

Control de movilidad del CO₂ mediante espumas reforzadas con HPAM

PROBLEMA

- La inyección de CO₂ propicia el recobro de petróleo con almacenamiento asociado de CO₂, pero su alta movilidad favorece efectos adversos, estos se muestran en la Fig. 1.
- Las espumas convencionales de CO₂ (CO₂ foam) reducen la movilidad del gas; sin embargo, su eficiencia disminuye en condiciones de yacimiento.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar los efectos de la adición de polímero HPAM a una solución de surfactante sobre la generación, la estabilidad, la propagación y el control de la movilidad de las espumas de CO₂ en comparación con la espuma convencional.

METODOLOGÍA

- Núcleos de arenisca: cuatro núcleos Bentheimer de 9 cm y un núcleo Berea de 83 cm.
- Formulaciones: CO₂ + Surfonic L24-22 0.5 wt.% vs CO₂ + Surfonic L24-22 0.5 wt.% + HPAM 0.5 wt.%.
- Equipo: Sistema experimental de inyección (Fig. 2.)
- Condiciones: 90 bar, 40 °C, salmuera con 3.5 wt.% de NaCl y calidad de espuma (*fg*) del 70 %.

$$fg = \frac{q_g}{q_g + q_t}$$

- Tasas de flujo: 2 y 4 ft/D, bajo esquemas en Fig. 3.
- La respuesta se cuantificó mediante la presión diferencial (DP), el factor de reducción de movilidad (MRF) y la viscosidad aparente (μ_{app}).

$$MRF = \frac{\Delta P_{foam}}{\Delta P_{no\ foam}}$$

$$\mu_{app} = \frac{k}{u_{gas} + u_{liquid}} \nabla p$$

RESULTADOS

- En núcleos cortos, la espuma con HPAM presentó valores de μ_{app} y MRF mayores a la espuma convencional, desmostrando una resistencia claramente mayor que la de la convencional (Fig. 4.).
- A 4 ft/D, el CO₂ PEF alcanzó un MRF máximo de 22.79 (promedio de 12.48), frente a 3.19 para la espuma de CO₂.
- Después de colocar PEF, la inyección posterior de CO₂ mantuvo MRF entre 8.91 y 11.68, lo que indicó un control residual de la movilidad sin inyección química continua.
- En el núcleo largo, el CO₂ PEF alcanzó un DP máximo de 11.64 bar, frente a 0.54 bar para el CO₂ foam (Fig. 5.)

Mensaje clave

La adición de HPAM transforma una espuma de CO₂ débil a moderada en un sistema con resistencia sostenida y potencial de desvío de flujo.

Indicadores destacados: MRF máx. 22.79; DP máx. 11.64 bar; μ_{app} hasta 78.84 cP.

CONCLUSIONES

- La adición de HPAM generó el CO₂ PEF que incrementó el control de la movilidad frente a la espuma de CO₂.
- Los resultados del CO₂ PEF se atribuyen al aumento de la viscosidad y la elasticidad de las lamelas, así como a la retención del polímero, que puede bloquear o desviar rutas preferenciales de flujo.
- La tecnología es prometedora para mejorar el barrido, el EOR y el almacenamiento, aunque debe optimizarse ante las limitaciones de inyectividad y de costo químico.

