

Evaluación del aceite de *Anacardium occidentale* como inhibidor de floculación de asfaltenos

Dany, Arriojas-Tocuyo¹; Tomás, Marín-Velásquez^{2*}

Resumen

En la investigación se evaluó, a nivel de laboratorio, al aceite de cáscaras de la semilla de *Anacardium occidentale* (CNLS), como inhibidor de floculación de asfaltenos. Se prepararon tres mezclas de CNLS en Diésel (40, 60 y 80% V/V) y se aplicaron cuatro dosis (2, 4, 6 y 8 µL) a 10 mL de una muestra de petróleo del Campo El Furrial, Venezuela, así como, el Diésel y el aceite puros, para un total de cinco productos evaluados a las cuatro dosis. Se midió como variable respuesta el Umbral de Floculación de los asfaltenos (UF), como el volumen de n-heptano aplicado al petróleo hasta observar en un microscopio óptico la formación de agregados. El diseño experimental fue factorial, con dos factores experimentales, Producto y Dosis y una variable respuesta UF, medida por triplicado para cada combinación producto-dosis. Se aplicó ANOVA factorial y test LSD de Fisher con $\alpha = 0,05$. Se obtuvo que el umbral de floculación fue dependiente de los dos factores de forma significativa ($p < 0,05$) y la presencia del CNLS en la mezcla produce efecto inhibidor, con un máximo de eficiencia de 43,6% para el producto al 80% CNLS a la dosis de 4 µL/10mL de petróleo.

Palabras clave: Precipitación, inhibidor de asfaltenos, floculación, *Anacardium occidentale*.

Evaluation of *Anacardium occidentale* oil as an asphaltene flocculation inhibitor

Abstract

In the investigation, *Anacardium occidentale* seed oil (CNLS) was evaluated at laboratory level as an asphaltene flocculation inhibitor. Three mixtures of CNLS in Diesel (40, 60 and 80% V/V) were prepared and four doses (2, 4, 6 and 8 µL) were applied to 10 mL of an oil sample from El Furrial Field, Venezuela, as well as, pure diesel and oil, for a total of five products evaluated at the four doses. The response variable measured was the Asphaltene Flocculation Threshold (UF), as the volume of n-heptane applied to the oil until the formation of aggregates was observed under an optical microscope. The experimental design was factorial, with two experimental factors, Product and Dose, and a UF response variable, measured in triplicate for each product-dose combination. Factorial ANOVA and Fisher LSD test were applied with $\alpha = 0.05$. It was obtained that the flocculation threshold was significantly dependent on the two factors ($p < 0.05$) and the presence of CNLS in the mixture produces an inhibitory effect, with a maximum efficiency of 43.6% for the product at 80% CNLS at a dose of 4 µL/10mL of oil.

Keywords: Precipitation, asphaltene inhibitor, flocculation, *Anacardium occidentale*.

Recibido: 10 de abril de 2020

Aceptado: 04 de Agosto de 2020

¹ MBA en Gerencia de la Industria de los Hidrocarburos; Gerencia de Calidad del Dato; Petróleos de Venezuela, Punta de Mata-Venezuela; arriojasd@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8192-9641>

² Magister en Gestión y Auditorías Ambientales; Docente de la Universidad de Oriente, Maturín- Venezuela; tmarin@protonmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3334-5895>

*Autor para correspondencia: tmarin@protonmail.com

I. INTRODUCCIÓN

El petróleo crudo es una mezcla de diversos hidrocarburos simples y complejos, principalmente saturados o parafinas, aromáticos, resinas y asfaltenos (Varjani, 2017). Los asfaltenos, representan, junto con las ceras parafínicas, la fracción sólida dentro de la composición del petróleo crudo y están formados por una compleja mezcla de moléculas aromáticas que están contenidos en la mayoría de los petróleos crudos producidos en el mundo, así como también en los residuos de su procesamiento y también en el del carbón (Zuo, Qu & Shen, 2019).

Por otro lado, los asfaltenos son considerados la fracción polidispersa más pesada y polarizable del petróleo crudo (Vargas, Creek & Chapman, 2010). Los asfaltenos, por su complejidad, no tienen una estructura molecular definida, por lo que se clasifican según la teoría de la solubilidad; es decir, los asfaltenos son sustancias químicas que son solubles en disolventes aromáticos como el tolueno, el benceno o el xileno, pero insolubles en disolventes parafínicos como el *n*-pentano o el *n*-heptano (Kuang *at al.*, 2016). Estructuralmente están constituidos por anillos poliaromáticos unidas por cadenas alifáticas laterales.

Según describen Li *et al.* (2020) los asfaltenos son compuestos sólidos, de apariencia fina y su color va de negro a marrón oscuro, con peso molecular en el rango de entre mil a 50 mil UMA (Unidad de Masa Atómica). Al ser componentes sólidos, que forman parte de la composición del petróleo, se ha definido su estado como de sólidos suspendidos coloidalmente dentro de la fase líquida constituida por hidrocarburos saturados y aromáticos, estabilizados por una capa de resina (García-James, Pino, Marín & Maharaj, 2012; Romero, Feitosa, Ribeiro & Batista, 2018). Esta denominada teoría coloidal, fue propuesta por Mansoori (1997) y supone que la estabilidad de los asfaltenos depende de la interacción entre las resinas, los asfaltenos y el resto de los componentes del petróleo crudo.

El sistema coloidal formado por la unión de los asfaltenos y las resinas (micelas) y los componentes líquidos del petróleo crudo, se encuentra en un estado de pseudo equilibrio termodinámico (Li *et al.*, 2020) por lo que cambios en las condiciones de temperatura, presión, composición y régimen de flujo causan la desestabilización del sistema,

propiciando la separación y agregación de las partículas de asfaltenos, formando depósitos que producen taponamiento de tuberías y equipos de procesos (Soltani, Reisi & Norouzi, 2019).

