

# Impacto geotécnico del diésel en un suelo arcilloso de baja plasticidad

## Geotechnical impact of Diesel on a low-plasticity clay soil

LADY SOFÍA RODRÍGUEZ CUERVO<sup>1</sup> - JOSÉ VICENTE AMÓRTEGUI GIL<sup>2</sup>

1. Magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Ingeniero civil. Profesor asociado de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

lady.rodriquez@gmail.com - jose.amortegui@escuelaing.edu.co

Recibido: 03/08/2017 Aceptado: 31/08/2017

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)

### Resumen

Cuando se presentan derrames de hidrocarburos en el suelo por efecto de la gravedad y las fuerzas capilares, estos fluidos se desplazan vertical y horizontalmente a través de los estratos; entonces surge el siguiente interrogante: ¿qué sucede en las propiedades geotécnicas y la composición mineralógica de un suelo arcilloso de baja plasticidad con presencia de diésel? Para dar respuesta a esta pregunta se requirió realizar ensayos de laboratorio con variables controladas. Así, la metodología implicó sacar al aire las muestras y posteriormente adicionar agua y el tratamiento de diésel de 0 %, 1 %, 3 % y 6 %, con un tiempo de exposición de una semana en condiciones de temperatura y humedad controladas. Se hicieron ensayos de laboratorio para determinar el contenido de humedad, gravedad específica de los sólidos, límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfiada. El análisis de mineralogía con difracción de rayos X (DRX), método del polvo, se realizó para las muestras con tratamiento de 0 % y 6 % de diésel.

Es importante precisar que se evaluó el efecto de la temperatura en la ejecución de los ensayos, si se desconoce de la presencia de diésel en el suelo se usa una temperatura de  $110 \pm 5$  °C, y si se conoce la presencia de diésel en el suelo se utiliza una temperatura de  $50 \pm 5$  °C. Los resultados de la investigación comprobaron los cambios en las propiedades geotécnicas y la incertidumbre en la estimación del contenido de humedad y la gravedad específica de los sólidos, pero la composición mineralógica no se vio afectada; no obstante, se redujo el porcentaje de micas.

**Palabras claves:** arcillas, diésel, propiedades geotécnicas, mineralogía.

### Abstract

When hydrocarbon spills occur on the soil, due to gravity and capillary forces, these fluids move vertically and horizontally through the different strata. This raises the following question: what happens in the geotechnical properties and mineralogical composition of a low-plasticity clay soil when exposed to Diesel? To answer this question, laboratory tests with controlled variables were required. The methodology required for the samples to be air-dried and subsequently wet. A diesel treatment of 0%, 1%, 3% and 6% was added with a one-week exposure period under controlled temperature and humidity conditions. Laboratory tests were performed to determine the moisture content, specific gravity of the solids, Atterberg limits, and resistance to unconfined compression. Analysis of mineralogy with X-ray diffraction (XRD), powder method, was performed for samples with 0% and 6% diesel treatment. It is important to clarify that the effect of temperature in the performance of the tests was assessed; if the presence of diesel in the soil is unknown a temperature of  $110 \pm 5$  °C was used, and if the presence of Diesel in the soil is known a temperature of  $50 \pm 5$  °C was used. The results of the investigation verified the changes in the geotechnical properties and the uncertainty in the estimation of the moisture content and the specific gravity of the solids, but the mineralogical composition was not affected; however, the percentage of micas was reduced.

**Keywords:** clays, diesel, geotechnical properties, mineralogy.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, el crecimiento de la población mundial ha generado el aumento en el consumo del petróleo y sus derivados, sector en el que se han masificado las refinerías, redes de transporte, centros de almacenamiento y venta de combustibles, lo que aumenta la probabilidad de que se presenten derrames. Los derrames pueden ocurrir por accidentes durante el transporte en carreteras o sistemas ferroviarios, fugas en los tanques de almacenamiento o líneas de conducción, y por tomas clandestinas o atentados contra la infraestructura petrolera (Zárate, 2014).

Los derrames de hidrocarburos afectan la estructura del suelo por la ruptura de los agregados, aumentando por ende la retención del agua en la capa superficial y el potencial hídrico (Brito, Lema & García, 2003, p. 89); en consecuencia, si estos suelos son usados como materiales para carreteras o en la construcción de obras civiles sus cambios estructurales, mineralógicos y propiedades índice son cruciales para asegurar la estabilidad y seguridad en las obras. Entonces, el interrogante es: ¿qué sucede en las propiedades geotécnicas y la composición mineralógica del suelo cuando está contaminado por hidrocarburos?