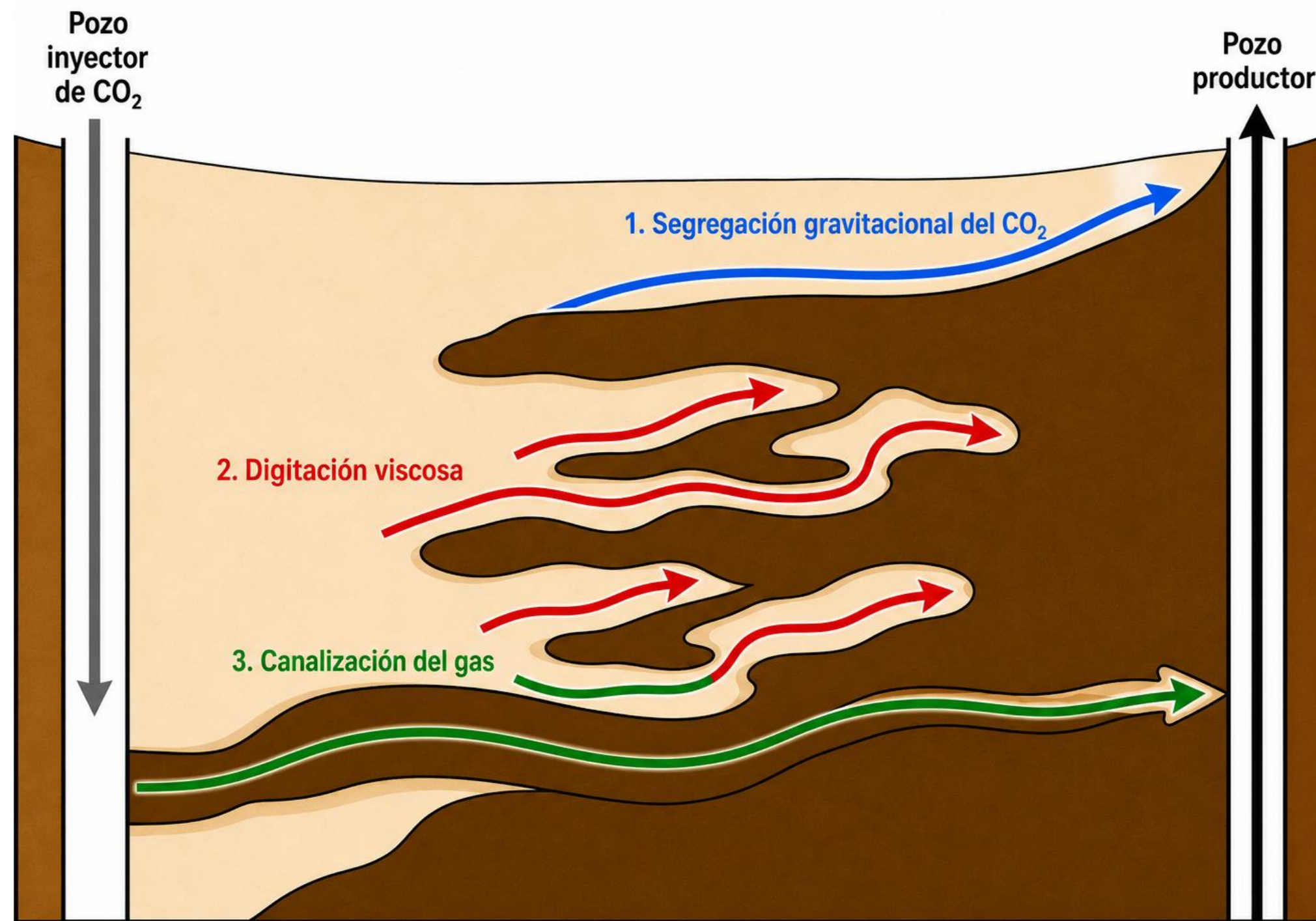


Fig. 1. Problemas asociados con la inyección de CO₂

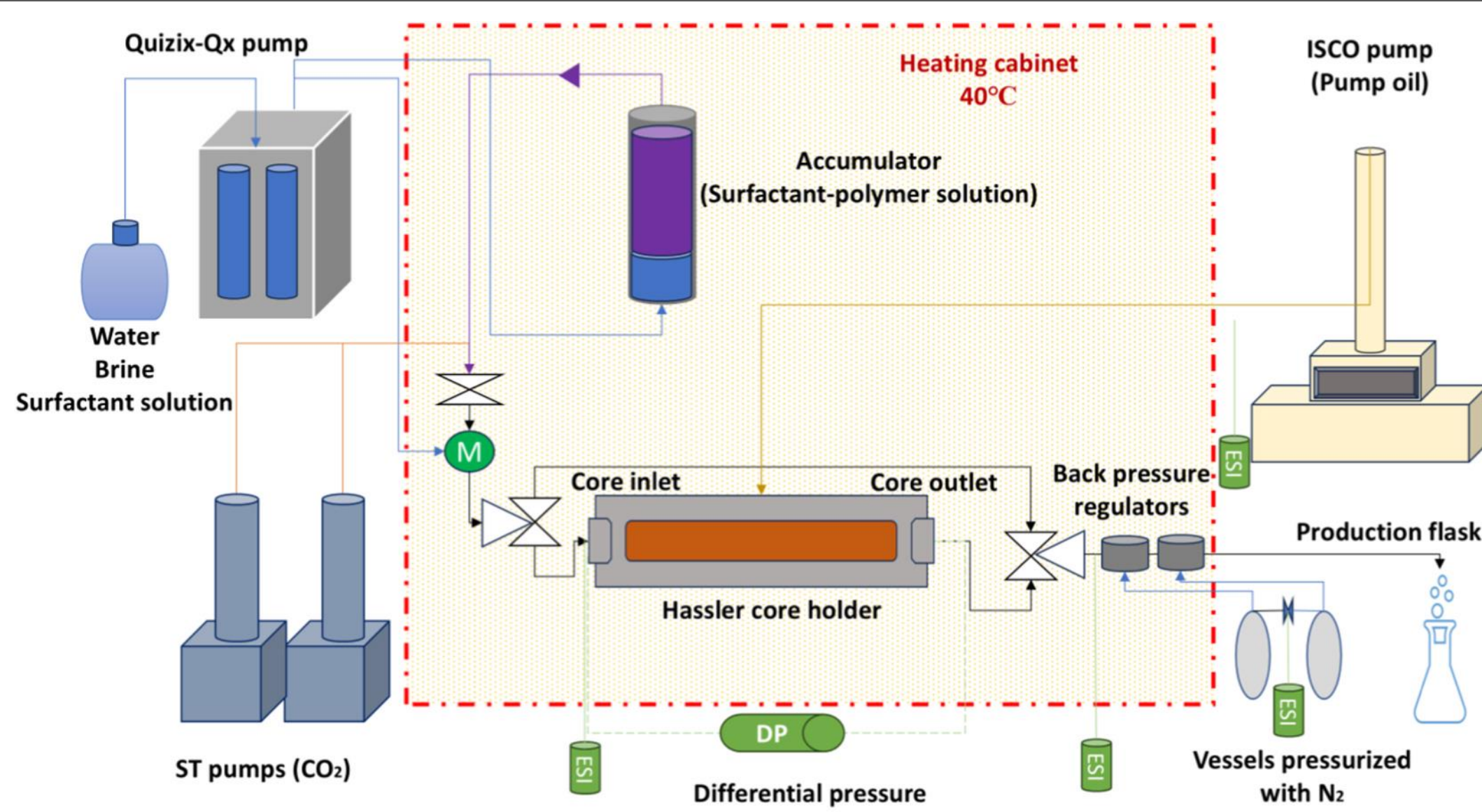


