

## 5      **METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DE PUNTOS CUÁNTICOS DE CARBONO (CQDS) COMO TRAZADORES INTERPOZOS PARA EL GERENCIAMIENTO DE YACIMIENTOS**

### **CAMPO DE LA INVENCIÓN**

10      La metodología para la implementación de puntos cuánticos de carbono como trazadores interpozos está enfocada para el gerenciamiento de agua en yacimientos de obtención de petróleo y gas. Se emplean trazadores no convencionales de puntos cuánticos que sean de fácil síntesis, resistentes a P y T, de fácil aplicación y medición en campo, y de muy bajo costo.

### 15      **RESUMEN**

    Mmetodología para la implementación de puntos cuánticos de carbono como trazadores interpozos para el gerenciamiento de yacimientos de obtención de petróleo y gas, la cual consta principalmente de cuatro etapas: Análisis y evaluación de condiciones previas, dosificación del trazador en pozos inyectoros, seguimiento del trazador en pozos  
20      productores y análisis de resultados.

### **ESTADO DE LA TÉCNICA**

    Los trazadores interpozos, han sido utilizados en la industria de hidrocarburos para la determinación de condiciones dinámicas de los yacimientos, el análisis cualitativo y  
25      cuantitativo de estos permite determinar variables como interconectividad entre pozos, canalizaciones preferenciales, identificar direcciones de flujo, y en algunos casos acumulaciones remanentes de crudo y determinar la distribución de saturación en el yacimiento, entre otros alcances, acciones para la optimización de los procesos de recuperación secundaria o terciaria de los campos.

30      Los trazadores son compuestos de propiedades fisicoquímicas específicas, con preferencia de mantenerse en la fase que se inyecta, no deben interactuar con la formación ni el crudo, ni modificar las características de transmisión del sistema, en la industria existen una variedad de trazadores con diferentes propiedades, entre los que se encuentran trazadores tipo radiactivos, los cuales tienen isótopos radiactivos que pueden emitir una radiación de  
35      partículas alfa, beta, rayos gamma o emisión de neutrones, tienen como ventaja su fácil detección a concentraciones bajas pero su principal limitación para su aplicación se asocian a su naturaleza radiactiva, en las etapas de exposición, transporte, instrumentación y análisis ; en la actualidad, los trazadores convencionales interpozos más usados son los derivados del ácido benzoico que presentan condiciones no radiactivas, menor toxicidad y  
40      gran variedad, sin embargo su aplicación se ve limitada por los altos costos de análisis de las muestras para la cuantificación de la concentración en los pozos productores.

    El objetivo de este documento es mostrar cómo los Puntos Cuánticos de Carbono (PCC) preparados de una forma práctica, escalable y económica de carbonización asistida por microondas, y con una metodología específica, son una excelente alternativa para

- 5 trazadores interpozos, en campos donde los trazadores convencionales son limitados por los altos costos asociados.

Los esfuerzos por optimizar los procesos de recuperación secundaria por inyección de agua, muchas veces se ven limitados por falta de información; con frecuencia, se encuentra con data de perfiles geológicos incompletos, condiciones de pérdida de fluido inyectado, interconectividad de pozos desconocida, canalización de pozos no identificados, inconsistencias en los perfiles de flujo que impiden el correcto gerenciamiento del yacimiento.

La adquisición de este tipo de información por medio de trazadores es la alternativa más usada, sin embargo, los altos costos de trazadores convencionales como los (FBA) asociados a los tiempos de análisis en laboratorios externos, impiden que muchos campos, puedan aplicarlos, al no poder soportar inversiones altas.

La presente invención se refiere a la implementación de una metodología para la aplicación de trazadores no convencionales de Puntos Cuánticos de Carbono (PCC) que sean de fácil síntesis, resistentes a P y T, de fácil aplicación y medición en campo, y de muy bajo costo, que permitan adquirir este tipo de información mediante análisis cualitativo y cuantitativo, con el objetivo de tener un mejor gerenciamiento en los procesos de inyección de agua en los campos de Ecopetrol y su grupo empresarial.

La caracterización y pruebas de laboratorio de los PCC permitió evaluarlos como una alternativa de trazadores interpozos, al ser compatibles con los fluidos del yacimiento, no interactuar ni generar cambios en el medio poroso, tener mínima adsorción, ser estables a T y P, y ser de fácil detección y cuantificación mediante su propiedad de fluorescencia.

