

# LA MINERALOGÍA EN LOS PROCESOS DE RECUPERACIÓN MEJORADA DE PETRÓLEO (EOR)

**Msc. Evelyn Quintero**

*Fundadora y CEO de PetroRenova*

Recientemente conté con el privilegio de participar en las Jornadas geológicas de Petróleo y Gas de la Sociedad Venezolana de Geólogos, con un trabajo acerca de la influencia de la mineralogía en la Recuperación Mejorada de Petróleo (EOR por sus siglas en inglés). Los procesos de EOR, son técnicas avanzadas diseñadas para el aumento del factor de recobro en yacimientos de hidrocarburos, que implican la inyección de fluidos, como vapor,  $\text{CO}_2$ , y productos químicos. Dichos aditivos interactúan inevitablemente con los minerales del yacimiento, esta interacción debe ser tomada en consideración e idealmente la movilidad del petróleo atrapado. Sin embargo, existen diversos desafíos asociados a la eficiencia del proceso, en vista de la heterogeneidad presente en formaciones que poseen los hidrocarburos se requiere la aplicación de estudios de las propiedades físicas, químicas y térmicas de la roca.

Los minerales, como las arcillas (caolinita y montmorillonita), pueden hincharse al absorber agua proveniente de un proceso típico en recuperación adicional como la inyección de agua o del vapor de baja calidad, lo que podría reducir la permeabilidad y obstruir el flujo de petróleo a través de la roca. En este caso funciona bien la inyección de agua de baja salinidad (LSWI por sus siglas en inglés Low Salinity Water Injection), la cual se basa en modificar la composición iónica y salinidad del agua inyectada para lograr que las interacciones roca-fluido en el yacimiento mejoren condiciones tales como; Cambio de mojabilidad de la roca, migración de finos e incremento del pH, incluso en caso donde el petróleo contiene componentes polares y exista saturación inicial elevada de agua.

Estudios han demostrado que la LSWI, puede incrementar el factor de recobro entre 3-6% adicional comparado con la inyección de agua tradicional (ver figura 1). En el rango de aplicación, la salinidad óptima del agua inyectada suele estar entre 1,000-5,000 ppm de sólidos disueltos totales. Este tipo de proceso comúnmente implica el uso de aditivos químicos que estabilizan las arcillas y previenen la migración de finos. Por ende, los principales iones presentes en el agua de baja salinidad incluyen: Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), Sodio ( $\text{Na}^+$ ), Cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), en el agua de baja salinidad, lo cual tiende a mejorar la recuperación, versus la inyección de agua tradicional donde existe alto contenido polar con los  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ . De igual forma, en procesos de recuperación secundaria con inyección de agua en formaciones con anhidrita, un sulfato de calcio tiene menor solubilidad, ocasionando que pueda reaccionar con salmueras duras y precipitar en forma de yeso, lo que bloquea los poros.



*"caolinita y montmorillonita"*

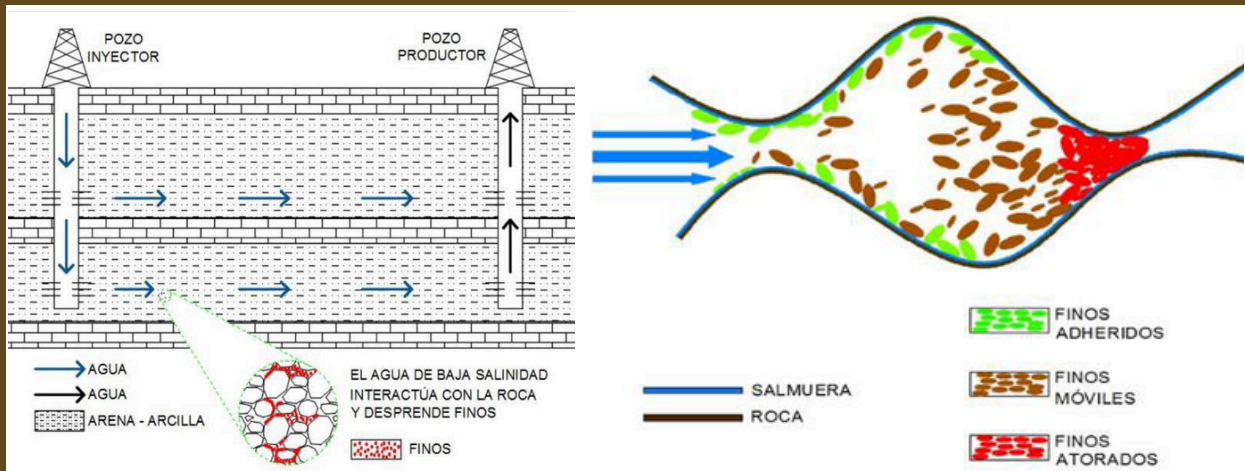
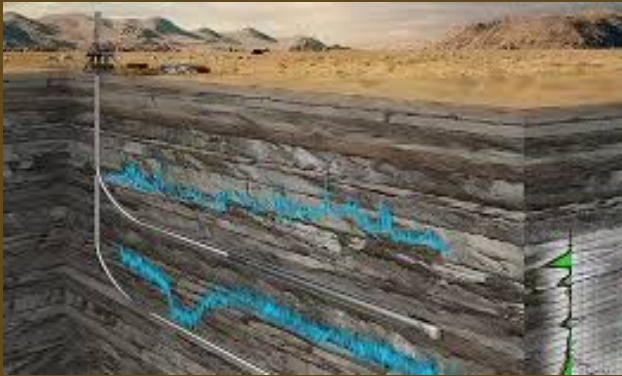


