



## Efectos sobre suelos de un fluido de perforación con coque de petróleo como controlador de filtrado

### Effects on soils of a drilling fluid with petroleum coke as a filtering controller

---

Díaz-Azócar Armando Antonio

Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas, Venezuela

Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Departamento de Ingeniería de Petróleo

Correo: [armandoaziaca@hotmail.com](mailto:armandoaziaca@hotmail.com)

<https://orcid.org/0000-0001-9997-9843>

Bravo-Santamaría Robert José

Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas, Venezuela

Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Departamento de Ingeniería de Petróleo

Correo: [ribert.jbs7@hotmail.com](mailto:ribert.jbs7@hotmail.com)

<https://orcid.org/0000-0003-8895-5204>

Vega-Mejía Rubén Darío

Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas, Venezuela

Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Departamento de Ingeniería de Petróleo

Correo: [rvega.udomonagas@gmail.com](mailto:rvega.udomonagas@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0002-6331-3851>

#### Resumen

Las actividades petroleras siempre se han considerado como fuente de contaminación de suelos y acuíferos. Así, ante el posible uso de coque de petróleo como controlador de filtrado en un fluido base agua, se evaluó su efecto sobre dos suelos típicos de áreas de operaciones petroleras en el estado Monagas, Venezuela; como son: Morichal y Orocuál. Estos al ser caracterizados físicamente resultaron ser suelos arenosos y francos arenosos, respectivamente. Los suelos se contaminaron con dicho fluido en tres diferentes concentraciones y 24 h después se sembraron con frijol (*Vigna unguiculata*) como bioindicador, observándose durante 21 días su germinación, crecimiento, número de hojas y color. Posteriormente, se determinaron las propiedades de pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico y aluminio intercambiable a los suelos y se compararon con los valores máximos permitidos en los artículos 49 y 50 del Decreto 2635. Finalmente, basados en un diseño estadístico factorial se aplicó un ANOVA ( $\alpha=0.05$ ) y test de Duncan para establecer diferencias entre los suelos, las concentraciones y las propiedades. El estudio permitió concluir que el efecto de la adición del fluido de perforación en sus diferentes concentraciones a los suelos, ocasionó comportamientos diferentes en las propiedades: pH, conductividad eléctrica, aluminio intercambiable y capacidad de intercambio catiónico según el tipo de suelo analizado.

**Descriptores:** Bioindicador, contaminación de suelos, coque de petróleo, fluido base agua, controlador de filtrado.

#### Abstract

Oil activities have always been considered a source of contamination of soils and aquifers. Thus, given the possible use of petroleum coke as a filtering controller in a water-based fluid, its effect was evaluated on two typical soils of areas of oil operations in Monagas state, Venezuela, such as Morichal and Orocuál. These, when physically characterized, turned out to be sandy soils and sandy loam, respectively. The soils were contaminated with said fluid in three different concentrations and 24 h later they were sown with beans (*Vigna unguiculata*) as a bioindicator, observing their germination, growth, number of leaves and color for 21 days. Subsequently, the properties of pH, electrical conductivity, cation exchange capacity and exchangeable aluminum to soils were determined and compared with the maximum values allowed in articles 49 and 50 of Decree 2635. Finally, based on a factorial statistical design, it was applied an ANOVA ( $\alpha = 0.05$ ) and Duncan's test to establish differences between soils, concentrations and properties. The study allowed concluding that the effect of the addition of the drilling fluid in its different concentrations to the soils, caused different behaviors in the properties: pH, electrical conductivity, exchangeable aluminum and cation exchange capacity according to the type of soil analyzed.

**Keywords:** Bioindicator, soil contamination, petroleum coke, water based fluid, filter controller.

## INTRODUCCIÓN

La industria petrolera ejecuta procesos donde sus consecuencias hacia el medio ambiente son directas, por lo que son altamente peligrosos (Yáñez & Cedeño, 2017). Las secuelas ambientales de los procesos asociados a la industria petrolera en Venezuela (exploración, perforación, producción, refinación, almacenamiento, transporte, distribución y comercialización) han producido graves daños ambientales que impactan de manera negativa (Marín, 2016), entre ellas destacan las emisiones atmosféricas, los efluentes líquidos y los desechos sólidos peligrosos. Según Ramírez (2020) la contaminación debido a PDVSA sigue siendo significativa en todo el país, aun cuando la compañía registra la producción petrolera más baja desde la década de 1930. Pareciera que, mientras menos produce, más contamina.

Entre estos daños está la contaminación del suelo como consecuencia de derrames de crudos y productos manejados por la industria como los fluidos de perforación. Estos, una vez depositados en el suelo, se acumulan y forman una capa hidrofóbica induciendo la fragmentación de los agregados; también causan la reducción y la inhibición de la cobertura vegetal y modifican las poblaciones microbianas del ambiente edáfico (Díaz *et al.*, 2013). Dicho daño conlleva a la modificación de la dinámica poblacional de la fauna y sobre todo afecta propiedades tales como el pH, la conductividad eléctrica, la concentración de metales pesados y el contenido de carbono orgánico, entre otros (De la Garza *et al.*, 2008).

Los cambios temporales en las propiedades del suelo constituyen indicadores de su funcionamiento y del manejo a que es sometido. Sin embargo, debe considerarse que para mejor comprensión deben estudiarse independientemente uno del otro, aunque entre ellos existe una estrecha interrelación y dependencia (Mortola & Lupi, 2011).

