

## Effect of solid wastes leachates on a tropical soil

Alejandro Quintero Ramírez, Yamile Valencia González & Luis Augusto Lara Valencia

Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. [aquinte@unal.edu.co](mailto:aquinte@unal.edu.co), [yvalenc0@unal.edu.co](mailto:yvalenc0@unal.edu.co), [lualarava@unal.edu.co](mailto:lualarava@unal.edu.co)

Received: April 03<sup>rd</sup>, 2017. Received in revised form: September 07<sup>th</sup>, 2017. Accepted: October 25<sup>th</sup>, 2017.

### Abstract

Disposal of solid wastes has become a common problem for public administrations due to the high population growth rates and the unavailability of land in large cities. Besides, the increase of long-term rainfalls combined with poor runoff water collection systems in sanitary landfills causes greater production of leachate at the disposal sites. This paper examines the impact of solid wastes leachates on a tropical soil throughout the geotechnical characterization of two samples of residual soil, both sharing the same origin, one of them exposed to the effect of solid wastes leachates for over 15 years and the other one in natural soil conditions (uncontaminated). For this purpose, various laboratory tests were carried out to determinate the physical, chemical, structural, mechanical and mineralogical properties of soil samplings. The results suggest that the exposition of the contaminated sample to leachates modify significantly their physical, chemical, structural, hydro-mechanical and mineralogical properties, showing a degradation of the geotechnical behavior of soils exposed to contaminants. These should serve to raise awareness in environmental authorities about the inadequate disposal of solid wastes and other contaminants thrown directly into the soil.

**Keywords:** Soil contamination; geotechnical characterization; environmental management.

## Efecto de los lixiviados de residuos sólidos en un suelo tropical

### Resumen

Debido al alto índice de crecimiento demográfico y la poca disponibilidad de tierra que enfrentan las grandes ciudades, la disposición de residuos sólidos se ha convertido en una problemática constante para las administraciones; adicionalmente, se suma el aumento de las lluvias por largos periodos lo que combinado con prácticas deficientes en la captación de aguas de escorrentía en los rellenos sanitarios, ocasiona una mayor producción de lixiviados en los sitios de disposición. Para estudiar el efecto que pueden generar los lixiviados de residuos sólidos en los suelos tropicales, se caracterizaron geotécnicamente dos muestras de suelo residual del mismo origen, una expuesta al efecto de lixiviados de residuos sólidos por más de 15 años y otra en condiciones naturales (no contaminada), con el objeto de estimar el efecto que genera la presencia del contaminante en las propiedades geotécnicas de dicho suelo residual. La investigación se realizó mediante una campaña de ensayos de laboratorio para caracterizar las propiedades físicas, químicas, estructurales, mecánicas y mineralógicas de los suelos. Los resultados permitieron establecer que la exposición de la muestra contaminada a los lixiviados genera cambios significativos en sus propiedades físicas, químicas, estructurales, hidro-mecánicas y mineralógicas. En consecuencia, se presenta una degradación del comportamiento geotécnico de los suelos expuestos a contaminantes, lo que debe servir como base para generar conciencia en las autoridades ambientales y que se impongan normativas más rígidas ante la disposición inadecuada de lixiviados y en general cualquier tipo de contaminante lanzado directamente al sub-suelo.

**Palabras clave:** Contaminación de suelos; caracterización geotécnica; gestión ambiental.

### 1. Introducción

La gestión de los residuos sólidos urbanos constituye hoy en día un importante problema ambiental, económico y social en todo el mundo, principalmente debido a que el volumen de residuos crece más rápidamente que la población mundial.

(Renou et al., 2008). Las malas prácticas de manejo y control en los rellenos sanitarios, pueden convertir a los rellenos en una potencial fuente de contaminación hidrogeológica, debido al riesgo que existe en el caso de que los lixiviados se infiltren y lleguen al agua subterránea, representando una alta fuente de toxicidad y un alto riesgo de contagio de

**How to cite:** Quintero-Ramírez, A., Valencia-González, Y. and Lara-Valencia, L.A., Efecto de los lixiviados de residuos sólidos en un suelo tropical DYNA, 84(203), pp. 283-290, December, 2017.

enfermedades cancerígenas (Park & Batchelor, 2002). Por lo tanto, los lixiviados son reconocidos como un importante problema ambiental y su evaluación y gestión de riesgos se considera esencial.

Ante este escenario, es clara la importancia del control de las capas de suelo compactado para la prevención del avance de los frentes de contaminación; así como el efecto que los lixiviados tienen en las propiedades geotécnicas de los suelos expuestos a dichos contaminantes.

La investigación actual cumple un papel muy importante en el aporte a la gestión ambiental desde el punto de vista geotécnico, ya que presenta los cambios que ocurren en las propiedades geotécnicas de un suelo residual por la contaminación con lixiviados generados de un relleno de residuos sólidos conformado en el año 1995.

Se espera contribuir al entendimiento de las alteraciones que sufre un suelo expuesto a contaminación, resaltar la importancia que se le debe dar al manejo de los residuos sólidos, a su disposición final y al posterior vertimiento de los lixiviados, a los cuidados que hay que tener con los lugares que en un futuro sean destinados para la disposición de éstos residuos, y al desarrollo de métodos de prevención de riesgos que puedan ser causados por los malos manejos que se le da hoy en día a los residuos sólidos y los lixiviados.