Figura 1: Proceso a través del cuál la inyección de agua de baja salinidad logra movilizar los finos atorados en el medio poroso. (fuente <https://energyandcommerce.com.mx> )



Se debe imaginar a un yacimiento de petróleo como un complejo laberinto de rocas, cada una con sus propias características y respuestas químicas. Cuando se inyectan fluidos como el  $\text{CO}_2$ , en yacimientos donde los minerales que prevalecen son los carbonatos, el  $\text{CO}_2$  inyectado se disuelve en el agua de yacimiento, formando ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), que proporciona los protones ( $\text{H}^+$ ) en la disolución, especialmente la calcita y la dolomita, se disuelven en presencia de fluidos ácidos, lo que genera un beneficio a la movilidad del petróleo dentro del reservorio, dado que aumenta la porosidad y permeabilidad. De forma contraria, es necesario verificar la presencia de La montmorillonita, una arcilla expansiva, durante los procesos de inyección de vapor, las altas temperaturas

afectan la mineralogía del yacimiento. tiende a hincharse en presencia de agua, lo que obstruye los poros y reduce la permeabilidad. Sin embargo, a temperaturas extremas, sufre colapso térmico, liberando agua y disminuyendo su capacidad expansiva, lo que podría mejorar la permeabilidad en ciertos contextos.

La caolinita, por otro lado, reacciona con álcalis a altas temperaturas, liberando sílice y aluminio en solución. Estos cambios químicos pueden generar precipitados, obstruyendo los poros y afectando la movilidad del petróleo. La deshidratación de ambas arcillas (montmorillonita y caolinita), también podría provocar fracturamiento térmico, alterando la estructura de la roca, en algunos casos, mejorando la conectividad en la formación.

En areniscas, los procesos de inyección de vapor también alteran las propiedades físicas y mecánicas. Estudios sobre el impacto térmico en la arenisca han demostrado que el enfriamiento repentino o el choque térmico puede aumentar la permeabilidad de la roca al generar grietas o fisuras, facilitando el flujo de fluidos.

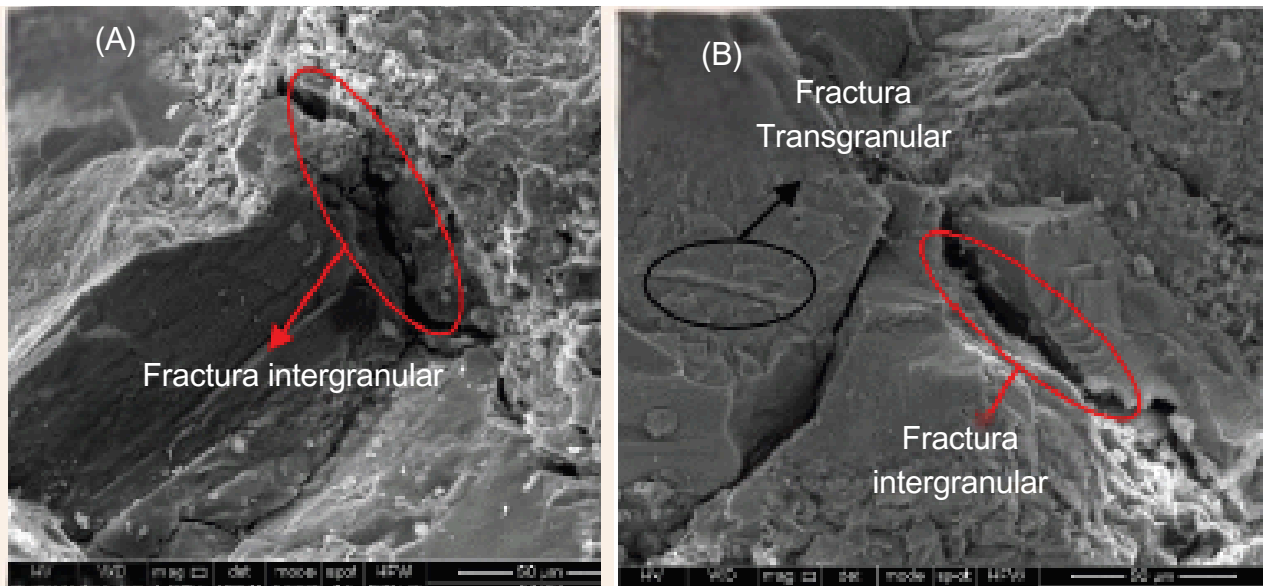


Figura 2. Imagen de microscopía electrónica de barrido de la roca arenisca sometida a (A) 500 °C y (B) 800 °C, y posteriormente enfriada con agua. (Fuente The Aramco Journal of Technology Summer 2023)

