

Formato de Presentación

ACIPET

Efecto de los puntos cuánticos de carbono en las propiedades térmicas de las arenas del yacimiento

A. Rios¹, S. Céspedes¹, I. Santos¹, F.B. Cortés¹, C.A. Franco¹

¹Grupo de investigación Fenómenos de Superficie – Michael Polanyi, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

Categoría: Marque con una “X”

- Artículo Técnico
- Tesis Pregrado
- Tesis Posgrado

Derechos de Autor 2022, ACIPET

Este artículo técnico fue preparado para presentación en el XIX Congreso Regional Colombiano de Petróleo, Gas y Energía organizado por ACIPET en Cartagena, Colombia. Este artículo fue seleccionado para presentación por el comité técnico de ACIPET, basado en información contenida en un resumen enviado por el autor(es).

Resumen

Mejorar las condiciones del yacimiento para la transferencia de calor permitiría una mejor distribución de energía. De esta forma, el aprovechamiento de un recurso ya sea a través de un fluido a alta temperatura, o el uso de herramientas que calientan el yacimiento, se realizaría de manera más eficiente. Esta investigación muestra el efecto de los puntos cuánticos de carbono (CQD) en las propiedades térmicas de las arenas del yacimiento. Las propiedades térmicas evaluadas fueron conductividad, difusividad, resistividad térmica, y capacidad calorífica volumétrica. La evaluación se realizó sobre núcleos compactados a una presión de 2000 psi. Las propiedades se midieron con el equipo analizador térmico TEMPOS con sensor SH-3. Inicialmente se evaluaron tres CQD de diferente naturaleza; en este procedimiento se realizaron soluciones a 2000 ppm y los núcleos se dejaron en estas soluciones por más de 30 horas. Posteriormente, se realizaron las mediciones de las propiedades mencionadas previamente. Como resultado, se obtuvieron incrementos de 58%, 15%, 38% y 37% en conductividad térmica, difusividad, capacidad calorífica volumétrica y resistividad térmica, respectivamente. Después de este proceso, se evaluó el efecto de diferentes concentraciones del mejor CQD a 100, 1000, 5000 y 10000 ppm. Se obtuvieron mejoras similares en las propiedades evaluadas, lo que permitió elegir sistemas con concentraciones óptimas. Finalmente, se empleó un modelo de transferencia de calor para evaluar el efecto de los CQD en un caso particular de un yacimiento, comparando el desempeño con un caso base sin CQD, donde se identifica un aumento de 37°C, demostrando el desempeño de los CQD en las propiedades térmicas del medio. Los resultados obtenidos muestran que la inyección de estos fluidos, que se utilizan como trazadores, permite ampliar el panorama en la inyección de energía al yacimiento, aumentando la eficiencia de los procesos de transferencia y transformación de energía dentro del mismo.

Palabras claves: CQD, Calor específico, Conductividad térmica, difusividad térmica, eficiencia energética, yacimientos de hidrocarburos.

Introducción

Debido a la actual dependencia de las actividades humanas a los combustibles fósiles, se pone en evidencia la necesidad de emprender iniciativas que lleven a la optimización de los procesos involucrados en la industria del petróleo, esto con el fin de buscar un incremento en la eficiencia de los recursos invertidos [1].

Una de las formas en las cual se invierte energía a los yacimientos de hidrocarburos es a través de la inyección de energía en forma de fluidos como vapor o agua caliente para el aumento de temperatura o también el uso de herramientas para la inyección de energía en forma de trabajo eléctrico [2]. La energía invertida en el yacimiento se utiliza para modificar propiedades fisicoquímicas de fluidos como crudos en yacimiento de crudos pesados y extrapesados, para aumentar la producción de los fluidos y de esta manera, aumentar el factor de recobro en el campo [3]. Aumentar la eficiencia de los procesos de inyección de energía en yacimiento es vital para el ahorro

de combustible y la distribución de energía en reservorios. Una forma de aumentar la eficiencia de estos procesos es a través de la adición de materiales que permitan transferir la energía en forma de calor de mejor manera a través del yacimiento [4].

Múltiples investigaciones se han enfocado en la mejora de los procesos de transferencia de calor en yacimiento [4-7]. La investigación presentada por Xuan et al. [8] permitió mostrar que la adición de metales en tamaño nanométrico permitía la mejora de las propiedades térmicas de los fluidos bases, además que el tamaño permitió evadir algunos problemas presentados en el mismo escenario cuando se utilizaba partículas micrométricas donde se presentaba poca estabilidad de fluido y precipitaciones. Los resultados presentados con los nanofluidos llevaron a la comunidad científica a evaluar este tipo de procesos, por ejemplo, en la investigación realizada por Daneshpour et al. [5] se muestra el uso de nanofluidos como fluidos novedosos para la mejora de la transferencia de calor, los autores utilizan nanomateriales de Al_2O_3 y CuO y evalúan el efecto en la transferencia de calor en un circuito cerrado representando el yacimiento como un intercambiador de calor. Los resultados de esta investigación muestran que el uso de nanofluidos permitió aumentar el coeficiente de transferencia de calor en un 14%. Por otro lado, la investigación realizada por Faizal et al. [4] demostró la mejora en transferencia de calor en yacimientos a través de materiales nanométricos como plata, cobre, aluminio, nanotubos de carbono, alúmina, óxido de titanio, óxido de cobre y grafito, mostrando mejoras en el coeficiente global de transferencia de calor de hasta un 20%.

