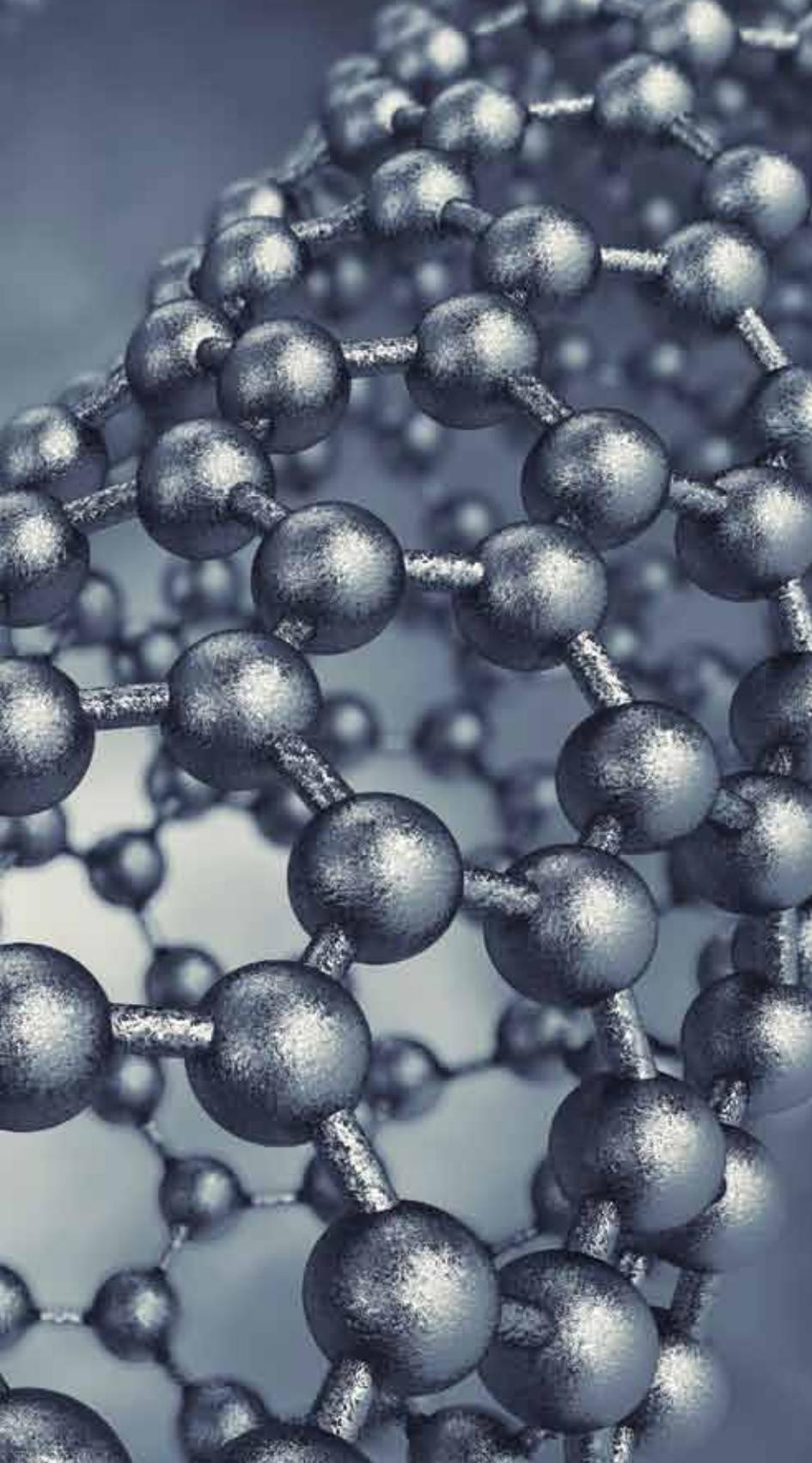


# “Investigación y desarrollo de nanotecnologías EOR en la Argentina”

Por **Ing. Mariano Clerici** (Consultor de EOR. Universidad de Buenos Aires, Instituto de Ingeniería Biomédica), **Dra. Carol Olmos**, **Ing. Andrea Vaca** e **Ing. Gustavo Rosero** (Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo), **Dr. Maximiliano Pérez** y **Dra. Betiana Lerner** (Universidad de Buenos Aires, Instituto de Ingeniería Biomédica y Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo).