Los indicadores de calidad del suelo son herramientas de medición que ofrecen información sobre las propiedades, procesos y características del suelo. Estos atributos medibles revelan la respuesta de la productividad o funcionalidad del suelo al ambiente e indican si la calidad del suelo mejora, permanece constante o decrece (Estrada *et al.*, 2017). El uso de indicadores de calidad del suelo puede ser una herramienta rápida para la toma de decisiones, porque son sensibles al manejo en el corto, mediano y largo plazos, en dependencia de la propiedad y del suelo que se evalúe (García *et al.*, 2012). Así, monitoreando los cambios en el tiempo de los indicadores de calidad de suelo se podría determinar si un sistema de manejo

está en una situación de estabilidad, mejora o degradación (Shukla *et al.*, 2006).

El marco regulatorio ambiental en la República Bolivariana de Venezuela es amplio y contempla en orden descendente la Constitución de la República, convenios internacionales, leyes orgánicas, leyes penales, decretos, reglamentos y resoluciones. Respecto a las actividades petroleras e impacto de suelos, la Constitución de la República Bolivariana en su artículo 129 expresa que: *todas las actividades susceptibles de generar daños a los ecosistemas deben ser previamente acompañadas de estudios de impacto ambiental y socio cultural* (Constitución de la República Bolivariana de Venezuela, 1999). Igualmente el Decreto 2635, en sus Secciones I (Disposiciones Generales) y II (De las disposiciones técnicas para el manejo de desechos peligrosos generados por la exploración y producción de petróleo) establece los valores de aceptación de los parámetros de calidad que permiten la disposición final de los fluidos base agua en suelo (confinamiento o esparcimiento en suelos (art. 48), límites de mezcla suelo/desecho con fines de confinamiento en el suelo (art. 49) y límites de mezcla suelo/desecho con fines de esparcimiento en el suelo (art. 50) (Decreto 2635, 1998).

Investigaciones previas demostraron a nivel de laboratorio el uso del coque de petróleo como aditivo controlador de filtrado en fluidos base agua (Vega *et al.*, 2016) y en fluidos base aceite (Vega *et al.*, 2018). Ello, basado en que el coque de petróleo es un producto residual de elevado contenido de carbono, resultante de la pirólisis de las fracciones pesadas obtenidas en la refinación del petróleo (Hassan, 2014), por lo que supuestamente podría sustituir al lignito y al lignosulfonato como controladores de filtrado. Sin embargo, es importante señalar que este proceso genera coque rico en azufre (S), entre 2 y 7 %, y metales pesados como el níquel (Ni) y vanadio (V), que limitan sus aplicaciones industriales y ocasiona serios problemas de contaminación ambiental, así como de transporte y almacenamiento (Ramos *et al.*, 2015).

Ante lo expuesto, surgió la necesidad de evaluar los efectos sobre suelo de un fluido base agua con coque de petróleo como controlador de filtrado, basado en propiedades asociadas a estos (pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico y aluminio intercambiables) contempladas en el Decreto 2635, que determinan con qué técnica (esparcimiento o confinamiento) pueden ser tratados los suelos contaminados. Para ello, se consideraron muestras de suelo de zonas petroleras en el estado Monagas-Venezuela, como Morichal y Orocuál.

**DESARROLLO**

La investigación se desarrolló en los laboratorios de perforación del Departamento de Ingeniería de Petróleo de la Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas y suelos del posgrado de Agronomía Tropical de la Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas. El coque provino del Complejo Petroquímico José Antonio Anzoátegui de Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA) y los aditivos para la formulación de los fluidos de la empresa PROAMSA.

CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS SUELOS

Se recolectaron muestras de suelo de las áreas en estudio, aplicando la norma NTC-3656, (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, ICONTEC, 2004). Las muestras fueron caracterizadas físicamente mediante las propiedades: densidad aparente ( $\rho_a$ ) método del cilindro (Flores & Alcalá, 2010); densidad real ( $\rho_R$ ), método del picnómetro (American Society for Testing and Material, ASTM, 2014), porosidad a partir de los valores de densidad aparente y real, y textura de suelo, método del hidrómetro (Bouyoucos, 1962).

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DEL FLUIDO SOBRE LOS TIPOS DE SUELO EN ESTUDIO

El coque fue triturado en un molino de martillo y tamizado para obtener un tamaño de partícula de 28 $\mu$ m, este se empleó como controlador de filtrado sustituyendo al lignito en un fluido tipo lignosulfonato (Tabla 1),

de acuerdo con la formulación presentada por Vega *et al.* (2016).

Para cada tipo de suelo (Morichal y Orocuál) se llenaron 16 bolsas de polietileno con 2 kg de suelo, contaminándose 12 de ellas con el fluido de perforación formulado, variando sus concentraciones (mL: kg) (Tabla 2). Las 4 restantes se tomaron como control (sin contaminar). 24 h después por voleo se sembraron en cada bolsa 5 semillas de frijol (*Vigna unguiculata*) y durante 21 días se observó el crecimiento o no de las plantas (Bioindicador) por efecto de la toxicidad de los hidrocarburos y sus derivados, registrándose semanalmente: germinación, tamaño, número de hojas y color de las plantas de acuerdo con la metodología de Vega *et al.* (2020).

Muestras de suelos (control y contaminados) fueron llevados al laboratorio donde se les midieron las propiedades de pH, norma UNE-ISO 10390 (Asociación Española de Normalización, UNE, 2012), conductividad eléctrica (CE), norma UNE 77308 (UNE, 2001), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y aluminio intercambiable (AI) UNE-ISO 23470 (UNE, 2018). Los valores se compararon con los permitidos en los artículos 49 y 50 del Decreto 2635, permitiendo establecer el tipo de tratamiento a aplicar para recuperar los suelos.