Por otro lado, aunque los nanofluidos han presentado buenos resultados en la mejora de la transferencia de calor, aun presentan problemas con la estabilidad de las partículas a bajos flujos y largos tiempos de respuesta [7, 9]. Debido al problema de estabilidad, se han presentado otro tipo de materiales para la mejora de transferencia de calor en fluidos de transporte de energía, estos materiales son conocidos como puntos cuánticos de carbono (CQD) [10]. Los CQD son nanomateriales que presentan una mejor estabilidad en fluidos transportadores de energía al compararlos con nanomateriales basados en óxidos metálicos como los presentados en las investigaciones discutidas previamente. Estos materiales novedosos han sido usados en diferentes aplicaciones para mejorar la transferencia de calor [6, 11-15]. Li et al. [11] utilizó CQD y nanopartículas para promover la conversión fotocatalítica en materiales, además de mejorar las propiedades térmicas del conjunto obtenido. Por otra parte, El-Shamy et al. [13] fabricó un híbrido de alcohol polivinílico /puntos cuánticos de carbono/fullereno para ser usado como material para aplicaciones termoeléctricas donde se destaca la mejora en conductividad eléctrica y térmica. La participación de los CQDs fue importante debido a que permitieron que esta mejora se conservara en el tiempo para los materiales obtenidos. Las investigaciones mencionadas previamente destacan la importancia de los CQD en la mejora de propiedades térmicas aplicadas a distintas áreas.

Respecto a los fluidos transportadores de energía, Rashidi et al. [6] utilizó por primera vez CQDs en refrigerante de radiadores de carros en concentraciones de 100, 200, 500, y 1000 ppm. Los resultados mostraron una buena estabilidad del fluido al igual que mejoras en conductividad térmica del fluido obtenido en un 5.7% al igual que de un 16.2% en el coeficiente de transferencia de calor. Los CQDs utilizados en esta investigación fueron obtenidos a partir de hidrogenocitrato de amonio comercial. También, Mousavi et al. en dos investigaciones relacionadas con el uso de CQDs para la mejora de la transferencia de calor en fluidos [14, 15] demostró mejoras en refrigerantes de hasta un 25% en la conductividad térmica al igual que un aumento en el 25% en la efectividad en la transferencia de calor. Los fluidos fueron aplicados a torres de enfriamiento donde mostraron resultados similares [15]. Por otro lado, Seifkar & Azizian [16] han demostrado la utilidad de los CQDs en el aprovechamiento de energía solar, donde son económicamente viables, y tienen alta conversión de energía solar a térmica con alta estabilidad hasta temperaturas de 200°C. Finalmente, Mirsaedi & Yousefi [12] demostraron el efecto de CQDs en la viscosidad, conductividad térmica, y densidad en agua, etilenglicol y mezclas agua-etilenglicol, Los resultados mostraron un aumento en la conductividad térmica de hasta un 25% con aumentos en la viscosidad de un 47% y aumentos en la densidad de hasta 0.5 %. Los resultados de esta investigación muestran el potencial que tienen los CQD para mejorar los procesos de transporte de energía al considerar fluidos de uso común como el agua y el etilenglicol.

Es importante destacar, que, a lo mejor de nuestro conocimiento, aun no se tienen investigaciones del efecto de los CQD sobre las propiedades térmicas de las arenas de los yacimientos de hidrocarburos, y tampoco se ha evaluado el efecto que tienen estos materiales en la transferencia de energía al inyectar una fuente de energía como puede ser una herramienta o la inyección de vapor en un proceso de recuperación térmica mejorada de petróleo (TEOR, por sus siglas en inglés). En este sentido, esta investigación se centra en la aplicación de materiales novedosos como CQDs en la mejora de propiedades térmicas de arenas de yacimiento de hidrocarburos y el efecto que tiene estos en los procesos de transferencia de calor. El desarrollo de la investigación incluye la evaluación de distintos CQD en núcleos realizados en laboratorio a partir de propiedades como conductividad térmica, resistividad térmica y capacidad calórica volumétrica. También, se considera la selección del mejor CQD para evaluación a diferentes concentraciones, permitiendo analizar el efecto de concentración sobre las propiedades consideradas. Finalmente, se muestra el desarrollo de un modelo analítico de transferencia de calor para valorar el efecto del CQD en situaciones de inyección de energía al yacimiento. Con el desarrollo de esta investigación se pretende encontrar tecnologías que permitan aprovechar de manera mas eficiente la energía invertida en los procesos llevados a cabo en yacimiento.