Los depósitos de asfaltenos generan problemas en todas las fases de la producción petrolera. Puede causar daños en la formación en las regiones cercanas a los pozos de petróleo por la obstrucción parcial o total del espacio poroso (Kraiwattanawong *et al.*, 2009). Pueden obstruir el fondo del pozo y tuberías de producción y equipos de superficie (Alimohammadi, Zendejboudi & James, 2019). Durante el transporte de petróleo crudo, la precipitación y la deposición de asfaltenos pueden obstruir los oleoductos y asentarse en los buques cisternas (Li, Chia, Guoa & Sun, 2019). En las refinerías, los asfaltenos pueden depositarse en las columnas de destilación, ensuciar los intercambiadores de calor y también causar la desactivación de los catalizadores (Ghosh, Chaudhuri, Kumar & Panja, 2016). Estos problemas conducen a una pérdida significativa de productividad y a un alto costo para la remoción de los taponamientos.

La inhibición y estabilización de los asfaltenos es fundamental para mantener la productividad de los pozos petroleros que producen petróleos inestables, es decir petróleos que tiene tendencia a formar depósitos de asfaltenos (Ashoori, Sharifi, Masoumi & Salehi, 2017). La técnica más utilizada para estabilizar los asfaltenos, es la inhibición de la formación de agregados mediante la aplicación de productos químicos que intervienen en el proceso de floculación de las partículas de asfaltenos y las mantienen en suspensión (Paridar, Solaimany & Karimi, 2018). Los productos químicos utilizados están formulados a base de disolventes orgánicos aromáticos y resinas sintéticas; la función es reforzar la capa estabilizante natural y dispersar las partículas evitando que se atraigan y formen agregados (Li *et al.*, 2020).

Al ser los productos inhibidores y dispersantes de asfaltenos formulados a partir de resinas sintéticas, su costo de producción es alto y, aun cuando se aplican en cantidades pequeñas (ppm o $\mu\text{L}/\text{L}$), su uso continuo genera gastos importantes a la industria. Adicionalmente, son difíciles de degradar y, al entrar en contacto con el suelo o el agua, genera un problema ambiental (Machalowski *et al.*, 2020). Lo anterior ha llevado al estudio productos alternativos de menor

costo y menos agresivos para el ambiente, no solo para el tratamiento de los asfaltenos, sino para todas las operaciones de tratamiento del petróleo.

Los aceites vegetales son estudiados como sustitutos de las resinas sintéticas en el tratamiento del petróleo, como el uso del aceite de coco para el tratamiento de las emulsiones de agua en petróleo (Saat, Chin & Wong, 2020) o como estabilizante de asfaltenos (Marín, 2019). Otro aceite vegetal utilizado como estabilizante de asfaltenos proviene de la semilla de *Jatropha curcas* (Marín, Marcano & Febres, 2016) demostró ser eficiente y con potencial para su uso a nivel de campo. Igualmente se evaluaron ácidos grasos obtenidos de aceites vegetales, que a pesar de su menor eficiencia en comparación con una resina sintética, demostró que causa un efecto inhibidor positivo; adicional, se producen de forma natural, son respetuosos con el ambiente y rentables, sustitutos adecuados de los productos comerciales (Alrashidi, Afra & Nasr-El-Din, 2019). Otros aceites vegetales que han sido estudiados y que ha mostrado actividad inhibidora de la floculación y precipitación de asfaltenos, se encuentran: aceite de nabo, aceite de almendra amarga, aceite de sésamo, aceite de manzanilla, aceite de jengibre, aceite de avellana, aceite de oliva y el aceite de romero.

El *Anacardium occidentale* es un árbol originario, de la América tropical, perteneciente a la familia Anacardiaceae. El árbol tiene diversos usos como la madera, el pseudo fruto comestible con un alto valor nutricional de 47% de grasa, 21% de proteína y 22% de carbohidratos, vitaminas y aminoácidos (Lafont, Páez & Portacio, 2011), y su semilla tipo nuez de forma arriñonada compuesto por proteína, fibra y grasa (Salehi et al., 2019).

De la cáscara que envuelve a la nuez (pericarpio) se obtiene un aceite de color marrón oscuro denominado CNSL (*Cashew Nut Shell Liquid*), principalmente de compuestos fenólicos que combinan el carácter aromático con largas cadenas alifáticas, ácido anacárdico, cardol y cardanol; este último es el más abundante y está presente en cantidades que varían desde el 68% hasta el 95% (Nunes et al., 2019).

Considerando las características aromáticas y resinosas del CNSL y los resultados positivos observados en las investigaciones citadas, al utilizar aceites vegetales, se decidió investigar a nivel de laboratorio, su posible uso como componente activo

inhibidor de la floculación de asfaltenos, como una alternativa rentable y ecoamigable, aplicado a un petróleo crudo del oriente venezolano, debido a que en esta zona se producen petróleos inestables, es decir que tienen tendencia a generar precipitación de asfaltenos, que generan taponamiento de.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización de las muestras de petróleo crudo.

La muestra de petróleo crudo utilizada se obtuvo de un pozo productor del Campo El Furrial, ubicado en la población del mismo nombre en el Estado Monagas, Venezuela. La misma fue proporcionada por personal de operaciones de Petróleos de Venezuela (PDVSA), en envase plástico de un galón de capacidad y almacenada refrigerada a 4°C en el Laboratorio de Procesamiento de Hidrocarburos de la Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas, Venezuela, en donde además se realizaron todos los ensayos correspondientes. Dicha muestra fue caracterizada para obtener propiedades básicas como Gravedad API según norma estándar ASTM D287 (2012), Viscosidad dinámica por la norma ASTM D2196 (2018), porcentaje de agua y sedimentos según norma ASTM D4007 (2016) y composición SARA aplicando el procedimiento descrito en la norma ASTM D2007 (2011). A partir de los resultados el análisis SARA, se determinó el índice de estabilidad coloidal mediante la ecuación 1, descrita por Ghosh, Chaudhuri, Kumar y Panja (2016)

$$CII = \frac{(\%Saturados + \%Asfaltenos)}{(\%Aromáticos + \%Resinas)} \quad (1)$$

También se determinó su umbral de floculación de asfaltenos (UF) mediante el principio de titulación con n-heptano (*Oliensis Spot Test Number*) modificado mediante microscopía óptica (Abrahamsen, 2012; Kraiwattanawong et al., 2009; Marín, 2019).

