

# Evaluación de Mucílago de Nopal (*Opuntia ficus-indica*) y de Maguey (*Agave salmiana*) en Formulaciones Espumantes para Remoción de Hidrocarburos en Suelos Contaminados

FERNANDA ESPINOSA LÓPEZ; MARÍA FERNANDA FLORES SUCHIL; MARÍA FERNANDA RAMÍREZ PÉREZ, MARIANA RAMÍREZ MORALES; VÍCTOR HUGO OCÁDIZ SALAZAR. Asesor: TOMÁS EDUARDO CHÁVEZ MIYAUCHI

**RESUMEN:** *En el presente trabajo se reporta la evaluación de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y de maguey (*Agave salmiana*) como agentes viscosificantes en formulaciones espumantes utilizadas para la remoción de hidrocarburos de fracción media de suelo. Para ello, se extrajo el mucílago de ambas plantas, se realizaron las formulaciones y se procedió con la evaluación de las espumas. Se observa que la estabilidad de las espumas aumenta a medida que aumenta la concentración de mucílago de nopal. El mucílago de maguey no aporta estabilidad a los sistemas coloidales. Las espumas más estables contribuyen a la remoción de componentes fuertemente adheridos a los granos del suelo no importando la concentración de tensoactivo. El estudio continúa con la evaluación de las formulaciones en la remoción de hidrocarburos de fracción media y pesada.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de suelos por hidrocarburos es un tema de atención nacional en México. Desde la contaminación local por micro y pequeñas empresas de alimentos y talleres automovilísticos, hasta derrames de líneas de transporte de hidrocarburos; representa un riesgo para el medio ambiente y para la comunidad que habita en sus alrededores. Las emergencias debidas a derrames químicos se han incrementado de 627 a 1961 casos en el periodo de 2013–2017 de acuerdo con la Procuraduría Federal de Protección Ambiental (PROFEPA) y de los cuales, el 85% corresponde a derrames de hidrocarburos [1,2].

FERNANDA ESPINOSA LÓPEZ Y MARÍA FERNANDA FLORES SUCHIL pertenecen a la carrera de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad La Salle México. [fernandaespinosa1707@gmail.com](mailto:fernandaespinosa1707@gmail.com). MARÍA FERNANDA RAMÍREZ PÉREZ, MARIANA RAMÍREZ MORALES Y VÍCTOR HUGO OCÁDIZ SALALZAR pertenecen a la carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad La Salle México. El trabajo es asesorado por el DR. TOMÁS EDUARDO CHÁVEZ MIYAUCHI y fue desarrollado como parte del proyecto “Evaluación de Propiedades Reológicas y Físicoquímicas de la Interfase Agua- Aceite para el Diseño de Procesos de Remediación de Agua y Suelo Contaminados por Hidrocarburos” NEC-05/16 del Grupo de Investigación, Desarrollo e Innovación de Ingeniería de Procesos y Nuevos Materiales. [tomas.chavez@ulsa.mx](mailto:tomas.chavez@ulsa.mx)

Durante un derrame de hidrocarburos, los residuos conocidos como “líquidos densos de fase no acuosa” (DNAPL por sus siglas en inglés) son aquellos que permanecen adheridos al suelo. Los DNAPL se encuentran formados principalmente por hidrocarburos poli aromáticos en su mayoría carcinógenos [3,4].

La contaminación por hidrocarburos se encuentra categorizada de acuerdo con el tipo de hidrocarburo derramado, y del mismo modo, de la naturaleza y cantidad de DNAPLs que permanecen en el suelo. El enfoque de este trabajo es en hidrocarburos de fase media (diesel, nafta) y posteriormente pesada (aceites vegetales, lubricantes, aceite crudo).

Para realizar la remoción de hidrocarburos el suelo puede ser tratado in-situ mediante técnicas de desplazamiento por inyección y enjuague con agua, sin embargo, en muchas ocasiones se requiere de un agente químico que pueda remover los componentes adsorbidos a los granos de suelo. El uso de detergentes tradicionales no es recomendado debido a que la inundación con los mismos puede dar lugar a cambios en el pH y la remoción de compuestos autóctonos benéficos del suelo como minerales y microorganismos. Además, las soluciones pueden percolar hasta el manto acuífero generando arrastre no solamente de tensoactivo, pero de igual forma de los DNAPL que se deseaba remover.