Metodología

Evaluación de núcleos. El elemento representativo de yacimiento se obtuvo a partir de la compactación de una arena de un campo petrolero colombiano que se encontraba empapado de aceite. Para realizar los núcleos la arena se compactó en cilindros envueltos en aluminio y se presurizó el sistema hasta 2000 psi, permitiendo obtener un sistema estable. La Figura 1 muestra una representación gráfica del proceso de realización de núcleos.

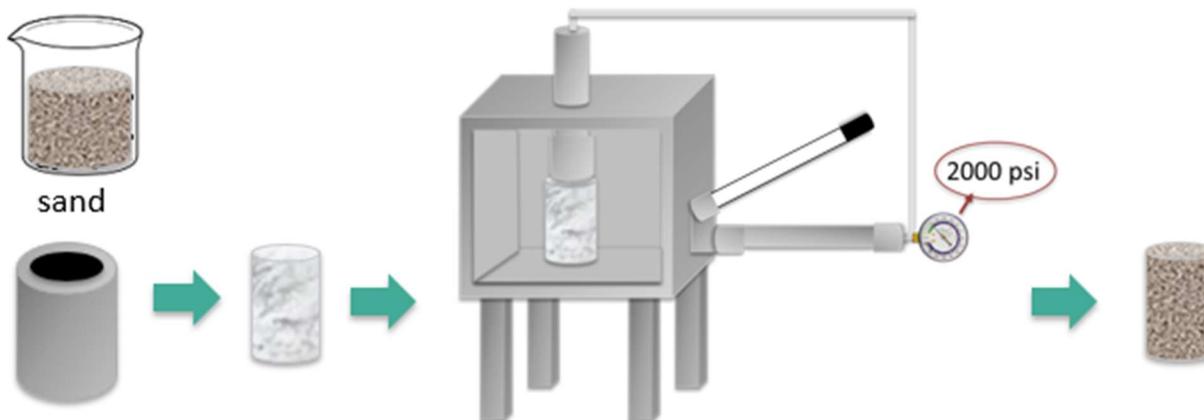


Figura 1. Metodología de compactación de núcleos.

Luego de la elaboración de los núcleos, se procedió a sumergir cada núcleo en diferentes fluidos que consistían en agua con diferentes CQD a una misma concentración de 2000 ppm. Los CQD son nombrados a partir del color representativo de la solución formada. De esta manera, para esta investigación se tienen los CQD azul, rojo y verde. Para la estabilización de las soluciones, cada muestra de fluido se dejó en proceso de sonicación por un periodo de 30 minutos. La Figura 2 muestra una representación gráfica del proceso realizado sobre los núcleos obtenidos del paso anterior.

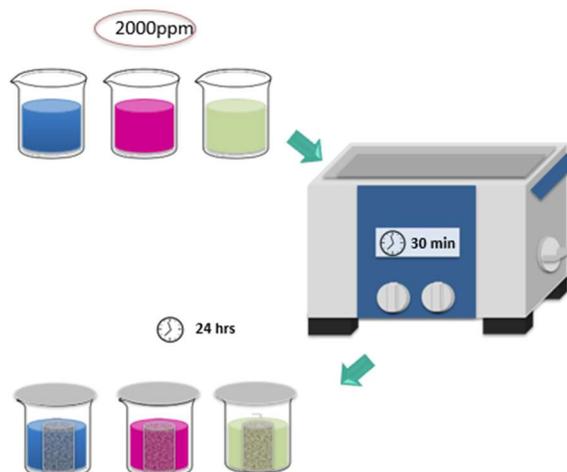


Figura 2. Preparación de núcleos en diferentes soluciones con CQDs azul, rojo y verde a 2000 ppm.

Las medidas de las propiedades térmicas se realizaron con el equipo analizador térmico TEMPOS con sensor SH-3 (Meter, United States). El sensor permite evaluar propiedades de sólidos con especificidad en conductividad térmica, difusividad térmica, capacidad térmica volumétrica, y resistividad térmica.

Luego de la evaluación de los núcleos, se procedió a comparar los resultados y elegir el CDQ con los mejores resultados. Con este CQD se realizaron pruebas a concentraciones de 100, 1000, 5000 y 10000 ppm con el fin de evaluar el efecto de la concentración en las

propiedades térmicas de los núcleos. Al igual que en el procedimiento anterior, se realizó un proceso de sonicación de las soluciones a diferentes concentraciones por un periodo de 30 minutos para posteriormente ingresar los núcleos.

La evaluación de los núcleos se realiza en el tiempo, donde en la última etapa se analizó la estabilidad del nanofluido a partir del cambio de las propiedades térmicas en un periodo de 1128 h.

Modelo analítico de transferencia de calor en yacimiento. Para la aplicación de los resultados obtenidos de manera experimental, se desarrolla un modelo analítico de transferencia de calor donde se considera solo el fenómeno de conducción en el medio poroso en la dirección radial donde no hay generación de energía en forma de calor y tampoco acumulación. Para el desarrollo del modelo se considera el balance de energía en forma de calor mostrada en la Ecuación (1).

