm también está relacionado con la estabilidad de taludes, ya que incluso se necesita una profundidad mínima para la impregnación de la materia orgánica en el suelo y la adherencia de raíces en la superficie, que garantiza cierta estabilidad con esta profundidad. Dentro de esta clasificación y a partir de la profundidad límite establecida para los canales, las cárcavas que están asociadas a la inestabilidad de taludes están dentro de los fenómenos de erosión interna o esqueletización. (Camapum *et al.*, 2006).



Figura 3. Erosión en canales. (Tomado de Suarez, 2001).

Las cárcavas corresponden al estado más avanzado y complejo de los procesos erosivos, cuyo poder destructivo es mucho mayor que el de cualquier otro estado, y por lo tanto el más difícil de controlar, generando altos costos para la recuperación de las áreas degradadas. Las cárcavas pueden actuar de manera separada o conjuntamente combinando varios procesos erosivos, tales como erosión superficial, erosión interna, derrumbes, deslaves, deslizamientos de tierra y caída de bloques debido a la pendiente del terreno. Estos procesos en conjunto, forman procesos erosivos más complejos, de alto poder destructivo, con una progresión más rápida que se desarrollan en su mayor parte desde de aguas abajo hacia aguas arriba (Ver **Figura 4**, Camapum *et al.*, 2006, tomado de Costa, 1981).



Figura 4. Erosión en cárcavas. (Tomado de Suarez, 2001).

En las zonas urbanas, las cárcavas son causadas por el aumento en el volumen y la concentración de las descargas de agua superficial y el drenaje inadecuado del agua lluvia. En general, el problema se agrava cuando la mezcla de las aguas residuales y aguas pluviales son enviadas al sistema de drenaje. En las zonas rurales, por lo general aparecen y se desarrollan como resultado de los cambios hidrológicos en la cuenca de drenaje como consecuencia de la deforestación y los cambios en las tasas de infiltración y en los regímenes de flujo. (Camapum et al., 2006).

3.3. Erosión superficial.

Según Oliveira (2005), se caracteriza por el arrastre superficial homogéneo y difuso, en grandes áreas, cargando capas delgadas de suelo, por medio de láminas de agua que no se infiltran. Cabe destacar que la erosión superficial también se conoce como erosión laminar, dada la poca velocidad y poder de arrastre que el flujo posee. La erosión superficial se debe a la escorrentía que no alcanza a infiltrarse. Este tipo de erosión se asocia al transporte, ya sea de las partículas o agregados desprendidos de los macizos por el impacto de las gotas de lluvia, o de los agregados o partículas arrancados por la fuerza de arrastre entre el agua y el suelo. El poder erosivo del agua en movimiento y su capacidad de transporte dependen de la densidad y velocidad del flujo, así como del espesor de la lámina de agua y, especialmente de la pendiente o relieve. La formación de las líneas en el flujo superficial aumenta el potencial erosivo y arrastre de las partículas del suelo, lo que casi en todos los casos se transforman en

canales los cuales se desarrollan en pequeñas cárcavas y llegan a la condición de cárcavas profundas (Camapum et al., 2006).



Figura 5. Erosión superficial (Tomado Suarez, 2001).

4. CARACTERISTICAS DEL AREA DE TRABAJO

Dado que el objetivo primordial de este trabajo es evaluar la mitigación de procesos erosivos superficiales mediante biomineralización, se optó por escoger un sitio afectado por un proceso de erosión del tipo laminar en la ciudad de Medellín. En este caso se escogieron tres sitios que cumplieran con estas características en el Cerro Nutibara. Este cerro se encuentra localizado sobre la margen izquierda del río Medellín, al lado de la desembocadura de la quebrada Altavista. Su configuración general es circular, con un diámetro promedio de 600 m, y cubre un área de 40 hectáreas aproximadamente.

4.1. Geología y geomorfología.

El Cerro Nutibara se encuentra desarrollado y subyacente por rocas metamórficas del Grupo Ayurá – Montebello, las cuales están rodeadas por extensos depósitos aluviales del río Medellín y sus quebradas afluentes. Las rocas metamórficas hacen parte de las anfibolitas de Medellín (Kam). Las anfibolitas de la margen izquierda del río Medellín son rocas constituidas esencialmente por hornblenda y plagioclasa, de textura por lo general isotrópica a bandeada siendo en ocasiones difícil distinguirlas de un gabro o una diorita. A nivel de afloramiento esta roca está por lo general profundamente meteorizada, con desarrollo de suelos residuales, limosos de color amarillento a amarillo rojizo (Rendón, 1999).