La figura 2 anexa, muestra una mejora significativa en la permeabilidad a causa de las fracturas generadas posterior al calentamiento y choque térmico del enfriamiento. El calentamiento de la arenisca bajo presión de confinamiento disminuye la permeabilidad de la arenisca. En general, la rigidez y la resistencia de la roca arenisca disminuyen al aplicar un gradiente térmico de enfriamiento, mientras que se observa una tendencia poco clara cuando la medición se realizó tras imponer un gradiente térmico de calentamiento. Una posible explicación para el efecto térmico en la arena.

La arenisca presenta el desarrollo de micro fisuras. La imagen obtenida mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) de la Fig. 2, ilustra la formación de una microfisura que se calentó inicialmente a la temperatura deseada y posteriormente se expuso a un choque térmico con agua; sin embargo, no está claro si esta grieta es consecuencia del calentamiento o del choque térmico aplicado. La otra razón es la variación en la expansión y las propiedades térmicas.

Una fractura intergranular es un tipo de falla en materiales que ocurre a lo largo de los límites de grano, resultando en una ruptura de la estructura cristalina y una fractura transgranular es un tipo de fisura que se produce en el interior de los granos de un material, rompiendo su estructura interna, en la figura 2 podemos observar que se generan los dos tipos de fracturas.

Un ejemplo de proceso térmico es la inyección cíclica de vapor que consiste típicamente de las fases de la figura 3 que se muestra a continuación.

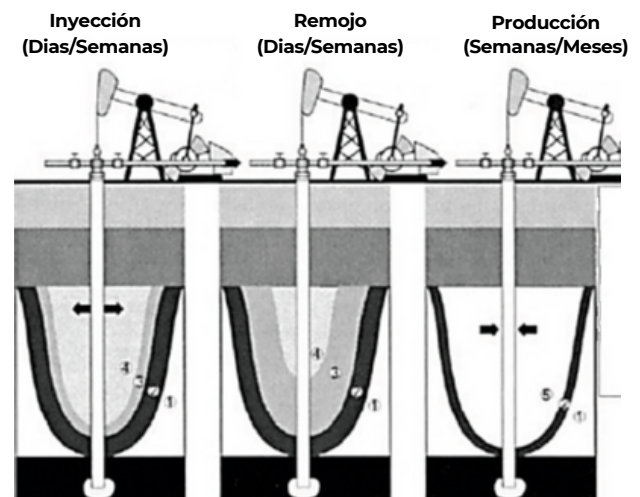


Figura 3. Fases de inyección cíclica de vapor (Alvarado D., Banzér C. 2002).

Además, a causa de las propiedades térmicas de la arenisca (ver tabla 1), la aplicación de tratamientos donde exista enfriamiento o choque térmico posterior al calentamiento, se reduce el módulo de Young y la UCS (la resistencia a la compresión uniaxial por sus siglas en inglés), los cambios afectan la integridad estructural de la roca y provocan fracturamiento que aumenta la conectividad del yacimiento, mejorando la eficiencia de la inyección de vapor.

**Tabla 1 Propiedades térmicas características de los minerales que componen la arenisca.**  
(Fuente The Aramco Journal of Technology Summer 2023)

Mineral	Coefficiente de dilatación térmica lineal (1/K)	Conductividad térmica (W/m·K)	Capacidad calorífica específica (kJ/kg·K)
Cuarzo	18 x 10 <sup>-5</sup>	6.5	0,72
Calcita	24 x 10 <sup>-6</sup>	3.6	0,8
Caolinita	18,6 x 10 <sup>-6</sup>	2.6	0,93
Esmectita	9 x 10 <sup>-6</sup>	1.9	0,93

La investigación futura en EOR se deberá centrar en la integración de las tecnologías, incluyendo el estudio exhaustivo de las propiedades mineralógicas de los yacimientos, incluyendo estudios para la mejor comprensión de los procesos de recuperación mejorada. Así llevar a cabo las reingenierías necesarias en el diseño de los procesos actuales. Por ejemplo, encontrar espacios para el desarrollo de la inyección de vapor donde existan tecnologías de choque térmico en contraposición al proceso actual donde se ejecuta inyección de vapor, remojo y producción (ver figura 3). Esto recientes estudios podrían transformar la historia de la implementación del EOR, proporcionando alternativas más seguras y eficientes en las estrategias del mejoramiento del recobro del yacimiento.



**Msc. Evelyn Quintero**

Fundadora y CEO de PetroRenova