Varios autores se han hecho este cuestionamiento. Izdebska-Mucha y Trzciński (2008) evidencian cambios de tipo microestructural. Zárate (2014) observó cambios en los límites de consistencia y resistencia del material. Bian, Liu, Cai y Chu (2016) reportan cambios en la distribución de las partículas y una leve influencia en los límites de consistencia. Ochepe y Joseph (2014) encontraron reducción de la resistencia a la compresión confinada, haciendo que el suelo sea más susceptible de fallar en la medida en que se incrementa la cantidad de hidrocarburo. Akinwumi, Diwa y Obianigwe (2014) reportan incremento de los límites líquido y plástico al aumentar la cantidad del hidrocarburo, pero la gravedad específica se redujo con el incremento de la cantidad del hidrocarburo. Khosravi, Ghasemzadeh, Sabour y Yazdani (2013) reportan aumento de la cohesión y el límite líquido, y disminución del ángulo de fricción interna y el límite plástico con el aumento en la cantidad de hidrocarburo; así mismo, se presentó formación de estructuras floculadas y no hubo cambios significativos en la resistencia al corte; Joseph y Hari (2015) reportan reducción del ángulo de fricción interna, cohesión y límites de Atterberg, y un aumento del pH, producto

de la presencia del hidrocarburo. Liu, Liu, y Cai (2015) reportan disminución en los límites de Atterberg y la resistencia a la compresión confinada al aumentar la cantidad de hidrocarburo. Tong, Chen, Zheng y Li (2012) reportan reducción de los límites de Atterberg al aumentar la cantidad de hidrocarburo. Walia, Singh y Kaur (2013) reportan disminución de la gravedad específica de los sólidos y la resistencia a la compresión confinada, y aumento en los límites de Atterberg por la presencia del hidrocarburo. Rasheed, Ahmed, y Jassim (2014) reportan disminución de la gravedad específica de los sólidos, el índice de plasticidad y la cohesión, y aumento de los límites de Atterberg y del ángulo de fricción interna por la presencia del hidrocarburo. Tianyuan, Junjie, Yongxia y Jiangjiao (2013) reportan disminución de la resistencia a la compresión confinada del suelo por la presencia de hidrocarburos. Al igual que otros autores, ponen de manifiesto la importancia de continuar haciendo investigaciones para determinar los cambios en la estructura, mineralogía y propiedades geotécnicas del suelo ante la presencia de hidrocarburos.

Todos los resultados de estas investigaciones ponen de manifiesto el cambio de las características físicas, propiedades índice, propiedades mecánicas, estructura y mineralogía del suelo; sin embargo, hay casos que reportan variaciones no significativas, según las condiciones de desarrollo del ensayo, tipo de hidrocarburo, tipo de suelo y porcentaje de hidrocarburo presente en el suelo (Tong et al., 2012).

## METODOLOGÍA

La experimentación se diseñó con base en la revisión de la bibliografía del periodo comprendido entre 2008 y 2016. Se consultó en las bases de datos de Elsevier, Google Scholar, Springer, CrossRef, Scielo, GeoScienceWorld, Clays and Minerals, entre otras, y con base en esto se pudo encontrar que las muestras usadas en la investigación correspondieron a una arcilla de baja plasticidad, cuyo lugar de procedencia se desconoce, y presentaron 1,1 % de contenido de materia orgánica. El proceso experimental implicó que las muestras se secan al aire (temperatura inferior a 40 °C), de tal forma que no se afectará su composición química ni sus propiedades; luego se procedió a triturar las muestras y adicionarle agua, para alcanzar un contenido de humedad del 9,0 %. Posteriormente, se adicionaron 0,

% 1 %, 3 % y 6 % de diésel respecto al peso seco de las muestras, se mezcló hasta obtener un material homogéneo y uniforme. Este material se puso en bolsas herméticas para evitar pérdidas por evaporación, y almacenado en un cuarto oscuro a temperatura controlada de 19 °C durante un periodo de siete días para lograr el equilibrio entre el diésel y el suelo. Al cabo de este tiempo se ejecutaron los ensayos de laboratorio.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis mineralógico