5. MATERIALES Y METODOS

5.1. Recolección de muestras en campo.

Las muestras fueron tomadas en 3 puntos diferentes del Cerro Nutibara, en la ciudad de Medellín, cuyas coordenadas según el sistema de georeferenciación Magna Sirgas se presentan en la **Tabla 2** y en la **Figura 6**.

Tabla 2. Coordenadas sitios muestreados, según Magna Sirgas.

SITIO	NORTE	OESTE
1	6°14'11.78"N	75°34'39.91"O
2	6°14'90.58"N	75°34'55.51"O
3	6°14'14.33"N	75°34'47.41"O



Figura 6. Ubicación y distribución de los sitios de muestreo (Tomada y modificada de Google Earth. Visitado 5 de Agosto de 2011).

Las muestras se recolectaron en dos estados, alteradas e inalteradas, a 1 m de profundidad, acorde con el alcance de esta investigación, que es la erosión superficial, y teniendo en cuenta que estas no presentarán contenido de materia orgánica, como humus, raíces, etc. Las muestras alteradas fueron tomadas de manera manual, mediante excavación y transporte en bolsas plásticas, las cuales minimizan en un 90% la pérdida de humedad. Las muestras inalteradas se tomaron en cajones cúbicos de 0.3 m de lado. Los bloques de suelo se esculpen en campo, con el fin de darle a estos la geometría del cajón, luego se recubren con parafina para conservar la humedad natural.

Uno de los dos bloques tomados de cada sitio, fue utilizado para la ejecución de algunos ensayos de clasificación física como contenido de humedad natural, granulometría, límites de Atterberg, clasificación Miniatura Compactada Tropical (MCT) expedita;

así como, ensayos de succión total y matricial, consolidación duplo-edométrica y ensayos para determinar la erodabilidad del suelo como "*Pinhole test*" y desagregación. Al otro bloque se le adicionó el nutriente B4, nutriente compuesto por 15g de acetato de calcio, 4g de extracto de levadura, 5g de glucosa, para 1 litro de agua destilada a un pH aproximado de 8.0; con el fin de llenar el 60% de los vacíos del suelo que no contienen agua. Este nutriente se deja actuando un mínimo de 15 días para que se dé la precipitación de carbonato de calcio (Valencia, 2009), para posteriormente proceder a la realización de los mismos ensayos que se ejecutaron en las muestras sin nutriente y comparar resultados.

5.2. "*Pinhole test*"

Para la realización del ensayo "*Pinhole test*" se utilizó la norma brasilera ABNT - NBR14114. El ensayo consiste en hacer circular agua por un agujero de 1 mm de diámetro, hecho en el centro de la muestra, para someter el sistema a diferentes cargas hidráulicas (**Figura 7**).



Figura 7. Ensayo "*Pinhole test*". (Tomado de Valencia, 2009).

Según Lima (2003), el concepto del ensayo es evaluar de forma directa y cualitativa la dispersión de los suelos arcillosos, considerando como suelos dispersivos las acillas erodables, las cuales sufren erosión por dispersión y defloculación.

En este ensayo la muestra es sometida inicialmente a una carga hidráulica de 50 mm, la cual se deja actuar por lo menos 2 horas, para garantizar la saturación de la muestra, luego se varía paulatinamente la carga

hidráulica en incrementos de 180 mm, 380 mm y finalmente 1000 mm. Con cada incremento, se toma el volumen de agua evacuada en un período de tiempo determinado, para calcular el caudal; además, se verifica la turbidez del agua. Posteriormente se realiza la etapa de descarga, donde se disminuye la carga hidráulica hasta llegar a las condiciones iniciales y se observa el diámetro final del agujero.

Camapum et al. (2006), proponen analizar los resultados del ensayo “*Pinhole test*” a partir de la curva “*CAUDAL vs GRADIENTE HIDRAULICO*”. Cuando se obtiene una curva con un comportamiento casi lineal y con un ligero desplazamiento hacia abajo, el suelo se considera como no erodable. Por otra parte, el suelo se considera erodable, cuando la curva presenta inflexión bien marcada hacia la parte superior de esta. Este punto de inflexión se produce a partir del momento en que la erosión comienza a ocurrir. El efecto de esto se ve agravado por el hecho de que la curva de descarga está muy por encima de la curva de carga tal como se muestra en la **Figura 8**.