En el procedimiento para determinar el UF se aplica n-heptano en proporciones sucesivas de 0,5 mL a una muestra de 10 mL de petróleo crudo sometido a agitación y temperatura constante de 25 °C. Luego de agitar por 5 min, por cada aplicación se extrajo una alícuota del petróleo crudo y se observó en un microscopio óptico con ocular 10X para constatar la

formación de los flóculos de asfaltenos, anotándose el volumen total de n-heptano (mL) utilizado como el UF de los asfaltenos, en caso de no observarse

flóculos, se repite el proceso desde la adición de 0,5 mL más de n-heptano. El esquema se muestra en la Figura 1.

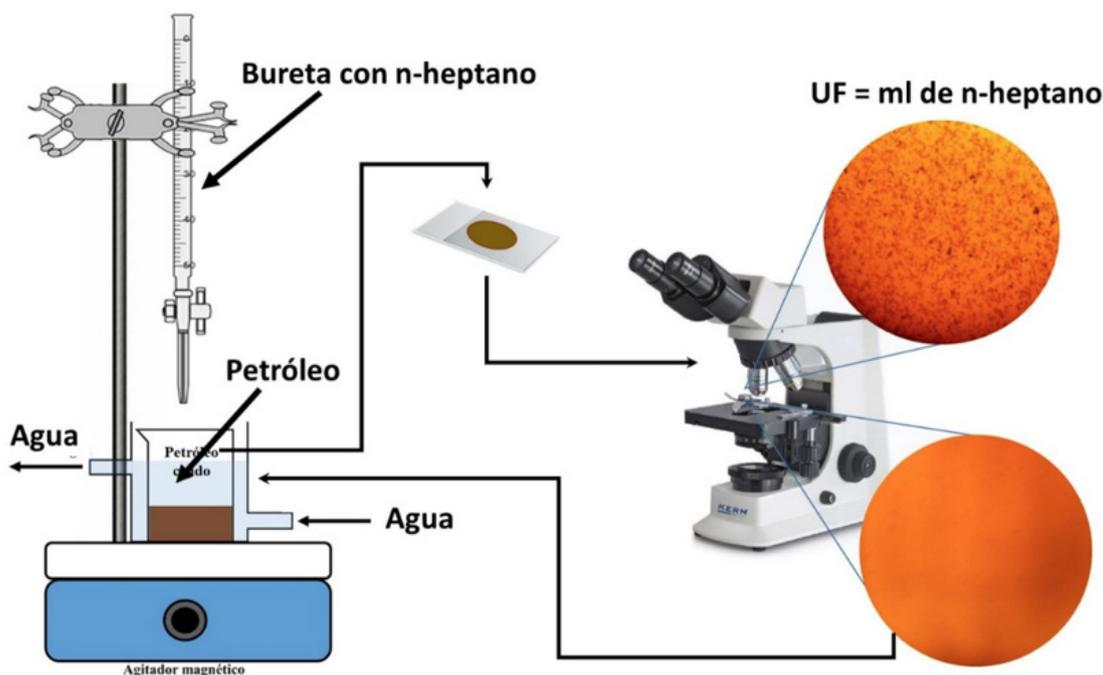


Figura 1. Esquema del ensayo para determinar UF. Fuente: Arriojas y Marín (2020)

Obtención del aceite de cáscaras de *A. occidentale* (CNSL)

Las cáscaras de *A. occidentale* fueron obtenidas de frutos recolectados en la población de El Furrial y poblaciones vecinas (Musipán y Punta de Mata). Se escogieron cáscaras de pseudo frutos maduros y se separaron manualmente de la nuez, se trituraron igualmente de forma manual y se secaron en estufa de laboratorio a una temperatura de 80 °C para eliminar el exceso de humedad.

Para la extracción del aceite se utilizó un equipo Soxhlet de 500 mL de capacidad y se utilizó como disolvente n-hexano grado analítico. La extracción se realizó con una proporción de 300 mL de disolvente por 30 g de cáscara triturada y seca. El proceso se realizó durante cuatro horas. El extracto se concentró

en un rotoevaporador y se almacenó en frascos de vidrio a condiciones de laboratorio (25 °C)

Preparación de productos a evaluar

Se prepararon tres productos con tres concentraciones de CNSL como componente activo y combustible Diésel como disolvente (40, 60 y 80% CNSL), para evaluar el efecto de la concentración del aceite sobre el UF de asfaltenos. Las mezclas fueron aplicadas al petróleo crudo en cuatro dosis (2, 4, 6 y 8 µL por 10 mL de petróleo). Adicionalmente se aplicó Diésel puro y NCSL puro en las mismas dosis. Luego de aplicar el producto al petróleo crudo, se procedió a determinar el UF de los asfaltenos y se comparó con el UF original, con lo que se obtuvo la Actividad Inhibidora Relativa Porcentual (ARP) mediante la ecuación 2.

$$ARP = \frac{UF_{dosificado} - UF_{Original}}{UF_{Original}} \times 100 \quad (2)$$

Diseño experimental

Se estableció un diseño experimental factorial, con dos factores (Producto y Dosis) y una variable respuesta (UF). El diseño seleccionado tiene

60 ejecuciones, con 1 una muestra tomada en cada ejecución. El modelo fue de Interacciones de 2 factores con 22 coeficientes. Los factores experimentales se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de los factores experimentales

Factor	Nomenclatura	Nivel
Producto	P0	0% CNSL
	P1	40% CNSL
	P2	60% CNSL
	P3	80% CNSL
	P4	100% CNSL
Dosis	D2	2 µL de producto
	D4	4 µL de producto
	D6	6 µL de producto
	D8	8 µL de producto

Fuente: elaboración propia

Cada valor de UF se obtuvo por triplicado, lo que representó un total de 60 ensayos.

Tratamiento estadístico de los resultados

Los resultados fueron sometidos a una prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, para establecer si se aplicaba estadística paramétrica o no paramétrica. El resultado de esta prueba arrojó un valor de significancia $p = 0,2149$ el cual al ser mayor que $\alpha = 0,05$ indicó que no se puede rechazar la hipótesis de que UF proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

De acuerdo a lo anterior se aplicó la prueba de varianza ANOVA con análisis múltiple de rangos basado en la Diferencia Mínima Significativa de Fisher (LSD) con significancia $\alpha = 0,05$. Para el análisis del diseño experimental, se utilizó el paquete estadístico Statgraphics Centurion XVII.

