

Analysis of Membrane Technologies for the Treatment of flowblack in Unconventional Reservoirs

Abstract– Despite their great energetic advantages, unconventional deposits demand significant environmental challenges, due to their large water volumes, their pollution and subsequent disposition in the environment. An important aspect and also relevant, it is to use an efficient technology for water treatment. Flowback water contains a lot of pollutants that are harmful to the environment and human health, therefore we consider important the subsequent treatment of this water. This paper presents a study and analyses of the membrane technologies for flowback water treatment, implementing a mechanism so as to evaluate the size of the particles present in the production water. The membranes are divided into four categories: microfiltration, nanofiltration, ultrafiltration, and reverse osmosis. The main difference that we found between these categories is they separate particles according to their size.

Keywords– Membranes, contaminants, water treatment, electronic deposits, water return, hydraulic fracture.

I. INTRODUCCIÓN

La industria de los hidrocarburos enfrenta un gran desafío en la actualidad, ya que los recursos provenientes de yacimientos convencionales se agotan a un ritmo acelerado, debido al aumento de la demanda energética que es consecuente al aumento poblacional, por eso los yacimientos no convencionales toman su auge con el fin de aumentar las reservas de gas y petróleo en el mundo [1].

El petróleo y el gas constituyen unos de los recursos más importantes a nivel mundial, sabemos que la sociedad depende de este recurso no renovable para el funcionamiento de una economía global, para el transporte de recurso y para el comercio de los diferentes bienes y servicios [2].

El aumento en la demanda de este recurso y a su vez la dificultad de extracción convencional amenaza con acabar con esta fuente de energía, por ende, se ha venido desarrollando nuevas técnicas y/o prácticas de extracción como lo son los yacimientos no convencionales [3].

Con el creciente desarrollo de la exploración y explotación de los yacimientos no convencionales a nivel mundial es necesario que se adopten medidas las cuales se ajusten a estas transformaciones. El parámetro más importante a la hora de hablar de yacimientos no convencionales viene asociado al fracturamiento hidráulico, este es un proceso donde se inyecta agua y arenas a altas presiones con el objetivo de generar fracturas para aumentar la conexión entre los espacios porosos en el subsuelo y así mejorar la permeabilidad [4].

Cuando el yacimiento empieza con la producción de crudo trae consigo agua de retorno que regresa a la superficie, la cual contiene múltiples materiales que son nocivos para el ser

humano y el medio ambiente en general, estos contaminantes pueden ser tanto orgánicos como inorgánicos [5].

Los componentes más comunes en este tipo de agua son: compuestos oleosos disueltos y dispersos, los minerales disueltos de la formación, producción de compuestos químicos, sólidos de producción (incrustaciones, bacterias, ceras y asfáltenos) y gases disueltos [6].

Se estima que el agua de retorno a nivel mundial se encuentra alrededor de los 250 millones de barriles por día, cifra que supera más de 3 veces la producción de aceite, la cual es de 80 millones de barriles diarios [7]. Por lo que se hace necesario tratar esta agua de la mejor manera posible para disminuir el impacto que genera la explotación de este tipo de yacimientos.

El avance y las nuevas tecnologías han permitido desarrollar alternativas adecuadas para el manejo y tratamiento del agua de retorno de yacimientos no convencionales. Esta alternativa es la tecnología de membranas que permite llevar el agua de retorno a unos niveles óptimos para diferentes propósitos como lo son el vertimiento, el reúso o la reinyección.

II. YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES

Una definición exacta para describir los yacimientos convencionales no existe; aunque en el 2008, Meckel y Thomasson los definieron con un límite de permeabilidad menor a 0.1md, sin embargo, muchas de las formaciones consideradas como no convencionales, tienen largas extensiones con permeabilidades que superan este valor [8].

Uno de los principales parámetros en el yacimiento es la permeabilidad, esta es una propiedad del medio poroso donde se cuantifica la capacidad y habilidad de la formación para transmitir fluidos. Esta propiedad de la roca es muy importante debido a que controla la dirección y gasto de flujo de los fluidos en la formación [9].

Los yacimientos convencionales son rocas donde se encuentra el hidrocarburo y tienen características de alta porosidad y permeabilidad. El hidrocarburo migró desde la roca generadora hacia reservorios en trampas donde se acumuló sin llegar hasta la superficie [10].