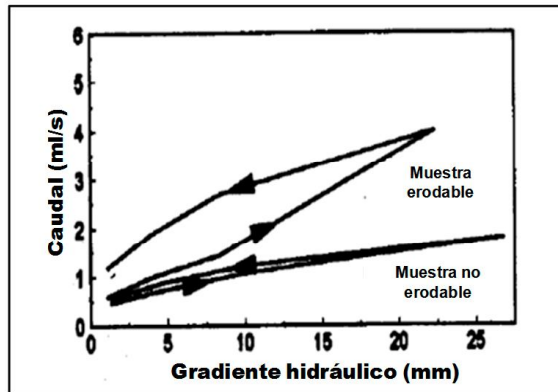


Figura 8. Resultado del ensayo “*Pinhole test*”. (Modificado de Valencia, 2009).

5.3. Desagregación.

El ensayo de desagregación, también conocido como “*Slaking test*” fue diseñado, según Lima (2003), por la ingeniera Anna Margarita Fonseca. Este ensayo tiene como objetivo, verificar la estabilidad de una muestra de suelo inalterada, cuando se sumerge en agua destilada, independiente de la dispersión del material. El resultado es puramente cualitativo, lo que indica, que los suelos altamente erodables se desintegran por completo en agua, es por esto que los estados

intermedios y de baja erodabilidad no son directamente verificables (Camapum et al. 2006).

Para la ejecución de este ensayo se tienen dos muestras de suelo cúbicas de 0,6 m de lado, las cuales se colocan en bandejas por separado, encima de una piedra porosa saturada, con el nivel del agua en la base de la muestra por un período de 30 minutos. Una de las muestra se somete a inmersión total durante un periodo de 24 horas, mientras que la otra se somete a inmersión parcial, que consiste en aumentar el nivel del agua gradualmente a 1/3 de la altura de la muestra, luego a 2/3 de la altura, manteniendo cada una de estas fases un periodo de 15 minutos. Por último se deja la muestra inmersa totalmente por 24 horas.

Durante la ejecución del ensayo, se deben anotar las observaciones en cuanto a la desagregación de la muestra, si es total, en fragmentos, o si la muestra se mantiene intacta.

6. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de todos los ensayos de laboratorio ejecutados, tanto a los suelos en su estado natural y los correspondientes al suelo tratado con el nutriente B4 (**Figura 9**). Esto permite evaluar la influencia que tiene la adición del nutriente en algunas propiedades del suelo.



Figura 9. Muestra M1 tratada con nutriente B4.

6.1. Caracterización física del perfil.

Los resultados de las pruebas índices (límites de consistencia, gravedad específica, relación de vacíos

y contenido de humedad natural) se presentan en la **Tabla 3** y la clasificación unificada se presenta en la **Tabla 4**, para las muestras de suelo con (CN) y sin tratamiento (SN):

Tabla 3. Pruebas índice

MTRA	W (%)		eo		LL (%)		IP (%)		GS	
	SN	CN	SN	CN	SN	CN	SN	CN	SN	CN
M1	29	29	0,98	0,95	43	39	12	8	2,98	2,78
M2	47	47	1,24	0,98	45	35	15	8	2,84	3,06
M3	43	43	1,00	0,98	44	34	12	5	2,73	2,84

W(%)=Contenido de humedad, e_o = Índice de vacíos inicial, LL(%)= Límite líquido, IP(%)= Índice de plasticidad, Gs=Gravedad específica de los sólidos.

Tabla 4. Clasificación U.S.C. y MCT rápida

MUESTRA	MCT		U.S.C	
	SN	CN	SN	CN
M1	NG'	NA'	ML	ML
M2	NG'	NA'	ML	ML
M3	NG'	NA'	ML	ML

Con relación al índice de vacíos se observa una disminución al pasar la muestra de sin nutriente, a la muestra con nutriente en todos los casos, reducción que hace que el suelo presente menor deformabilidad al ser tratado. En el caso del peso específico de los sólidos existe una tendencia inversa con relación a presencia de calcio en el suelo, según análisis químicos realizados a las muestras y que puede deberse a una hidratación del calcio que interfiere en los resultados (Arrieta, 2011).