Siendo la Fluorescencia en los PCC la característica usada para la selección, detección y cuantificación de los PCC como trazadores Interpozos.

Las principales patentes existentes en el estado de la técnica relacionadas con el estado de la técnica de la presente solicitud de patente son:

**US2019330976A**, *NANOTRACER FOR OIL RECOVERY AND METHOD OF PREPARATION THEREOF*, Trazadores para recuperación de petróleo, particularmente nanotrazadores fluorescentes conservadores en fases acuosas. El marcador comprende una nanopartícula núcleo-cubierta adaptada de acuerdo con la operación a rastrear. Contiene un núcleo fluorescente que permite su detección en el campo y una cubierta polimérica funcionalizada que proporciona una mayor estabilidad en las fases acuosas de alta salinidad. Un método para preparar dicho nanotracer. Dada la versatilidad del nanotracer, puede usarse tanto para rastrear pasos de fracking como para mallas de recuperación secundaria y terciaria.

**US2012318503A**, *CARBON-BASED FLUORESCENT TRACERS AS OIL RESERVOIR NANO-AGENTS*, Se proporcionan trazadores de nanoagentes fluorescentes a base de carbono para el análisis de depósitos de petróleo. Los nanoagentes fluorescentes a base de carbono son medios económicos para analizar, entre otras propiedades, la porosidad de una formación. Los nanoagentes son adecuados para la inyección en un depósito de

- 5 petróleo y se pueden recuperar posteriormente para determinar los caudales y los tiempos de retención.

**US2018283173A**, *PROCESS FOR DEVELOPING A SUBTERRANEAN FORMATION BY INJECTION OF A FLUID COMPRISING AN ADDITIVE LABELLED WITH A LUMINESCENT SEMICONDUCTING NANOCRYSTAL*, La presente invención se refiere a

- 10 un proceso para desarrollar una formación subterránea, en el que se inyecta al menos un fluido. De acuerdo con la invención, el fluido comprende al menos un aditivo, el aditivo está marcado con al menos un nanocristal semiconductor luminiscente (fluorescente o fosforescente). De esta manera, y por análisis óptico de la presencia de nanocristales semiconductores luminiscentes en el fluido recuperado de la formación subterránea, se
- 15 puede determinar la presencia y / o cantidad de aditivo en el fluido recuperado. Dado que el nanocristal semiconductor es fosforescente o fluorescente, el aditivo se vuelve fácilmente detectable y cuantitativamente determinable en los fluidos recuperados de la formación subterránea.

**US2011214488A**, *COLLOIDAL-CRYSTAL QUANTUM DOTS AS TRACERS IN UNDERGROUND FORMATIONS*, Se describen puntos cuánticos de cristal coloidal como trazadores. De acuerdo con una realización, un método comprende inyectar una solución de puntos cuánticos en una formación subterránea, y monitorear el flujo de los puntos cuánticos desde la formación subterránea para determinar una propiedad de la formación subterránea.

25

## DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS DIBUJOS

Figura 1. Esquema Pasos Iniciales Inyección del Trazador con montaje en Serie.

Figura 2. Esquema Final pasos y requerimientos de Seguridad Inyección de Trazador

- Figura 3. a) Esquemático Montaje Herramienta en Serie b) Esquemático Montaje  
30 Herramienta en Paralelo

Figura 4. Ejemplo del comportamiento Curva de Calibración (Blanco).

Figura 5. Ejemplo Líneas Base de fluorescencia Campo Brisas. a) PCC Azul. b) PCC Rojo

Figura 6. Modelo Carta de Control de fluorescencia.

Figura 7. Ejemplo Resultados de Concentración de trazador PCC en Pozo Productor

35

**DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INVENCIÓN**

Para el desarrollo y posterior implementación, de la presente invención, se realizaron pruebas de caracterización de los PCC y estudios de compatibilidad con los fluidos de yacimiento, pruebas estáticas y dinámicas en medios porosos de campos seleccionados, estos resultados evidenciaron que las características morfológicas y luminiscentes de los puntos cuánticos de carbono propuestos para su implementación como trazadores en campos de producción de hidrocarburos sujetos a inyección de agua, no indujeron a ningún tipo de alteración a las propiedades de flujo o taponamiento de los canales, eran resistentes a cambios de presión y temperatura, y sus propiedades luminiscentes mostraron la capacidad de ser discriminados de otro trazador fluorescente o de algunos materiales fotoluminiscentes que se encuentren en el agua de producción de crudo.