## 2. Descripción de la zona de estudio

El sitio en estudio está localizado en la subregión Oriente del departamento de Antioquia-Colombia, en la zona rural del municipio de El Santuario, específicamente en la vereda El Señor Caído, a 1.5 km al Occidente de la zona urbana del municipio, en los alrededores del relleno sanitario municipal a una distancia aproximada de 50 km de la ciudad de Medellín por la Ruta Nacional 60 (Autopista Medellín – Bogotá), de acuerdo al sistema de coordenadas geográficas mundial, WGS 84, está georeferenciada en las coordenadas 6°8'25.31" Latitud Norte y 75°16'30.30" Longitud Oeste. El municipio de El Santuario está localizado sobre la cordillera central, hace parte de la subregión del Altiplano del Oriente Antioqueño que está integrada por los Municipios de El Retiro, La Ceja, La Unión, El Carmen de Viboral, El Santuario, Marinilla, Guarne, San Vicente y Concepción. Presenta una altitud media de 2150 msnm en la cabecera municipal, con una altura máxima de 2500 msnm y mínima de 2120 msnm (PBOT El Santuario, 2000). El promedio de precipitación anual para el municipio de El Santuario es de 2795 mm, con variaciones entre 2000 y 3000 mm (EE.PP. El Santuario, 2015a). El régimen de precipitación es bimodal, con dos períodos mayores de lluvias en marzo – mayo y septiembre – noviembre, intercalados con dos estaciones menos húmedas. El municipio presenta una temperatura promedio variando entre 12°C y 18°C (CORNARE, 2006), su paisaje es irregular de colinas redondeadas y vertientes cortas, unidad de vertientes abruptas y escarpes y unidad de planicies aluviales (CORNARE, 2006).

Geológicamente en este sector predomina la unidad ígnea plutónica denominada Batolito Antioqueño de edad Cretácica y compuesto principalmente por tonalitas y granodioritas. Esta unidad presenta contactos intrusivos con el basamento metamórfico Triásico de la Cordillera Central,

representado en el Complejo El Retiro, al cual pertenecen las rocas del Néis de la Ceja. La intrusión de las rocas plutónicas del Batolito ha creado una aureola de contacto con desarrollo de cornubianitas (Rodríguez, et al, 2005).

## 3. Metodología

### 3.1. Exploración de campo

Los sitios de toma de muestras están localizados en los alrededores del relleno sanitario del municipio de El Santuario. La muestra natural (no contaminada) fue tomada en un talud adyacente a la zona de disposición de residuos sólidos dónde se extrae material para cubrir los residuos recién depositados en el relleno. La muestra contaminada (afectada por lixiviados) fue tomada en la parte baja del sitio de disposición de los residuos sólidos en el sector Sur del relleno, específicamente en el sitio de descarga de las cunetas de aguas lluvia a la parte exterior del relleno. Las cunetas de aguas lluvias son de sección trapezoidal y descargan las aguas en cunetas naturales (sin recubrimiento) localizadas en el cerramiento del lote. Éstas están diferenciadas de las cunetas de los lixiviados de sección triangular a lo largo de su trazado dentro del relleno, sin embargo, existe un punto de confluencia entre ambos tipos cunetas en el sector Sur-Occidental del relleno, en el que se genera un paso de lixiviado desde las cunetas triangulares (lixiviados) hacia las cunetas trapezoidales (aguas lluvias). Este fenómeno de paso de lixiviados entre cunetas se da principalmente en las épocas de lluvias, donde existe un mayor caudal de lixiviado y las cunetas triangulares superan su capacidad hidráulica, generando un reboce de lixiviados que es captado por las cunetas de aguas lluvias. La zona de recolección de la muestra contaminada ha estado en contacto con el lixiviado durante un largo periodo de tiempo, lo que garantiza que el sub-suelo de este sitio está bajo la influencia del líquido lixiviado. Se recolectaron varias muestras alteradas (muestras de cajón) e inalteradas (muestras en bolsa), tanto en estado natural como contaminada con el fin de realizar una completa caracterización de los materiales (caracterización física, química, mineralógica, estructural y mecánica las muestras de suelo).

### 3.2. Caracterización física

Los ensayos de caracterización física son realizados en muestras alteradas para obtener las propiedades índice de los materiales, la clasificación de las muestras recuperadas, entre otras propiedades de interés. Estos ensayos consisten en la determinación del contenido de humedad (ASTM D2216-10, n.d.), Gravedad específica de los sólidos (ASTM D854-10, n.d.), Análisis granulométrico por tamizado y por hidrómetro con y sin agente defloculante (ASTM D422-63, n.d.), Límites de consistencia (ASTM D4318-10, n.d.) y Clasificación Miniatura Compactada Tropical (MCT) rápida (Nogami & Villibor, 1995).

### 3.3. Caracterización mineralógica y estructural

Al momento de caracterizar geotécnicamente un suelo, específicamente un suelo tropical, es de gran importancia conocer la composición mineralógica y microestructural de estos, ya que en gran parte sus características y

comportamiento físico y mecánico/hidráulico dependen de su composición mineralógica y estructura. Los ensayos efectuados para esta caracterización corresponden a la microscopía electrónica de barrido y la difracción de rayos X. El Microscopio Electrónico de Barrido es una de las principales herramientas para la caracterización de materiales, en él es posible obtener imágenes digitales de alta resolución que ayudan en la identificación de diversos rangos micro estructurales de los materiales, así como de análisis topográficos, en este caso la muestra se usa inalterada. La difracción de rayos X, es el método más utilizado para la identificación de los minerales del suelo de grano fino, como las arcillas, que no pueden verse usando equipos ópticos, y para el estudio de la estructura cristalina; permiten determinar los espaciamentos entre los planos atómicos de los minerales y los ángulos a los cuales se dan las difracciones de los rayos-X, parámetros que son conocidos para muchos materiales cristalinos, lo que permite su identificación por comparación. En este caso las muestras fueron analizadas bajo la técnica del polvo.