Este trabajo describe el desarrollo de una investigación acerca de la nanotecnología en nuestro país, sobre todo aplicada a la recuperación mejorada de petróleo.

producción de crudo. La búsqueda de estrategias de recobro es uno de los objetivos a los que se apunta en la actualidad que en parte tienen incidencia en el presente y el futuro próximo de la industria petrolera.

## Tecnologías en la Argentina

En la actualidad, la Argentina produce cerca de 76,000 m<sup>3</sup>/d de petróleo, de los cuales alrededor del 40% es aportado por recobro secundario, mediante la inyección de agua. Tan solo el 0,004% de la producción a nivel del país se obtiene por Enhanced Oil Recovery (EOR por su sigla en inglés)<sup>1</sup>. Cabe destacar que a pesar de contar con yacimientos maduros con los cuales el corte promedio de agua a nivel país es del 94%, los proyectos de recuperación terciaria son aún escasos (Figura 1).

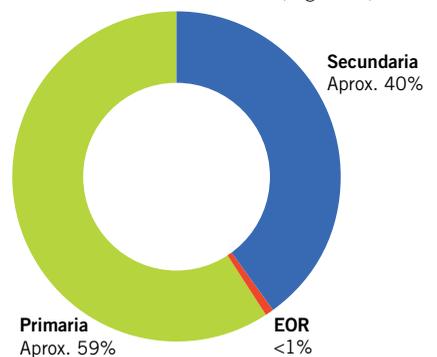


Figura 1. Porcentaje de recuperación de petróleo en Argentina<sup>1</sup>.

## Aplicación de nanotecnologías

Durante la última década se han desarrollado nanotecnologías para mejorar las eficiencias volumétricas

La industria de los hidrocarburos ha enfrentado, históricamente, muchos desafíos. Uno de ellos es la extracción del crudo de sus yacimientos. Menos del 30 % del crudo puede llegar a la superficie por presión natural o con sistemas de levantamiento artificial y para aumentar

estos resultados la industria ha desarrollado tecnologías como inyección de (i) agua, (ii) aire, (iii) vapor y (iv) microorganismos. Países, como Reino Unido, Canadá, México, Colombia y la Argentina, entre otros, hacen uso de estas tecnologías. Dichas experiencias han permitido aumentar la

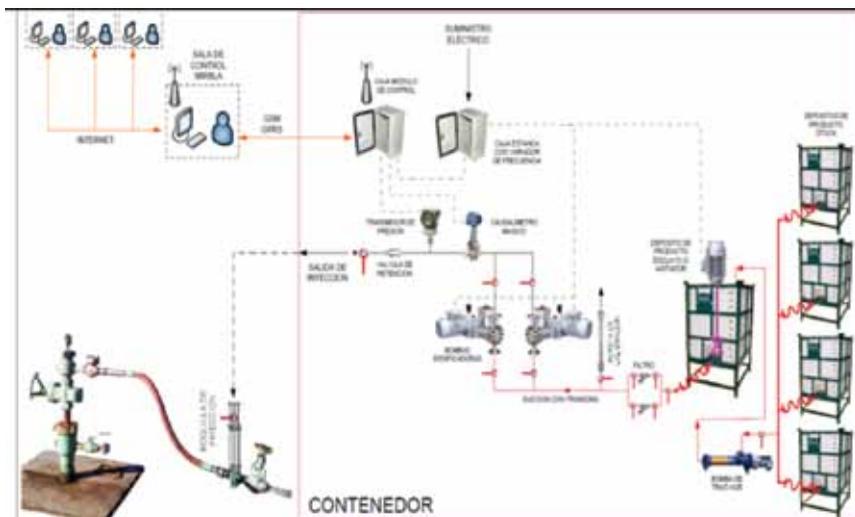


Figura 2. Esquema de instalaciones de campo para dosificación de producto.