Lo anterior, permitió definir y desarrollar una metodología para la aplicación de puntos cuánticos de carbono como trazadores interpozos para el gerenciamiento de yacimientos de generación de petróleo y gas, que contempla los requerimientos para la aplicación de este tipo de trazadores PCC, que incluye las etapas de Diseño, selección de trazador PCC, aplicación en campo, el mecanismo para el procesamiento de las muestras y los análisis de laboratorio en campo, necesarios para garantizar resultados que permitan la interpretación cualitativa y cuantitativa de los mismos.

**DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCIÓN**

De acuerdo a los resultados de laboratorio, pruebas de campo preliminares, se construyó la metodología para la aplicación de puntos cuánticos de Carbono como trazadores interpozos. Esta metodología se desarrolla principalmente en cuatro etapas:

1. Análisis y evaluación de condiciones previas
2. Dosificación del trazador en pozos inyectoros
3. Seguimiento del trazador en pozos productores
4. Análisis e interpretación de resultados

**1. Análisis y evaluación de condiciones previas**

La primera etapa consiste en llevar a cabo el análisis y evaluación de las condiciones previas propias del yacimiento donde se quiere utilizar el trazador en los pozos, la cual incluye las siguientes subetapas:

- Selección del trazador.
- Determinación de la curva de calibración para la cuantificación del trazador PCC.
- Elaboración de línea base de fluorescencia en el agua de yacimiento
- Determinar la cantidad de trazador a dosificar

- 5      • Establecer la frecuencia de muestreo

### 1.1. Selección del Trazador

Previo a la dosificación de los trazadores en los pozos inyectoros, el tipo de PCC se selecciona con base en las siguientes características:

10

- Tamaño de partícula inferior a los 100 nm.
- Detectable a una concentración superior a 0.1 ppb.
- Conservar sus propiedades de fluorescencia por un periodo superior a 180 días.
- Propiedades de fluorescencia del trazador diferentes a las del agua del yacimiento de crudo para que esta misma no cause interferencia en su detección.

15

- No deben alterar las propiedades físico-químicas del petróleo (viscosidad y densidad) y las petrofísicas del yacimiento (permeabilidad, mojabilidad, porosidad).
- Conservar sus propiedades de fluorescencias a temperaturas hasta de 300°C.
- Compatibilidad con los fluidos del yacimiento: ausencia de emulsiones y coeficiente de partición agua/crudo = cero.

20

- Compatibilidad con la roca del yacimiento: Retención mínima en la roca, es decir que en las pruebas de desplazamiento de fluido en medio poroso representativo del yacimiento, se recupere una masa superior al 90% del trazador inyectado.

25

Una vez se confirmen las propiedades del trazador PCC en las pruebas de laboratorio, se debe seleccionar el color que se ajuste a las condiciones de fluorescencia natural del campo donde se tiene planeado aplicar; para esto se debe estudiar el comportamiento de la fluorescencia natural en el agua de producción e inyección del campo, determinando las longitudes de onda de máxima excitación y emisión mediante un barrido desde 200 a 800

30

nm. La información obtenida se compara con la del trazador PCC y con ella se escoge el color que no interfiera con la fluorescencia natural del agua de formación. La figura 5 muestra longitudes de onda por cada tipo de trazador PCC.

### 1.2. Curva de Calibración para la cuantificación del trazador PCC

35

La curva de calibración se realiza para determinar la concentración del trazador en función de los valores de intensidad de fluorescencia emitida por los PCC en una muestra de agua. Para esto se utilizan soluciones patrón de diferentes concentraciones de PCC (1 a 100.000 ppb) a las cuales se les determina su fluorescencia específica, verificando que haya linealidad en los datos obtenidos.

40

Para la lectura de la fluorescencia de una muestra determinada, se debe conocer las longitudes de onda de máxima absorción (excitación) y emisión, pues con ellas se fijarán los parámetros adecuados para los análisis sistemáticos durante el seguimiento del trazador.

Esta curva debe realizarse para cada color de trazador a evaluar como candidato para el campo, por ejemplo si se evalúan dos colores, cada color debe tener su propia curva de calibración.