La propuesta del presente trabajo es la utilización de espumas en lugar de la inyección de soluciones de tensoactivos. La espuma es un coloide en el cual un gas (generalmente aire) se encuentra atrapado en una matriz de líquido. Por su naturaleza, las espumas cuentan con una muy pequeña cantidad de líquido que conforma las paredes de las burbujas conocidas como “lamelas” y, por ser un sistema coloidal, cuenta con una alta viscosidad. Las espumas, por tanto, solucionarían dos problemas: control en la inyección del tensoactivo y disminución de percolación de componentes al manto acuífero.

Para generar una formulación espumante, es necesario contar con por lo menos dos componentes principales: un tensoactivo capaz de generar las lamelas, y un agente viscosificante que ayudará a evitar que la lamela drene. En este trabajo designamos al dodecil sulfato de sodio (SDS) como tensoactivo, el cual se ocupa en prácticamente todos los detergentes y jabones comerciales y mucílago de plantas como agente viscosificante.

El mucílago es una solución conformada por polisacáridos y agua que se encuentra presente en todos los cactus, agaves y

suculentas. Esta solución brinda a dichas plantas la capacidad de retener agua. [5] Puede ser obtenido a partir del desecho de las hojas de agaves en la fabricación de bebidas alcohólicas o bien, del remanente de hojas de nopal. En la Figura 1 se puede observar la extracción a partir de mucílago de nopal. El uso de dichos desechos implica un aprovechamiento de los recursos naturales en su totalidad o en mayor medida; del mismo modo, el destinar una fracción de la producción a la generación de compuestos de valor comercial-industrial diversifica la fuente de ingreso de familias productoras de estos insumos.



Figura 1. Nopal (*Opuntia ficus indica*) y extracción de mucílago.

## 2. MATERIALES Y MÉTODO

### 2.1. MUCÍLAGO DE NOPAL Y MAGUEY

En el presente trabajo realizamos la extracción de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*), el cual está reportado como agente para remoción de metales pesados [6,7] y para coagulación de hidrocarburos [8,9] y de mucílago de magüey (*Agave salmiana*) el cual cuenta con una cadena mucho más corta de polisacárido, y los comparamos para determinar si: las formulaciones espumantes pueden ser efectivas para la remoción de hidrocarburos y para determinar si la viscosidad del mucílago es un factor determinante para la efectividad del proceso.

Para realizar la extracción del mucílago, se utilizan cladodios (hojas) de nopal de edad media (20 – 25 cm) y hojas maduras de magüey (80 – 120 cm). Se separan 2 kg de muestra vegetal de cada especie y se proceden a moler en relación 1:2 con agua utilizando una licuadora de mesa. La mezcla se deja reposar por 24 horas a 50°C en una estufa con temperatura controlable. Posterior al tiempo de reposo, la mezcla es filtrada. La solución madre se centrifuga a 2000 rpm por 15 minutos y se decanta para remover la fibra suspendida. Se cuantifica el contenido de sólidos de la mezcla resultante por triplicado mediante análisis de secado y gravimetría, y dicho valor se utiliza para realizar las formulaciones espumantes correspondientes.

### 2.2. FORMULACIONES ESPUMANTES

Las formulaciones contienen 0.4% en peso de dodecil sulfato de sodio como tensoactivo espumante y diferente concentración de mucílago como agente viscosificante. Se midió el pH, así como la viscosidad de estas mediante el uso

de un viscosímetro de Ostwald. En la Tabla 1 se observan las propiedades de las formulaciones utilizadas.