de barrido. Una de las tecnologías EOR que se estudian en el país es la inyección de nano-geles. Entre sus características se destaca la extracción de crudo residual atrapado por capilaridad. Esta tecnología novedosa trata de un sistema polimérico entrecruzado (gel pre-formado) que se comercializa como una nanodispersión de una solución acuosa de polímero en un aceite. El polímero entrecruzado se encuentra encapsulado en una fase oleosa y se encuentra estabilizado por la adición de surfactante.

La inyección en campo se hace por dosificación de la emulsión in-

versa en el flujo de agua. Esta aplicación en campo constituye una ventaja competitiva (Figura 2). Además, no requiere instalaciones especiales de preparación, con lo cual su implementación es relativamente sencilla y rápida.

De acuerdo con el fabricante, el producto presenta las siguientes características<sup>2</sup>:

- El proceso de fabricación (polimerización en emulsión inversa) permite obtener sistemas de tamaño controlado según las necesidades del reservorio a aplicar.
- El producto corresponde a una

nanoemulsión cuyo tamaño varía entre 20 nm y 200 nm, la cual se dispersa en agua fácilmente y alcanza rangos de microgel con un comportamiento bimodal en función del tiempo (Figura 3).

- Las partículas pasan sin dificultad a través de punzados y se difunden en las paredes del pozo (*nearwellbore*).
- El producto está constituido aproximadamente por un 60% de aceite, un 10% surfactantes y un 30% de polímero entrecruzado.
- Son flexibles y se pueden deformar para pasar por canales de menor garganta poral. Esto permite que continúen avanzando a través de las zonas menos permeables.
- La viscosidad de la dispersión es similar a la del agua.
- Al hidratarse totalmente, la partícula no se adhiere a la roca u otra "nano".
- El diseño en tamaño nano se basa en que puedan ingresar en la formación a través de las inmediaciones del pozo. Se espera que los nanogeles en condiciones de reservorio, se expandan hasta un tamaño que podrían bloquear zonas de alta permeabilidad.
- Una vez que el sistema se aloja en los canales de alta permeabilidad, la permeabilidad de estas vías disminuye. Al volver a inyectar agua, ésta se distribuiría y barrería zonas de menor permeabilidad que aún no habían sido contactadas, permitiendo extraer más petróleo y reduciendo el corte de agua.

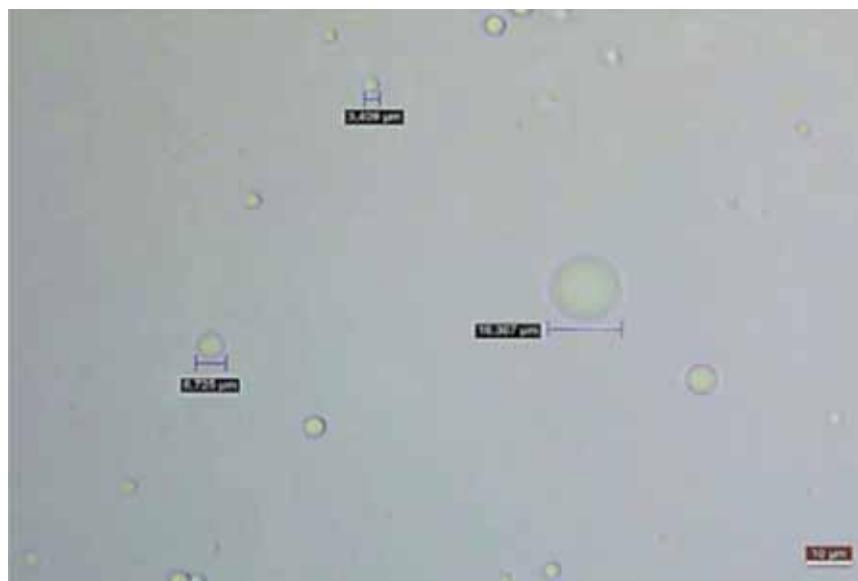


Figura 3. Dispersión del producto en agua sintética de inyección. Tiempo de hidratación: 0 hs., 25 °C.