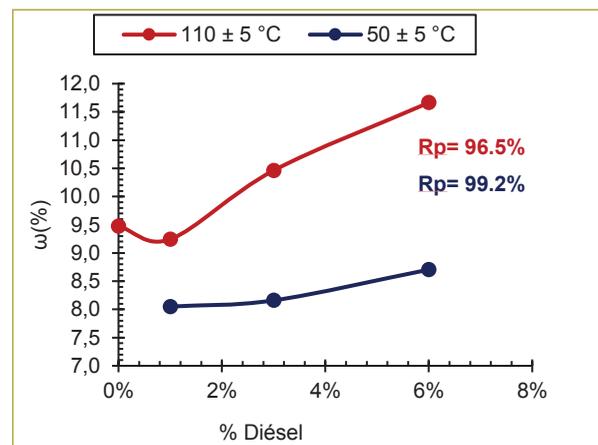
El análisis mineralógico se realizó con el ensayo de difracción por rayos X (DXR), método del polvo. Este método semicuantitativo se aplicó a la muestra control (0 % diésel) y a la muestra con tratamiento del 6 % de diésel. Se evidenció que la muestra control tenía como mineral dominante el cuarzo (>50 %), presencia de caolinita (5-15 %), trazas de feldespato (<5 %), presencia de micas (5-15 %) y arcillas 14 Å, donde se encuentran esmectita, vermiculita y clorita (<5 %), y que para su diferenciación se requiere procesar la muestra con otros tratamientos, como etilenglicol y calentamiento a 550 °C. La muestra con tratamiento del 6 % de diésel tenía como mineral predominante el cuarzo (>50 %), presencia de caolinita (5-15 %), trazas de feldespato (<5 %), trazas de micas (<5 %) y arcillas 14 Å, donde se encuentran esmectita, vermiculita y clorita (<5 %). Por lo tanto, los resultados demuestran la disminución en la presencia de las micas respecto a la muestra control, donde el diésel estuvo presente en los espacios interlaminares, los cuales representan la mayor superficie externa de este mineral, interactuando químicamente y llevando la reducción del porcentaje presente en la muestra. Además, se registraron una atenuación en las reflexiones de las arcillas 14 Å, una acentuación en las reflexiones de la caolinita y los feldespatos por la presencia del diésel.

### Contenido de humedad

Se usó la norma INVE-122-13 (Invías, 2013a), suponiendo que no se conoce la presencia de diésel en el suelo; en el caso contrario se utilizó la adaptación de la norma INVE-122-13 para suelos afectados por derrames de hidrocarburo, proyecto desarrollado por la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga,

Colciencias y Ecopetrol S.A. Instituto Colombiano del Petróleo (Serrano Guzmán & Torrado Gómez, 2013c).

En la figura siguiente se evidencia que el contenido de humedad aumenta para ambas temperaturas de ensayo, en la medida en que se incrementa el porcentaje de hidrocarburo en la estructura del suelo. El valor de la propiedad es mayor para la temperatura de ensayo de 110±5 °C, posiblemente porque se tiene una mayor tasa de evaporación de los líquidos presentes en la estructura del suelo. La incertidumbre experimental en la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110±5 °C y 50±5 °C es del 20,1 %, la cual es aceptable para los resultados de la investigación, teniendo en cuenta la naturaleza del suelo y la cantidad de unidades experimentales (figura 1).



**Figura 1.** Variación del contenido de humedad con el porcentaje de diésel. Fuente: La autora.

No obstante, la expresión con la cual se hace el cálculo del contenido de humedad es la relación entre el peso de agua y el peso de los sólidos.

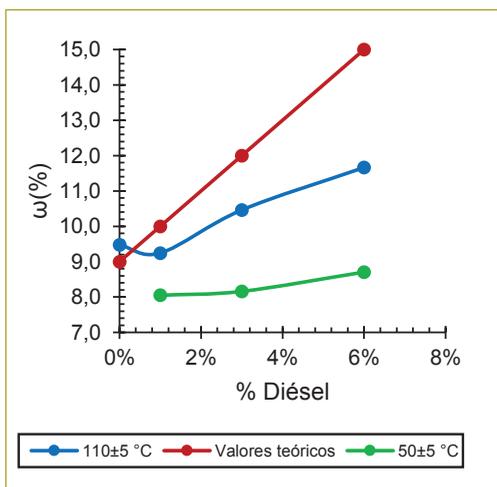
$$\omega(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (1.1)$$

Ahora bien, cuando hay presencia de diésel en el suelo no es correcto determinar el contenido de humedad con la expresión (1.1) debido a que el diésel no es agua; es decir, el contenido de humedad es con respecto a la fracción de agua presente en el suelo, no con respecto a la fracción de fluidos presentes en el suelo. Por lo tanto, el contenido de humedad teórico será el contenido de humedad de las muestras sin diésel más el porcentaje de diésel presente en la muestra, obteniendo la siguiente expresión:

$$\omega \text{ teórico (\%)} = \left( \frac{W_w}{W_s} + \frac{W_{\text{diésel}}}{W_s} \right) \times 100 \quad (1.2)$$