Debido a la notable variación de la plasticidad del suelo tratado y no tratado, se puede inferir que existe presencia de carbonato de calcio. Para confirmar lo obtenido, estos resultados se compararon con los alcanzados por Camapum (1985) (**Figura 10**), tomando como punto de comparación la relación que existe entre el límite líquido y el índice de plasticidad de los suelos con diferentes niveles de carbonato de calcio, donde se tiene que el aumento del contenido de carbonato de calcio en los suelos estudiados por el autor, genera un desplazamiento de los puntos a una posición más baja y hacia la izquierda de la Figura. La misma observación se puede ver en los resultados de esta investigación y que se ilustran en la **Figura 10**.

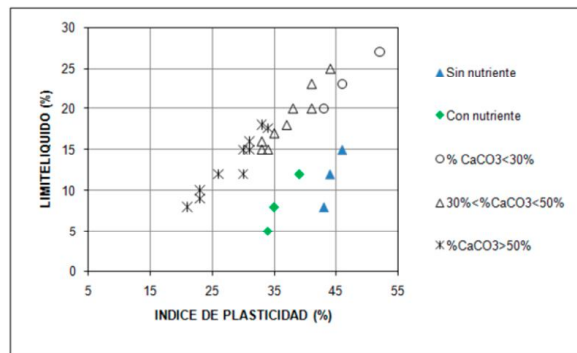


Figura 10. Análisis comparativo de los resultados obtenidos en esta investigación y los obtenidos por Camapum et al. de Carvalho (1985), en cuanto a la influencia del carbonato de calcio en la plasticidad.

Con relación a los cambios producidos por la adición del nutriente en la clasificación de los suelos, se evidencia una reducción de la plasticidad que no afecta la clasificación por el método U.S.C. (ML= Limo de baja plasticidad), como se ilustra en la **Tabla 4**. Es de anotar que aunque no se presenta cambio alguno 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. Por otra parte, la agregación que se genera con la adición del nutriente aumenta el tamaño aparente de partícula considerablemente, pasando de NG' (Suelos saprolíticos arcillosos) a NA' (arenas cuarzosas), tal como se muestra en la **Tabla 4**.

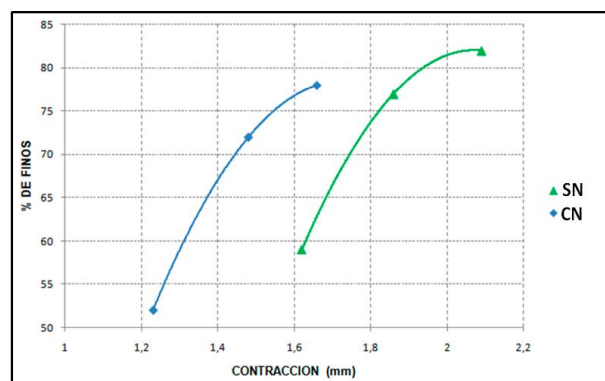


Figura 11. Variación de la contracción por el método MCT rápido debido al contenido de finos de la muestra.

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 mejorar su estabilidad (**Figura 11**).

6.2. Succión total y matricial.

En la **Figura 12** se muestra la variación de la succión total (TOT) y matricial (MAT) en función de la humedad del suelo, en estado natural y con la adición del nutriente.

Se puede observar, que 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.

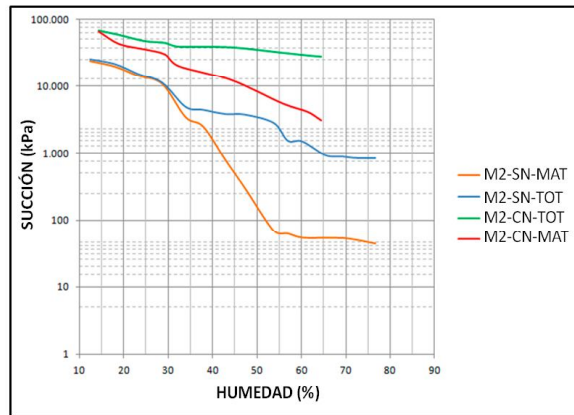


Figura 12. Variación de la succión con la humedad. Muestra M2.