Figura 4. Núcleo de berea - cara de entrada.



Finalmente, según el fabricante, se deberían movilizar 190 m<sup>3</sup> de petróleo por tonelada de producto inyectado (20% volumen poral) dando un valor del 6% y mediciones de hasta el 14% de incremento del factor de recobro de la malla del inyector. Por lo

tanto, el producto tiene la facultad de reducir el Sor (Saturación de petróleo residual).

Actualmente, se encuentra en estudio dichas propiedades de la nanoemulsión bajo las condiciones características de reservorio.

## Metodologías para determinar eficiencias EOR

Entre las metodologías que permiten proveer una evaluación completa de los fluidos inyectados previo a la inyección a los reservorios se encuentran estudios mediante celda Hele-Shaw, núcleos de berea, micromodelos sobre plug de corona, entre otros.

Previamente Masiero *et al.* informaron la eficiencia de inyectividad de nanogeles (dispersión de la emulsión con nanogel en agua)<sup>2</sup>. La evaluación del producto en bereas con permeabilidad entre 100-200 mD reveló que el sistema presenta baja inyectividad, observándose taponamiento en la cara de entrada al medio poroso. En presencia de un surfactante adicional se observa una ligera mejora en el transporte en el medio poroso. Adicionalmente, se ha observado que en ensayos con bereas de mayor permeabilidad desaparece el problema de inyectividad.

## Micro-modelo sobre plugs de la corona del yacimiento

Los ensayos de micro-modelo sobre plugs de corona consisten en la saturación con crudo, luego barrido con