$$= \omega(\%) + \text{diésel (\%)}$$

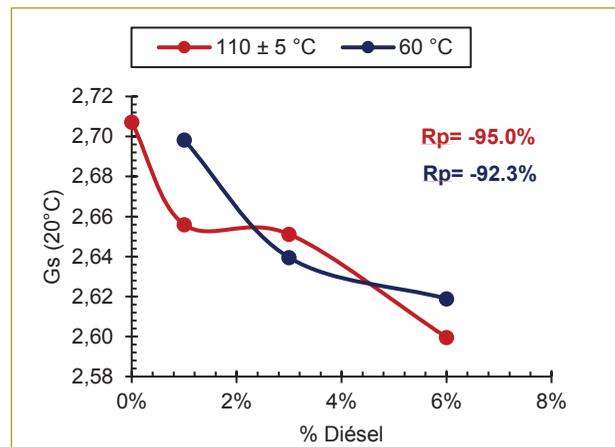
Así mismo, se presenta la comparación del valor del contenido de humedad teórico con respecto al valor de esta propiedad (figura 2), obtenido por medio de ensayos de laboratorio (figura 1). El contenido de humedad definido teóricamente fue 9,0 % y el obtenido en el laboratorio fue 9,5 % para la muestra control, lo cual representa una variación experimental del 5,55 %, la cual es aceptable para los propósitos de la investigación. Se observa que independiente de la temperatura de ensayo, el valor de la propiedad es inferior al valor teórico. Esto se atribuye a que durante el proceso de secado en horno parte del diésel se adhirió a las partículas sólidas del suelo, generando un aumento de su masa y, por ende, el descenso del valor de la propiedad, lo cual corrobora que durante los procesos de secado este hidrocarburo puede quedar de forma remanente en las partículas sólidas del suelo. De ello resulta que los valores de los límites de Atterberg, al ser calculados como un contenido de humedad, tienen una gran incertidumbre, aplicando los procedimientos de las normas vigentes. Por otra parte, se observa que según la temperatura de ensayo el valor de la propiedad presenta cambios, con tendencia a tener una mayor tasa de evaporación del diésel a la temperatura de ensayo de  $110 \pm 5$  °C.



**Figura 2.** Comparación del contenido de humedad teórico con el obtenido por medio de ensayos de laboratorio. **Fuente:** La autora.

### Gravedad específica de los sólidos

Se usó la norma INVE-128-13 (Invías, 2013e), suponiendo que no se conoce la presencia de diésel en el suelo; en el caso contrario se empleó la norma INVE-128-07 (Invías, 2007). Así mismo, se observa que la gravedad específica de los sólidos de esta arcilla era 2,71 para la muestra control y con la adición del 6 % diésel a su estructura disminuyó a 2,60 para la temperatura de ensayo de  $110 \pm 5$  °C (figura 3). Para la temperatura de ensayo de 60 °C pasa de 2,70 para la muestra con tratamiento del 1 % de diésel a 2,62 para la muestra con tratamiento del 6 % de diésel. La temperatura de ensayo afectó ligeramente los resultados obtenidos, evidenciando que a  $110 \pm 5$  °C es mayor la reducción de esta propiedad. Igualmente, la adsorción del diésel a las partículas del suelo produjo la disminución de la fracción sólida, obteniéndose una tendencia descendente en esta propiedad.



**Figura 3.** Variación de la gravedad específica de los sólidos con el porcentaje de diésel. **Fuente:** La autora.

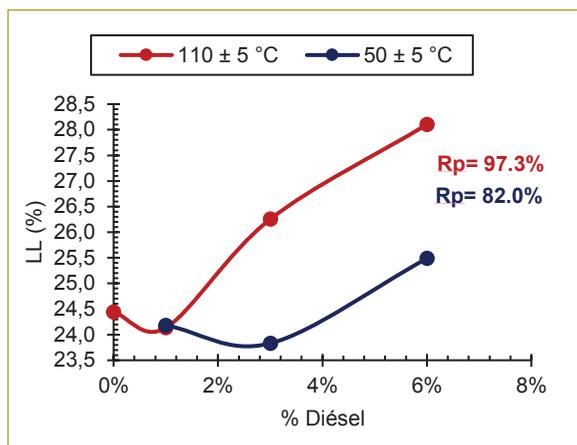
### Límites de Atterberg

Se usaron las normas INVE-125-13 (Invías, 2013b), INVE-126-13 (Invías, 2013c) y INVE-127-13 (Invías, 2013d), suponiendo que no se conoce la presencia de diésel en el suelo; en caso contrario, se ensayaron las muestras con la adaptación de las normas anteriores para suelos afectados por derrames de hidrocarburo, proyecto desarrollado por la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga, Colciencias y Ecopetrol S.A. - Instituto Colombiano del Petróleo (Serrano Guzmán & Torrado Gómez, 2013b, 2013d).

También se observa que el límite líquido del suelo se incrementó con la adición del hidrocarburo, pasando de 24,4 % para la muestra control a 28,1 % para la muestra con tratamiento del 6 % de diésel a la temperatura de ensayo de  $110 \pm 5$  °C, lo cual representa una variación experimental del 15,2 %. Para la temperatura de ensayo de  $50 \pm 5$  °C, pasó de 24,2 % para la muestra con tratamiento del 1 % de diésel a 25,5 % para la muestra con tratamiento del 6 % de diésel, lo cual representa una variación experimental del 5,37 % (figura 4).