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \dots\dots\dots(1)$$

El modelo mostrado en la Ecuación 1 se resuelve entre el radio de pozo y un radio de invasión considerando que se conoce la temperatura en el radio de pozo debido a que es la inyección de vapor se realiza a una temperatura conocida. Por otra parte, también se conoce el flujo de vapor inyectado. De esta manera, se conocería el flujo de energía que se transfiere en el sistema considerado. Teniendo en cuenta lo escrito anteriormente, el modelo analítico que indica la temperatura en función del radio se muestra en la Ecuación (2).

$$T(r) = \frac{q_r r_d}{KA} \left[\ln(r_w) - \ln(r) \right] + T_{steam} \dots\dots\dots(2)$$

donde $T(r)$ [°C] es la temperatura del medio poroso en función del radio r , q_r [kJ s⁻¹] es el flujo de energía inyectado en el yacimiento, r_d [m] es el radio de invasión, A [m²] es el área transversal a la dirección del flujo de transferencia de calor en el radio de pozo, K [W m⁻¹ K⁻¹] es la conductividad térmica del medio poroso, r_w [m] es el radio de pozo, y T_{steam} [°C] es la temperatura del vapor inyectado en el medio poroso.

La Tabla 1 muestra información de las constantes consideradas para el modelo mostrado en la Ecuación (2).

Tabla 1. Propiedades para cálculo de temperatura en función del radio.

Propiedad	valor
Densidad del agua [kg m ⁻³]	997
Densidad del vapor de agua saturado (x=1) a 250°C [kg m ⁻³]	0.050081
Área [m ²]	282.3
r_w [m]	0.335
h [m]	134
T_{steam} [°C]	523.15
r_d [m]	0.8409

Para la solución del modelo mostrado en la Ecuación 2, se consideró el cambio de conductividad debido al uso de CQD, esta información es tomada de la primera parte de la investigación.

Resultados

Best-in-class: Selección de mejor CQD. En una primera aproximación, se evalúa el efecto de tres (3) diferentes CQDs a 2000 ppm en

núcleos donde previamente se midieron las propiedades térmicas de interés con el fin de realizar comparación y conocer el porcentaje de mejora en cada propiedad. Los resultados de este procedimiento se muestran en la Figura 3. Los resultados obtenidos indican que, respecto a la conductividad térmica, el CQD rojo tiene un mayor impacto, ocasionando un mayor aumento (64%), esto también se refleja en la resistividad, donde ocurre igualmente el mayor cambio, indicando la disminución más drástica en esta propiedad. Por otro lado, al analizar la capacidad calorífica volumétrica también se identifica el efecto del CQD rojo, donde se tiene el mayor porcentaje de aumento (19%). En términos de transferencia de calor, este último valor solo es favorable para sistemas donde se requiere guardar energía, para sistemas donde se prefiere el tránsito de energía y la transferencia a través de un medio, se buscan condiciones de bajas capacidad calorífica volumétrica. Finalmente, al analizar la difusividad térmica se puede destacar que para el CQD rojo se presenta el mayor aumento, con un valor de 38%. El último resultado presentado demuestra la buena capacidad de los núcleos que interactuaron con los CQDs rojos por 24 h en mejorar las condiciones para la transferencia de calor. Como conclusión, el mejor CQD fue el rojo, seguido del azul y, finalmente el verde, en este mismo orden se muestran las mejoras en las propiedades térmicas evaluadas.

Se debe aclarar que, aunque el CQD rojo presenta un aumento considerable en capacidad calorífica volumétrica, se selecciona este material debido al aumento en la difusividad térmica, que indica que es favorable en el escenario de transferencia de calor en el medio poroso. Para complementar los resultados obtenidos, esto se encuentran de acuerdo con lo reportado por [13] donde se obtienen materiales con mejores propiedades térmicas a partir de la adición de CQDs.

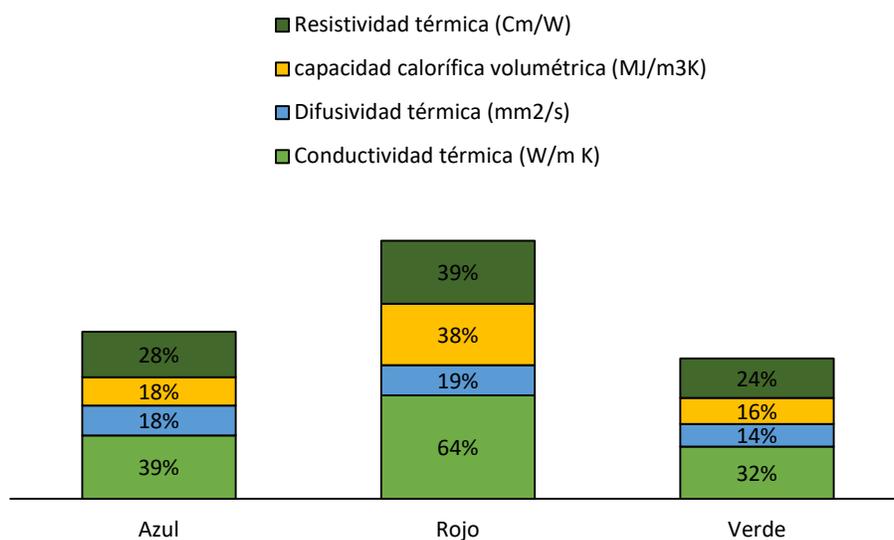


Figura 3. Cambio en las propiedades térmicas evaluadas en núcleos con CQD azul, rojo y verde a 2000 ppm.