Fig. 2. Sistema experimental de pruebas de movilidad de CO₂

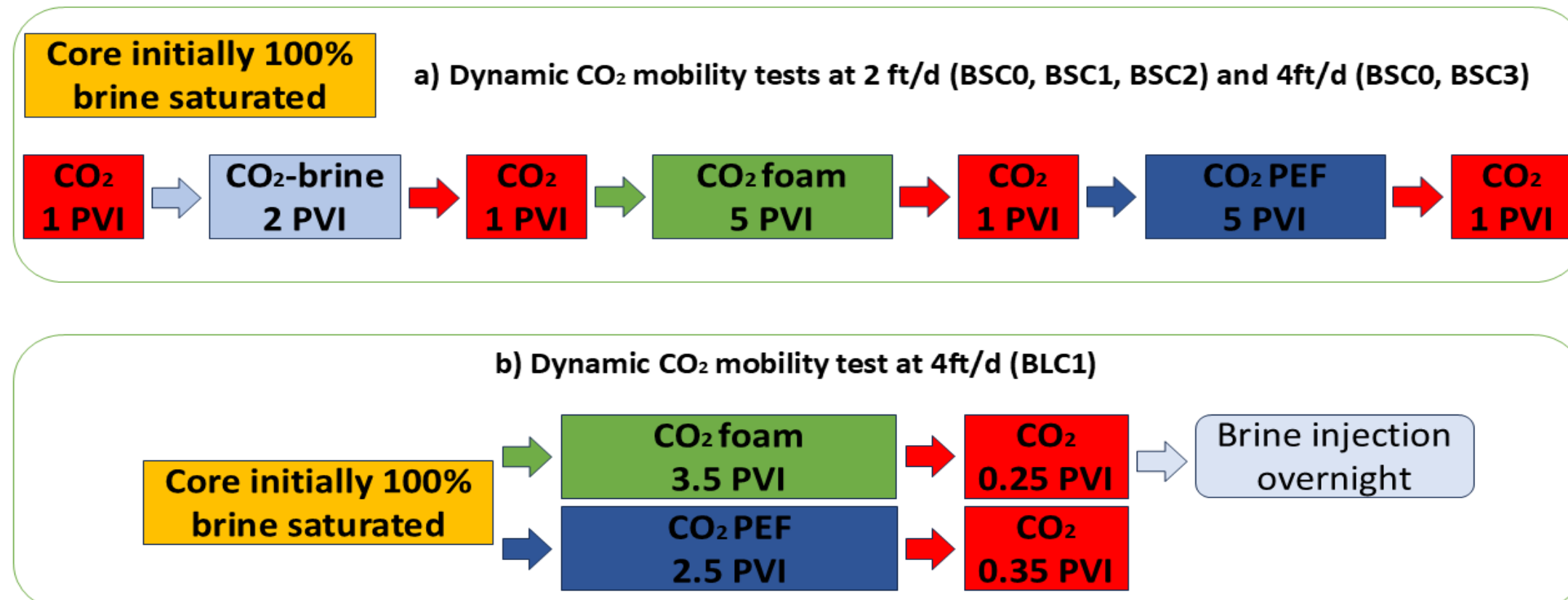


Fig. 3. Esquema de secuencias de pruebas de movilidad de CO₂