### 3.4. Caracterización química

Esta caracterización se realiza con el fin de observar la variación en las propiedades químicas de las muestras, inducidas por el proceso de contaminación al que fueron sometidas, para ello se determinó el pH en agua (NTC 3651), pH en Cloruro de Potasio KCl (NTC 3651), Al, Ca, Mg, K, P y elementos menores (Cu, Fe, Mn, Zn) (NTC – 5151), Capacidad de Intercambio Catiónico Equivalente CICE (NTC-5268. Numeral 4.1. Método: A. Saturación con acetato de amonio. Método cuantificación: Volumétrica.). Los valores de pH en agua y en KCl permiten el cálculo del punto de carga cero ( $PZC = 2pH_{KCl} - pH_{H2O}$ ), punto en el cual se equilibran las cargas positivas y negativas del medio (Lavorenti & Alves, 2005); así como la Carga Neta ( $Carga\ Neta = pH_{H2O} - PZC$ ) que permite determinar que muestra se encuentra más agregada.

### 3.5. Caracterización mecánica

Los ensayos realizados en la caracterización mecánica son ejecutados en muestras inalteradas, ya que estos intentan representar el estado de la muestra en el terreno. Estos ensayos entregan parámetros mecánicos del suelo al ser sometidos a sollicitaciones externas. Fueron entonces, efectuados ensayos de corte directo tipo Consolidado Drenado CD (natural y saturado) para encontrar los parámetros de resistencia al corte de un suelo (ASTM D3080-11, n.d.), ensayos de compresión simple (ASTM D2166-13, n.d.), ensayos duplo-edométricos en condiciones saturadas y sin saturar que pueden proporcionar otros parámetros del suelo a parte de la consolidación, como son el índice de colapso o expansión de las muestras (ASTM D2435-11, n.d.), determinación de la curva característica de retención de agua por el método del papel filtro con trayectoria mixta, o sea secando y humedeciendo partir de la humedad natural del material (ASTM D5298-10, n.d.), *Pinhole Test* o ensayo de orificio de aguja que se realizó bajo los lineamientos de la norma brasilera NBR 14114/98 de la Asociación Brasileira de

Normas Técnicas (ABNT). Los ensayos de caracterización mecánica se realizan bajo un mismo valor de contenido de humedad natural en ambas muestras con el objetivo de eliminar esa variable en las comparaciones.

Cabe resaltar que todos los ensayos de caracterización fueron ejecutados como mínimo tres veces con el objetivo de garantizar la repetitividad, y se ensayaron tanto las muestras en estado natural como contaminado para analizar la influencia del contaminante.

## 4. Resultados, análisis y discusión

### 4.1. Caracterización física

A continuación se presentan los resultados de la caracterización física de las muestras, la Tabla 1 resume las principales propiedades físicas analizadas.

Se observó un aumento del 14% en el valor de límite líquido y una disminución de un 37% del índice de plasticidad de la muestra contaminada con respecto a la muestra natural. El aumento del límite líquido en la muestra contaminada puede obedecer principalmente al incremento de partículas de tamaño limo en el suelo y la disminución del índice de plasticidad afecta de manera significativa las propiedades físicas de la muestra contaminada, ya que se disminuye el rango en el que los materiales se comportan plásticamente. Estas variaciones se atribuyen además, al cambio en la naturaleza del líquido al interior de los vacíos de la muestra. La desagregación de las partículas debido a la presencia de lixiviado, tiende a aumentar el área de superficie específica de suelo, lo que lleva a una alta absorción de agua que cambia los valores de los límites (Sunil et al., 2009).

Tabla 1. Propiedades físicas de las muestras analizadas.

Propiedad física	Muestra natural	Muestra contaminada
Contenido de humedad natural, $w_{nat}$ [%]	25 – 32	25 – 32
Límite líquido con humedad natural, $LL$ [%]	37	43
Límite plástico con humedad natural, $LP$ [%]	21	33
Índice de plasticidad, $IP$ [%]	16	10
Clasificación USCS fracción fina según	CL	ML
Clasificación MCT	NS'NA' (No laterítico Limoso/arena limosa)	NS'-NG' (No laterítico Limoso/arcillas limosa-arenosas)
Peso unitario húmedo $\gamma_h$ [kN/m <sup>3</sup> ]	17.88	17.64
Gravedad específica de los sólidos, $G_s$	2.78	2.80
Relación de vacíos, $e$	0.96	1.09

Fuente: Los Autores

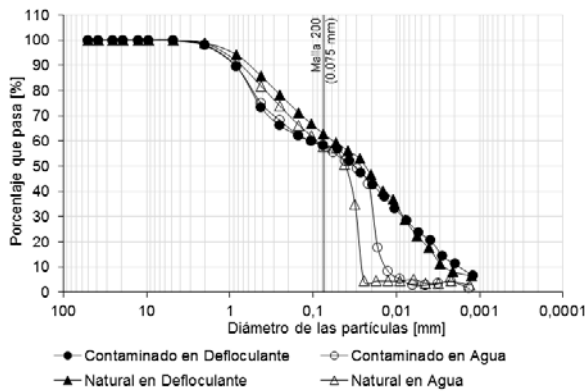


Figura 1. Curvas granulométricas por tamizado e hidrómetro (en agua y en agente defloculante) de las muestras natural y contaminada.

Fuente: Los Autores

Las clasificaciones mediante la metodología MCT mostraron diferencias en la contracción diametral de las muestras (Contracción muestra natural 0.75 y muestra contaminada 1.23). La contracción diametral de la muestra contaminada aumentó un 65 % con respecto a la contracción de la muestra natural. Este cambio se debe al incremento de iones en el suelo debido a los lixiviados del contaminante, lo que genera que haya mayor atracción entre las partículas de arcilla ocasionando agregaciones inestables en la estructura de la muestra contaminada. La contracción en los suelos puede ocasionar en los horizontes superficiales grietas que desencadenen en problemas de estabilidad (Quintero & Valencia, 2012).