Efecto de la concentración de CQD en las propiedades térmicas de los núcleos. En esta sección se muestra el efecto de la concentración de CQD rojo en las propiedades térmicas de los núcleos después de 120 h de interacción. Para esto, primero se evaluaron las propiedades de cada núcleo previo a la interacción con la solución a las concentraciones de 100, 1000, 2000, 5000, y 10000 ppm, esto con el fin de comparar con una base y obtener el porcentaje de mejora. Los resultados de esta etapa son mostrados en la Figura 4.

Las muestras presentan el siguiente orden descendiente en mejora de la conductividad térmica: 2000 ppm > 5000 ppm > 100 ppm > 1000 ppm > 10000 ppm. En este caso se muestra que la mayor mejora no se encuentra en la muestra de mayor concentración, esto se puede explicar por la interacción que puede tener el CQD a estas concentraciones con el crudo que se encuentra pegado a la arena donde se hicieron los núcleos, donde el CQD tendrá mayor interacción con este fluido, prefiriéndolo por encima de la arena y afectando la mejora de conductividad térmica, como ocurre con las nanopartículas de óxidos metálicos [17]. La misma tendencia observada para la conductividad térmica es observada para la resistividad térmica.

Al analizar la capacidad calorífica volumétrica, las mejores condiciones, en orden descendientes de las muestras son: 10000 ppm < 5000 ppm < 1000 ppm < 100 ppm < 2000 ppm. Se debe recordar que para un medio donde se busca transferir de mejor manera la energía disponible, se busca sistemas con baja capacidad calorífica volumétrica. Como se discutió anteriormente, se puede destacar que a la

mayor concentración de CQD, se tiene el mejor efecto de cambio en el calor específico, lo que indica que el CQD interactúa con el aceite presente en la arena.

Finalmente, al analizar la difusividad térmica, las mejores condiciones, en orden descendentes de las muestras son: 5000 ppm > 10000 ppm > 2000 ppm > 100 ppm > 1000 ppm. Se debe aclarar que la diferencia entre las 3 últimas (2000 ppm, 100 ppm, y 1000 ppm) no es significativa, con lo que se considerará un cambio de la misma magnitud. Al considerar la difusividad de gran importancia, considerándola como una medida directa de la eficiencia en la transferencia de calor, se debe considerar la muestra de 5000 ppm como la de mejor rendimiento térmico, esto también se puede destacar al analizar los resultados obtenidos para la conductividad térmica y la capacidad calorífica volumétrica. Por otro lado, al analizar el desempeño del CQD rojo a una concentración de 100 ppm, se puede observar buenos resultados a bajas concentraciones, lo que indica un buen desempeño con un gran rendimiento económico al compararlos con las otras muestras. Debido a los resultados mostrados, se eligen las muestras con concentraciones de CQD de 100 ppm y 5000 ppm para el análisis a través del tiempo.

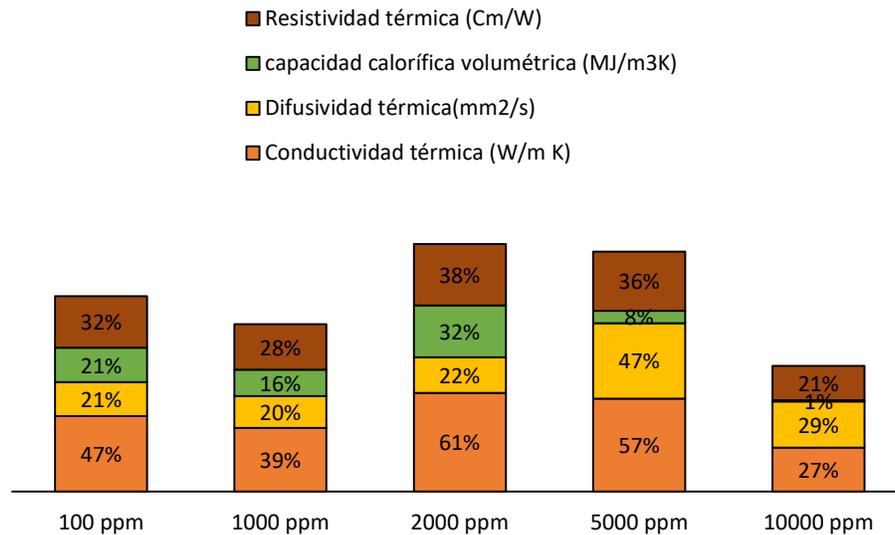


Figura 4. Cambio en las propiedades térmicas evaluadas en núcleos con CQD rojo a 100, 1000, 2000, 5000 y 10000 ppm.