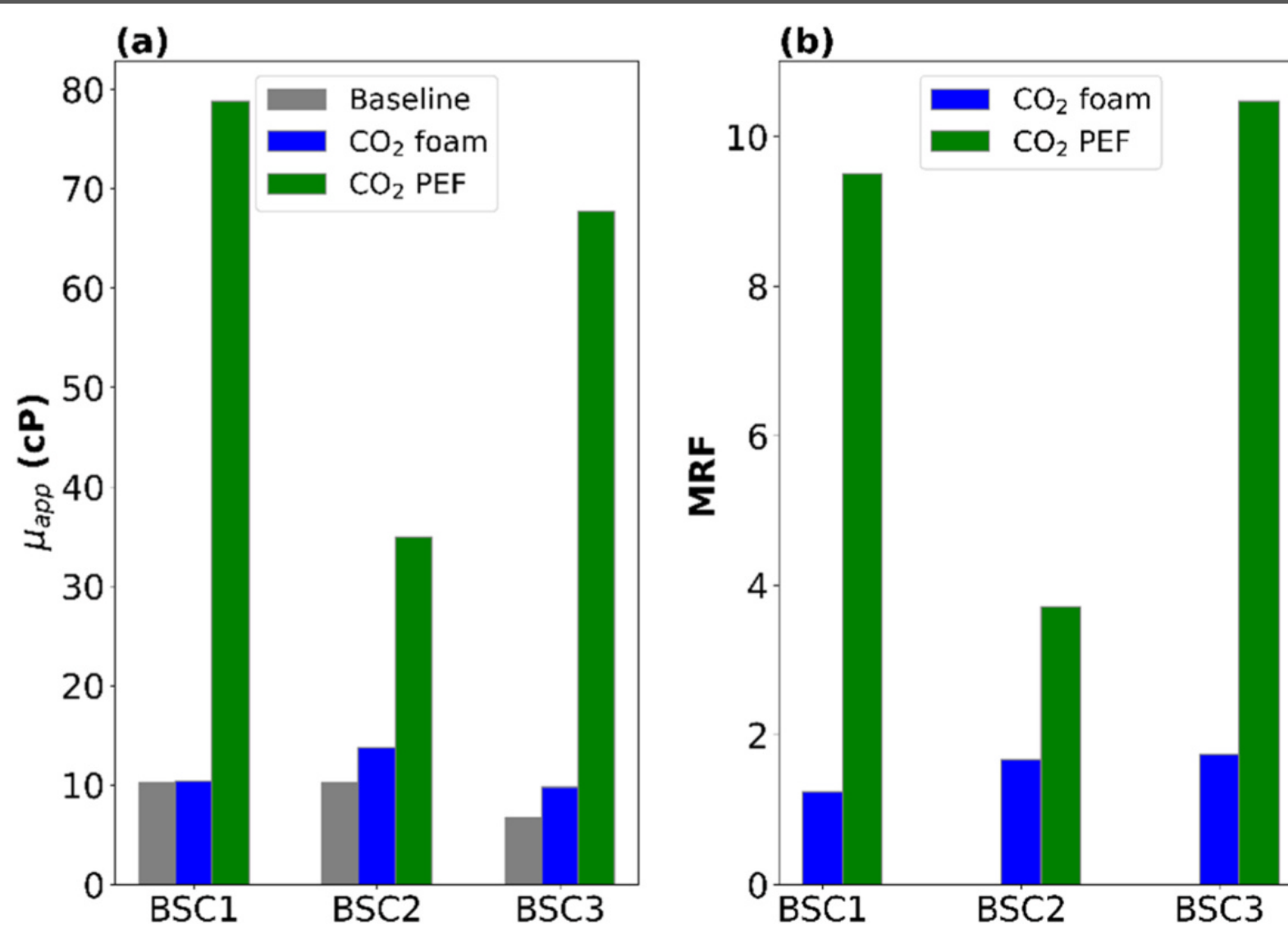


Fig. 4. Comparaciones entre los resultados de a) μ_{app} y b) MRF de los ensayos realizados en los núcleos cortos BSC1-BSC3