Tabla 1. Formulación del fluido de perforación base agua tipo lignosulfonato

Aditivo	Concentración	Unidad	Mezcla (min)
Agua	304.5	mL	0
Bentonita	25	g	15
KOH	Hasta pH 9.5	-	15
Coque de petróleo	2	g	15
Lignosulfonato	4	g	15
Barita	18.6	g	15

Tabla 2. Proporciones de fluido de perforación con coque como controlador de filtrado utilizadas en las muestras de suelos

Proporción fluido: suelo (Morichal – Orocuál)	Fluido (mL)	Masa de suelo (kg)	Repeticiones (r)
Control (1)	0	2	4
2	20	2	4
3	30	2	4
4	40	2	4

VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS EFECTOS DE CONCENTRACIÓN DEL FLUIDO SOBRE LOS SUELOS EN ESTUDIO

Basados en los resultados obtenidos de las propiedades de pH, CE, CIC y AI para los suelos estudiados, las distintas concentraciones de contaminación aplicadas y sus repeticiones, permitieron establecer una parcela experimental de 128 experimentos, (2 bloques x 4 concentraciones x 4 propiedades x 4 repeticiones). En el estudio estadístico se empleó un diseño factorial, el cual estudia paralelamente más de un factor, de modo que los tratamientos se forman por todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores. Se aplicó un Análisis de Varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de 5 % y un Test de Duncan para los bloques, las propiedades y las concentraciones (factores), lo que permitió compararlos para conocer si existían o no diferencias estadísticas significativas (DES) entre ellos y el fluido de control. Se empleó el software InfoStat® versión estudiantil.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La  $\rho_a$  exhibió valores de 1.70 g/cm<sup>3</sup> y 1.60 g/cm<sup>3</sup> para Morichal y Orocuál, respectivamente, los mismos están dentro del rango de la propiedad para suelos de los llanos (1.2 a 1.95 g/cm<sup>3</sup>) (Ramírez, 1997) y concuerdan con el valor de 1.7 g/cm<sup>3</sup> reportado por Hossne *et al.* (2009) para estos tipos de suelo. Un aumento de la  $\rho_a$  se relaciona con la disminución de la porosidad total, afectándose la disponibilidad de agua y de oxígeno, la penetrabilidad de las raíces y otras características. La porosidad mostró una diferencia entre ambos suelos de 4.52 %, reflejando valores de 34.04 % (Morichal) y 38.56 % (Orocuál), ambos son considerados extremadamente porosos (Universidad de Caldas, 2011). Estos son concordantes con el rango para la propiedad (32 % – 39 %) según el rango de  $\rho_a$  donde se ubicaron (1.6 g/cm<sup>3</sup> – 1.8

g/cm<sup>3</sup>) (Ramírez, 1997). Los valores de porosidad son ligeramente superiores a 31.56 % reportado por Hossne *et al.* (2009).

La  $\rho_R$  para los suelos presentó valores de 2.58 g/cm<sup>3</sup> (Morichal) y 2.60 g/cm<sup>3</sup> (Orocuál), evidenciando que no hay presencia de cantidades apreciables de materia orgánica. La  $\rho_R$  fluctúa entre 2.5 y 2.6 g/cm<sup>3</sup> cuando no se presentan cantidades considerables de materia orgánica y alcanza el mayor valor de 2.65 g/cm<sup>3</sup> en suelos arcillosos o arenosos con muy poca materia orgánica (Ramírez, 1997). Los resultados obtenidos son semejantes (2.63 g/cm<sup>3</sup>) a los presentados por Hossne *et al.* (2009) (Tabla 3).

El porcentaje de humedad de ambos suelos fue bajo, Orocuál no alcanzó el 1 %, demostrando la poca capacidad de las muestras para retener agua. Un bajo contenido de humedad indica que el suelo es duro y muy coherente a causa del efecto de cementación entre partículas secas (Rucks *et al.*, 2004). El porcentaje de humedad equivalente de los suelos (6.6 % Morichal y 7.7 % Orocuál), están en el rango de 5 % – 15 %, clasificándolas como bajas (Ramírez, 1997). Según los contenidos de arena, arcilla y limo presentes, el suelo de Morichal se definió como un suelo netamente arenoso, mientras que Orocuál se ubicó en la zona de arena francosa (UDSA, S.F). Ambos suelos son considerados como ligeros y de textura gruesa.

Los valores de las propiedades descritas expresaron la baja compactación de los suelos y la posible presencia de animales como lombrices, que influyen sobre ellos mediante actividades de excavación asociadas a su dinámica de vida. Asimismo, son indicadores de baja capacidad de retención de agua y que las muestras no son propias de suelos con actividad agrícola relevante.

Respecto a la germinación, crecimiento y número de hojas de las plantas, la Figura 1a, refleja las medias de germinación de las muestras en cada nivel de concen-

Tabla 3. Características físicas de las muestras de suelo de los campos Morichal y Orocuál

Parámetro	Morichal	Orocuál
	Valor	
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.70	1.60
Densidad real (g/cm <sup>3</sup> )	2.58	2.60
Porosidad (%)	34.04	38.56
Humedad (%)	3.02	0.79
Equivalente de humedad (%)	6.6	7.7
Arena (%)	91.52	81.52
Arcilla (%)	5.97	8.97
Limo (%)	2.52	9.52

tración del fluido de perforación aplicado. Se observan valores iguales de germinación (100 %) para ambos suelos no contaminados (control), a partir de ellos hay comportamientos disimiles, mientras que Morichal alcanzó una germinación de 100 % solo en la concentración 3, Orocuál lo logró en las concentraciones 2 y 4. Los valores reportados de menor porcentaje de germinación fueron de 66.7 % para Morichal (concentración 2) y 88.9 % para Orocuál (concentración 3).