La diferencia en el parámetro de contracción diametral se ve reflejado en el cambio del grupo de clasificación de las muestras al pasar de NS'/NA' en estado natural a NS'-NG' en estado contaminado. El cambio en el grupo de clasificación es congruente con los cambios presentados en las granulometrías de las muestras, en las que se evidenció un aumento en las partículas de grano fino en la muestra contaminada.

El aumento en el índice de vacíos fue de un 14 % al pasar de la muestra natural a la muestra contaminada, aumento debido a la agregación que se presenta en el suelo al contaminarse con el lixiviado y que se confirmará en los análisis químicos y estructurales.

Con relación a la gravedad específica de los sólidos, no se observan grandes variaciones ya que como se verá en el análisis de la mineralogía, no se presentan variaciones mineralógicas que se reflejen en cambios del Gs.

En el caso de la granulometría (Fig. 1), las variaciones más representativas se observan al analizar los resultados de los hidrómetros de ambas muestras en agua, donde la muestra contaminada presenta mayor porcentaje de materiales finos que la muestra natural. Esto se debe a que el lixiviado actúa defloculando más la muestra produciendo un efecto desagregador de las partículas, las cuales perderían estabilidad en presencia de agua, que posteriormente mostrará influencia en la resistencia al corte, siendo esta menor en la muestra contaminada. Se puede constatar que la presencia de lixiviados en las muestras aumenta la cantidad de partículas finas de tamaño limo al compararla con una muestra sin contaminar

Tabla 2. Composición química de las muestras analizadas.

	Natural	Contaminada
Potencial Hidrógeno en agua		
<b>pH</b> (H <sub>2</sub> O)	3.65	5.17
Potencial Hidrógeno en Cloruro de potasio		
<b>pH</b> (KCl)	3.46	5.04
Materia Orgánica		
<b>M.O.</b> [%]	0.03	0.4
Capacidad de Intercambio Catiónico Equivalente <b>CICE</b>		
Aluminio <b>Al</b> [meq/100 g suelo]	3.8	0.7
Calcio <b>Ca</b> [meq/100 g suelo]	0.07	0.57
Magnesio <b>Mg</b> [meq/100 g suelo]	0.12	0.74
Potasio <b>K</b> [meq/100 g suelo]	0.01	3.56
Sodio <b>Na</b> [meq/100 g suelo]	0.02	2.58
Punto de Carga Cero <b>PZC</b>	4	8.2
Carga Neta	3.27	4.91
	0.38	0.26

Fuente: Los Autores

(Oztoprak & Pisirici, 2011). Para el caso en que se usa defloculante, al igual que en las muestras analizadas en agua, se presenta un mayor contenido de partículas finas en la muestra contaminada, sin embargo, la proporción no es tan significativa. En conclusión, el lixiviado genera en sí un efecto desagregador que deja de ser relevante con el uso del defloculante.

#### 4.2. Caracterización química

En la Tabla 2 se presenta la caracterización química, donde se observa claramente un aumento en los elementos “bases” (Al, Ca, Mg, K y Na), este aumento pudo estar favorecido por el arrastre de dichos elementos a través del lixiviado, acumulándolos en el perfil de estudio. Es evidente además una disminución en el pH de la muestra contaminada generado por la descomposición de materia orgánica proveniente del lixiviado.

Como los valores del pH en agua están por encima de los valores de PZC ( $PZC = 2pH_{KCl} - pH_{H_2O}$ ), sin pasar por éste al contaminar el material, el suelo no sufre desagregación por efecto del lixiviado. Adicionalmente, al ser el valor de carga neta ( $Carga\ Neta = pH_{H_2O} - PZC$ ) menor para la muestra contaminada, está se encuentra un poco más agregada que la muestra natural, generando mayor porosidad del material como se constató en los resultados de relación de vacíos.

#### 4.3. Caracterización mineralógica y estructural

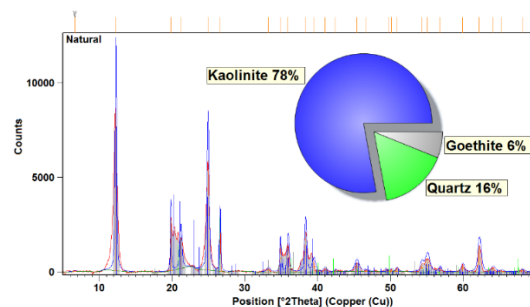


Figura 2. Difractograma de rayos X de la muestra natural.

Fuente: Los Autores

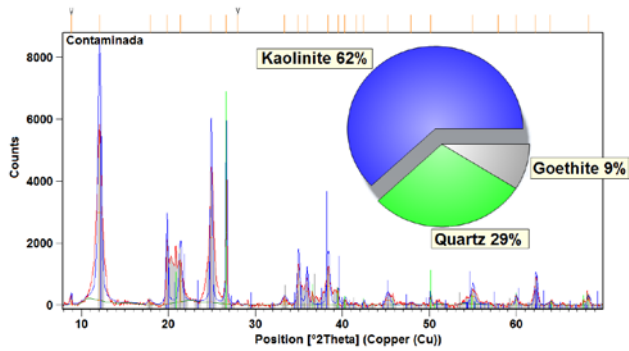


Figura 3. Difractograma de rayos X de la muestra contaminada.  
Fuente: Los Autores