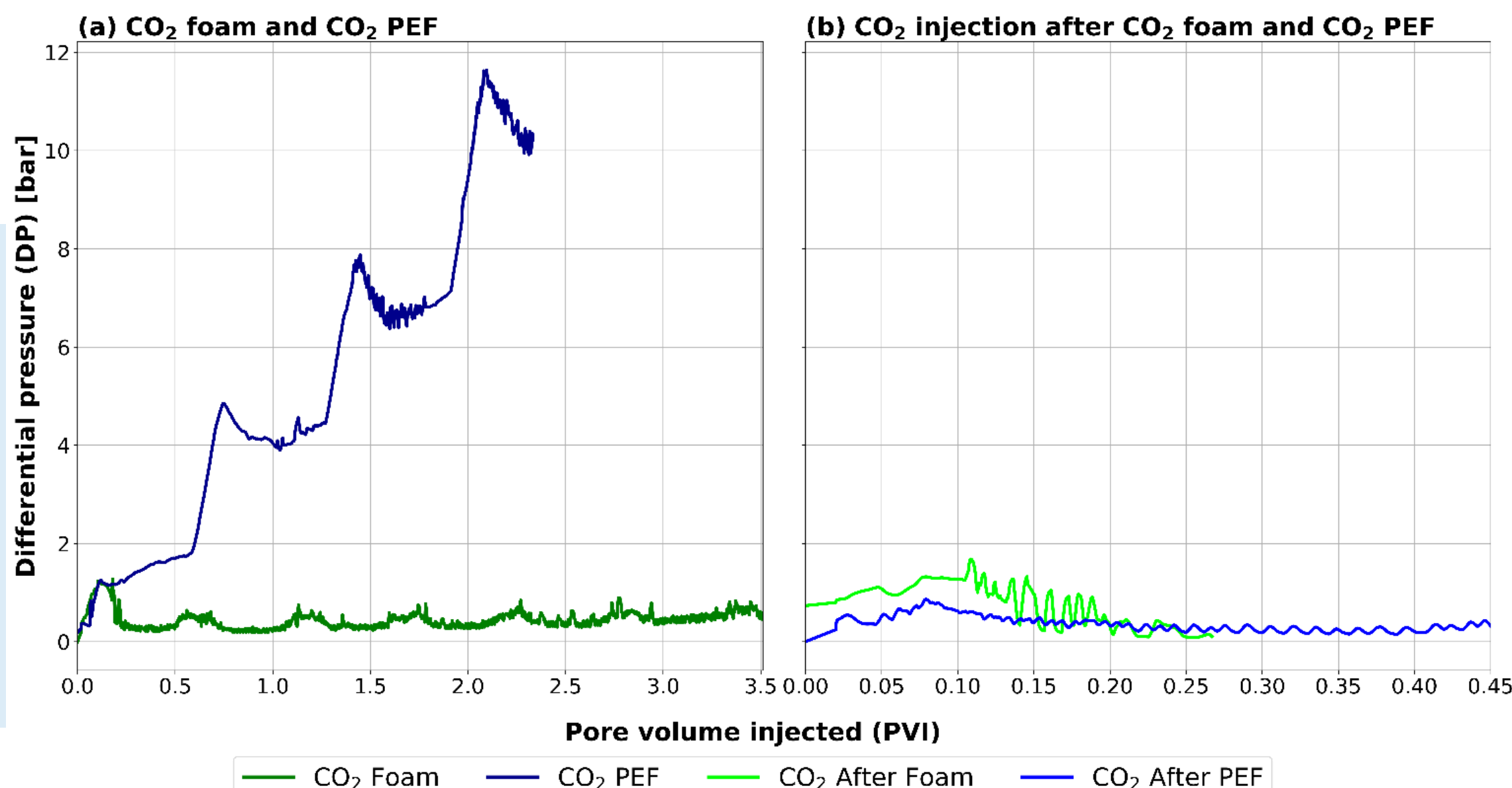


Fig. 5. Comparaciones de DP en el núcleo largo

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló con apoyo de NORAD mediante el proyecto “CO₂-EOR for CCUS in Colombia and Ecuador” (NORHED-II, Grant No. 71660), el proyecto CCUS FICT-300-2020 de ESPOL y el Reservoir Physics Research Group de la University of Bergen.

Artículo base: Geoenergy Science and Engineering 259 (2026) 214352. DOI: 10.1016/j.geoen.2025.214352