Una roca necesita de espacios vacíos para así contener fluidos, la porosidad es una medida del espacio disponible para el almacenamiento de fluidos. Para ser más precisos se define como porosidad a la relación que existe entre el espacio disponible en la roca y el volumen total de la roca. A diferencia de la permeabilidad que es una propiedad de flujo (dinámica), la porosidad es una propiedad estática [9].

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

Cabe aclarar que este tipo de yacimientos siempre estuvo presente al igual de los convencionales; pero debido a los diversos problemas (tecnología y precios de explotación), nunca se había visto la posibilidad de extraerlos [4].

III. TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS

Dado el auge y crecimiento de las aplicaciones de membrana para el tratamiento del flowback en yacimientos no convencionales, estos sistemas están disponibles en diferentes tamaños y formas, donde cada uno se ajusta a la necesidad y aplicación particular.

Una membrana es un sistema de espesor muy pequeño comparado con su superficie que, cuando se interpone entre dos fases fluidas macroscópicas, ejerce un control selectivo de las transferencias de materia o de energía entre ellas [11]. Es decir es una barrera que separa las dos fases y controla la transmisión de diferentes componentes químicos en una determinada aproximación [12].

Gracias a la tecnología de membranas se pueden separar materiales de distinto peso molecular, contribuyendo así a la reducción de costos energéticos. Son muchos los estudios de campo que avalan los procesos de membrana para el tratamiento del agua de retorno, en varios yacimientos se han instalado membranas con el objetivo de tratar y reciclar el agua de retorno [13] [14].

Los diferentes trenes de tratamiento son combinaciones de diferentes sistemas de membrana (MF, NF, o UF + RO) o son combinaciones de diversas tecnologías de tratamiento de agua convencionales tales como filtración, sedimentación, floculación o clarificación de medios [15].

Existen diferentes tipos de membranas las cuales se clasifican en: microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF), y osmosis inversa. Donde el tamaño de poro de la capa selectiva disminuye de MF a UF y luego NF y RO por último, y por consiguiente la resistencia hidrodinámica de los aumentos de paso de líquido [16].

Tabla I
CARACTERÍSTICAS DE LAS MEMBRANAS MF Y NF

Membrana	Microfiltración	Nanofiltración
	Simétrica/Asimétrica	Asimétrica
Tamaño de poro	0,1 y 10 μm	0,5 y 1,5 nm
Material habitual	Cerámico, polimérico	Polimérico
Modulo de membrana	Tubulares (fibra hueca)	Tubulares (espirales y planas)
Presión de operación	<2 bar	5-35 bar
Pretratamiento	Filtros de cartucho y coagulación Micro filtros. ^a	Cáusticos e inhibidores de escamas para prevenir el ensuciamiento. ^c Filtros de Cartucho y arena. ^d
Componentes removidos	Sólidos en suspensión. ^{a,b} Aceite disperso y Partículas > 100 nm. ^d Turbidez y sólidos en suspensión. ^c	Iones multivalentes. ^{a,b} Dureza. ^a Iones divalentes, metales, radionucleidos. ^c

% de remoción	DQO = 35, COT = 25, AYG = 92, Fenol = 35 ^d SST = 100 ^a	Cationes = 33 – 94 y Aniones = 3 – 77 ^d MgSO ₄ > 90 ^c Iones divalentes y metales > 99 y sales monovalentes < 90 ^c Dureza = 99 ^c
Calidad del agua de alimento	Relativamente limpia en términos de componentes de aceite. ^d	STD entre 500 y 25,000 mg/L. ^c Relativamente limpia en términos de SST, barro y suciedades orgánicas. ^d

^a [17], ^b [18], ^c [19], ^d [20]