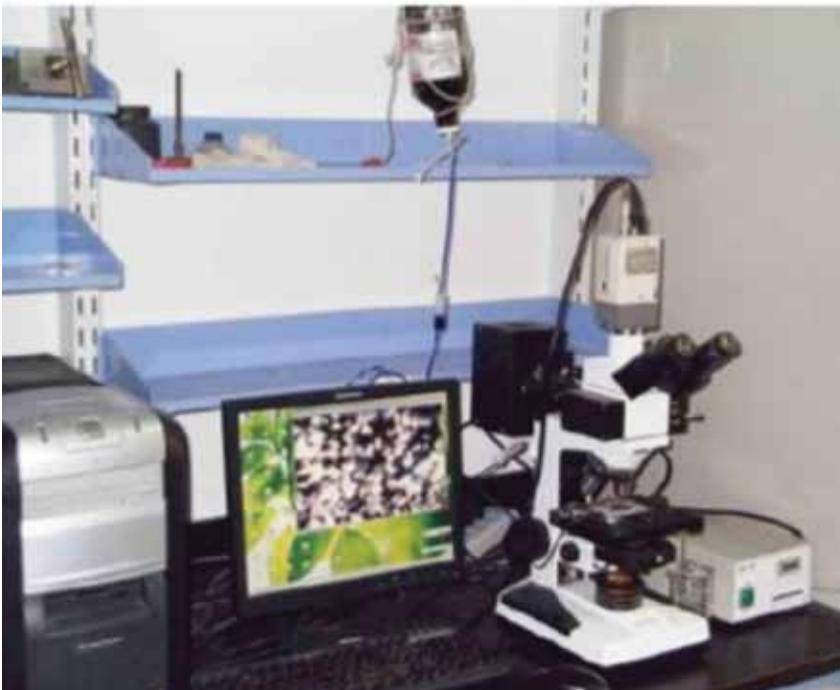
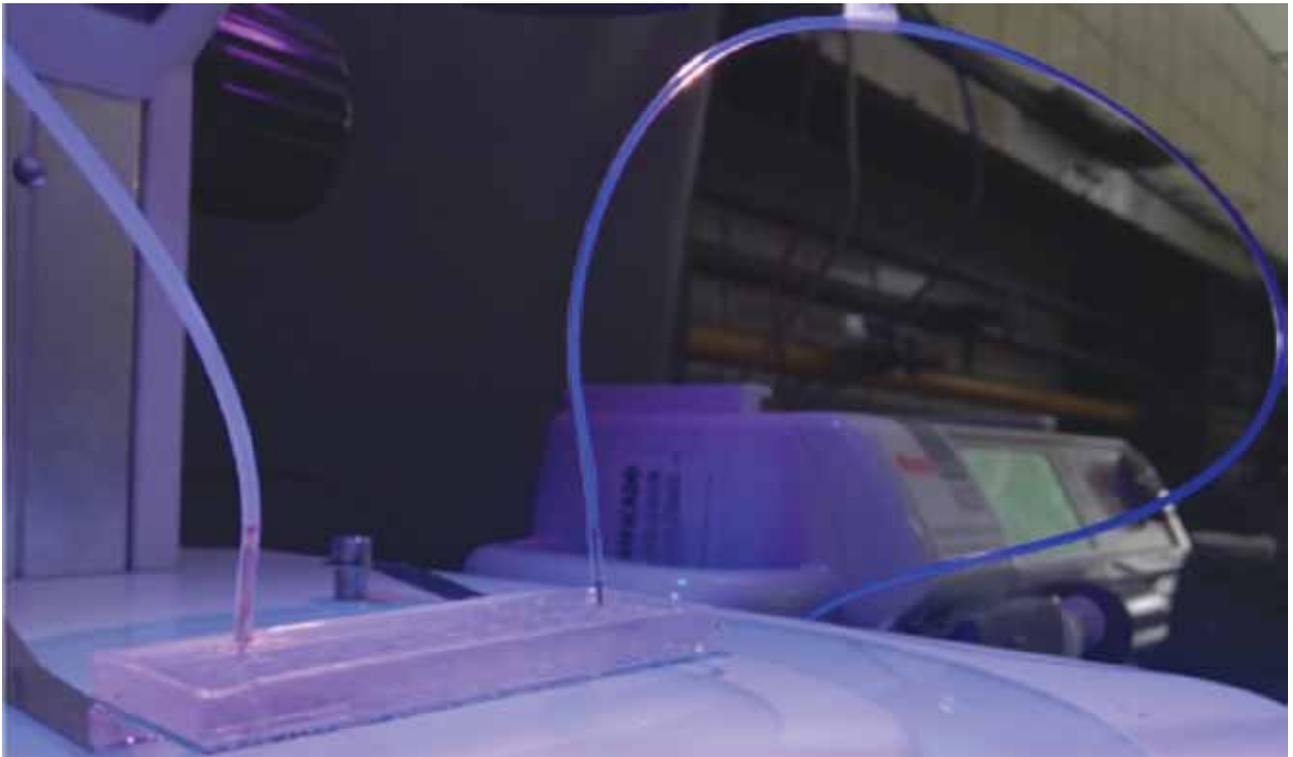
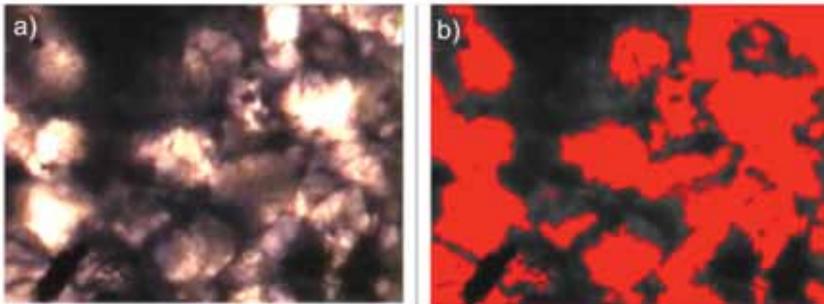


Figura 5. Monitoreo de micromodelo sobre plug de corona.