Así mismo, se observa que el límite plástico del suelo se incrementó con la adición del hidrocarburo, pasando de 13,5 % para la muestra control a 15,3 % para la muestra con tratamiento del 6 % de diésel a la temperatura de ensayo de  $110 \pm 5$  °C, lo cual representa una variación experimental del 13,3 % (figura 5). Para la temperatura de ensayo de  $50 \pm 5$  °C, pasó de 13,4 % para la muestra con tratamiento del 1 % a 13,7 % para la muestra con tratamiento del 6 % de diésel, lo cual representa una variación experimental del 2,24 %.

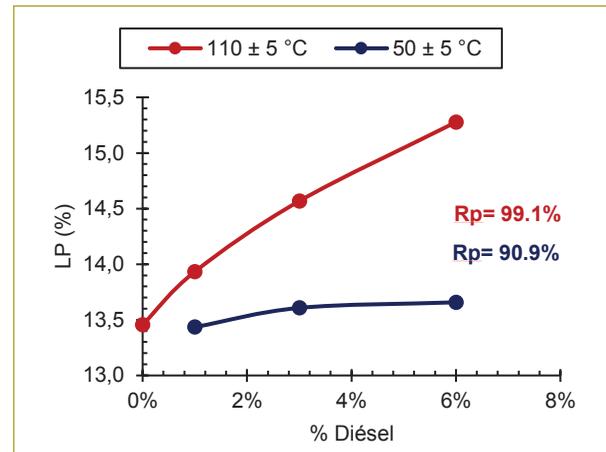
Se puede apreciar que el límite de contracción del suelo se incrementó con la adición del hidrocarburo, pasando de 9,0 % para la muestra control a 14,7 % para la muestra con tratamiento del 6 % de diésel a la temperatura de ensayo de  $110 \pm 5$  °C, lo cual representa una variación experimental del 63,3 %. Para la temperatura de ensayo de  $50 \pm 5$  °C disminuye el valor de la propiedad, al pasar de 11,1 % para la muestra con tratamiento del 1 % de diésel a 10,5 % para la muestra con tratamiento del 6 % de diésel, lo cual representa una variación experimental del 5,4 % (figura 6).



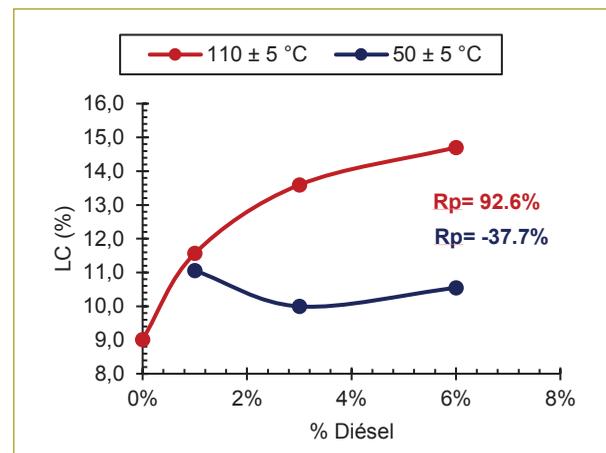
**Figura 4.** Variación del límite líquido con el porcentaje de diésel. Fuente: La autora.

En este caso, la temperatura de ensayo modifica notablemente el valor de los límites de contracción y su comportamiento. Sumado a que durante el proceso de secado en horno parte del diésel se solidifica y se adhiere a las partículas sólidas del suelo, particularidad que no se tiene en cuenta en la expresión del contenido de humedad de las normas utilizadas, y por ende, los valores de los límites de Atterberg determinados tienen incertidumbre producto de la expresión de cálculo.

El aumento en los límites se explica porque el diésel, al adherirse a las partículas de suelo, les proporciona una cohesión adicional, sin disminución de la doble capa difusa, lo que hace que se requiera más agua para cambiar la consistencia del suelo.



**Figura 5.** Variación del límite plástico con el porcentaje de diésel. Fuente: La autora.



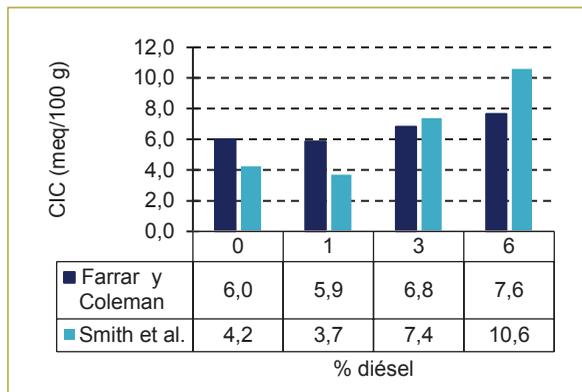
**Figura 6.** Variación del límite de contracción con el porcentaje de diésel. Fuente: La autora.