Tabla1. Propiedades de formulaciones espumantes

Tipo de mucílago	Mucílago (% peso)	pH	Viscosidad (cSt)
---	0.00	7.50	0.993
Nopal	0.25	4.58	0.996
Nopal	0.50	4.56	1.482
Nopal	0.75	4.56	1.561
Nopal	1.00	4.56	1.743
Magüey	0.25	4.96	0.975
Magüey	0.50	4.95	0.979
Magüey	0.75	4.95	0.984
Magüey	1.00	4.95	0.994

### 2.3. SUELO

El suelo utilizado consiste en una muestra de suelo limpio de textura “franco arcillo arenoso” con pH neutro (7.36). Para las pruebas de desplazamiento de hidrocarburo, se colocan 500 gr de suelo y se agrega diesel a saturación. La muestra se deja reposando por 48 horas y se contiene en refrigeración para conservar las condiciones iniciales de contaminación. Una vez transcurrido el reposo, se deja escurrir el diésel remanente y se cuantifica el volumen total presente en el suelo contaminado. Se asume que todas las muestras contienen la misma cantidad de diésel.

### 2.4. ESTABILIDAD DE ESPUMAS

La evaluación de la estabilidad de las espumas se realiza mediante una prueba comparativa, generando columnas de espuma en probetas de 500 ml. En la Figura 2 se muestra el esquema e imagen de las columnas de espuma.

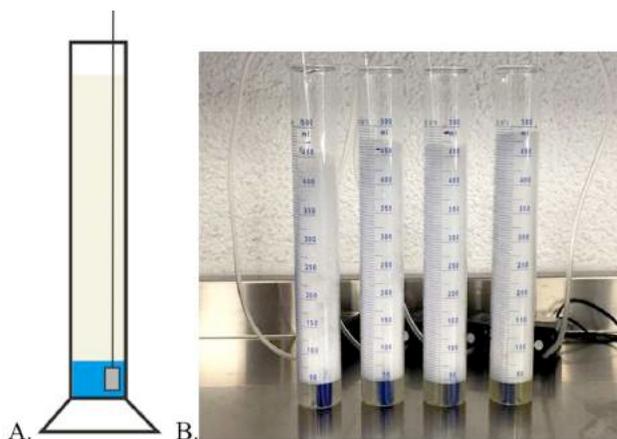


Figura 2. A. Esquema de la columna para evaluación de estabilidad de espumas B. Imagen de una prueba de estabilidad de espumas.

Se realiza la evaluación de dos variables: la calidad de la espuma, correspondiente al volumen de esta en función del tiempo con su comparativo de cantidad de líquido presente en

las lamelas y el drenaje, el cual se mide mediante la acumulación de líquido en la base de la probeta, y la cual representa la capacidad de la espuma de retener líquido en las lamelas.

2.5. DESPLAZAMIENTO DE DIESEL

Para evaluar el desempeño de las formulaciones espumantes para la remoción de diesel del suelo, se realizó una prueba de desplazamiento forzado y otra de desplazamiento por inundación.

2.5.1. PRUEBA DE DESPLAZAMIENTO FORZADO

En una prueba de desplazamiento forzado la muestra es sometida a fuerzas externas que no se presentarían en un sistema real; de este modo, se pueden evaluar las formulaciones a condiciones extremas. A una muestra de masa conocida de 10 g de suelo contaminado se le inyectan 15 ml de espuma, se deja reposar por 10 minutos, posteriormente se agregan 10 ml de agua y se centrifuga a 1500 rpm por 15 minutos. Se utiliza solamente agua como blanco.

2.5.2. PRUEBA DE DESPLAZAMIENTO POR INUNDACIÓN

En esta prueba, el desplazamiento del hidrocarburo se lleva a cabo solamente a través de la flotación del aceite libre del suelo. La muestra de masa conocida de 10 g de suelo contaminado se coloca en una probeta conectada a un sistema de inyección de agua o de espuma. El agua se hace fluir desde la base a flujo de 1 ml/min y después de 15 minutos el sistema se deja reposar por 30 minutos para cuantificar el volumen de aceite desplazado. Para el desplazamiento con espumas, se inyectan 20 ml de espuma y se deja reposar el sistema 15 minutos previo al flujo de agua. La imagen del sistema utilizado se puede apreciar en la Figura 3.



Figura 3. Sistema de desplazamiento de hidrocarburo por inundación

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Figura 4 pueden apreciarse las curvas de drenaje como función del tiempo.