III. RESULTADOS

Las propiedades obtenidas al caracterizar la muestra de petróleo crudo utilizada se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades de la muestra de petróleo crudo

Propiedad	Valor	Unidad
Gravedad API	27,4	°API
Viscosidad a 25°C	17,7	cP
%AyS	0,1	%
%Saturados	50,5	%
%Aromáticos	21,2	%
%Resinas	5,1	%
%Asfaltenos	3,1	%
%Volátiles	20,1	%
UF	7,8±0,3	mLC7

Fuente: elaboración propia

De acuerdo a las características obtenidas, el petróleo se clasifica como mediano o medio (API entre

22 y 32). El porcentaje de agua y sedimentos (%AyS) de 0,1 indica que el petróleo contiene poca agua, es

decir es un petróleo seco o limpio. En cuanto a la composición SARA, se observa una mayor cantidad de compuestos saturados y aromáticos (71,7%),

El valor de CII calculado a través de la ecuación 1 dio como resultado 2,03 valor que se interpreta como de un petróleo crudo inestable ($CII \geq 0,9$) es decir tiene tendencia producir precipitación de asfaltenos (Ghosh et al., 2016). El UF indica que se

necesitan $7,8 \pm 0,3$ mL de n-heptano para iniciar la formación de agregados por cada 10 mL de petróleo crudo (0,75 a 0,81 mL/mL). Este valor de UF original es la referencia para determinar si los tratamientos mejoran la estabilidad, produciendo un aumento de éste.

En la Tabla 3 se muestran los resultados de UF obtenidos al aplicar los tratamientos al petróleo crudo.

Tabla 3. Umbrales de Floculación obtenidos al aplicar los tratamientos en mL de n-heptano.

Producto	Dosis μ L	UF promedio	DE
PO	2	7,8	0,3
	4	7,8	0,3
	6	7,3	0,3
	8	7,8	0,3
P1	2	8,7	0,3
	4	8,7	0,3
	6	8,3	0,3
	8	8,0	0,5
P2	2	7,8	0,3
	4	8,5	0,5
	6	9,8	0,3
	8	9,7	0,6
P3	2	9,7	0,6
	4	11,2	0,3
	6	9,5	0,9
	8	8,7	0,6
P4	2	9,2	0,3
	4	9,7	0,6
	6	10,3	0,6
	8	10,5	0,5

Fuente: elaboración propia

En la tabla 3 se observa una tendencia a aumentar el UF de la muestra de petróleo crudo luego de la aplicación de los tratamientos. En el caso del PO, que fue la aplicación de Diésel puro, los valores de UF se mantuvieron iguales a los del petróleo original (7,8 mL n-heptano) y se observó que en la dosis de

6 μ L este valor fue incluso menor al obtenerse 7,3 mL de n-heptano en promedio. Los tratamientos con los mayores valores de UF fueron P3 y P4, que representan 80% de CNSL en Diésel y 100% CNSL. En la Figura 2, se muestran microfotografías obtenidas de los agregados de asfaltenos.

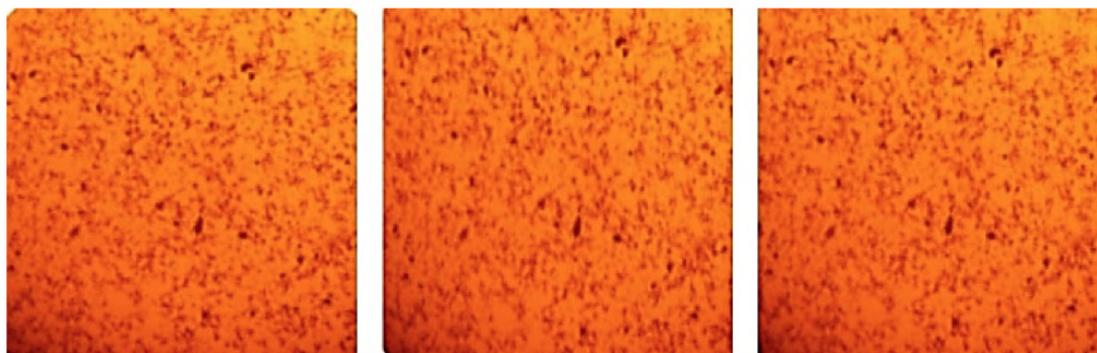


Figura 2. Microfotografías de flóculos de asfaltenos obtenidos al aplicar n-heptano a la muestra de petróleo crudo.

En la Tabla 4 se muestran los resultados del cálculo de la actividad inhibidora relativa porcentual para cada uno de los tratamientos aplicados.

Tabla 4. Actividad Inhibidora Relativa Porcentual de los tratamientos aplicados a la muestra de petróleo crudo.

Producto	Dosis μL	ARP
PO	2	0,0
	4	0,0
	6	-6,4
	8	0,0
P1	2	11,5
	4	11,5
	6	6,4
	8	2,6
P2	2	0,0
	4	9,0
	6	25,6
	8	24,4
P3	2	24,4
	4	43,6
	6	21,8
	8	11,5
P4	2	17,9
	4	24,4
	6	32,1
	8	34,6

Fuente: elaboración propia

Se observa que en el caso del tratamiento PO (100% Diésel) no se observó actividad inhibidora en ninguna de las dosis aplicadas, llegando incluso a ser un valor negativo para la dosis D6, indicando que la aplicación de Diésel puro al petróleo crudo no genera ningún cambio en el comportamiento de estabilidad de los asfaltenos presentes.

La presencia del CNSL en la mezcla con Diésel produce una eficiencia inhibidora desde P1 (40% CNSL) sin embargo a esta concentración se alcanza una ARP máxima de 11,5% a las dosis más bajas (D2 y D4). Para el producto P2, se observó un comportamiento inverso al P1, ya que las mayores ARP fueron a las dosis mayores D6 y D8, alcanzando

una eficiencia máxima de 25,6% a D6, superando al producto anterior. La máxima eficiencia se obtiene con el producto P3 a una dosis D4 de 43,6%. En el caso del P4 (100% CNSL) las eficiencias fueron

menores al P3, con un ARP mayor a la dosis D8 de 34,6%.