Tabla II
CARACTERÍSTICAS DE LAS MEMBRANAS UF Y OSMOSIS INVERSA

Membrana	Ultrafiltración	Osmosis Inversa
	Asimétrica	Asimétrica
Tamaño de poro	1 a 100 nm	<0.002 μm
Material habitual	Cerámico, polimérico	Polimérico
Modulo de membrana	Tubulares (espirale, fibra hueca y planas)	Tubulares (espirales y planas)
Presión de operación	1-10 bar	15-150 bar
Pretratamiento	Filtros de cartucho y coagulación. ^a	Cáusticos e inhibidores de escamas para prevenir el ensuciamiento. ^c NF. ^b
Componentes removidos	Macromoléculas. ^{a,b} Color, olor, virus, materia orgánica coloidal, hidrocarburos, SST y componentes disueltos. ^d	Componentes disueltos e iónicos. ^{a,b} Iones y moléculas monovalentes y multivalentes. ^c Metales. ^c
% de remoción	HT = 96 BTX = 54 Cu = 95 Zn = 95 ^b SST = 100 ^a	Solutos de agua = 99 ^d NaCl > 99 ^c Radionucleidos > 99 ^c STD > 99.4 Amoniacio = 80 Boro < 50 ^c
Calidad del agua de alimento	Aceite < 50 mg/L, Sólidos < 15 mg/L ^b Baja salinidad. ^d	STD entre 20,000 y 47,000 mg/L ^c Relativamente limpia en términos de SST, barro y suciedades orgánicas. ^d

^a [17], ^b [18], ^c [19], ^d [20]

A. Microfiltración

El proceso de microfiltración está diseñado para separar partículas en suspensión, en este proceso se utiliza membranas porosas para la separación de partículas con un tamaño que oscila entre 0,1 y 10 micrómetros [21].

Generalmente este tipo de membranas se utilizan seguidamente de las técnicas convencionales de tratamiento y además son utilizados como un pre-tratamiento justo antes de la osmosis inversa, ya que ayudan a reducir la incrustación y prolongan la vida útil de la membrana de osmosis inversa.

B. Ultrafiltración

Es un tipo de membrana que permite la separación de macromoléculas disueltas, donde se elimina el material suspendido y coloidal, además tiene la capacidad de eliminar bacterias, virus y compuestos orgánicos. Los poros de las membranas de ultrafiltración oscilan en un tamaño de poro de

1 a 100 nm y son capaces de prohibir el paso de partículas con un peso molecular comprendido entre 300 g/mol y 500.000 g/mol [22].

Una de sus principales características es la posibilidad para eliminar aceites, por ende, es eficaz en los tratamientos de agua de retorno, y además sus costes energéticos son bajos [23] [24].

C. Nanofiltración

Las membranas de nanofiltración están diseñados para separar iones multivalentes en lugar de iones univalentes, además la NF tiene la capacidad de ser selectivo a los compuestos orgánicos con peso moleculares relativamente bajos de agua. Este tipo de membranas poseen tamaños de poro de 0,5 y 1,5 nm. Este proceso elimina entre 60 y 80% de la dureza del agua, más del 90% del color y toda la turbidez [25].

D. Osmosis Inversa

En el proceso de osmosis inversa generalmente son rechazadas todas las especies que no sean agua. Este tipo de membrana es usado para la separación de componentes disueltos e iónicos, además de ser eficaz para la eliminación de minerales y contaminantes inorgánicos tales como: tales como radionucleidos, nitratos, arsénico y otros contaminantes tales como plaguicidas [26].

La osmosis inversa también tiene como objetivo rechazar casi todo el material disuelto en una solución acuosa, es por esto que es el procedimiento de membrana más común usado para la desalinización, y esto se lleva a cabo aplicando una presión a la solución que tenga mayor concentración de sales y por lo tanto la membrana semipermeable esta forzada a un caudal inverso [27].

IV. FORMACIÓN MARCELLUS

Esta formación es considerada una de las más largas formaciones de lutitas en los Estados Unidos, se encuentra en la cuenca de los Apalaches, la cual se ubicada en el Este de Estados Unidos, comprendiendo los Estados de Pensilvania, Nueva York, Ohio y Virginia del Este. Cubre un área de 152.000 km², y su profundidad está entre 4500-8500 pies con 500 Tera pies cúbicos de gas recuperable [28].

Para la operación de fracturamiento hidráulico en este campo se utilizan entre 3 – 8 millones de galones de agua, de las cuales aproximadamente entre el 10 – 40% del agua regresa a la superficie como “flowback” [28].

El flowback en Marcellus se caracteriza por tener unas altas concentraciones de cloruros y sodio, eso debido al agua de formación (salmuera) y capas de sal que tienen calcio, sodio, potasio, hierro, magnesio, bario y estroncio que se disuelven y contribuyen a la salinidad del fluido de retorno [29].

En la siguiente tabla observamos los principales componentes y su composición en el agua de retorno en la formación Marcellus.