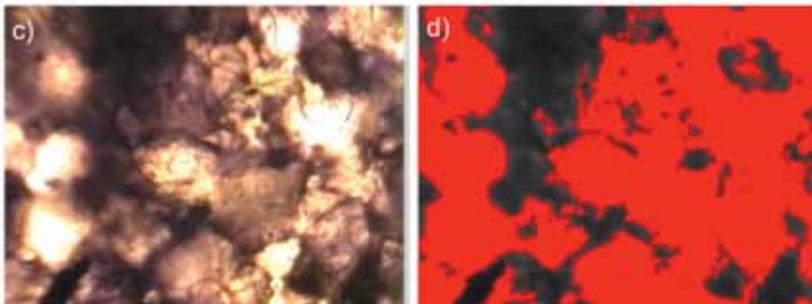


**Estado inicial con crudo**



**Area crudo: 48.8%**  
**Area + arenisca: 51.2%**

**Posterior a la inyeccion de nanogeles**



**Area crudo: 25.8%**  
**Area + arenisca: 74.2%**

Figura 6. Imágenes capturadas por el microscopio óptico que permiten ver el avance y los cambios dentro del plug. El área negra es crudo sintético, el área clara es arenisca más agua. a) y c): imagen original; b) y d): imagen procesada.

agua, nano gels y agua nuevamente. Todo el proceso se monitorea con cámaras para luego poder comparar y medir los volúmenes desplazados y el crudo remanente (Figura 5).

Las metodologías previamente indicadas (núcleos de berea, micromodelos sobre plug de corona) presentan retos entre los que se encuentra acceso visual restringido. Por lo cual son necesarias tecnologías nuevas y de avanzada para tener éxito en este campo. A continuación se presenta una metodología alternativa y de las más novedosas en el nivel mundial, sobre todo para el estudio de EOR, es decir la aplicación de la microfluídica, que permite evaluar la eficiencia de recuperación de productos químicos que se están desarrollando o que se encuentran en el mercado, lo que permite hacer importante cantidad de ensayos simultáneamente en iguales condiciones, con diferentes productos y tecnologías.

## Aplicación de la microfluídica en estudios de EOR

El número de investigaciones en el área de microfluídica ha crecido entre 2000 y 2012 se ha visto un aumento

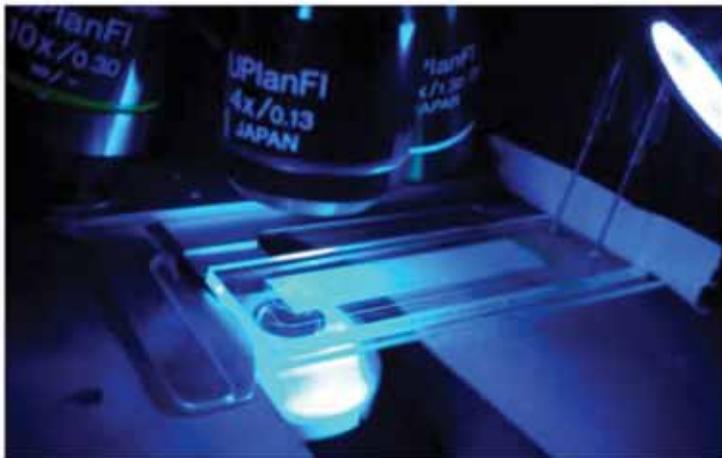


Figura 7. Visualización de fluidos dentro de microdispositivo.

significativo de publicaciones en revistas multidisciplinarias, ingeniería, biología y medicina. Este crecimiento es un indicador del enorme potencial de la microfluídica en diferentes áreas.