Luego de la obtención de los resultados e procedió a realizar el análisis de varianza ANOVA factorial y los resultados se observan en la Tabla 5

Tabla 5. Análisis de Varianza para UF

Factores	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	p-valor
A:Producto	42,0167	4	10,5042	0,0000
B: Dosis	4,3125	3	1,4375	0,0013
AB	22,25	12	1,85417	0,0000
Residuos	4,8	24	0,2	
Total	77,2458	59		

Fuente: elaboración propia

Los p-valor de la tabla ANOVA son todos menores que 0,05 lo que indica que los dos factores estudiados (Producto y Dosis) tiene influencia significativa sobre la variable UF, con un nivel de confianza de 95%. De igual forma la interacción entre ambos factores, también ejerce influencia significativa, es decir la combinación Producto-Dosis es significativa cuando

se determina el UF de los asfaltenos en la muestra de petróleo crudo utilizada.

Para establecer las diferencias o similitudes entre cada uno de los tratamientos y sus niveles se aplicó el test LSD de Fisher, cuyos resultados, para los factores experimentales, se observan en la gráfica de medias mostrada en las Figura 3 y 4.

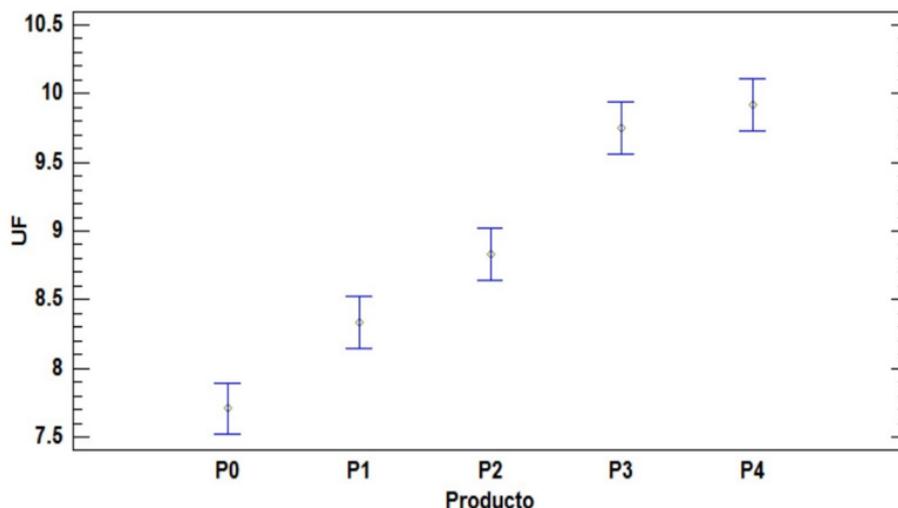


Figura 3. Gráfico de medias y 95% LSD de Fisher para la variable UF por el factor Producto

En la Figura 3 se observa como las medias entre los productos P0, P1 y P2 muestran diferencias estadísticas significativas entre ellas, pues el rango de medias no se cruzan entre ellas, es decir no hay coincidencia de medias entre estos tratamientos

con un nivel de confianza de 95%. Sin embargo, al observar las medias de los productos P3 y P4, se observa que los rangos de los mismos se cruzan o traslapan, lo que significa que no existe diferencia significativa entre ellas con un nivel de confianza de 95%.

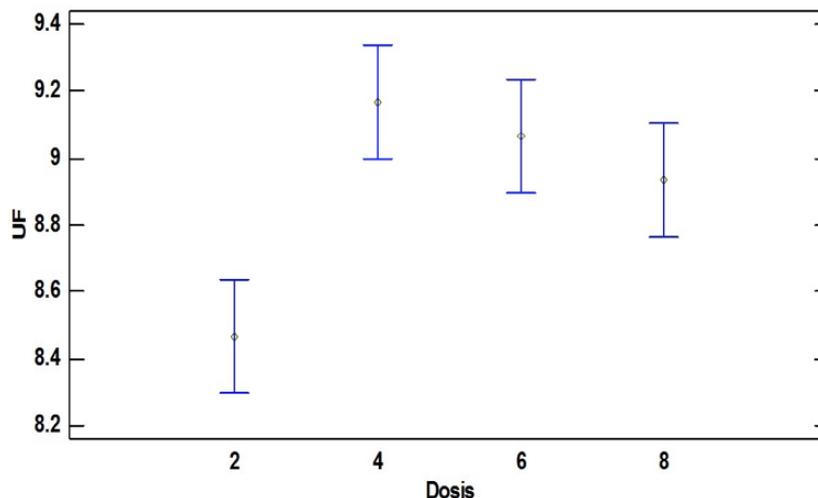


Figura 4. Gráfico de medias y 95% LSD de Fisher para la variable UF por el factor Dosis

Se observa que la dosis D2 (2 μ L) fue con la que se obtuvo el menor rango de UF y que además tiene diferencia estadística significativa respecto a las otras tres dosis con un nivel de confianza de 95%. El resto de las dosis aplicadas, aun cuando muestran diferencias en sus medias, estas no son significativas, ya que sus rangos de medias se traslapan, lo que indica que son estadísticamente iguales con un nivel de confianza de 95%. A pesar de lo anterior, se destaca la dosis D4 (4 μ L) con el mayor rango de UF. De acuerdo a lo mostrado en la tabla ANOVA (Tabla 5) la interacción entre los factores influye de forma significativa en los valores de UF obtenidos, por lo que se puede asegurar que para este estudio particular, la mejor combinación Producto-Dosis, es la P3-D4, por ser con la que se obtiene la mayor eficiencia inhibidora de asfaltenos.