TABLA III
COMPOSICIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL AGUA DE RETORNO EN LA FORMACIÓN MARCELLUS

Parámetro	Rango	Media
pH	5,8 – 7,2	6,6
TDS	38.500 - 238.000	67.300
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	48.8 - 32.7	138
TSS (mg/L)	10,8 - 3.220	99
TOC (mg/L)	3,7 – 32,3	62,8
BOD (mg/L)	6,2 – 1.950	138
Cloruros (mg/L)	26.400 - 148.000	41.850
Bicarbonato (mg/L)	29,8 - 162	74
Sulfatos (mg/L)	<0,031 - 106	25,9
Calcio (mg/L)	1.440 - 23.500	4950
Bario (mg/L)	21,4 - 13.900	686
Hierro (mg/L)	10,8 - 180	39
Sodio (mg/L)	10.700 - 65.100	18.000
Magnesio (mg/L)	135 - 1550	559

Fuente: Adaptado de HAYES, Thomas. Sampling and Analysis of Water Streams Associated with the Development of Marcellus Shale Gas. Des Plaines: Marcellus Shale Coalition, 2009

V. DISEÑO DE LA TECNOLOGÍA

No existe en Colombia hoy en día una legislación o reglamentación para realizar el vertimiento de agua de retorno de yacimientos no convencionales, es por eso que la resolución 631 del 2015, artículo 11, parágrafo 2, es una de las opciones para guiarnos a desarrollar el estudio y análisis de nuestra tecnología a desarrollar.

A pesar de que no hay una norma, si existen algunos rangos que no se pueden omitir y por lo tanto se deben tener en cuenta para que el agua de retorno pueda ser nuevamente utilizada como fluido de fractura, y los parámetros son los siguientes: el TDS que no debe estar por encima del rango de los 50.000-65.000 mg/L, el contenido de TSS debe ser menor a 50 mg/L, los cloruros no deben sobrepasar el rango de 20.000-30.000 mg/L, los niveles de pH deben estar entre los valores de 6 a 8, la concentración de aceites y sustancias orgánicas solubles debe ser menor de 25 mg/L, la dureza total debe ser menor a 2500 mg/L, el contenido de sulfatos menor a 100 mg/L, la concentración de hierro (Fe) debe ser menor a 20 mg/L y el conteo total de bacterias debe ser menor de 100 por 100 mL [30].

Como resultado de la investigación se diseñó una metodología que puede ser utilizada como una guía para el proceso de tratamiento de agua, la metodología es la siguiente:

1) Una vez obtenida la composición fisicoquímica del agua de retorno, identificamos los diferentes contaminantes presentes en el agua y sus respectivas concentraciones, con el objetivo de diseñar un óptimo sistema de tratamiento y remover la mayor cantidad de contaminantes presente.

2) Al identificar los contaminantes y sus respectivas concentraciones procedemos a eliminar los contaminantes que son más sencillos de remover, comenzamos con un tratamiento primario donde llevamos a cabo un tratamiento químico, en esta

etapa se inyecta ácido sulfúrico (H₂SO₄), donde el objetivo es eliminar del agua aceite, hierro, carbonatos y bicarbonatos.

3) Si el agua de retorno contiene altas concentración de calcio, magnesio y una alta demanda química de oxígeno, utilizamos un proceso de sedimentación.

4) Cuando tenemos presencia de sólidos en suspensión, partículas coloidales, hierro y metales pesados como el plomo, mercurio, cromo o arsénico en el agua de retorno usamos floculantes y/o coagulantes y en esta etapa utilizamos una unidad de flotación.

5) Luego observamos la concentración de cloruro y contaminantes que debieron ser eliminados en etapas anteriores como el magnesio y el calcio (que aumentan la dureza del agua), cromo, mercurio o una alta demanda química de oxígeno (DQO), todo esto se hace con el fin de evitar el deterioro de las membranas y eliminar la presencia de estos. Los equipos de filtración utilizados en esta etapa pueden ser: filtros de arena o de cascara de nuez.

6) Para reducir la alcalinidad, concentración de sulfatos, sólidos totales disueltos (TDS), bacterias, virus y compuestos orgánicos, la ultrafiltración es una excelente alternativa para la eliminación de este material.