### Capacidad de intercambio catiónico

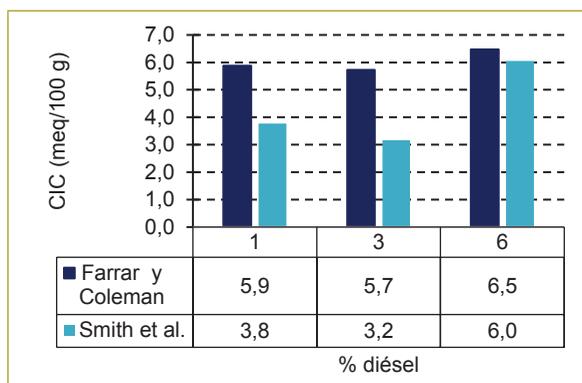
La capacidad de intercambio catiónico (CIC) (mEq, 100 g) se determinó usando las correlaciones con el límite líquido presentadas en el estudio realizado por Yukselen y Kaya (2006). Por lo tanto, en las figuras 7 y 8 se observa el incremento en el valor de esta propiedad, donde el diésel da una cohesión adicional e incrementa aparentemente la capacidad de intercambiar cationes de las partículas del suelo, sin que se llegue a modificar su potencial de baja expansión (figuras 7 y 8).

$$CIC = 0,45 LL - 5 \text{ (Farrar \& Coleman, 1967)}$$

$$CIC = 1,74 LL - 38,3 \text{ (Smith et al., 1985)}$$



**Figura 7.** Variación de la CIC a 110 ± 5 °C con el porcentaje de diésel. Fuente: La autora.

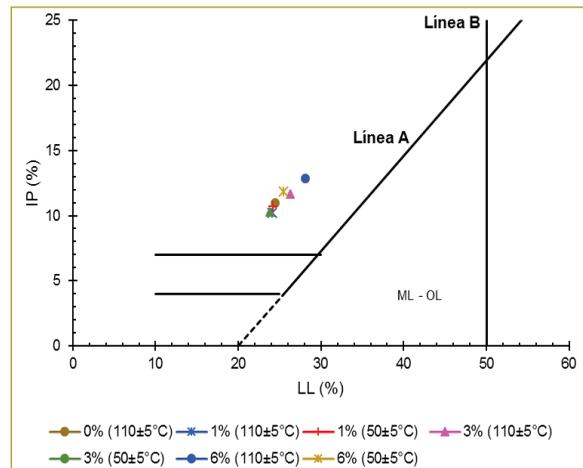


**Figura 8.** Variación de la CIC a 50 ± 5 °C con el porcentaje de diésel.

### Clasificación del suelo

Las muestras se clasificaron según la norma INVE-181-13 (Invías, 2013g). En la figura siguiente se observa que el suelo se clasificó como una arcilla de baja

compresibilidad (CL) para todos los tratamientos y las temperaturas de ensayo utilizadas (figura 9).

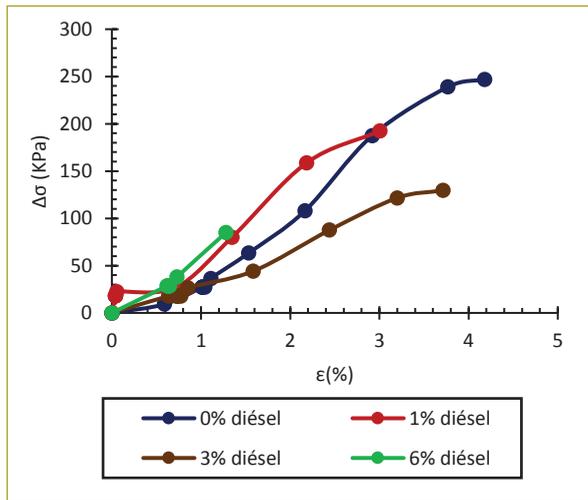


**Figura 9.** Variación del SUCS con el porcentaje de diésel. Fuente: La autora.

### Resistencia a la compresión confinada

Se utilizó la norma INVE-152-13 (Invías, 2013f), suponiendo que no se conoce la presencia de diésel en el suelo; en el caso contrario se usó la adaptación del ensayo de compresión confinada en muestras de suelos afectados por derrames de hidrocarburo, proyecto desarrollado por la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga, Colciencias y Ecopetrol S.A. - Instituto Colombiano del Petróleo (Serrano Guzmán & Torrado Gómez, 2013a).

La densidad total del suelo correspondió a 2.17 g/cm<sup>3</sup>, y en la figura siguiente se aprecia la pérdida de resistencia del suelo en la medida en que se incrementó la cantidad de diésel presente en su estructura, viéndose reducida su capacidad para deformarse (figura 10). Al trabajar con muestras alteradas la falla que se presentó fue frágil. La resistencia pasó de 246,7 KPa a 112,3 KPa para el tratamiento de 6 % de diésel, lo cual representa una reducción del 54,5 %. Así mismo, con el tratamiento de 6 % de diésel se tiene la menor deformación unitaria de 2,2 %. Esta disminución en la resistencia y la deformación unitaria se explica puesto que, al tener el suelo en sus poros agua y diésel, se reduce la constante dieléctrica de los fluidos de poros, lo que implica que disminuye la capacidad de los fluidos de separar iones de cargas opuestas y se incrementan las fuerzas de atracción, afectándose la doble capa difusa y llevando a la reducción de la resistencia a la compresión confinada y la resistencia al corte.