Evaluación de CQD en el tiempo. En esta sección, los resultados relacionados con los cambios en el tiempo de la conductividad térmica, capacidad calorífica volumétrica, difusividad térmica, y resistividad térmica para las muestras de CQD rojo a 100 ppm y 5000 ppm. La Figura 5 muestra los resultados luego de 1128 h de interacción de los sistemas. Como se puede observar, la muestra de 100 ppm muestra mejores resultados respecto a las propiedades conductividad y resistividad térmicas. Por otra parte, a 5000 ppm se identifican mejores rendimientos en la difusividad térmica y capacidad calorífica volumétrica. También se debe aclarar que no se observó precipitación en algunas de las muestras y que las propiedades se mantuvieron en el tiempo. A bajas concentraciones de CQD, este no tiene una interacción significativa con el crudo adherido a la arena, permitiendo la distribución del CQD dentro del núcleo, aumentando la conductividad y calor específico volumétrico del medio, similar a lo ocurrido con los nanofluidos basados en óxidos metálicos [7]. Por otra parte, cuando se tienen altas concentraciones de CQD (5000 ppm), este comienza a interactuar de forma más intensa con el crudo que se encuentra adherido a la arena, lo que produce menores aumentos en conductividad térmica y calor específico volumétrico, pero este tipo de interacciones permite que el calor transferido a través del sistema que considera arena, CQD, y crudo, se realiza de una manera más fácil (mayor difusividad térmica).

Los resultados previamente discutidos demuestran los beneficios que tienen los CQD para mejorar las propiedades térmicas de la arena representativa de yacimientos de hidrocarburos. En la siguiente sección se evaluarán los resultados de la conductividad obtenida de manera experimental en un modelo analítico mostrado en la Ecuación (2).

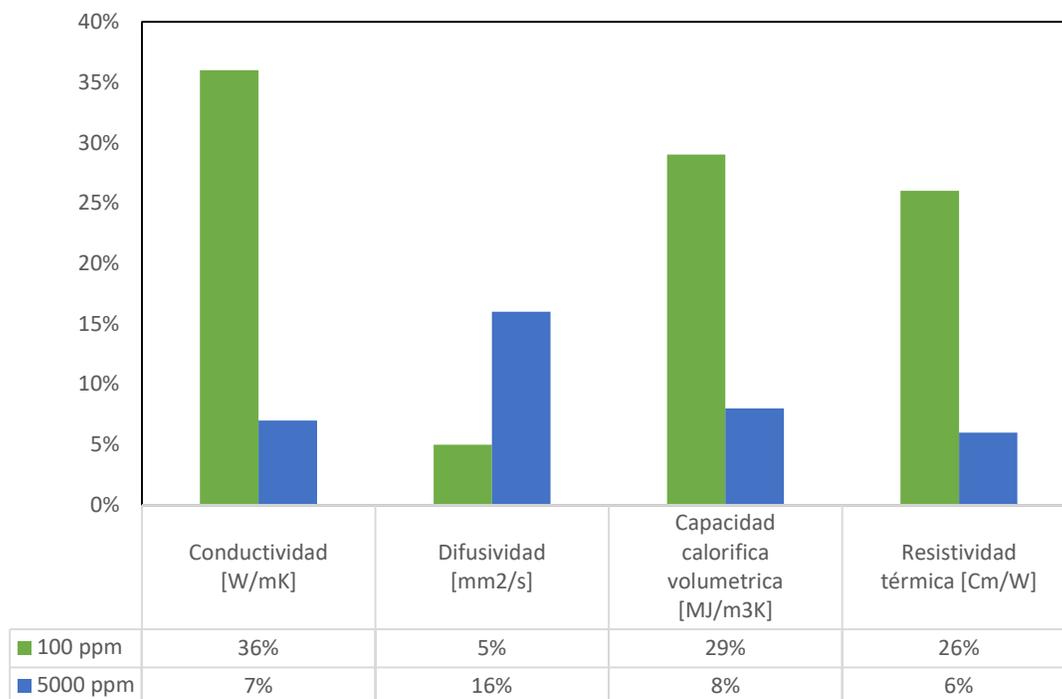


Figura 5. comparación entre sistemas de 100 ppm y 5000 ppm de CQD rojo después de 1128 h de interacción con núcleos

Evaluación de fluidos en modelo analítico de temperatura. Como se mencionó previamente, se utiliza la información de conductividad térmica de las muestras obtenidas para las muestras de 100 ppm y 5000 ppm de CQD rojo en los núcleos para resolver el modelo mostrado en la Ecuación 2 junto a la información que se detalla en la Tabla 1. La conductividad tomada para el caso de 100 ppm de CQD rojo es de $1.657 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ y para la muestra de 5000 ppm es de $1.279 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. La Figura 6 muestra el perfil de temperaturas para el caso de 100 ppm y 5000 ppm de CQD en interacción con el reservorio. El caso evaluado considera una profundidad de 134 m con un gradiente geotérmico de 25°C km^{-1} con el fin de representar un proceso de inyección de vapor real.