La tendencia de la altura de las plantas germinadas para ambos suelos (Figura 1b) fue semejante, así para los suelos control se presentaron las alturas máximas de 33.4 cm (Morichal) y 34.2 cm (Orocuál). Al adicionar el fluido de perforación (concentración 2) ocasionó una caída en los valores de altura de las plantas (21.1 cm Morichal y 8.6 cm Orocuál), pero luego mostraron un incremento a medida que aumentaba el nivel de concentración de fluido, alcanzando valores de 28.7 cm para Morichal y 17.5 cm Orocuál (concentración 3) y 31.0 cm Morichal y 19.6 cm Orocuál (concentración 4).

El número de hojas promedio de las plantas germinadas (Figura 1c) presentó un máximo de 8 hojas para los suelos control, al agregar la concentración 2 existió una disminución de 4 hojas (Morichal) y 2 hojas (Orocuál), luego aumentaron a 6 hojas para las concentraciones 3 y 4 (Morichal) y 3 hojas (concentración 3) y 4 hojas (concentración 4) (Orocuál).

Concerniente al color, todas las plantas presentaron una pigmentación verde completamente normal (Figura 2).

La germinación, tamaños y número de hojas de las plantas se ajustaron a los valores reportados para el frijol (*Vigna unguiculata*) de Hernández y Valladares (2012). Se ratificó el uso potencial del desecho del fluido de perforación base agua no disperso como posible fertilizante en el cultivo de frijol (*Vigna unguiculata*) (Mendez *et al.*, 2007), debido a que estimuló la germinación de las semillas, favoreció el crecimiento, desarrolló las plántulas y no tuvo un efecto negativo sobre los caracteres de la nodulación. Se confirmó la posibilidad de generar una tierra cultivable en suelos arenosos con la adición de coque de petróleo (Laine, 2012 y Rincón *et al.*, 2011) quienes mezclaron el coque de petróleo previamente molido con suelo, para obtener 2 % en peso del mismo (contenido de carbono orgánico de la tierra negra) y este no cambió los parámetros de crecimiento de la planta (diámetro del tallo y altura) en comparación con el mismo suelo sin coque añadido.

Los resultados señalaron que el fluido de perforación aplicado sobre los suelos estudiados, no incide negativamente sobre el desarrollo de las plantas como se hubiese podido esperar debido a que el coque se produce de la refinación del crudo pesado, el cual contiene componentes que pueden considerarse dañinos para los ecosistemas, tales como azufre (S), y metales pesados (níquel (Ni) y vanadio (V)) que ocasionan serios problemas de contaminación ambiental (Ramos *et al.*, 2015).

Culminado el tiempo de observación de las plantas, estas fueron retiradas y muestras de los suelos fueron

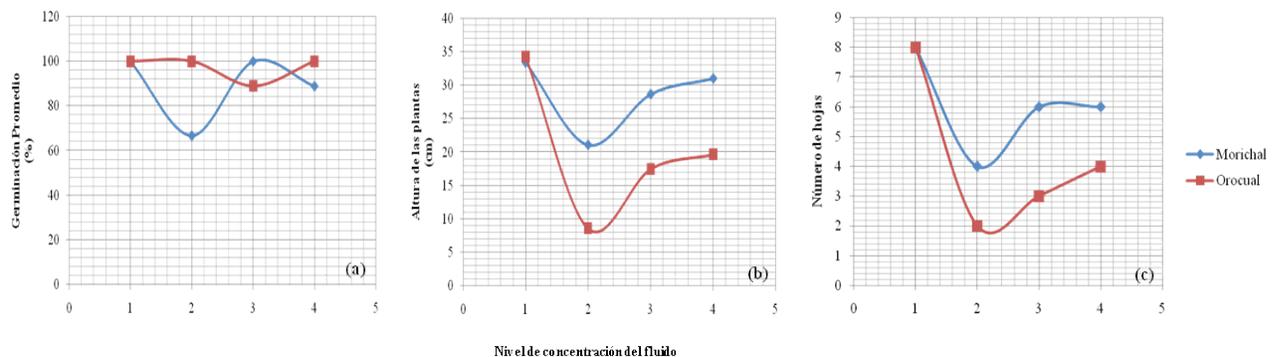


Figura 1. a) Germinación promedio de las semillas, b) altura promedio de las plantas germinadas y c) número de hojas de las plantas germinadas en los suelos de Morichal y Orocuál

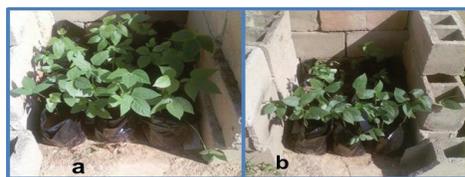


Figura 2. Muestras de las plantas al finalizar el periodo de estudio. Concentración 4:1 a 32 días de germinación, a) Morichal, b) Orocuál

Tabla 4. Valores promedio obtenidos de pH, conductividad eléctrica, aluminio intercambiable e intercambio catiónico en los suelos de Morichal y Orocuál

	Suelo Morichal				Suelo Orocuál			
	pH (adim)	CE (mmhos/cm)	AI meq/100g.	CIC meq/100g	pH (adim)	CE (mmhos/cm)	AI meq/100g.	CIC meq/100g
Suelo control 1	5.23	0.43	0.07	3.7	5.94	1.81	0.05	7.43
Concentración 2	5.80	2.69	0.07	3.35	5.74	2.62	0.07	7.83
Concentración 3	5.93	2.62	0.06	3.13	5.62	3.17	0.08	7.9
Concentración 4	5.46	2.45	0.05	3.52	5.46	3.85	0.09	8.13

llevados al laboratorio de suelos para realizar las pruebas de pH, CE, CIC y AI (Tabla 4).