**Figura 10.** Variación de la resistencia a la compresión inconfina con el porcentaje de diésel. Fuente: La autora.

**Relaciones volumétricas y gravimétricas**

A continuación se presentan las variaciones en la relación de vacíos, la porosidad y la saturación con el aumento en el porcentaje de diésel. La reducción en la relación de vacíos y la porosidad se asocia a la capacidad del diésel para fomentar que el agua forme estructuras floculadas con las partículas de suelo. Y la saturación aumento en la medida en que se incrementó el hidrocarburo porque ocupó los espacios vacíos del suelo (tabla 1).

**Tabla 1**

Variación de las relaciones de fase con el porcentaje de diésel

	Diésel							
	0%		1%		3%		6%	
	110 ± 5 °C	110 ± 5 °C	50 ± 5 °C	110 ± 5 °C	50 ± 5 °C	110 ± 5 °C	50 ± 5 °C	
$\gamma_t$ (KN/m <sup>3</sup> )	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	
$\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> )	19,4	19,5	19,7	19,3	19,7	19,1	19,6	
e	0,37	0,34	0,34	0,35	0,32	0,34	0,31	
$\eta$ (%)	26,8	25,3	25,6	26,0	24,0	25,3	23,8	
S (%)	69,9	72,6	63,1	82,7	68,0	89,5	72,9	

Fuente: La autora.

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

El diésel no afectó la estructura mineralógica del suelo, teniendo en cuenta que el periodo de exposición fue muy corto, apenas de siete días. Las fases cristalinas

identificadas fueron cinco, el mineral dominante fue el cuarzo y se encontraron en proporciones más bajas los minerales micas, caolinita, feldespatos y arcillas 14 Å, pero hubo una reducción en el porcentaje de participación de las micas, una atenuación de las reflexiones de las arcillas 14 Å y una acentuación de las reflexiones de la caolinita y los feldespatos.

El contenido de humedad presentó una tendencia a incrementarse, sin ser proporcional con la cantidad de diésel, siendo el valor de la propiedad mayor para la temperatura de 110±5 °C con respecto a la temperatura de 50±5 °C. No obstante, durante el proceso de secado en horno parte del diésel se solidificó y se adhirió a las partículas del suelo, particularidad que no se toma en cuenta dentro de la expresión del cálculo del contenido de humedad, por ende, los valores obtenidos tienen una incertidumbre generada por la expresión de cálculo. La gravedad específica de los sólidos disminuyó, aunque el procedimiento experimental es cuestionable puesto que el diésel interactúa con el agua, y durante el secado en horno parte del hidrocarburo queda de forma remanente en las partículas sólidas del suelo.

Los límites de Atterberg fueron afectados por el diésel, presentándose un incremento, sin embargo, al ser un contenido de humedad su expresión de cálculo cuando se tienen suelos con diésel es cuestionable porque parte del diésel queda remanente en las partículas sólidas del suelo después del proceso de secado en horno, independiente de la temperatura de ensayo. La CIC tiende a aumentar y su potencial de expansión no cambia, se mantiene en baja expansión, precisando que fue determinada a partir de una correlación con el límite líquido. El suelo no cambió su clasificación de arcilla de baja compresibilidad (CL), según el SUCS. El suelo pierde resistencia con la presencia del diésel y reduce su capacidad para deformarse. Se reportó disminución de la relación de vacíos y de la porosidad, así como aumento del grado de saturación. Cuando el suelo tenía 1 % y 3 % de diésel se presentó un comportamiento indefinido en las propiedades del suelo, por lo que estos porcentajes son un valor de transición para el comportamiento de este suelo. La temperatura de ensayo afecta los resultados de los ensayos, siendo su comportamiento indefinido y generando incertidumbre en la estimación de los parámetros del suelo.

Finalmente, se recomienda continuar las investigaciones en esta área, puesto que el diésel ocasionó cam-

bios en el suelo usado en la experimentación durante un periodo de exposición de una semana; luego, si se tienen mayores tiempos de exposición, cómo cambiarían la fábrica, estructura, composición mineralógica y propiedades de los suelos arcillosos.

Por otra parte, la temperatura es un factor influyente en el valor obtenido de las propiedades geotécnicas del suelo, por lo cual se sugiere realizar más estudios con un mayor número de unidades experimentales, con el fin de validar los resultados obtenidos, debido a que la bibliografía hasta la fecha no referencia la temperatura usada en los diversos estudios; además, hay que determinar cambios en las propiedades mecánicas del suelo y curvas de succión. Adicionalmente, se recomienda validar la expresión para la determinación del contenido de humedad, donde se tomen en cuenta la evaporación del hidrocarburo y la parte remanente en estado sólido, pues las normas existentes no tienen estas consideraciones que influyen en el cálculo de los límites de Atterberg.