7) Para modificar – eliminar la turbidez, dureza, color o la cantidad de carbono orgánico total (TOC), empleamos la nanofiltración, ya que este proceso nos permite disminuir entre el 60 y el 80% de la dureza total del agua y eliminar en gran medida la turbidez de esta, esto debido a su capacidad de ser selectiva a los compuestos orgánicos con pesos moleculares relativamente bajos.

8) Por ultimo analizamos si hay presencia de boro, en caso tal que se presente es necesario aumentar el pH del agua para que la membrana de osmosis inversa pueda removerlo del agua, adicionalmente a esto dicha membrana tiene la capacidad de remover contaminantes como los metales pesados y los materiales radioactivos de origen natural (NORM), este tipo de membranas se usa generalmente como el último proceso para el tratamiento de agua debido a que son diseñadas para rechazar todas las especies que no sean agua.

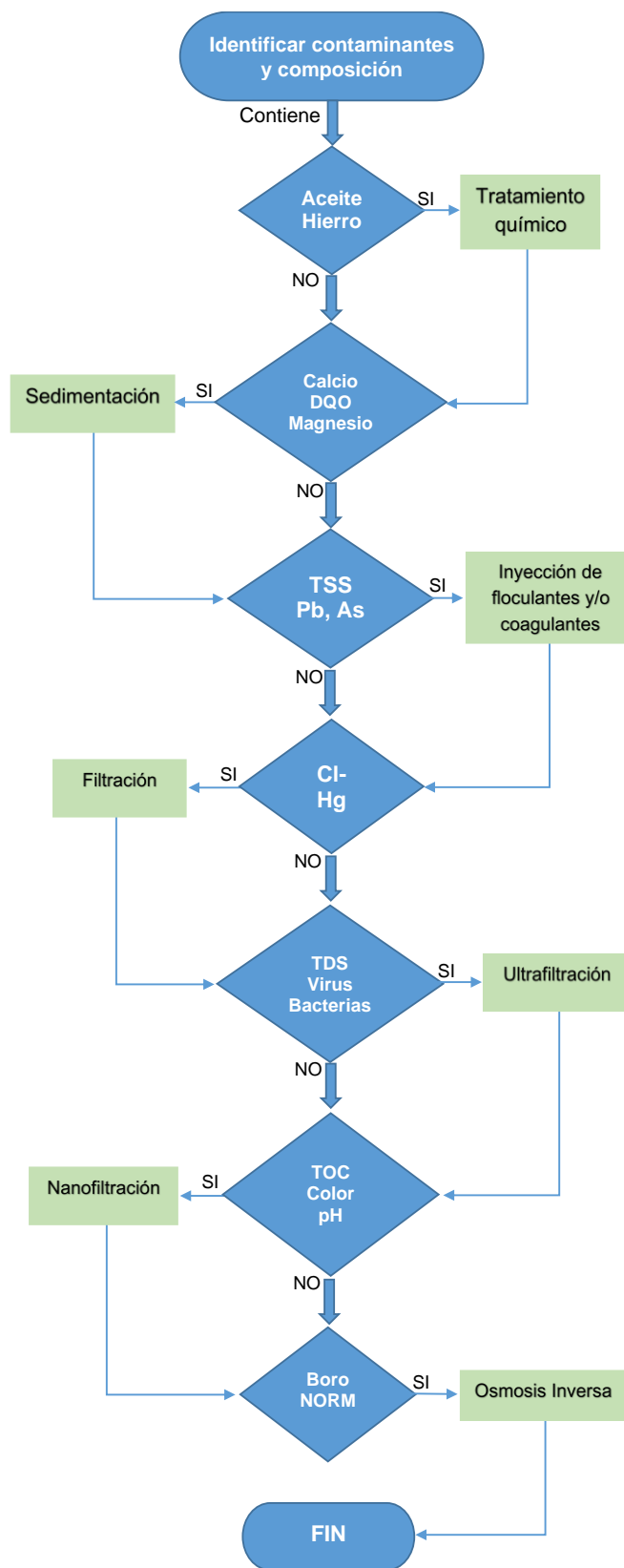


Figura 1. Esquema Propuesto para el Tratamiento de Agua de Retorno

VI. ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA

A continuación, se observa el diseño de una metodología para el tratamiento de agua de retorno basándonos en datos del campo Marcellus, como se muestra en la Figura No 2. Este diseño de tecnología está basado en los datos obtenidos de la composición fisicoquímica del fluido de retorno de Marcellus (Tabla III) donde utilizamos los datos de rango medio y ajustamos esos datos a la resolución 631 del 2015 colombiana.