El análisis estadístico se realizó a partir de dichos datos y se estableció el siguiente arreglo factorial (Tabla 5), de acuerdo con la metodología planeada.

El ANOVA, expuso un coeficiente de correlación de Pearson de 0.87, indicando que el 87 % de los datos se ajustaron al modelo aplicado, con un p-valor de 0.0004 (< 0.05), expresando DES. El modelo tuvo como posibles fuentes de variación: los bloques, las propiedades y las concentraciones.

El test de Duncan para los bloques mostró DES (Figura 3), afirmando respuestas distintas de los suelos a las propiedades antes de las concentraciones propuestas, ello debido a que son suelos diferentes, arenoso (Morichal) y franco (Orocuál). Este comportamiento coincide con Méndez *et al.* (2007), donde también manifestaron comportamientos diferentes según el tipo de suelo estudiado.

Las concentraciones aplicadas demostraron la no existencia de DES (letras iguales) entre ellas (Figura 4), cuando se estudian como un conjunto. Es decir, no existen diferencias en las propiedades al aumentar o disminuir las concentraciones respecto al control, ello independiente del bloque.

Las propiedades de pH (P<sub>1</sub>), conductividad eléctrica (P<sub>2</sub>), capacidad de aluminio intercambiable (P<sub>3</sub>) e intercambio catiónico (P<sub>4</sub>) presentaron DES, dicho comportamiento es lógico porque sus escalas de medición no son iguales.

El estudio individual de las propiedades mostró respecto al pH, que para el suelo de Morichal, el efecto de los niveles de concentración de fluido de perforación con coque como controlador de filtrado provocó un aumento de la acidez del suelo en los niveles intermedios de concentración 2 (5.8), concentración 3 (5.93) y una disminución en el nivel de concentración 4 (5.46) respecto al suelo control (5.23). Orocuál en la medida en que se incrementó el nivel de concentración del fluido de perforación favoreció su acidificación, reflejando valores de 5.94 (control), 5.74 (concentración 2), 5.62 (concentración 3) y 5.46 (concentración 4). Ambos suelos poseen un pH acorde para la aplicación de la técnica de esparcimiento (pH: 5 – 8), según el Decreto 2635.

Estadísticamente se observaron comportamientos independientes de la concentración y tipo de suelo, lo que evidencia DES (p-valor <0.0001). La variación del pH además de afectar la actividad microbiana, también afecta la solubilización, adsorción y absorción de los contaminantes y de los iones (Staunton, 1996). El com-

Tabla 5. Arreglo factorial

Bloque	Concentración	Propiedad			
		P <sub>1</sub> (pH)	P <sub>2</sub> (CE)	P <sub>3</sub> (AI)	P <sub>4</sub> (CIC)
I (Morichal)	C1 (Control)	5.23	0,43	0.07	3.7
	C2 (2)	5.80	2.69	0.07	3.35
	C3 (3)	5.93	2.62	0.06	3.13
	C4 (4)	5.46	2.45	0.05	3.52
II (Orocuál)	C1 (Control)	5.94	1.81	0.05	7.43
	C2 ( )	5.74	2.62	0.07	7.83
	C3 (3)	5.62	3.17	0.08	7.9
	C4 (4)	5.46	3.85	0.09	8.13

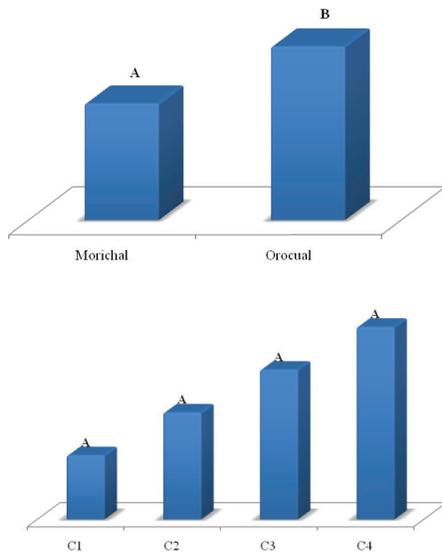


Figura 3. Test de Duncan para los bloques Morichal y Orocuál. Medias con letras en común no son estadísticamente diferentes ( $p > 0.05$ )

portamiento del parámetro concuerda con el descrito por Martínez & López (2001), quienes encontraron DES en el pH al variar la concentración del agente contaminante (Figura 5).

Los suelos examinados mantuvieron un pH moderadamente ácido, factor que no afectó el crecimiento del bioindicador. El frijol es un cultivo anual, se adapta a condiciones de escasez de agua, baja fertilidad y tolera condiciones de acidez de los suelos (Hernández & Valladares, 2012). Los valores del parámetro coinciden con López & Ojeda (1996), quienes explican que el pH ácido es característico de las sabanas venezolanas, sobre todo en los llanos orientales.