6.3. Ensayo duplo edométrico y colapso.

En la **Figura 13** se muestra los resultados del ensayo duplo edométrico para las muestras con tratamiento y sin tratamiento en condiciones naturales (NSAT) y saturadas (SAT) para ambos casos.

Para poder realizar un análisis comparativo, se llevaron las muestras tratadas con nutriente a la misma humedad con la que se realizó el ensayo en estado natural.

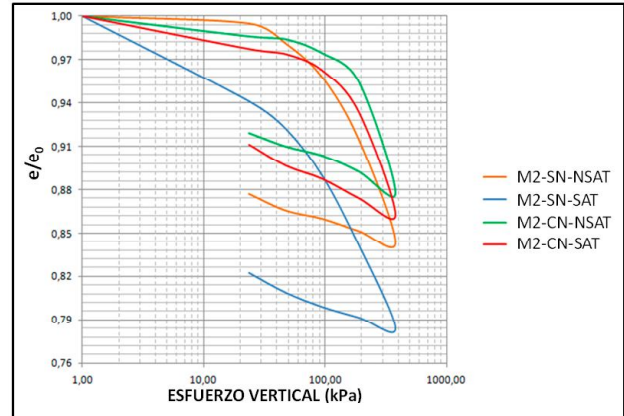


Figura 13. Variación de la relación de vacíos normalizadas con el esfuerzo vertical en el ensayo duplo edométrico. Muestra M2.

En la **Figura 14**, se muestra un valor máximo del índice de colapso asociado a un nivel de tensión determinado, tensión que es descrita como “tensión crítica de colapso”, la cual corresponderá a la tensión máxima soportada por el suelo antes de que se vea afectada su estructura (Arrieta, 2011).

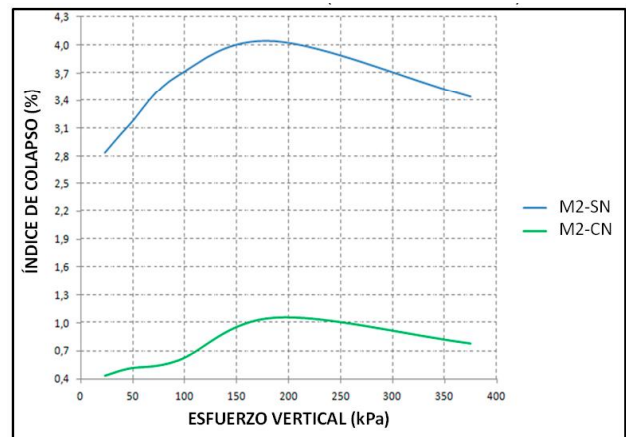


Figura 14. Variación del índice de colapso con la tensión vertical. Muestra M2.

Se puede apreciar en las figuras anteriores, una reducción considerable del índice de colapso para las muestras tratadas en relación a las muestras sin nutriente. Para tensiones que varían desde 24 kPa hasta 379 kPa, se obtuvo reducción en el índice de colapso en la muestra M1 del 17% hasta 30%, en la muestra M2 desde un 28% hasta un 56% y en la muestra M3 desde un 36% hasta un 86%. Este hecho evidencia la mejora generada por el tratamiento en el suelo.

6.4. “Pinhole test”

Para analizar el potencial erosivo que posee el suelo y su variación al momento de adicionarle el nutriente se realizó el ensayo “Pinhole test”, cuyo resultado se muestra en la **Figura 15**.

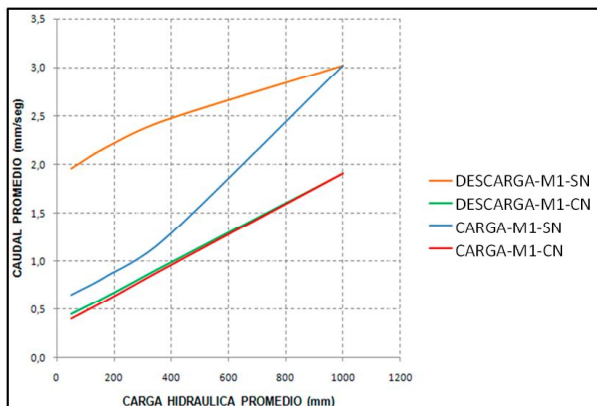


Figura 15. Variación del caudal con la carga hidráulica. M1 con nutriente y sin nutriente.