1) Como primer paso, utilizamos un tratamiento químico, se utiliza ácido sulfúrico (H_2SO_4), con el fin de remover los bicarbonatos, además el ácido sulfúrico puede ayudar en el proceso de remover el bario.

2) Se realiza un proceso de sedimentación con el objetivo de remover aquellos contaminantes que pueden sedimentar, como por ejemplo los sólidos sedimentables y algunos suspendidos o aquellos que pueden flotar como las grasas.

3) Para continuar con la metodología de tratamiento y debido a la alta cantidad de hierro expresado en mg/L, se utiliza el proceso de coagulación en donde se adicionan compuestos químicos con el objetivo de remover los sólidos presentes.

4) Posteriormente se instala una unidad de flotación en donde ya entramos a un tratamiento secundario, el objetivo de este tratamiento es remover la demanda biológica de oxígeno (DBO) soluble que escapa a un tratamiento primario, además de remover cantidades adicionales de sólidos sedimentables.

5) Luego de la unidad de flotación se recomienda utilizar un proceso de filtración, en este caso utilizamos membranas de microfiltración, para disminuir la cantidad de sólidos totales suspendidos (TSS), además este tipo de membrana se utiliza como pre-tratamiento justo antes de la osmosis inversa para ayudar a prolongar la vida útil de la membrana.

6) Como última etapa se escogió utilizar la tecnología de membranas haciendo uso de la osmosis inversa, esta ayuda a remover muchos de los contaminantes que pudieron pasar a través de las membranas de microfiltración como algunas partículas de bario, además de disminuir la concentración de cloruros presentes en el agua.

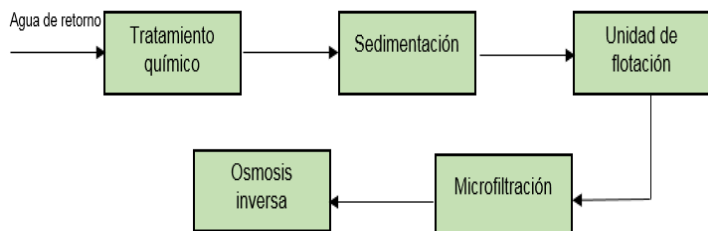


Figura 2. Esquema propuesto para el tratamiento de agua de retorno en la formación Marcellus

VII. CONCLUSIONES

Para realizar un tratamiento de membranas es recomendable un pretratamiento adecuado con el fin de garantizar su funcionamiento, duración y efectividad.

El flowback requiere de un exhaustivo tratamiento para que sea adecuado en el caso de reciclaje, reuso o uso beneficioso. La reutilización y el reciclado de agua de retorno incluyen la inyección subterránea para aumentar la producción de petróleo, el uso para riego y diversos usos industriales.

Las diferentes tecnologías de membranas son métodos eficaces a la hora de remover una gran cantidad de productos presentes en el flowback, el gasto económico no es elevado, y generalmente no requieren la adición de productos químicos.