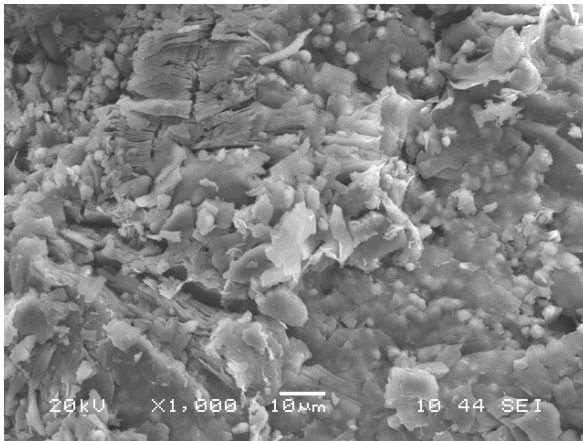


Figura 4. Imagen Microscopio Electrónico de Barrido de la muestra Natural, aumento 100x.  
Fuente: Los Autores

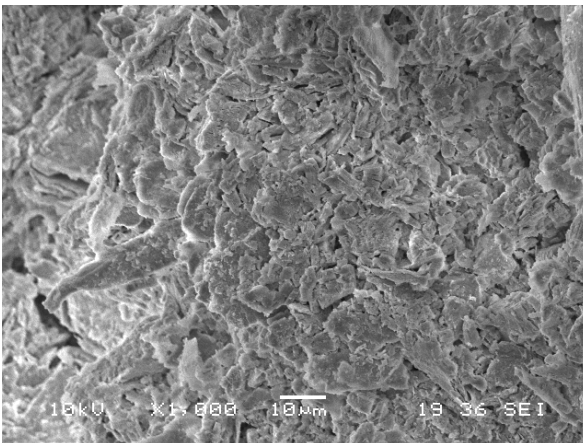


Figura 5. Imagen Microscopio Electrónico de Barrido de la muestra Contaminada, aumento 100x.  
Fuente: Los Autores

Como se puede observar en las Figs. 2 y 3, se ve que la mineralogía de ambas muestras está conformada por Caolinita, Cuarzo y un pequeño trazo de goethita.

El ensayo de difracción de Rayos X, muestra que los minerales que componen los suelos analizados son en

términos generales los mismos en ambas muestras, sin originarse o desaparecer algún mineral a causa de la lixiviación a la que se someten las muestras, lo que indica que dicho proceso de lixiviación y el lixiviado como tal no ejerce ningún efecto que altere la mineralogía de los materiales. Dentro de la interpretación de los resultados se marcaron los minerales principales detectados en ambas muestras, de existir otros minerales diferentes a los reportados corresponden a trazas muy pequeñas de estos por lo tanto el equipo no es capaz de detectarlos.

Por medio de las imágenes de la microscopía (Figs. 4 y 5) se pueden observar claramente las variaciones estructurales que sufre el suelo al contacto con los lixiviados. Se genera una atracción entre las partículas del material en la muestra contaminada, apareciendo aglomeraciones (que podría estar vinculado a una mayor contracción de la muestra contaminada debido a la deshidratación, tal como se constató en el ensayo MCT), disminuyendo los macro y microporos, pero aumentando los poros intermedios, como se verá en las curvas características de retención de agua; dicho incremento en los vacíos intermedios consigue generar un aumento en el índice de vacíos total de la muestra contaminada comparada con la muestra natural.

#### 4.4. Caracterización mecánica

Curva Característica de retención de agua.

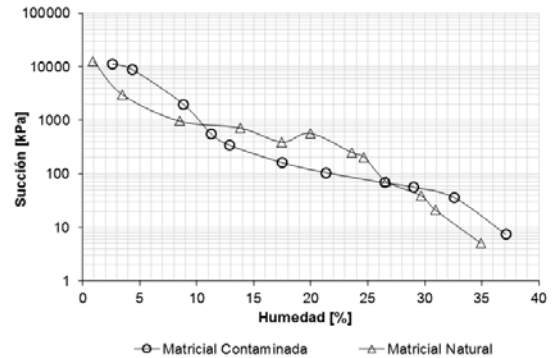


Figura 6. Curvas características de las muestras analizadas (Succión matricial vs humedad).  
Fuente: Los Autores

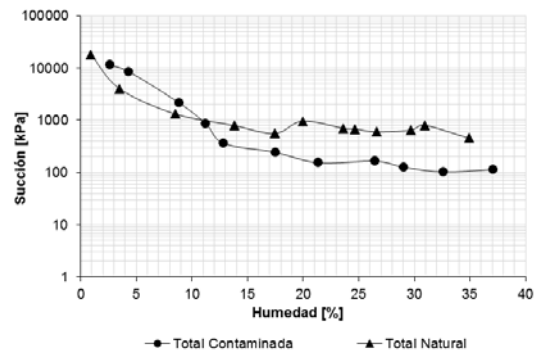


Figura 7. Curvas características de las muestras analizadas (Succión total vs humedad)  
Fuente: Los Autores