Se pudo observar que, para un mismo gradiente hidráulico existe diferencia en las trayectorias de carga y descarga para todas las muestras en el suelo sin nutrientes (gran abertura entre las curvas), lo que se traduce como arrastre de partículas o pérdida de la estabilidad estructural del suelo, procesos directamente asociados a la incidencia de la erosión. El tratamiento aplicado, proporciona una mayor estabilidad estructural, dado que la trayectoria de las curvas carga-descarga es prácticamente la misma para diferentes gradientes hidráulicos.

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 la **Figura 15** del suelo sin nutriente para la muestra M1. Al momento de adicionarle el nutriente todas las muestras fueron consideradas como suelos no erodables, de acuerdo con lo anteriormente descrito (curva carga-descarga prácticamente iguales) y no dispersivos (ya que no se ha observado turbidez en el agua drenada durante la ejecución del ensayo), de acuerdo con la clasificación de la norma NBR 14114 (1998).

6.5. Desagregación.

A continuación se presentan los resultados del ensayo de desagregación para cada una de las muestras, donde

se compara en las **Tabla 5** a **Tabla 8**, el suelo sin nutriente y el suelo con nutriente.

Tabla 5. 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	Desagregacion en las puntas y centro de la base
	2/3 de la altura	Dsagregacion total
	Inmersión total (24 h)	Dsagregacion total
M2	Base del cuerpo	Intacta
	1/3 de la altura	Desagregacion en las puntas y centro de la base
	2/3 de la altura	Dsagregacion total
	Inmersión total (24 h)	Dsagregacion total
M3	Base del cuerpo	Intacta
	1/3 de la altura	Desagregacion en las puntas y centro de la base
	2/3 de la altura	Dsagregacion total
	Inmersión total (24 h)	Dsagregacion total

Tabla 6. Resultados ensayo de desagregación inmersión total suelo SN.

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

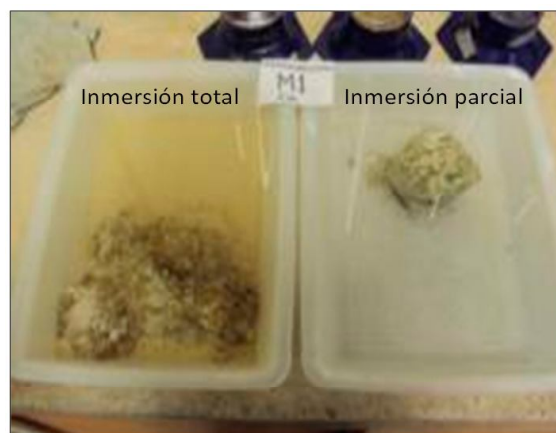


Figura 16. Desagregación con inmersión total y parcial M1, SN.

Tabla 7. 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 (24 h)	Intacta
M2	Base del cuerpo	Intacta
	1/3 de la altura	Intacta
	2/3 de la altura	Intacta
	Inmersión total (24 h)	Intacta
M3	Base del cuerpo	Intacta
	1/3 de la altura	Intacta
	2/3 de la altura	Intacta
	Inmersión total (24 h)	Intacta



Figura 18. Desagregación con inmersión parcial. M1, CN.

La mejora en los resultados de “Pinhole test” y desagregación se debe principalmente a la formación de concreciones compuestas por calcio que se forman en los vacíos de las muestras tal como se observó en los resultados del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) - muestra 2 (Ver **Figura 19**).

Tabla 8. Resultados ensayo de desagregación inmersión total suelo CN.

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

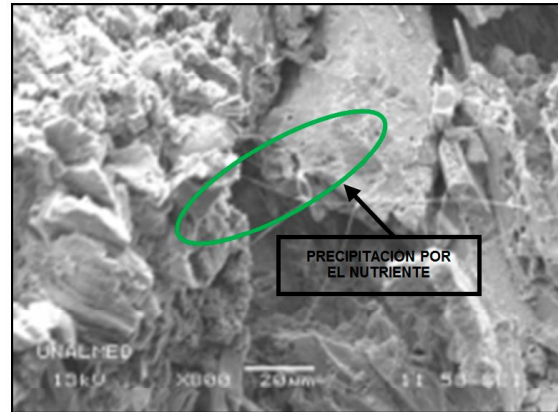


Figura 19. Imagen MEB muestra M2 - CN.