La EOR comprende varias técnicas para aumentar la cantidad de crudo que se puede extraer de un reservorio. Los experimentos de core floods son el estándar actual de la industria para evaluar tanto el efecto de la inyección de fluidos como la mejora de la recuperación de petróleo. Las pruebas de core floods requieren parámetros de entrada críticos para diseñar pruebas piloto y aplicaciones EOR de escala de campo. Entre los desafíos que afronta estas pruebas se encuentran la escasez de material de corona de yacimiento, la baja replicación de los resultados principales, la duración (tiempos largos de ensayos), los altos costos de los experimentos y el acceso

visual restringido. En particular, los dispositivos de microfluídica aborda los problemas mencionados, ya que es posible integrar varias operaciones

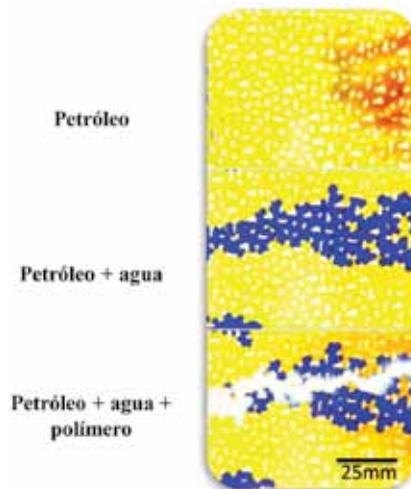


Figura 8. Desplazamiento de petróleo con fluidos.

de laboratorio, como la inyección de muestras y reactivos, el mezclado, la incubación, la reacción, la separación, la detección, el aislamiento, etc. Estos dispositivos se identifican como lab-on-a-chip (LOC)<sup>3,4</sup> (Figura 7).

La tecnología de lab-on-a-chip es ideal para estudiar la recuperación asistida de petróleo, ya que se puede simular medios porosos con diseños personalizados incluyendo poros, canales y la interconexión de diferentes zonas con distintas permeabilidades que se reproducen con precisión. Otras ventajas que ofrecen los micro-modelos son las siguientes:

- Materiales de fabricación costo-eficientes.
- Reproducibles.
- Requieren solo pequeña cantidad de volumen de fluidos.
- Permiten un acceso visual al proceso de desplazamiento que per-

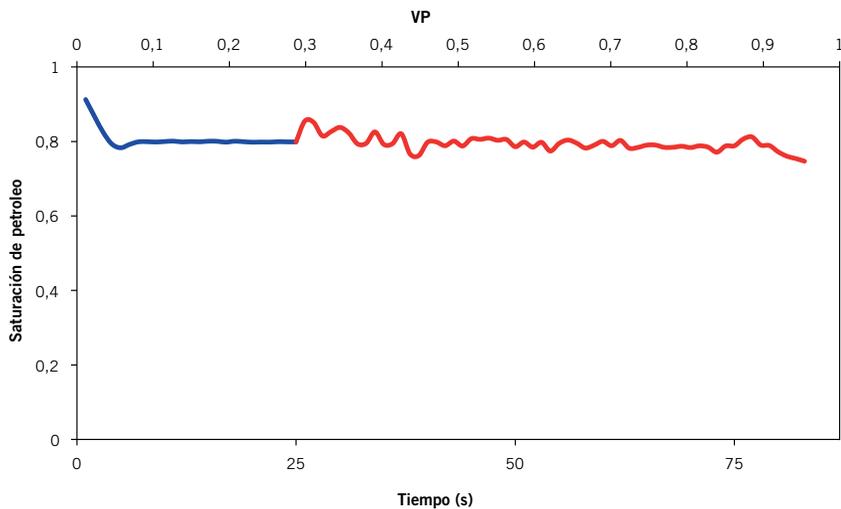


Figura 9. Eficiencia de recuperación: factor de saturación medida durante la inyección de agua y subsecuente inyección de polímero en el microdispositivo.

mite obtener una mayor descripción del proceso.

- Permiten control de la mojabilidad.
- Permiten un proceso de *screening* EOR costo-eficiente.
- No requieren material físico de *core*.

Los *lab-on-a-chip* proporciona capacidades incomparables para entender el proceso EOR, no solo respecto al factor de recuperación, sino también la visualización a escala de poros, mecanismos de captura y movilización de fluidos<sup>4</sup>.

## Inyección de fluidos

La figura 8 muestra una subsección de un micromodelo que presenta propiedades de porosidad y permeabilidad de un determinado reservorio en donde se observa el desplazamiento de fluidos. La fase oleosa (amarillo) es desplazada por agua salina (azul), subsecuentemente se inyecta polímero en baja concentración.