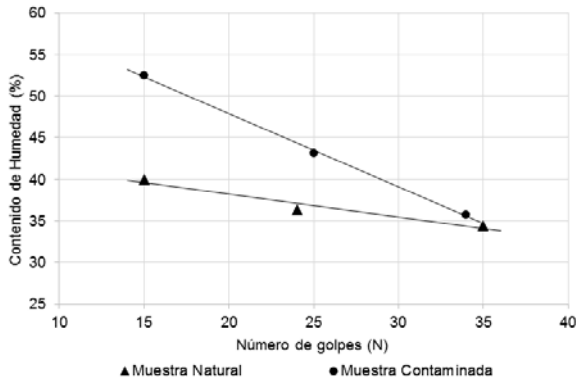


Figura 8. Curva de fluidez de las muestras.  
Fuente: Los Autores

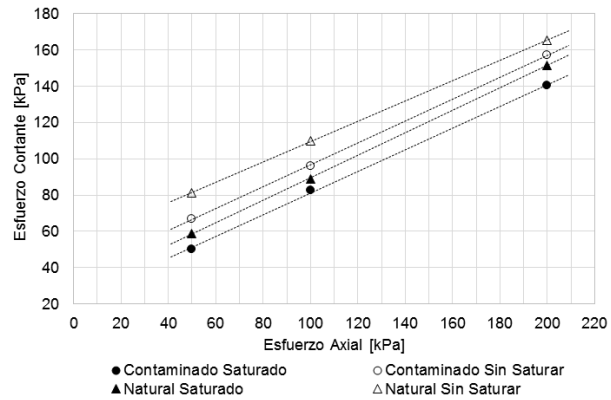


Figura 9. Esfuerzo axial vs esfuerzo cortante de las muestras estudiadas.  
Fuente: Los Autores

Se observa una disminución en la succión matricial (Fig. 6) en la zona de los poros de tamaño intermedio en la muestra contaminada, poros comúnmente formados por partículas de tamaño limos. Esta aseveración tiene lógica si se observan los resultados de la granulometría por hidrómetro, donde se obtuvo una mayor defloculación en el rango de los limos en la muestra contaminada. La presencia de lixiviados en la muestra contaminada afecta las partículas de dicho tamaño generando dispersión. La defloculación aumenta los vacíos de la zona de poros de tamaño intermedio, al aumentar dichos vacíos las succiones en esa región son menores en la muestra contaminada.

Para la succión total se observa un comportamiento peculiar en los valores de succión asociados a humedades mayores a 10%, ya que con el aumento en el contenido de sales minerales presentado en la caracterización química, se esperaría una mayor succión en la muestra contaminada debido al incremento en las sales disueltas del líquido percolante, lo cual generaría una menor presión de vapor en el medio entre el papel filtro y la muestra y por ende una mayor succión (Fig. 7). Pero como se observa en la curva de fluidez de los materiales (Fig. 8), el mayor aporte por succión osmótica en el suelo contaminado se tiene para humedades mayores a las obtenidas en el ensayo de succión.

En las zonas de los macroporos y microporos es evidente una mayor succión en la muestra contaminada, lo que se confirma mediante la microscopía electrónica de barrido, donde se observó un tamaño mayor en los poros de la muestra natural, y macro y micro poros de menor tamaño en la muestra contaminada.

#### 4.5. Resistencia al corte directo

El comportamiento mecánico con relación a la resistencia al corte de las muestras se ve afectado significativamente por la presencia de lixiviados (Fig. 9). Se observa que la muestra contaminada sin saturar presenta una disminución en la resistencia con respecto a la muestra natural sin saturar, lo que nos indica que solo el efecto de los lixiviados tiene gran incidencia en la disminución de resistencia de las muestras; efecto que puede ser constatado con la granulometría (Fig. 1), donde el punto de inflexión de la curva sin defloculante obtenida para el suelo contaminado corresponde a un menor

Tabla 3.

Parámetros de resistencia al corte de las muestras analizadas de acuerdo a la modalidad de ensayo realizada (Saturada y sin saturar).

	Cohesión [kPa]	Fricción [°]
Natural Sin Saturar	54	29
Natural Saturada	27	32
Contaminada Sin Saturar	36	31
Contaminada Saturada	22	31

Fuente: Los Autores

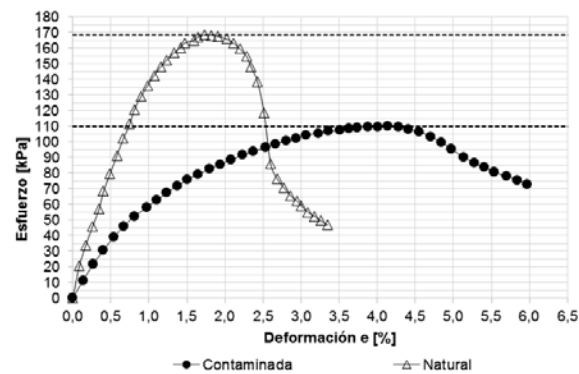


Figura 10. Resistencia a la compresión inconfina de las muestras.  
Fuente: Los Autores

tamaño de grano lo que podría estar apuntando para una inestabilidad de los agregados o de los paquetes de arcilla en presencia de agua.

Además se dio una disminución en la resistencia de las muestras debida a la saturación de los materiales y a la presencia de lixiviados en la estructura de los mismos que se ve reflejada en la disminución de la cohesión de la muestra contaminada saturada en comparación con la muestra natural saturada de un 18% (Tabla 3), lo que representa por ejemplo una disminución del 12% del esfuerzo cortante,  $\tau$ , para un esfuerzo normal  $\sigma = 50$  kPa.

#### 4.6. Resistencia a la compresión inconfina

En términos de deformación se observa que la muestra contaminada soporta una mayor deformación antes de la falla

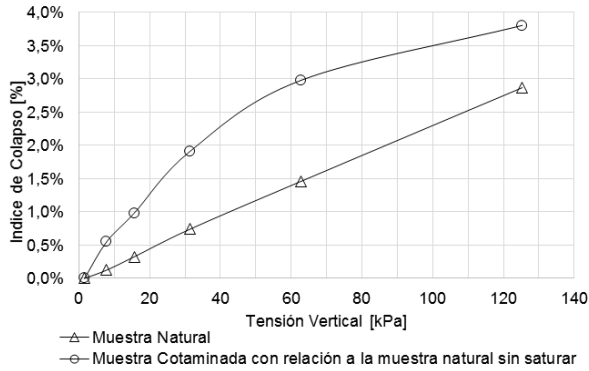


Figura 11. Tensión vs Índice de colapso total.