REFERENCIAS

- [1] K. Contreras Gómez, Análisis del impacto ambiental generado por la extracción de gas por métodos no convencionales – Shale plays en Estados Unidos, Universidad Industrial de Santander, 2015.
- [2] ASOCIACION COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS. Desarrollo de un fluido de fractura base Guar- Boro con aguas de producción y retorno post- fractura. Bogotá D. C.
- [3] L. Arenales y T. Cadena, Análisis de fluidos de retorno de operaciones en yacimientos no convencionales (roca generadora) y alternativas de tratamiento para su reuso o disposición, Universidad Industrial de Santander, 2019.
- [4] Luis Cabanillas, et al, “Hidrocarburos convencionales y no convencionales. Argentina: Asociación argentina de geólogos y geofísicos del petróleo”, 2012-2014. p.4
- [5] M. Gil, A. Soto, J. Usma y O. Gutiérrez, “Emerging contaminants in waters: effects and possible treatments,” Revista Producción + Limpia, vol.7, no.2, Dec. 2012.
- [6] B. R. Hansen y S. H. Davies, “Review of potential, technologies for the removal of dissolved components from produced water”, Chem. Eng. Res. Des. 72, 176–188, 1994.
- [7] B. Dal Ferro y M. Smith, “Challenges in Reusing Produced Water”, Oil & Gas Review OTC Edition. 2007.
- [8] M. Díaz Molano y C. Lizarazo, aplicación de la nanotecnología en el tratamiento de aguas de retorno como alternativa para la mitigación del impacto medioambiental del fracturamiento hidráulico, Universidad Industrial de Santander, 2018.
- [9] K. Meza Constantino, Parámetros petrofísicos compuestos en la caracterización de yacimientos, Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.
- [10] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DEL PETRÓLEO. Los Yacimientos No Convencionales y su Importancia para Colombia. Mayo, 2014: Bogotá
- [11] H. Lonsdale, "The Growth of Membrane Technology", Journal of Membrane Science, Vol.10, pp. 81-181, April 1982.
- [12] B. Esfahani, B. Esfahani, M. Koupaei y S. Ghasemi, “Industrial waste water treatment by membrane systems”, Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences, Vol. 4 pp. 1168-1177, April-June 2014.
- [13] D. Stepan, et al, “Energy & Environmental Research Center University of North Dakota.” 2010
- [14] A. Hussain, et al, “Advanced Technologies for Produced Water Treatment and Reuse,” 2014
- [15] S. Perez, et al, “Nanofiltration membranes, prepared via interfacial polymerization, doped with ZnO nanoparticles: effect on performance” Revista Mexicana de Ingeniería Química, Vol. 15, no. 3, pp 961-975, 2016.
- [16] C.A. Solís, C.A. Vélez, y J.S. Ramírez. “Membrane Technology: Ultrafiltration”, Entre Ciencia e Ingeniería vol.11, no.22, Dec. 2017.
- [17] E. Igunnu y G Chen, “Produced water treatment technologies”, International Journal of Low-Carbon Technologies, Vol. 9, no.3, pp. 157–177, September 2014.
- [18] A. Fakhru'l-Razi, et al, “Review of Technologies for Oil and Gas Produced Water Treatment”, Journal of Hazardous Materials vol. 170, pp. 530-551, 2009.

- [19] COLORADO SCHOOL OF MINES. Earth Energy Environment. Technical assessment of produced water treatment technologies. 1 st EDITION. p. 35, November 2009.
- [20] S. Munirasu, M. Haija y F. Banat. "Use of membrane technology for oil field and refinery produced water treatment", Process Safety and Environmental Protection, Vol.100, pp. 183-202 2016, March 2016.
- [21] A. Tiraferri, "Membrane-based water treatment to increase water supply", [online] available: <http://www.colloid.ch/index.php?name=membranes> September 2014.
- [22] A. Sagle y B. Freeman, "Fundamentals of Membranes for Water Treatment", The Future of Desalination in Texas, Vol. 2, 2004.
- [23] K. Dahm y M. Chapman. "Science and Technology Program Research Report. Produced Water Treatment Primer: Case Studies of Treatment Applications", 2014
- [24] J. Forero, J. Díaz y V. Blandon. "Diseño de un nuevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales", Ciencia, tecnología y futuro, ISSN-e 0122-5383, Vol. 1, no 5, pp. 67-75, 1999.
- [25] D. Bessarabov y Z. Twardowski, "Industrial application of nanofiltration – new perspectives. Membrane Technology", (September 2002).
- [26] X. Zhao, Y. Wang, Z. Ye, A.G.L. Borthwick y J. Ni, "Oil field wastewater treatment in Biological Aerated Filter by immobilized microorganisms", Process Biochemistry, Vol. 41, pp. 1475-1483, 2006.
- [27] P. Rodríguez, J. López y A. Burgos. Filtración en membrana y osmosis inversa. 2015.
- [28] C. A. Gómez Zapata, "Alternativas para la minimización del uso del agua en las operaciones de fracturamiento hidráulico en la explotación de yacimientos no convencionales", Fundación Universidad de América, 2016.
- [29] N. Abualfaraj, P. Gurian, M. Stone. "Characterization of Marcellus Shale Flowback Water", Environmental Engineering Science, Vol. 31, pp. 514-524, 2014.
- [30] J. M. Estrada y R. Bhamidimarri. "A review of the issues and treatment options for wastewater from shale gas extraction by hydraulic fracturing", Fuel, Vol. 182, pp. 292-30, October 2016.