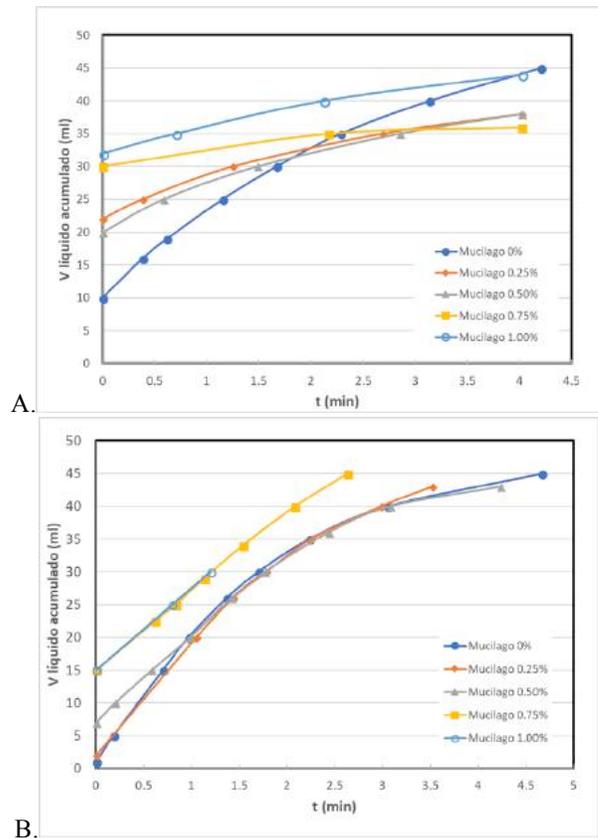


Figura 4. Curvas de drenaje para espumas con A. Mucilago de nopal y B. Mucilago de maguey

Puede apreciarse en la Figura 4-A que a medida que la concentración de mucilago aumenta, el volumen de líquido inicial también es mayor, lo cual es una indicación de que el arrastre de líquido por el aire resulta ser más complicado, dando como lugar a espumas secas desde el inicio de su formación. Del mismo modo, se aprecia que la pendiente de las curvas disminuye, lo cual indica que el drenaje es más lento a medida que la concentración de mucilago aumenta. Este efecto se encuentra mayormente relacionado con la viscosidad de la fase líquida y se puede observar que la tendencia antes mencionada se conserva hasta que la concentración de mucilago alcanza el 1.00% en peso. A viscosidades más altas, el peso de la fase líquida es lo suficientemente grande para evitar mantenerse en las lamelas y por consiguiente dreña más rápidamente. Es por ello que la curva de Mucilago 1.00% se encuentra fuera de la tendencia.

Con respecto al mucilago de maguey, la viscosidad es muy pequeña en todas las concentraciones y solamente en las concentraciones más altas se aprecia un desplazamiento correspondiente al arrastre inicial de líquido. En cuanto a la estabilidad de la espuma, puede observarse su comportamiento en la Figura 5.

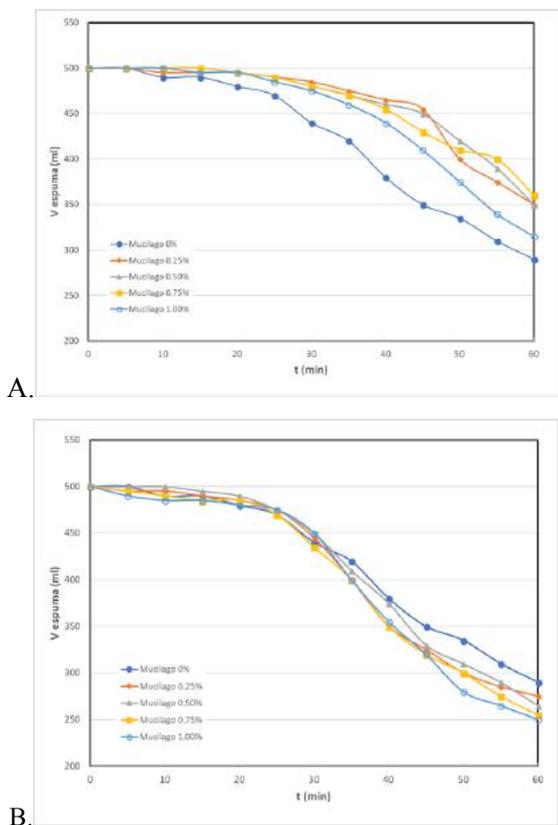


Figura 5. Curvas de estabilidad de espumas con A. Mucílago de nopal y B. Mucílago de maguey