El panel a de la Figura 6 muestra mejores resultados al compararlo con el panel b, considerando la temperatura del medio una medida de la energía. Esto se justifica por la diferencia de conductividades de las muestras, donde para 100 ppm de CQD se tienen mejores conductividades. También se debe aclarar que el modelo no consideró fenómenos detallados como la convección o la acumulación de energía. Bajo las suposiciones realizadas, en un escenario de inyección de vapor donde se busca que la energía se aproveche de mejor manera al ser transferida desde la fuente (cara de pozo) hasta un radio de impacto, se puede utilizar una baja concentración de CQD que permite tener fluidos a mayor temperatura y, de esta manera, distribuir la energía de manera más eficiente, que era lo buscado con la adición de los CQD.

Los resultados obtenidos del modelo analítico representado por la Ecuación 2 muestra la utilidad de los CQD, aunque los resultados se pueden complementar con evaluaciones experimentales realizadas a escala de laboratorio, donde se tenga medidas de las pérdidas de transferencia de calor al igual que fenómenos como la convección o la conversión de muestras de crudos que pueden provocar efectos exotérmicos que llevan a un mayor incremento de la temperatura, como se ha mostrado en otras investigaciones [2, 18].

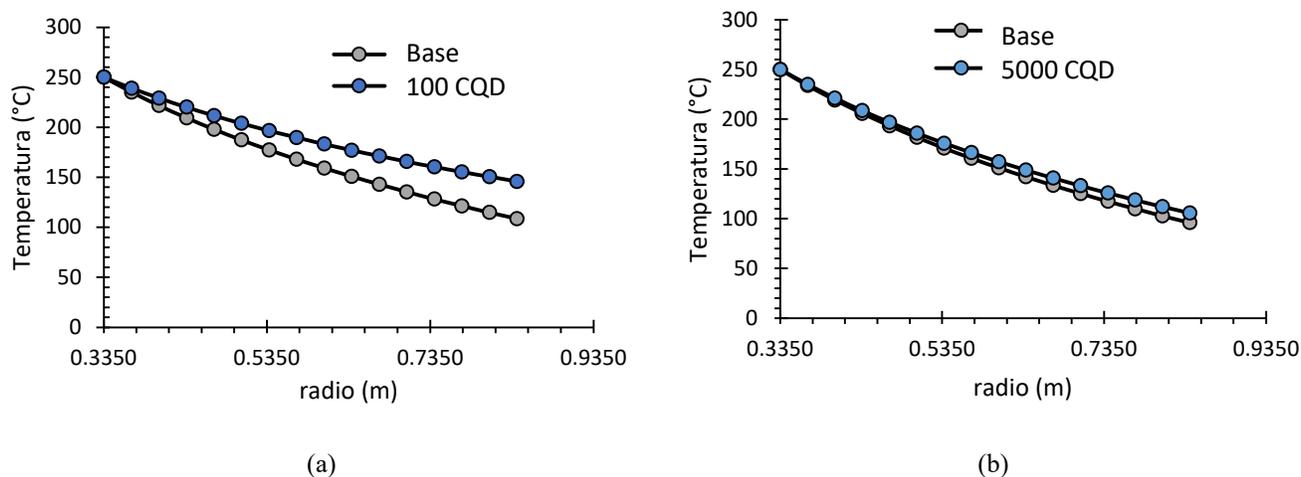


Figura 6. perfil de temperatura en función del radio para un sistema de inyección de vapor saturado ($X=1$) a 250°C .

Conclusiones

- Las pruebas realizadas permitieron determinar que al invadir el medio con CQDs se presentan mejoras en las propiedades térmicas de la arena, las cuales se encuentran relacionadas con las propiedades de los CQDs.
- El CQD rojo permitió obtener los mejores resultados, al compararlo con los CQD azul y verde. Aunque se debe destacar que todos los CQD mostraron mejoras en las propiedades térmicas analizadas y buena estabilidad al compararlo con sistemas donde se usan nanomateriales de óxidos metálicos.
- Por medio del proceso experimental se logró obtener datos que llevaron a modelar el comportamiento de la temperatura en el pozo, dando como resultado perfiles de temperatura que permitieron analizar como se aprovecha la energía invertida en el reservorio a través de la inyección de vapor, obteniendo procesos mas eficientes.
- Se demostró que los CQD son buenos materiales para el uso en procesos de la industria del petróleo, como lo son los procesos TEOR. También se debe aclarar que este tipo de compuestos son usados como trazadores en la industria del petróleo y gas.
- Los CQDs se presentan como materiales multifuncionales, que permiten imponer tecnologías novedosas que pueden tener beneficios para la industria del petróleo, como para la energía geotérmica al permitir mejorar las propiedades térmicas de las arenas donde estos fluidos son inyectados, algo que ha sido mencionado en diferentes investigaciones [5, 17, 19].