Los resultados de esta investigación muestran claramente, que el tratamiento logró disminuir la erodabilidad de los suelos estudiados, cuando son sumergidos en agua, dada la baja desagregación y dispersión que presentaron.

7. REFLEXIONES Y RECOMENDACIONES

En la actualidad se vienen implementando técnicas comunes de estabilización (cal, cemento, entre otros) 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



Figura 17. Desagregación con inmersión total. M1, CN.

con el uso de la biomineralización como técnica propuesta pueden llegar a ser bajos, si se piensa en el menor impacto ambiental que esta técnica causa en relación con los tratamientos convencionales.

Cabe resaltar el hecho de que en esta investigación se trabajó con bacterias nativas del suelo, metodología propuesta por Valencia (2009) y no con incorporación de bacterias calcificantes al medio, lo cual disminuye el impacto ambiental sin alterar el equilibrio del ecosistema bacteriano.

Con base en las observaciones, análisis y resultados obtenidos se presentan las siguientes reflexiones:

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 causadas por el tratamiento o a la precipitación de los carbonatos de calcio.

La adición nutriente no genera cambios en la clasificación del suelo según el sistema U.S.C., pero sí produce 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. Por otra parte, la agregación que se genera con la adición del nutriente provoca que el tamaño aparente de partícula aumente considerablemente, pasando de NG' (Suelos saprolíticos arcillosos) a NA' (arenas cuarzosas).

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 y al control de la erosión.

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 "Pinhote 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.

En conclusión, ante las mejorías verificadas en las propiedades del suelo tratado, especialmente las relacionadas con la erosión de los materiales, la técnica de biomineralización se constituye en una opción positiva para el control de los procesos erosivos superficiales.

Se recomiendan estudios más detallados sobre diferentes tipos de bacterias que generen diferentes tipos de precipitados para utilizar otros medios de tratamiento. Adicionalmente, sería interesante estudiar otros tipos de suelos de diferentes formaciones geológicas.

Se sugiere el estudio de la implementación *in situ* de esta técnica utilizada en laboratorio.

En investigaciones futuras se recomienda evaluar la estabilidad a largo plazo de los precipitados de carbonato de calcio, ante agentes químicos.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] ABNT. NBR 14114. (1998). Solo – Solos argilosos dispersivos. Identificação e Classificação por meio do ensaio do furo de agulha (Pinhole Test), Rio de Janeiro, RJ.

[2] Arrieta, M. (2011). Biomineralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales, en un suelo

tropical de la ciudad de Medellín. Tesis para optar al título de Magister en Ingeniería-Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia.

[3] Camapum de Carvalho, J. (1985). Etude du comportement mécanique d'une marne compactée. These em Doctorat en Génie Civil. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

[4] Camapum de Carvalho, J., Martines, M., Mortini, D., Fázio, J. A., da Motta, N. O. & Apolinário, R. (2006). Processos erosivos. Livro: Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro. Ed: FINATEC, Brasília, Cap 2, 39-91.

[5] Frederik, H y Willy, V. (2002). Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Journal of Environmental Science & Bio/Technology*.

[6] Lee, Y. N. (2003). Calcite Production by *Bacillus amyloliquefacies* CMB01. *Journal of Microbiology*, 41 (4): 345-348.

[7] Lima, M. (2003). Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental, Brasília, DF, 336 p.

[8] Monroe, G. (1988). New approaches to studying the microbial precipitation of carbonate minerals.

[9] Oliveira, M. (1999). Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. *Erosão e Conservação de Solos: Conceitos, Temas e Aplicações*, Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, RJ, 57-100.

[10] Rendon, D. (1999). Cartografía y caracterización de las unidades geológicas de la zona urbana de Medellín.

[11] Salvatore, G. (1999). Influence of different initial soil moisture contents on the distribution and population dynamics of introduced *Rhizobium leguminosarum* biovar trifolii. *Soil Biol. Biochem.*

[12] Soto, A. (2003). Introducción a los Biominerales y Biomateriales. Universidad de Chile.

[13] Suarez, J. (2001). Control de erosión en zonas tropicales. Universidad Industrial de Santander, (UIS).

[14] Valencia, Y. (2009). Influencia da biomineralizacao nas propriedades físico - mecánicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos.

[15] Zachar, D. (1982). Soil erosion. Elsevier Scientific Publishing Company, New York. 547 p.