El mucílago de nopal les brinda una mayor estabilidad a las espumas en comparación con el mucílago de maguey. El volumen de estas se mantiene aún por encima de los 300 ml después de 60 minutos. El mucílago le brinda mayor estabilidad a la espuma a diferencia del dodecil sulfato de sodio solo; a medida que la concentración de mucílago aumenta, la estabilidad de las espumas disminuye, esto puede deberse a que en un inicio las espumas son más secas y por consiguiente cuentan con una matriz líquida más débil y en el caso de la formulación de 1.00% también influye la velocidad del drenaje, tal como se comentó previamente.

En comparación, el mucílago de maguey no brinda estabilidad alguna a las espumas; inclusive, se vuelven más inestables que el tensoactivo solo. La tendencia es la misma: a mayor cantidad de mucílago, la estabilidad de la espuma disminuye.

La eficiencia de recuperación de hidrocarburo se calcula tomando en cuenta el diésel original en la muestra y el diésel desplazado en la prueba. La eficiencia se calcula entonces de la siguiente manera:

$$\%eff = \frac{\text{Diesel Recuperado}}{\text{Diesel Original}} \cdot 100 \quad \text{Eq.1}$$

Con respecto a las pruebas de desplazamiento forzado de hidrocarburo, pueden observarse los resultados en la Tabla 2.

Tabla 2. Eficiencia de prueba de desplazamiento forzado

No.	Tipo de Mucílago	Mucílago (% peso)	Diesel Recuperado (% Vol)
1	Blanco	0.00	81.50
2	---	0.00	83.95
3	Nopal	0.25	86.40
4	Nopal	0.50	91.40
5	Nopal	0.75	91.40
6	Nopal	1.00	96.30
7	Maguey	0.25	83.95
8	Maguey	0.50	81.48
9	Maguey	0.75	86.42
10	Maguey	1.00	86.42

El blanco representa el porcentaje de diésel recuperado utilizando solamente agua, mientras que el experimento 2 implica el uso de una solución 4% de SDS sin mucílago. Las pruebas se realizaron por triplicado, y debido a que la precisión de la medición de volumen recuperado solamente puede ser llevado a cabo hasta décimas de mililitro con el material volumétrico de cristalería, el error calculado para prácticamente en todas las muestras oscila en  $\pm 4.0\%$ .

Como puede apreciarse, el diesel cuenta con una adsorción pobre al material mineral, por lo que la recuperación de hidrocarburo utilizando solamente agua, es bastante grande, sin embargo, se alcanza a apreciar una tendencia al aumento de remoción de hidrocarburo. El uso de tensoactivo (2) aumenta un poco la recuperación de hidrocarburo, sin embargo, a medida que se agrega mucílago de nopal a la formulación, la eficiencia de remoción se incrementa. De acuerdo con los análisis de estabilidad de la espuma, se puede observar una relación directa entre la estabilidad de la espuma, la viscosidad de la lamela y la eficiencia de remoción de hidrocarburo. Considerando el sistema con 1.00% de mucílago, a pesar de que la estabilidad de la espuma decrece a comparación de las composiciones más bajas, la viscosidad de la fase líquida parece ser la adecuada para incrementar el factor de arrastre de hidrocarburo.

En el caso del mucílago de maguey, no se aprecia mejora alguna en comparación con el dodecil sulfato de sodio solo, lo que implica que no existe un factor de arrastre que apoye con la remoción de hidrocarburos.