Agradecimientos

Referencias

- [1] A. Vilches, D. Gil Pérez, J. Toscano, and O. Macías. La transición energética. Una Nueva Cultura de la Energía [Online]. Available: <http://www.oei.es/decada/accion.php?accion=023>
- [2] O. E. Medina, C. Olmos, S. H. Lopera, F. B. Cortés, and C. A. Franco, "Nanotechnology applied to thermal enhanced oil recovery processes: a review," *Energies*, vol. 12, p. 4671, 2019.
- [3] J. J. Sheng, "Status of surfactant EOR technology," *Petroleum*, vol. 1, pp. 97-105, 2015.
- [4] M. Faizal, A. Bouazza, and R. M. Singh, "Heat transfer enhancement of geothermal energy piles," *Journal Renewable Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 16-33, 2016.
- [5] M. Daneshpour and R. Rafee, "Nanofluids as the circuit fluids of the geothermal borehole heat exchangers," *J International Communications in Heat Mass Transfer*, vol. 81, pp. 34-41, 2017.
- [6] A. Rashidi, B. Ghobadian, G. Najafi, M. H. Khoshtaghaza, N. A. C. Sidik, A. Yadegari, *et al.*, "Experimental investigation of conduction and convection heat transfer properties of a novel nanofluid based on carbon quantum dots," *International Communications in Heat and*

- Mass Transfer*, vol. 90, pp. 85-92, 2018.
- [7] L. Godson, B. Raja, D. M. Lal, and S. Wongwises, "Enhancement of heat transfer using nanofluids—an overview," *J Renewable sustainable energy reviews*, vol. 14, pp. 629-641, 2010.
- [8] Y. Xuan and Q. Li, "Heat transfer enhancement of nanofluids," *J International Journal of heat fluid flow*, vol. 21, pp. 58-64, 2000.
- [9] M. Molana and H. Wang, "A critical review on numerical study of nanorefrigerant heat transfer enhancement," *Powder Technology*, vol. 368, pp. 18-31, 2020.
- [10] S. Y. Lim, W. Shen, and Z. Gao, "Carbon quantum dots and their applications," *Chemical Society Reviews*, vol. 44, pp. 362-381, 2015.
- [11] J. Li, Y. Ma, Z. Ye, M. Zhou, H. Wang, C. Ma, *et al.*, "Fast electron transfer and enhanced visible light photocatalytic activity using multi-dimensional components of carbon quantum dots@ 3D daisy-like In₂S₃/single-wall carbon nanotubes," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 204, pp. 224-238, 2017.
- [12] A. Mirsaedi and F. Yousefi, "Viscosity, thermal conductivity and density of carbon quantum dots nanofluids: an experimental investigation and development of new correlation function and ANN modeling," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 143, pp. 351-361, 2021.
- [13] A. gamal El-Shamy, "Novel hybrid nanocomposite based on Poly (vinyl alcohol)/carbon quantum dots/fullerene (PVA/CQDs/C60) for thermoelectric power applications," *Composites Part B: Engineering*, vol. 174, p. 106993, 2019.
- [14] H. Mousavi, S. M. T. Ghomshe, A. Rashidi, and M. Mirzaei, "Hybrids carbon quantum dots as new nanofluids for heat transfer enhancement in wet cooling towers," *Heat and Mass Transfer*, vol. 58, pp. 309-320, 2022.
- [15] M. Hamid, T. G. Seyed Mostafa, R. Alimorad, and M. Masoumeh, "A Novel Approach for Energy and Water Conservation by Using Silver-Carbon Quantum Dots Hybrid Nanofluids in Wet Cooling Towers Systems," *Journal of Thermal Science*, vol. 30, pp. 1827-1841, 2021.
- [16] F. Seifikar and S. Azizian, "Super-stable carbon quantum dots nanofluid for efficient solar-thermal conversion," *Energy Conversion and Management*, vol. 228, p. 113675, 2021.
- [17] S. Angayarkanni and J. Philip, "Review on thermal properties of nanofluids: Recent developments," *Advances in colloid and interface science*, vol. 225, pp. 146-176, 2015.
- [18] O. E. Medina, C. Caro-Vélez, J. Gallego, F. B. Cortés, S. H. Lopera, and C. A. Franco, "Upgrading of extra-heavy crude oils by dispersed injection of NiO–PdO/CeO₂±δ nanocatalyst-based nanofluids in the steam," *Nanomaterials*, vol. 9, p. 1755, 2019.
- [19] G. Diglio, C. Roselli, M. Sasso, and U. J. J. G. Channabasappa, "Borehole heat exchanger with nanofluids as heat carrier," vol. 72, pp. 112-123, 2018.