La CE para el suelo de Morichal evidenció que el suelo control poseyó un valor de 0.43 mmhos/cm, pero al agregar el fluido de perforación experimentó un aumento para la concentración 2 (2.60 mmhos/cm), mientras que para las concentraciones 3 y 4 ocurrió una leve disminución de 2.62 mmhos/cm y 2.45 mmhos/cm, respectivamente. Para el suelo de Orocuál, la tendencia fue de un comportamiento ascendente, es decir, aumentó a medida que se incrementó la dosis. Así, reflejó valores de 1.81 mmhos/cm (Control), 2.62 mmhos/cm (concentración 2), 3.17 mmhos/cm (concentración 3) y 3.85 mmhos/cm (con-

centración 4). De acuerdo con el Decreto 2635 (1998), el suelo de Morichal cumple tanto para la técnica de esparcimiento como de confinamiento ( $< 12$  y  $< 3.5$  mmhos/cm, respectivamente). Orocuál cumple para la técnica de esparcimiento, para confinamiento la concentración 4 está fuera del rango de permisivo.

La CE mostró DES ( $p$  – valor  $< 0.0001$ ) (Figura 6) y al igual que el pH una variación irregular no acorde con el aumento de la concentración. Su comportamiento irregular y la diferencia estadística presentada concuerda con el presentado por Martínez & López (2001).

Los valores de C.E del suelo de control de Morichal se consideraron no salinos (entre 0 y 2 mmhos/cm), y el de Orocuál de salinidad ligera (entre 2 y 4 mmhos/cm), la adición de las concentraciones conllevaron a aumentos de la CE que hacen que estos sean todos de salinidad ligera, lo cual impide la solubilización de sales presentes en el suelo.

Concerniente al AI, para el suelo de Morichal se observó que el suelo control reportó un valor de 0.067 meq./100 g suelo, para la concentración 2 ocurrió un ligero aumento (0.073 meq./100 g suelo), pero para las concentraciones 3 y 4 descendió a 0.06 meq/ 100g meq./100 g suelo y 0.053 meq./100 g suelo. En el caso de

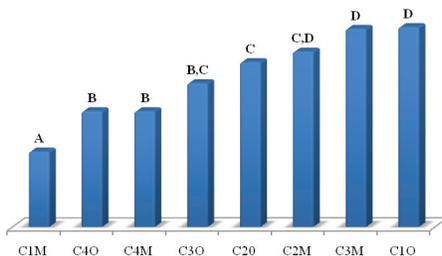


Figura 4. Test de Duncan para las concentraciones en estudio. Medias con letras en común no son estadísticamente diferentes ( $p > 0.05$ )

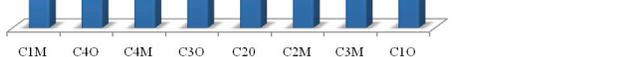


Figura 5. Test de Duncan para la propiedad de pH. Medias con letras en común no son estadísticamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Orocual el control presentó un valor de 0.053 meq./100 g suelo y a partir de él ocurrieron aumentos según el nivel de concentración de fluido de perforación, evidenciando valores de 0.067 meq./100 g suelo (concentración 2), 0.080 meq/ 100g suelo (concentración 3) y 0.093 meq./100 g suelo (concentración 4). Al comparar los resultados de las pruebas de AI con el Decreto 2635, la única técnica que lo considera es esparcimiento (< 1.5 meq/ 100g suelo) y todas las muestras de ambos suelos lo satisfacen.

La diferencia estadística en el AI fue significativa ( $p$  – valor = 0,0021) (Figura 7). Al igual que las propiedades anteriores para el suelo de Morichal se reflejó una variación irregular, no así para Orocual. El incremento del AI está asociado a la disminución de la CIC y al pH. Sin embargo, la variación de la propiedad a pesar de ocasionar DES se aproximan o están en el rango para la propiedad (0.68 – 0.96 meq./100 g de suelo) reportado por Hossne *et al.* (2009).

Un  $pH < 5.5$  es indicativo de la presencia de AI, según Rivera *et al.* (2016), la toxicidad del AI es probablemente el factor que más limita el crecimiento de las plantas en suelos fuertemente ácidos.

La tendencia asociada al suelo de Morichal referida a la CIC fue inestable porque ocurrieron aumentos en las concentraciones 2 (3.35 meq./100 g de suelo) y 4 (3.52 meq./100 g de suelo) y disminuyó en la concentración 3 (3.13 meq./100 g de suelo) respecto al blanco (3.27 meq./100 g de suelo). Para el suelo de Orocual, se mantuvo la tendencia al aumento con el nivel de concentración de fluido, obteniéndose valores de 7.43 meq./100 g de suelo (suelo control) y 7.83 meq./100 g de suelo, 7.9 meq./100 g de suelo y 8.13 meq./100 g de suelo para las concentraciones 2, 3 y 4, respectivamente. El Decreto 2635, no contiene rangos de toxicidad para este parámetro.

La desigualdad en el comportamiento conllevó a la presencia de DES en la propiedad ( $p$  – valor < 0.0001) (Figura 8). La tendencia inestable e independiente de la concentración del comportamiento de Morichal concuerda con el comportamiento reflejado por Martínez & López (2001), Orocual difiere.

Los valores de CIC menores a 10 Meq/100g suelo, son consecuencia del alto contenido de arena, del requerimiento de menos cantidad de caliza para corregir el pH, posibilidad de mayor lixiviación de nitrógeno y

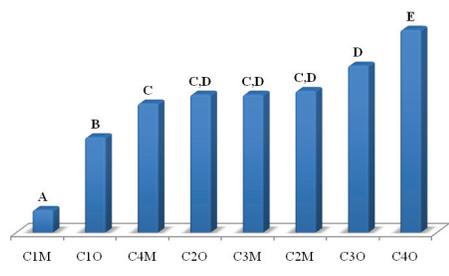


Figura 6. Test de Duncan para la propiedad de conductividad eléctrica (CE). Medias con letras en común no son estadísticamente diferentes ( $p > 0.05$ )