La prueba de desplazamiento por inundación de hidrocarburo solamente se realizó utilizando soluciones de mucílago de nopal debido a la baja eficiencia del mucílago de maguey. Los resultados se pueden apreciar en la Tabla 3:

**Tabla 3. Eficiencia de prueba de desplazamiento por inundación**

No.	Tipo de Mucílago	Mucílago (% peso)	Diesel Recuperado (%Vol)
1	Blanco	0.00	63.33
2	---	0.00	80.00
3	Nopal	0.25	78.33
4	Nopal	0.50	80.33
5	Nopal	0.75	75.00
6	Nopal	1.00	75.00

De acuerdo a la prueba de desplazamiento por inundación puede apreciarse que existe una concentración óptima de mucílago para la remoción de hidrocarburo. El efecto de la centrífuga puede aumentar el efecto de remoción del hidrocarburo. A partir de los experimentos puede apreciarse que el mucílago aporta mayor desplazamiento del hidrocarburo. Cabe mencionar que las pruebas realizadas solamente consideran aceite de fracción media y el desplazamiento del hidrocarburo libre. Pruebas subsecuentes considerarán el tiempo de añejamiento y hidrocarburos de fracción más pesada.

**4. CONCLUSIONES**

A partir del trabajo desarrollado podemos concluir que:

- El mucílago de nopal incrementa la viscosidad de las formulaciones espumantes, lo cual provoca que el drenaje sea más rápido, pero de igual manera aumenta la estabilidad de las espumas secas al mantener la estructura de las lamelas.
- El mucílago de maguey por su cuenta no incrementa la viscosidad de las formulaciones espumantes y no brinda estabilidad alguna a las espumas
- El suelo usado (mayormente arenoso) no cuenta con buena retención de diesel, por lo que la remoción del mismo por desplazamiento con agua es muy efectiva; sin embargo, la presencia de espumas con alta resistencia, como es el caso de las generadas con las formulaciones de 0.75 y 1.00% mucílago de nopal, muestran un incremento en el desplazamiento de diesel remanente en las pruebas de desplazamiento forzado y con las formulaciones de 0.50% de mucílago de nopal en las pruebas de desplazamiento por inundación..
- Existe una relación entre la estabilidad de las espumas y el factor de arrastre y detergencia de los contaminantes adheridos a los granos del suelo.
- El trabajo continúa modificando el proceso de desplazamiento de diesel a un sistema más parecido al de campo, asimismo, utilizando suelo extraído de un sitio experimental y con hidrocarburos de fracción media (aceites vegetales, de motor, combustóleo) y pesada (aceite crudo)

**AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos el apoyo de los laboratorios de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad La Salle México, así como de los comentarios y propuestas del Dr. Alejandro Islas García.

**REFERENCIAS**

[1] <https://www.gob.mx/profepa/prensa> Enero 2017, “Recibe PROFEPA 1,961 reportes de emergencias ambientales asociadas con sustancias químicas”

[2] <https://semarnat.gob.mx/dgeia/informe> 2014, “Residuos. 7.4.1. Sitios Contaminados”

[3] Cohen, R.M.; Mercer, J.W. EPA/600/R-93/022 1993 “DNAPL Site Evaluation”

[4] Pankow,J.F.; Cherry; J.A. Food and Agriculture Organization of the United Nations Report” 1996 “Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater: history, behavior and remediation”

[5] Sepúlveda, E.; Sáenz, C.; Aliaga, E.; Aceituno, C. J. Arid Environ. 2007, 68, 534-545 “Extraction and characterization of mucilage in Opuntia spp.”

[6] Fox, D.I.; Pichler, T.; Yeh, D.H.; Alcantar, N.A. Environ Sci Technol. 2012, 46(8) 4553-4559 “Removing heavy metals in water: the interacton of cactus mucilage and arsenate (As(V))”

[7] Young, K.A. Graduate Thesis and Dissertations Scholar Commons 2006, 3832 “The mucilage of Opuntia ficus indica: A natural, sustainable, and viable water treatment technology for use in rural Mexico for reducing turbidity and arsenic contamination in drinking water”

[8] Alcantar, N.A.; Fox, D.I.; Thomas, S. US Patent Application Publication US 2013/0087507 April 2013, “Use of cactus mucilage as a dispersant and absorbant for oil in oil-water mixtures”

[9] Torres, L.; Caprinteyro-Urban, S.; Orozco, C. Inter. J. Boitechnol. Res. 2013, 1, 38-45 “Production and characterization of Opuntia ficus-indica mucilage and its use as coagulant-flocculant aid for industrial wastewaters