IV. DISCUSIÓN

Los valores obtenidos de UF, mostrados en la tabla 3, evidencian un efecto positivo del aceite de *A. occidentale* como inhibidor de floculación de asfaltenos, pues los mismos fueron mayores al UF original del petróleo y mientras mayor es el UF, significa que más estables se encuentran los asfaltenos en el petróleo crudo (Zheng *et al.*, 2019). En relación a los valores mostrados en la tabla 4, se evidencia que la composición del producto inhibidor es fundamental para lograr la inhibición y dispersión de los asfaltenos, sobre todo se necesita que el producto contenga resinas o compuestos

surfactantes (Goual, Sedghi, Wang & Zhu, 2014) los cuales no están presentes en este derivado del petróleo, cuya composición es mayoritariamente hidrocarburos saturados (parafinas y neftenos) y aromáticos (Bacha *et al.*, 2007; Ghosh, 2008) por tal razón no se obtiene actividad inhibidora al aplicar 100% Diésel a la muestra de petróleo. Al aplicar los productos elaborados al mezclar el CNSL con Diésel, se observa que se produce actividad inhibidora, y la ARP máxima obtenida con el producto P3 a una dosis D4 de 43,6% coincide con el reportado por Kuang *et al.* (2019) de 43% al usar un inhibidor comercial a una muestra de petróleo crudo de Texas, USA, mediante la aplicación de la prueba de Dispersión de Asfaltenos (ADP). La disminución de la eficiencia para el producto P4 compuesto de 100% CNSL, indica que el aceite de *A. occidentale*, para la muestra de petróleo estudiada fue más eficiente como inhibidor de la floculación de asfaltenos, aplicado en mezcla con Diésel en proporción 80:20, debido a que supera al aceite puro en ARP.

Chávez-Miyauchi *et al.* (2013) mostraron un aumento en la cantidad de n-heptano necesario para obtener el UF de un petróleo crudo pesado mexicano, al ser tratado con un producto químico comercial inhibidor/dispersante de asfaltenos, medido a través de adsorción de luz visible de 22,8% valor que fue superado por los productos P2, P3 y P4 utilizados en la presente investigación. Lo anterior también demuestra que el CNSL presenta propiedades inhibidoras de la floculación de asfaltenos y que

puede llegar a superar a productos comerciales. Un punto importante que se debe tomar en cuenta, es la influencia de la composición, tanto del CNSL, como del propio petróleo que se utilizó en la investigación, ya que se ha demostrado que la eficiencia de los inhibidores de asfaltenos varía significativamente en función al tipo de petróleo crudo y por ende de su composición (Bello, Manzano & Marín, 2015). Así mismo los compuestos fenólicos y ácidos grasos presentes en el CNSL, actúan como surfactantes (Sánchez *et al.*, 2015; Taiwo, 2015) lo que retarda la formación de los agregados de asfaltenos por la acción del n-heptano, aumentando el UF.

La comparación estadística entre las medias de los UF en función al factor producto, muestra que al aumentar la concentración de CNSL en la mezcla con Diésel, también aumenta el UF de los asfaltenos en la muestra de petróleo crudo y que dicho aumento es significativo hasta la concentración de 80%, para luego mantenerse estable y constante hasta el 100% CNSL. Este resultado permite asegurar que el producto más indicado para el tratamiento de la muestra de petróleo, sería el P3, pues utiliza menos CNSL y si se utiliza más de este aceite, el resultado sería estadísticamente no significativo, además este producto fue el que produjo el mayor cambio en el UF, con el mayor porcentaje de eficiencia puntual de 43,6%.

Para la inhibición de la floculación de asfaltenos, se han investigado diferentes compuestos, en su mayoría químicos sintéticos, como alquiles de cadena larga que han demostrado efectividad al aplicarse a muestras de petróleo Maya Mexicano, a una concentración de 0,1 g/L (Chávez-Miyauchi *et al.*, 2013) lo que contrasta con el resultado obtenido en la presente investigación, donde la concentración más eficiente fue de 0,4 $\mu\text{L}/\text{mL}$ (0,4 mL/L) que tomando en cuenta una densidad de P3 de 0,8453 g/mL, representa 0,33 g/l. En investigaciones con aceites vegetales, como el de coco y de andiroba, se reportaron resultados eficientes con mayores concentraciones 50 g/L al aplicarlo a un petróleo crudo ligero de Kuwait (Alrashidi *et al.*, 2019). Así mismo, el aceite de coco también mostró eficiencia máxima al ser aplicado a dos muestras de petróleo crudo mediano venezolano, específicamente del Estado Monagas, a una dosis de 0,8 $\mu\text{L}/\text{mL}$ (Bello *et al.*, 2015) lo que indica que el aceite extraído de

la cáscara de la semilla de *A. occidentale* muestra eficiencia a una menor dosis sobre muestras similares. Un resultado coincidente, fue obtenido por Marín *et al.* (2016) con una muestra de petróleo crudo de la misma área de estudio (Campo El Furrial) y también de grado mediano, al aplicar aceite de *Jatropha curcas*, con un resultado de mayor ARP a una dosis de 0,4 $\mu\text{L}/\text{mL}$.

Otros aceites vegetales utilizados en investigaciones anteriores, como los de nabo, almendra negra y sésamo, demostraron ser eficientes como inhibidores de asfaltenos, pero con concentraciones más altas de 1 g/L, al ser aplicados a un petróleo crudo liviano iraní (Mardani *et al.*, 2018) por lo que al comparar con lo obtenido con el aceite de *A. occidentale*, se observa una mayor eficiencia de este último, sin embargo se debe tomar en cuenta que los aceites mencionados se aplicaron a muestras con diferentes características en cuanto a su composición, debido a sus distintos lugares de procedencia. La importancia de la composición del petróleo crudo sobre la eficiencia de los productos inhibidores de asfaltenos, fue observada por Bello *et al.* (2015). Así mismo, Gabrienko, Martyanov y Kazarian (2015) concluyeron que el efecto de la composición está en función de la relación porcentual de los componentes SARA del petróleo y en especial la relación entre las resinas y los asfaltenos. Igualmente, García y Carbognani (2001) mencionan que la relación entre los saturados y los asfaltenos, también es fundamental en el comportamiento y la eficiencia de los productos inhibidores de asfaltenos. Por otro lado, la influencia de la composición del petróleo crudo sobre los inhibidores de asfaltenos fue explicada por Wang y Buckley (2003) como una función de la composición de los mismos asfaltenos, así como, por el tipo de disolvente utilizado para obtener el UF, es decir, los asfaltenos floculados por parafinas de menor peso molecular, son más estables que las fracciones de distribución estrecha floculadas por parafinas de mayor peso molecular (Pereira *et al.*, 2011).