Fuente: Los Autores

y a lo largo del desarrollo del ensayo; sin embargo, a pesar de soportar mayores deformaciones, su resistencia es un 35 % menor que la resistencia correspondiente a la muestra natural, tal disminución se relaciona directamente al proceso de lixiviación al que ha sido sometida la muestra contaminada (Fig. 10).

Las curvas son indicativo de dos estructuras diferentes, apuntando para una mayor floculación en la muestra natural y una mayor dispersión en la contaminada (Camapum De Carvalho, et al., 1987).

#### 4.7. Consolidación unidimensional

Para el ensayo de consolidación, se determinó el índice de colapso total en función de la saturación (Fig. 11), el comportamiento obtenido mostró que el suelo contaminado es más colapsible que el suelo natural. Se presentaron aumentos hasta de 1.5% en el índice de colapso total al pasar de suelo natural a suelo contaminado, lo cual corresponde a un incremento hasta del 50% en dicho valor. La estimación cuantitativa del Índice de colapso (I) se efectuó a partir de las ecuaciones. (1) a (3) según Jennings & Knight (1975):

$$I = \frac{\Delta e_c}{\left[ 1 + \left( \frac{e_{nat}}{e_{o(nat)}} \right) \times e_{o(medio)} \right]} \quad (1)$$

$$\Delta e_c = \left[ \left( \frac{e_{nat}}{e_{o(nat)}} \right) - \left( \frac{e_{sat}}{e_{o(sat)}} \right) \right] \times e_{o(medio)} \quad (2)$$

$$e_{o(medio)} = \frac{(e_{o(nat)} + e_{o(sat)})}{2} \quad (3)$$

Donde  $e_{o(nat)}$  y  $e_{o(sat)}$  son las relaciones de vacíos inicial de la muestra en estado de humedad natural y saturada; y  $e_{nat}$  y  $e_{sat}$  son las relaciones de vacíos final en estado de humedad natural y saturada.

#### 4.8. Pinhole test

Con relación a los resultados de los ensayos de *pinhole test*, se puede ver que la curva del suelo natural esta levemente por encima de la curva del suelo contaminado, evidenciando un

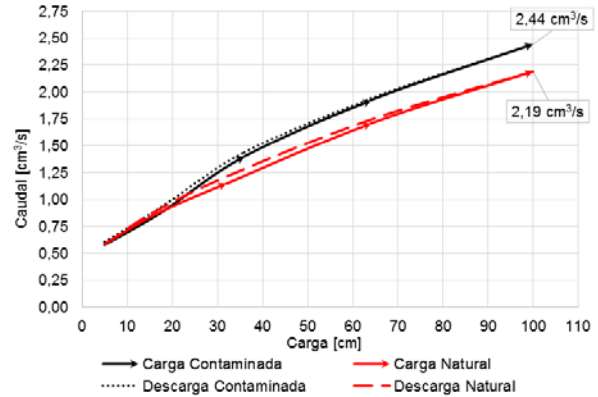


Figura 12. Resultados de los ensayos *pinhole test* de las muestras.

Fuente: Los Autores

mayor caudal en la muestra contaminada (se presenta un aumento del 10 % del caudal de salida para una carga hidráulica de 100cm) esto se debe a como fue descrito en el ensayo de compresión simple, a que la estructura de la muestra natural es floculada y la de la contaminada es dispersa., lo que representa una mayor erodabilidad en la muestra contaminada por ende una mayor susceptibilidad a procesos erosivos (Fig. 12).

### 5. Conclusiones

En términos generales, se logró evidenciar cambios importantes en las propiedades físicas, químicas, estructurales y mecánicas de las muestras, producidas por la presencia de lixiviados de residuos sólidos durante un periodo de tiempo prolongado; sin embargo el mayor efecto, se presenta en las propiedades químicas, afectando notoriamente la estructura del material con consecuencias importantes en las propiedades hidro/mecánicas del suelo, tornando el material inestable y vulnerable ante situaciones externas.

A pesar de existir una normativa clara en cuanto al tratamiento que se debe dar a los lixiviados, siguen existiendo sitios tales como botaderos ilegales o incluso rellenos sanitarios municipales que generan un impacto negativo en el ambiente, al incumplir con los requerimientos mínimos de disposición final de residuos sólidos y vertimiento de lixiviados. Se resalta entonces, la necesidad de generar conciencia no solo en las autoridades ambientales sino en la comunidad en general, en lo concerniente a la regulación en la disposición final de residuos sólidos, para que cumplan con todas las normativas de manejo integral de los residuos y sus lixiviados. Lo cual evitará una contaminación del suelo de fundación; previniendo así, futuros problemas geotécnicos de consideración.

Si bien los resultados de esta investigación muestran un efecto en las propiedades geotécnicas del suelo producido por la presencia de lixiviados del relleno sanitario, cabe resaltar que las prácticas de manejo de vertimientos de lixiviados llevadas a cabo por la entidad encargada de la administración del relleno sanitario, cumplen con las normas técnicas y están regidas y controladas por un Plan de gestión del riesgo para el manejo de vertimiento de lixiviados avalado por la Corporación Autónoma Regional CORNARE. Se deberá

tener especial cuidado con el paso accidental de lixiviados desde las cunetas instaladas para dicho fin a las cunetas de aguas lluvias, realizando un aislamiento entre los dos sistemas de cunetas.