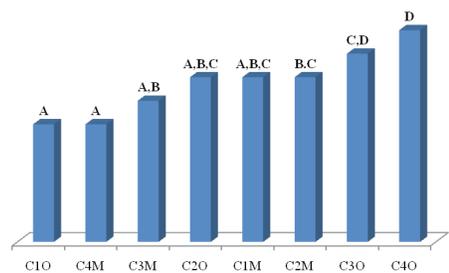


Figura 7. Test de Duncan para la propiedad de aluminio intercambiable (AI). Medias con letras en común no son estadísticamente diferentes ( $p > 0.05$ )

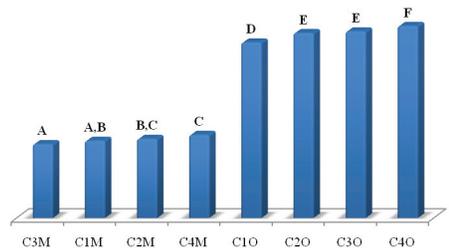


Figura 8. Test de Duncan para la propiedad de capacidad de intercambio catiónico (CIC). Medias con letras en común no son estadísticamente diferentes ( $p > 0.05$ )

potasio, baja capacidad de almacenamiento de agua y textura gruesa.

Los cambios en las propiedades químicas analizadas son menores a los reportados por Martínez & López (2001) al contaminar suelos con hidrocarburos, ello permite indicar que el fluido con coque de petróleo ocasiona menos impacto que los crudos o sus derivados.

El Decreto 2635 tiene como objetivo regular la recuperación de materiales y el manejo de los desechos cuando los mismos presenten características, composición o condiciones peligrosas, representando una fuente de riesgos a la salud de las personas y al ambiente (Castrillo *et al.*, 2013). En tal sentido, el posible uso del coque de petróleo como aditivo controlador de filtrado probado a nivel de laboratorio por Vega *et al.* (2016) y siendo este señalado como un producto contaminante, conllevó a su verificación ante el citado decreto, obteniéndose resultados satisfactorios, los cuales abren un abanico de oportunidades para el uso del coque de petróleo almacenado en grandes cantidades en la localidad de José en el estado Anzoátegui-Venezuela, como consecuencia de la producción de crudo pesado y extrapesado en la Faja Petrolífera del Orinoco.

Se ratificó que las diferencias o similitudes de las propiedades examinadas en la investigación con las reportadas en las diferentes literaturas pueden deberse al amplio rango de aditivos empleados en los fluidos de perforación y las diferentes concentraciones usadas, así como el tipo de suelo en estudio expresado por Mendez *et al.* (2007).

### CONCLUSIONES

Los suelos caracterizados fueron de tipo: arenoso (Morichal) y franco-arenoso (Orocual), presentando propiedades físicas típicas de los suelos llaneros orientales venezolanos.

El uso de coque de petróleo como controlador de filtrado en la formulación de fluidos de perforación base agua tipo lignosulfonato, no inhibió el crecimiento de las plantas de frijol (*Vigna unguiculata*) para las concentraciones en estudio.

El efecto de la adición del fluido de perforación en sus diferentes concentraciones ocasionó comportamientos disímiles en las propiedades: pH, conductividad eléctrica, aluminio intercambiable y capacidad de intercambio catiónico, según el tipo de suelo analizado.

Quedó demostrado que los suelos contaminados con este tipo de fluido pueden ser tratados mediante la técnica de esparcimiento, confirmando que el coque de petróleo puede sustituir al lignito como controlador de filtrado, sin ocasionar inconvenientes para el control,

recuperación y manejo de materiales y desechos peligrosos de la industria petrolera.

Estadísticamente, el estudio de las concentraciones como un todo evidenció la no existencia de diferencias estadísticas significativas entre ellas, lo que permite emplear la mayor concentración y aplicar la técnica de esparcimiento como tratamiento de los suelos en estudio. Pero, la relación suelo concentración en el estudio individual de las propiedades conllevó a comportamientos disímiles, Morichal independiente de la concentración y Orocual dependiente de ella, lo que ocasionó diferencias estadísticas significativas.

### REFERENCIAS

- American Society for Testing and Material-ASTM. (2014). ASTM D854. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. West Conshohocken: ASTM International.
- Asociación Española de Normalización-UNE. (2001). UNE 77308:2001 Calidad del suelo. Determinación de la conductividad eléctrica específica. Madrid: UNE.
- Asociación Española de Normalización-UNE. (2012). UNE-ISO 10390:2012. Calidad del suelo. Determinación del pH. Madrid: UNE.
- Asociación Española de Normalización-UNE. (2018). UNE-ISO 23470:2018 (Ratificada) Calidad del suelo. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CIC) y de cationes intercambiables. Madrid: UNE.
- Bouyoucos, G. (1962). Hydrometer method used for making particle size analyses of soils. *Agron J*, (54), 464-465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Castrillo, K., Otahola, V., Bello, N., Otahola, J. & Arenas, A. (2013). Uso de eisenia foetida como bioindicador de la toxicidad de ripsos de perforación base aceite generados en la industria petrolera. *RITI UDO*, 2 (2), 10-21.
- Constitución de la República Bolivariana de Venezuela. (1999). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, 5.453 (Extraordinaria), (Decreto Núm. 36.860 del 30 de diciembre de 1999). Caracas.
- De la Garza, F., Ortiz, Y., Macías, B., García, C. & Coll, D. (2008). Actividad biótica del suelo y la contaminación por hidrocarburos. *Rev. Latinoam. Rec. Nat.*, (4), 49-54.
- Decreto 2635. (1998). Gaceta Oficial Extraordinaria de la República de Venezuela 5245. Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos. Caracas.
- Díaz, M., Alarcón, A., Ferrera, R., Almaraz, J. & García, O. (2013). Crecimiento de Casuarina equisetifolia (Casuarinaceae) en suelo con diésel, y aplicación de bioestimulación y bioaumentación. *Rev. Biol. Trop.*, 61 (3), 1039-1052.