Finalmente, se deben validar las metodologías para determinar el contenido de humedad, límites de Atterberg y gravedad específica de los sólidos.

## REFERENCIAS

- Akinwumi, I. I., Diwa, D. & Obianigwe, N. (2014). Effects of crude oil contamination on the index properties, strength and permeability of lateritic clay. *International Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, 3(4), 816–824.
- Bian, H., Liu, S., Cai, G. & Chu, Y. (2016). Influence of diesel pollution on the physical properties of soils. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(14), 552-555. <https://doi.org/10.3208/jgssp.CHN-16>
- Brito, O. O., Lema, I. I. & García, A. G. (2003). La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México. *Gaceta ecológica*, (69), 83–92.
- Invías (2007). INVE-128-07. Determinación de la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral.
- Invías (2013a). INVE-122-13. Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo - agregado.
- Invías (2013b). INVE-125-13. Determinación del límite líquido de los suelos.
- Invías (2013c). INVE-126-13. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.
- Invías (2013d). INVE-127-13. Determinación de los factores de contracción de los suelos.
- Invías (2013e). INVE-128-13. Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua.
- Invías (2013f). INVE-152-13. Compresión inconfiada en muestras de suelo.
- Invías (2013g). INVE-181-13. Sistema unificado de clasificación de suelos para propósitos de ingeniería.
- Izdebska-Mucha, D. & Trzcinski, J. (2008). Effects of petroleum pollution on clay soil microstructure. *geologija*, 50, 68–74. <https://doi.org/10.2478/V10056-008-0027-0>
- Joseph, J. & Hari, G. (2015). Investigation on the Effects of Hydrocarbon Spillage on Soil Properties. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4.
- Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M. R., & Yazdani, H. (2013). Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite. *Engineering Geology*, 166, 11-16. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.08.004>
- Liu, Z., Liu, S. & Cai, Y. (2015). Engineering property test of kaolin clay contaminated by diesel oil. *Journal of Central South University*, 22(12), 4837-4843. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-3035-3>.
- Rasheed, Z. N., Ahmed, F. R., & Jassim, H. M. (2014). Effect of crude oil products on the geotechnical properties of soil (vol. 186, pp. 353-362). *WIT Transactions on Ecology and The Environment*. <https://doi.org/10.2495/ESUS140301>.
- Serrano Guzmán, M. F. & Torrado Gómez, L. M. (2013a). Compresión inconfiada en muestras de suelos afectados por derrames de hidrocarburo. Tomadao y adaptado de INVE-152-13. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.
- Serrano Guzmán, M. F. & Torrado Gómez, L. M. (2013b). Determinación del límite líquido de los suelos afectados por derrames de hidrocarburo. Tomado y adaptado de INVE - 125 - 13. Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga.
- Serrano Guzmán, M. F. & Torrado Gómez, L. M. (2013c). Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo afectado por derrames de hidrocarburo, roca y mezclas de suelo afectado con hidrocarburo - agregado. Tomado y adaptado de INVE-122-13. Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga.
- Serrano Guzmán, M. F. & Torrado Gómez, L. M. (2013d). Límite plástico e índice de plasticidad de suelos afectados con hidrocarburo. Tomado y adaptado de INVE - 126 - 13. Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga.
- Tianyuan, Z., Junjie, Y., Yongxia, L. & Jiangjiao, L. (2013). Experimental study on engineering properties of diesel contaminated soil. Recuperado a partir de [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTOTAL-GCKC201301002.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-GCKC201301002.htm).
- Tong, L., Chen, W. S., Zheng, X. L. & Li, M. (2012). Effect of Oil Contamination on Atterberg Limits of Soil. *Advanced Materials Research*, 374-377, 336-338. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.374-377.336>.
- Walia, B. S., Singh, G. & Kaur, M. (2013). Study of diesel contaminated clayey soil. En *Proceedings of Indian Geotechnical Conference* (pp. 22–24). Roorkee, India. Recuperado a partir de [http://www.igs.org.in/igc2013/igc\\_2013\\_roorkee\\_proceedings/full\\_length\\_paper/14%20Th%20PDF/14%20Th-09.pdf](http://www.igs.org.in/igc2013/igc_2013_roorkee_proceedings/full_length_paper/14%20Th%20PDF/14%20Th-09.pdf).
- Yukselen, Y. & Kaya, A. (2006). Prediction of cation exchange capacity from soil index properties. *Clay Minerals*, 41(4), 827-837. <https://doi.org/10.1180/0009855064140222>.
- Zárate, A. Y. (2014, agosto 4). *Evaluación del impacto de la contaminación con diésel en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso* (Thesis). Recuperado a partir de <http://ri.uaq.mx/handle/123456789/1738>.