V. CONCLUSIONES

El efecto del CNSL en las mezclas se comprobó al comparar con el uso del Diésel puro, el cual no mostró eficiencia inhibidora. La mezcla con la que se determinó la mayor eficiencia inhibidora fue la

formada por 80% CNSL a una dosis de aplicación de 4 μ L en 10 mL de petróleo crudo, seguida por el CNSL al 100% aplicado a una dosis de 8 μ L en 10 mL de petróleo crudo, las cuales no mostraron diferencias significativas entre ellas. El análisis estadístico mostró que los dos factores experimentales evaluados (Producto y Dosis) son estadísticamente influyentes sobre los valores del umbral de floculación de los asfaltenos (UF), al igual que la interacción entre ambos con un nivel de confianza de 95%.

Se comprobó que el CNSL presenta actividad inhibidora sobre los asfaltenos de la muestra de petróleo crudo estudiada, lo que demuestra su potencial como componente activo en productos para el tratamiento de la precipitación de asfaltenos, lo que podría significar una alternativa en la minimización de este problema, que está presente en los procesos de producción petrolera.

VI. REFERENCIAS

Abrahamsen, E.L. (2012). *Organic flow assurance: Asphaltene dispersant/inhibitor formulation development through experimental design*. Stavanger: Schlumberger Limited.

Alimohammadi, S., Zendehboudi, S., & James, L. (2019). A comprehensive review of asphaltene deposition in petroleum reservoirs: Theory, challenges, and tips. *Fuel*, 252, 753-791. doi: 10.1016/j.fuel.2019.03.016

Alrashidi, H., Afra, S., & Nasr-El-Din, H.A. (2019). Application of natural fatty acids as asphaltene solvents with inhibition and dispersion effects: A mechanistic study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 172, 724-730. doi: 10.1016/j.petrol.2018.08.066

Arriojas, D.D.J., & Marín, T.D. (2020). Análisis comparativo de la eficiencia estabilizadora de asfaltenos del aceite de cáscara de Anacardium occidentale y productos comerciales. *Enfoque UTE*, 11(3), 111-123. doi: 10.29019/enfoque.v11n3.643

ASTM D287. (2012). *Standard Test Method for API Gravity of Crude Petroleum and Petroleum Products (Hydrometer Method)*. USA: American Society of Testing Materials.

ASTM D2007. (2011). *Standard Test Method for Characteristic Groups in Rubber Extender and Processing Oils and Other Petroleum-Derived Oils by the Clay-Gel Absorption Chromatographic Method*. USA: American Society of Testing Materials.

ASTM D2196. (2018). *Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational Viscometer*. USA: American Society of Testing Materials.

ASTM D4007. (2016). *Standard Test Method for Water and Sediment in Crude Oil by the Centrifuge Method (Laboratory Procedure)*. USA: American Society of Testing Materials.

Ashoori, S., Sharifi, M., Masoumi, M., & Salehi, M.M. (2017). The relationship between SARA fractions and crude oil stability. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26, 209-213. doi: 10.1016/j.ejpe.2016.04.002

Bacha, J., Freel, J., Gibbs, A., Gibbs, L., Hemighaus, G., Hoekman, K., Horn, J., et al. (2007). *Diesel Fuels Technical Review*. USA: Chevron Corporation.

Bello, Y.B., Manzano, J.R., & Marín, T.D. (2015). Análisis comparativo de la eficiencia dispersora de asfaltenos de productos a base de aceite de coco (*Cocos nucifera*) como componente activo y dispersantes comerciales aplicados a muestras de petróleo del Campo el Furrial, Estado Monagas, Venezuela. *Revista Tecnológica ESPOL – RTE*, 28(2), 51-61.

Chávez-Miyauchi, T.E., Zamudio-Rivera, L.S., Barba-López, V., Buenrostro-Gonzalez, E., & Martínez-Magadán, J.M. (2013). N-aryl amino-alcohols as stabilizers of asphaltene. *Fuel*, 110, 302-309. doi: 10.1016/j.fuel.2012.10.044

Gabrienko, A.A., Martyanov, O.N., & Kazarian, S.G. (2015). Effect of Temperature and Composition on the Stability of Crude Oil Blends Studied with Chemical Imaging In Situ. *Energy & Fuels*, 29(11), 7114-7123. doi: 10.1021/acs.energyfuels.5b01880

García, M.D.C., & Carbognani, L. (2001). Asphaltene-Paraffin Structural Interactions. Effect on Crude Oil Stability. *Energy & Fuels*, 15(5), 1021-1027. doi: 10.1021/

ef0100303

García-James, C., Pino, F., Marín, T., & Maharaj, U. (2012). Influence of Resin/Asphaltene Ration on Paraffin Wax Deposition in Crude Oils from Barrackpore Oilfield in Trinidad. *SPE Journal*, 158106, 1-12. doi: 10.2118/158106-m

Ghosh, A.K., Chaudhuri, P., Kumar, B., & Panja, S.S. (2016). Review on aggregation of asphaltene vis-a-vis spectroscopic studies. *Fuel*, 185, 541-554. doi: 10.1016/j.fuel.2016.08.031

Ghosh, P. (2008). Predicting the Effect of Cetane Improvers on Diesel Fuels. *Energy & Fuels*, 22, 1073-1079. doi: 10.1021/ef0701079

Goual, L., Sedghi, M., Wang, X., & Zhu, Z. (2014). Asphaltene Aggregation and Impact of Alkylphenols. *Langmuir*, 30(19), 5394-5403. doi: 10.1021/la500615k

Guevara, S., Parra, M., Malavé, V., Castillo, L., & Márquez, I. (2018). Efecto de la implementación del método de levantamiento artificial por gas sobre la composición del crudo del campo El Furrial. *Revista Tecnológica ESPOL - RTE*, 31(1), 1-12.