45

- 5 Para la preparación de las soluciones patrón se utiliza agua desionizada (blanco) y se realizan diluciones del trazador a diferentes concentraciones, procediendo a realizar las lecturas de intensidad bajo la longitud de onda específicas del trazador evaluado.

10 Durante las mediciones se debe verificar que el Coeficiente de correlación del equipo sea un valor cercano a 1 y el Error estándar sea cercano a cero (0) o el mínimo posible. Si estos datos no son correctos, se debe revisar cuál de las concentraciones presenta un error mayor y se debe volver a hacer la dilución y/o realizar nuevamente la lectura, hasta que los datos de correlación sean los recomendados.

### 15 **1.3. Elaboración de la línea base de fluorescencia en el agua de yacimiento**

Para la selección del trazador, se debe conocer el comportamiento de la fluorescencia natural del agua de inyección/producción en cada uno de los pozos de seguimiento.

Para la elaboración de la línea base de fluorescencia se deben seguir los siguientes pasos:

- 20 • Definir pozos de interés (Inyector – productores).
- Realizar lectura de fluorescencia en aguas de producción/ Inyección haciendo un barrido de longitudes de onda desde 200 a 800 nm.
- Establecer las longitudes de onda de máxima excitación y emisión del agua de formación e Inyección y con base en ellas establecer el color de trazador PCC a utilizar de modo que no se genere interferencia.
- 25 • Se realiza muestreo diario en cada pozo durante mínimo 15 días. Considerando que el trazador a seleccionar debe ajustarse a las condiciones del campo, y por lo cual deben mapearse durante el seguimiento las condiciones operacionales del campo como el ingreso de agua de captación y los bacheos de química (inhibidores de Corrosión – Bacterias - escamas Orgánicos e Inorgánicos) para evaluar su efecto sobre la fluorescencia natural del agua en el patrón de interés.
- 30 • La cantidad de muestra requerida puede estar en el rango de 100 - 500 cc de agua para análisis de fluorescencia.
- Las muestras recolectadas se analizan sobre las curvas de calibración establecidas previamente en el espectrofluorometro. Es importante que cada muestra esté libre de trazas de aceite e impurezas que puedan afectar la calidad de la lectura del equipo en la medición de fluorescencia, para ello se utiliza un sistema de separación de aceite – agua.
- 35 • Con base en los resultados obtenidos en el seguimiento realizado en los pozos del patrón se establece la línea base de fluorescencia para cada uno de ellos.
- 40

Una vez obtenidos los valores de fluorescencia en unidades de intensidad, se utiliza la curva de calibración para convertir estas lecturas en datos de concentración (ppm).

### 45 **1.4. Determinación cantidad de trazador a dosificar**

La cantidad de trazador necesario debe evaluarse con el objetivo de que permita una recuperación con concentraciones suficientemente altas para ser detectadas con los

5 equipos de medición, esta cantidad está asociada a las características de volumen de yacimiento, espaciamiento entre pozos, la porosidad de la roca, la saturación de fluidos presente y del espesor de la formación.

De acuerdo a la literatura existen diferentes métodos para la determinación de la cantidad de trazador requerida, entre los que se encuentran: Modelos Matemáticos que tienen en  
 10 cuenta los efectos como dispersión, difusión y dilución debido a la expansión del fluido y separación de los trazadores, estos métodos (Método Abbaszadeh & Smith Método Brigham & Smith) son poco aplicables debido principalmente a la incertidumbre en el parámetro  $\alpha$ .

15 Por tal razón, el modelo de Dilución Total es el más usado actualmente en la industria, el cual estima un volumen adicional anticipado, obtenido a partir del cálculo del volumen poroso entre el pozo inyector y los pozos productores considerando el espesor de la formación y las condiciones de saturación de agua en el yacimiento, esto permite evaluar  
 20 la dilución del trazador en el yacimiento.

$$M_T = V_d \times LMD \times F$$

Dónde:

25 **Vd (Bls):** Es el volumen poroso con saturación de agua actual del patrón de inyección. Es decir, volumen de dilución.

**LMD:** Es el límite de detección del equipo. Depende del modelo y tipo de espectrofluorometro, el rango de detección puede ser de partes por billón (ppb) o los de mayor rango en parte por trillon. (ppt)

30 **F:** Factor de seguridad, generalmente asociado al factor de flujo fuera del patrón varía en un rango de 1-5.