Adicionalmente, mediante esta metodología es posible simular condiciones de reservorio, condiciones de temperatura, presión y salinidad del medio, entre otros. Por otro lado, se usan varios algoritmos de análisis de imagen que permiten evaluar los experimentos. Los análisis incluyen:

- Distribuciones de saturación de fase.
- Factor de recuperación frente al tiempo o inyección de VP.
- Tamaño y extensión de las zonas de mezcla.
- Lineamientos y rastreo de partículas.
- Procesos de flooding y control de movilidad.

Como resultado de los experimentos de inyección se pueden obtener gráficos de eficiencia de recuperación como se indica en la figura 9.

En resumen, el uso de dispositivos de microfluídica permite un análisis eficiente de los procesos de recuperación mejorada que requiere volúmenes pequeños de fluidos reduciendo sustancialmente el tiempo y el número de ensayos. Además, es posible el acceso visual al proceso de desplazamiento permitiendo una descripción del proceso más detallada. También se puede producir una cantidad ilimitada de chips con la misma red de poros. Es de destacar que los micromodelos se generan sobre la base de imágenes de red de poros, por eso esta tecnología se puede aplicar incluso si el material del núcleo físico no está disponible.

Recientemente, el grupo de investigación del Dr. Maximiliano Pérez (*eorscreeningchips.com*) realizó ensayos de eficiencia EOR por medio de micromodelos. Además de hacer investigación básica, el grupo ofrece servicios a empresas petroleras que consisten en el estudio del comportamiento de los diferentes compuestos EOR, como polímeros, nanopartículas o microgeles, entre otros, en configuraciones y diseños de microchips específicamente realizados para que se adapten al pozo en estudio. De esta manera, se ofrecen servicios personalizados que se adaptan a las características de los reservorios. El grupo ha trabajado en desarrollos con la empresa YPF, INLAB y el Instituto Francés del Petróleo (IFP).

## Conclusiones

La exploración y la producción de crudo ha llegado a áreas desafiantes que requieren diferentes enfoques interdisciplinarios que promuevan diversas actividades para incrementar la producción de petróleo. Algunas de las más importantes y novedosas, son las relacionadas con la recuperación mejorada: IOR - Recuperación Avanzada de Hidrocarburos o Improved Oil Recovery, por su sigla en inglés) y EOR. El avance de estas tecnologías es considerable, se ha logrado hacer productos resistentes a altas temperatura de reservorio y alta salinidad, etc. Si bien la Argentina ha avanzado en el estudio de estas tecnologías logrando el mismo nivel de investigación que los países más desarrollados del mundo, aún falta llevar estas tecnologías al reservorio. Las metodologías de aplicación de nanotecnologías, tanto en campo (inyección de fluidos en reservorios) como en el ámbito de laboratorio (evaluación de eficiencias de compuestos EOR), representan justificaciones excelentes para promover iniciativas en el nivel nacional donde estén involucrados los esfuerzos del Gobierno, academia e industria. Uno de los principales retos a los que se enfrenta la Argentina es la apertura a estas nuevas tecnologías, las que han medido factores de recobro incremental de hasta un 14% abriendo de esta forma un enorme potencial en los campos maduros. ■

## Bibliografía

- (1) [www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3299](http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3299)
- (2) Masiero, D. M. A.; Hernández, M.; Vega, I.; Lucero, A.; Peltier, J.; Juri, J.; Clérici, M. *Swellable Nanogels Injection Pilot in Mendoza Norte, Argentina*. OnePetro 2017.
- (3) Sackmann, E. K.; Fulton, A. L.; Beebe, D. J. *The Present and Future Role of Microfluidics in Biomedical Research*. *Nature* 2014, 507, 181-189.
- (4) Lifton, V. A. *Microfluidics: An Enabling Screening Technology for Enhanced Oil Recovery (EOR)*. *Lab on a Chip* 2016, 16, 1777-1796.

## Agradecimientos

Fotografía: Pamela Schreiber y Andrea Layedra.