- Estrada, I., Hidalgo, C., Guzmán, R., Almaraz, J., Navarro, H. & Etchevers, J. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *AGROCIENCIA*, 51 (8), 813-831.
- Flores, L. & Alcalá, J. (2010). Geología UNAM. Obtenido de Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de física de suelos. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología. Departamento de Edafología. Recuperado de <http://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>
- García, Y., Ramírez, W. & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35 (2), 125-138.
- Hassan-Al-Haj, I. (2014). Characterization and thermal treatment of syrian petcoke fines. *Current Advances in Energy Research*, 1 (2), 62-66.
- Hernández, M. & Valladares, N. (2012). Evaluación del desarrollo vegetativo de 19 cultivares de frijol (*Vigna unguiculata* (L.) Walp), cultivados en Santa Bárbara, estado Monagas, Venezuela. *UDO Agrícola*, 12 (3), 505-521.
- Hossne, A., Mayorca, Y., Salazar, L., Subero, F. & Zacillo, A. (2009). *Humedad compactante y sus taminación*. Bogotá: ICONTEC.
- Laine, J. (2012). Perspective of the preparation of agrichar using fossil hydrocarbon coke. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (16), 5597-5602.
- López, D. & Ojeda, A. (1996). Alternativas en el manejo agroecológico de los suelos de sabana del norte de sudamérica. *Ecotropicos*, 9 (2), 99-115. <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/25730>
- Marín, T. (2016). Crecimiento de plantas de maíz (*Zea mays*) en un suelo contaminado con petróleo y remediado con extracto de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*). *Revista Enfoque UTE*, 7 (3), 1-13. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n3.101>
- Martínez, E. & López, F. (2001). Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas del suelo arcilloso. *Terra Latinoamericana*, 19 (1), 9-17.
- Mendez, J., Otaola, V., Pereira, R., Simoza, J., Tellis, L. & Zabala, E. (2007). Comparación del desecho de un fluido de perforación base agua no disperso con la fertilización química en el cultivo de frijol (*Vigna unguiculata* (L.) walp.). *IDESIA*, 25 (1), 7-20. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292007000100002>
- Mortola, N. & Lupi, A. (2011). Indicadores de calidad de suelo para el manejo sustentable de los agroecosistemas productivos en Argentina. VI Congreso Iberoamericano de Física y Química Ambiental. Ciudad de México.
- Ramírez, R. (1997). *Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos*. Santa Fe de Bogotá: Produmedios.
- Ramírez, R. (septiembre de 2020). Connectas.org. Recuperado en noviembre de 2020 de Venezuela contamina más de lo que produce y <https://www.connectas.org/especiales/pdvsa-contamina-mas-de-lo-que-produce/>
- Ramos, A., Da Silva, R. & Grillo, M. (2015). Analysis of petroleum coke consumption in some industrial sectors. *Journal of Petroleum Science Research*, 4 (1), 1-7.
- Rincón, M., Rincón, M., Robles, F., Severino, E., Labady, M. & Marcano, E. (2011). Preliminary Study on the use of petroleum coke as an agrichar. 19th Venezuelan Congresson Soil Science. Caracas.
- Rivera, Y., Moreno, L. & Herrera, M. R. (2016). La toxicidad por aluminio (Al<sup>3+</sup>) como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: el caso de la palma de aceite. *Revista Palmas*, 37 (1), 11-23.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J. & Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Montevideo: Universidad de la República.
- Shukla, M., Lal, R. & Ebinger, M. (2006). Determining soil quality indicators by factor análisis. *Soil Till. Res.*, (87), 194-204. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2005.03.011>
- Staunton, S. (1996). Effect of pH and some organic anions on the soil. *Eur J Soil Sci.*, (47), 231-239. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01394.x>
- UDSA. (S.F). USDA.gov. Recuperado en mayo de 2018 de Calculadora de Textura de Suelos y [https://nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p\\_054167](https://nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p_054167)
- Universidad de Caldas. (2011). *Edafología I*. Caldas: Espacio Gráfico Comunicaciones S.A.
- Vega, R., García, M., Rivas, C., Castillo, L., Figueroa, Y. & Hernández, O. (2016). Uso del coque del complejo petroquímico general de división José Antonio Anzoátegui como controlador de filtrado en fluidos base agua. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 37 (3), 137-146.
- Vega, R., León, M. & Lara, P. (2018). Coque de petróleo como controlador de filtrado en fluidos de perforación base aceite. *Enfoque UTE*, 9 (2), 188-197.
- Vega, R., Martínez, A. & Marquez, M. (2020). Efectos de un fluido base agua con coque de petróleo como controlador de filtrado sobre suelos. *Revista Cubana de Ingeniería*, XI (3), 33-42.
- Yáñez, A. & Cedeño, C. (2017). Análisis descriptivo de la afectación del sistema de vida de los habitantes de la parroquia de Dayuma causada por la industria petrolera en la Amazonía ecuatoriana. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 20 (4), 1180-1197.

#### Cómo citar:

Díaz-Azócar, A. A., Bravo-Santamaría, R. J. & Vega-Mejía, R. D. (2021). Efectos sobre suelos de un flujo de perforación con coque de petróleo como controlador de filtrado. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 22 (04), 1-10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.4.031>