## Referencias

- [1] Dirassouyan, F., Givaudan, J.G., Moulin, P., Poulain, S. and Renou, S., Landfill leachate treatment: Review and opportunity, *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), pp. 468-493, 2008. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.077.
- [2] Batchelor, B. and Park, J.Y., A multi-component numerical leach model coupled with a general chemical speciation code, *Water Research*, 36(1), pp. 156-166. DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00207-X.
- [3] Administración municipal de El Santuario. Plan básico de ordenamiento territorial para el municipio de El Santuario, Antioquia. Acuerdo N°02 del 2000 del 5 de marzo del 2000. El Santuario, COL. Administración municipal de El Santuario, 2000.
- [4] EE.PP. Plan de Manejo Ambiental Relleno Sanitario municipio de El Santuario. El Santuario, COL. Empresas Públicas de El Santuario, 2015.
- [5] CORNARE. Plan de ordenación y manejo de las cuencas bodegas y el salto. Orden de Trabajo número 315-2004. El Santuario, COL. Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare, 2006.
- [6] MINMINAS. Geología de la Plancha 147 Medellín Oriental. Medellín, COL. Ministerio de Minas y Energía, 2005.
- [7] ASTM. Standard test method for laboratory determination of water (Moisture) content of soil and rock by mass. D2216-10. Philadelphia, U.S. American Society for Testing and Materials, 2010.
- [8] ASTM. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. D854-10. Philadelphia, U.S. American Society for Testing and Materials, 2010.
- [9] ASTM. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. D4318-10. Philadelphia, U.S. American Society for Testing and Materials, 2010.
- [10] Nogami, J.S. e Villibor, D.F., *Pavimentação de Baixo Custo com solos lateríticos*, Vilibor, Sao Paulo, 1995.
- [11] ICONTEC. Calidad del agua. Determinación del pH. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. NTC 3651-94. Bogotá, COL. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2012.
- [12] Alves, M.E. y Lavorenti, A., Point of zero salt effect: Relationships with clay mineralogy of representative soils of the Sao Paulo State, *Pedosphere*, 15(5), pp. 545-553, 2005.
- [13] ASTM. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. D3080-11. Philadelphia, U.S. American Society for Testing and Materials, 2011.
- [14] ASTM. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. D2166-13. Philadelphia, U.S. American Society for Testing and Materials, 2013.
- [15] ASTM. Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using. D2435-11. Philadelphia, U.S. American Society for Testing and Materials, 2011.
- [16] ASTM. Standard test method for the measurement of soil potential (suction) using filter paper. D5298-03. Philadelphia, U.S. American Society for Testing and Materials, 2003.
- [17] ABNT. Solo-solos argilosos dispersivos- identificação e classificação por meio do ensaio do furo e agulha (pinhole test). NBR 14114/98. São Paulo, BR. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998.
- [18] Nayak, S., Shrihari, S. and Sunil, B.M., Shear strength characteristics and chemical characteristics of leachate-contaminated lateritic soil, *Engineering Geology*, 106(1-2), pp. 20-25, 2009. DOI: 10.1016/j.enggeo.2008.12.011.
- [19] Quintero, A. y Valencia, Y., Variación de las propiedades geotécnicas por los lixiviados de residuos sólidos urbanos en un suelo tropical. XVI Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana. Bogotá D.C., Colombia, Octubre 2012.
- [20] Oztoprak, S. and Pisirici, B., Effects of micro structure changes on the macro behaviour of Istanbul (Turkey) clays exposed to landfill leachate, *Engineering Geology*, 121(3-4), pp. 110-122, 2011. DOI: 10.1016/j.enggeo.2011.05.005.
- [21] Ministère de L'équipement. La reconstitution des éprouvettes en laboratoire. Rapport de recherche LPC N°145. Toulouse, FR.

Ministère de L'équipement, 1987.

- [22] Jennings, J.E. and Knight, K. A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure. 6th Regional Conference for African on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Durban, South Africa, pp. 99-105, 1975.

**A. Quintero-Ramírez**, graduado de Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Colombia, en el año 2011, con Maestría en Ingeniería – Geotecnia en el 2017 de la Universidad Nacional de Colombia Ha trabajado en consultoría en geotecnia desde 2011. Dentro de las líneas de investigación se incluye los suelos tropicales, los suelos residuales y la contaminación de suelos.


ORCID: 0000-0001-8349-2853

**Y. Valencia-González**, graduada de Ingeniera Civil de la Universidad Nacional de Colombia en el 2001, con Maestría en Ingeniería – Geotecnia en el 2005 de la Universidad Nacional de Colombia. En el 2009 recibió su título de Doctora en Geotecnia y posteriormente realizó un año de estudios posdoctorales en la Universidad de Brasilia en Brasil. Actualmente es profesora asociada del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Sus líneas de investigación son: suelos tropicales, biotecnología, fundaciones y control de vibraciones.

ORCID: 0000-0002-5389-2212

**L.A. Lara-Valencia**, graduado de Ingeniero Civil de la Universidad Nacional en el 2005, con Maestría en Estructuras y Construcción Civil en el 2007 de la Universidad de Brasilia. En el 2011 recibió su título de Doctor en Estructuras y Construcción Civil en la Universidad de Brasilia en Brasil. Actualmente es profesor asociado del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Sus líneas de investigación son: Control de vibraciones, dinámica de estructuras y suelos tropicales.

ORCID: 0000-0002-2718-6234



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**  
SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

**Área Curricular de Ingeniería Civil**

**Oferta de Posgrados**

**Especialización en Vías y Transportes**  
**Especialización en Estructuras**  
**Maestría en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas de Transporte**  
**Maestría en Ingeniería – Geotecnia**  
**Maestría en Ingeniería – Estructuras**  
**Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil**

Mayor información:

E-mail: [asisacic\\_med@unal.edu.co](mailto:asisacic_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 5172