Guzmán, R., Ancheyta, J., Trejo, F., & Rodríguez, S. (2017). Methods for determining asphaltene stability in crude oils. *Fuel*, 188, 530-543. doi: 10.1016/j.fuel.2016.10.012

Kraiwattanawong, K., Fogler, H.S., Gharfeh, S.G., Singh, P., Thomason, W.H., & Chavadej, S. (2009). Effect of Asphaltene Dispersants on Aggregate Size Distribution and Growth. *Energy & Fuels*, 23, 1575-1582. doi: 10.1021/ef800706c

Kuang, J., Yarbrough, J., Enayata, S., Edwarda, N., Wang, J., & Vargas, F.M. (2016). Evaluation of solvents for in-situ asphaltene deposition remediation. *Fuel*, 241, 1076-1084. doi: 10.1016/j.fuel.2018.12.080

Kuang, J., Melendez-Alvarez, A.A., Yarbrough, J., Garcia-Bermudes, M., Tavakkoli, M., Abdallah, D.S., Punnapala, S., & Vargas, F.M. (2019). Assessment of the performance of asphaltene inhibitors using a multi-section packed bed column. *Fuel*, 241, 247-254. doi:

10.1016/j.fuel.2018.11.059

Lafont, J.J., Páez, M.S., & Portacio, A.A. (2011). Extracción y Caracterización Fisicoquímica del Aceite de la Semilla (Almendra) del Marañón (*Anacardium occidentale L*). *Información Tecnológica*, 22(1), 51-58. doi: 10.4067/S0718-07642011000100007

Li, X., Chia, P., Guoa, X., & Sun, Q. (2019). Effects of asphaltene concentration and asphaltene agglomeration on viscosity. *Fuel*, 255, 115825-115931. doi: 10.1016/j.fuel.2019.115825

Li, H., Zhang, J., Xu, Q., Hou, C., Sun, Y., Zhuang, Y., & Wu, C. (2020). Influence of asphaltene on wax deposition: Deposition inhibition and sloughing. *Fuel*, 266, 117047-117055. doi:10.1016/j.fuel.2020.117047

Machalowski, T., Wysokowski, M., Petrenko, L., Fursov, A., Rahimi-Nasrabadi, M., Amro, M.M., Meissner, H., Joseph, Y., Fazilov, B., Ehrlich, H., & Jesionowski, T. (2020). Naturally pre-designed biomaterials: Spider molting cuticle as a functional crude oil sorbent. *Journal of Environmental Management*, 261, 110218-110230. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110218

Mansoori, G.A. (1997). Modeling of asphaltene and other heavy organic depositions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 17, 101-111. doi: 10.1016/S0920-4105(96)00059-9

Marín, T., Marcano, S., & Febres, M. (2016). Evaluación del aceite de *Jatropha curcas* como aditivo dispersante de asfaltenos en un crudo del campo el Furrial, Venezuela. *Ingeniería-Revista Académica de la Facultad de Ingeniería UNAY*, 20(2), 98-107.

Marín, T.D. (2019). El aceite de coco (*Cocos nucifera*) como estabilizante de asfaltenos en un crudo del Estado Monagas, Venezuela: efecto de la temperatura. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(2), 290-305.

Nunes, M., Yuan, L.L., Weingart, D., Alves, V., Nazareth, A.L., Furtado, A.M., & Vasques, E.B.A. (2019). The Use of Cashew Nut Shell Liquid (CNSL) in PP/HIPS Blends: Morphological, Thermal, Mechanical and Rheological Properties. *Materials*, 12, 1904-1928. doi: 10.3390/ma12121904

- Paridar, S., Solaimany, A.R., & Karimi, Y. (2018). Experimental evaluation of asphaltene dispersants performance using dynamic light scattering. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 163, 570-575. doi: 10.1016/j.petrol.2018.01.013
- Pereira, J.C., Delgado-Linares, J., Briones, A., Guevara, M., Scorzza, C., & Salager, J.-L. (2011). The Effect of Solvent Nature and Dispersant Performance on Asphaltene Precipitation from Diluted Solutions of Instable Crude Oil. *Petroleum Science and Technology*, 29(23), 2432-2440. doi: 10.1080/10916461003735061
- Romero, J.F., Feitosa, F.X., Ribeiro, F., & Batista, H. (2018). Paraffin effects on the stability and precipitation of crude oil asphaltenes: Experimental onset determination and phase behavior approach. *Fluid Phase Equilibria*, 474, 116-125. doi: 10.1016/j.fluid.2018.07.017
- Saat, M.A., Chin, L.H., & Wong, C.S. (2020). *Treatment of crude oil emulsion using coconut oil and its derivative as green demulsifiers*. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.253>
- Salehi, B., Gültekin-Özgülven, M., Kırkın, C., Özçelik, B., Bezerra, M.F., Pereira, J.N., Fonseca, C., et al. (2019). Anacardium Plants: Chemical, Nutritional Composition and Biotechnological Applications. *Biomolecules*, 9(9), 465-499. doi: 10.3390/biom9090465
- Sánchez, L., Chávez, J., Ríos, L.A., & Cardona, S.M. (2015). Evaluación de un Antioxidante Natural extraído del Marañón (*Anacardium occidentale* L.) para mejorar la Estabilidad Oxidativa del Biodiesel de *Jatropha*. *Información Tecnológica*, 26(6), 19-30. doi: 10.4067/S0718-07642015000600004
- Soltani, B., Reisi, F., & Norouzi, F. (2019). Investigation into mechanisms and kinetics of asphaltene aggregation in toluene/n-hexane mixtures”, *Petroleum Science*, 2019. DOI: 10.1007/s12182-019-00383-3
- Taiwo, E.A. (2015). Cashew Nut Shell Oil — A Renewable and Reliable Petrochemical Feedstock. In *Advances in Petrochemicals*. doi: 10.5772/61096
- Vargas, F.M., Creek, J.L., & Chapman, W.G. (2010). On the Development of an Asphaltene Deposition Simulator. *Energy & Fuels*, 24, 2294-2299, 2010. doi: 10.1021/ef900951n
- Varjani, S.J. (2017). Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource Technology*, 223, 277-286. doi: 10.1016/j.biortech.2016.10.037
- Wang, J., & Buckley, J.S. (2003). Asphaltene Stability in Crude Oil and Aromatic Solvents The Influence of Oil Composition. *Energy & Fuels*, 17(6), 1445-1451. doi: 10.1021/ef030030y
- Zheng, C., Brunner, M., Li, H., Zhang, D., & Atkin, R. (2019). Dissolution and suspension of asphaltenes with ionic liquids. *Fuel*, 238, 129-138. doi: 10.1016/j.fuel.2018.10.070
- Zuo, P., Qu, S., & Shen, W. (2019). Asphaltenes: Separations, structural analysis and applications. *Journal of Energy Chemistry*, 34, 186-207. doi: 10.1016/j.jechem.2018.10.004