Para el caso de los trazadores cuánticos de carbono en la aplicación en campo se consideró un factor de seguridad adicional, con el objetivo de asegurar una concentración mínima en los pozos productores.

35

$$M_T = V_{poroso} * S_w * F_{seguridad} * F_{Dilución} * LMD$$

Como parte de los lineamientos de la literatura, también se consideró el criterio de que la masa calculada con método de dilución total, debe generar una concentración mínima que  
 40 sea 10 veces mayor al límite de detección del equipo.

El factor de seguridad de dilución varía entre 1-5.

### 1.5. Establecer la frecuencia de muestreo

45 Para el caso de Trazadores cuánticos de carbono como trazadores Interpozo se tiene en cuenta en el diseño del cronograma, la facilidad de muestreo y análisis, esto genera la posibilidad de tener una mayor densidad en el muestreo junto con el análisis de datos en tiempo real en el mismo campo.

5 Por las facilidades y economía de la tecnología se recomienda muestrear diariamente hasta el día de irrupción, por lo general, se muestrea con una mayor frecuencia (3 veces al día) en los primeros 8 días, para detectar posibles zonas ladronas de alta permeabilidad o fracturas, que permitan entender la heterogeneidad del yacimiento y regiones que pueden producir un flujo lineal. Después de la irrupción del trazador y con el tiempo, se puede reducir la frecuencia de muestreo considerando que, a mayor tiempo de irrupción del trazador, mayor la dilución.

15 La tabla 1 presenta las recomendaciones para el diseño del cronograma de muestreo.

15

**Tabla 1.** Recomendaciones para el diseño del cronograma de muestreo

| Tiempo de Irrupción estimado | No. Muestras al día antes de la Irrupción | No. Muestras al día después de la Irrupción |
|------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <15 Días                     | 3 veces por día                           | 2-1 al día, 1 vez a la semana               |
| >15 Días                     | 1 vez al día                              | 2-1 al día, 1 vez a la semana               |

20 **2. Dosificación del trazador en pozos inyectores**

Una vez se realiza el análisis del patrón, y finaliza la fase de Diseño, se continúa con la aplicación en campo, con las siguientes subetapas:

- 25
- Revisión del sistema de inyección.
  - Instalación de herramienta para lanzamiento del trazador.
  - Inyección del trazador

**2.1. Revisión del Sistema de Inyección**

30 Previo a la inyección del trazador, se debe realizar inspección de las instalaciones del pozo Inyector objeto del estudio, identificando condiciones del patín de inyección, puntos de acople para inyectar el trazador, con el fin de asegurar que los accesorios se encuentren en óptimo estado.

Igualmente, se debe realizar visita a los pozos productores del Patrón de seguimiento para validar que cuenten con toma muestras ubicados en condiciones ergonómicas.

35

- Chequeo previo de la configuración del Completamiento del pozo Inyector para que de acuerdo al diseño: (Inyección selectiva o conjunta) evaluar la integridad de la sarta dónde se desea inyectar, y si es el caso realizar las respectivas adecuaciones como configuración de Válvulas reguladoras de flujo en el caso de sarta selectiva y asegurar la inyección de acuerdo a la unidad (es) objeto del estudio.
- De acuerdo con la información de registros de distribución de producción, o con cálculos de permeabilidad por espesor neto (KxH) para cada arena abierta en los pozos

40

- 5 productores, realizar la estimación del porcentaje de fluidos producido en cada una de ellas.
- Con la información de Control de Producción, realizar seguimiento a las condiciones operacionales de los pozos productores (la velocidad de la Bomba, Presión en la entrada de la bomba) e inyector (Caudal de Inyección y Presión de Inyección), indicando pozos
- 10 pendientes de optimizar y condiciones operativas promedio.
- Mapear de acuerdo al programa del taladro posibles eventos de intervención de pozos y los estados mecánicos actualizados. Indicando posibles intervenciones, o cambios operativos de cada pozo.
  - Durante el levantamiento de la Línea Base de fluorescencia
- 15 • identificar la necesidad de incluir en el estudio pozos agregados que, aunque no están considerados dentro del patrón en primera y segunda línea, si se requiere confirmar si están siendo afectados por la inyección.

## 2.2. Instalación de herramienta para lanzamiento del trazador (HLT):

- 20 Para el caso de los trazadores PCC, el tiempo de inyección del trazador se minimizo con la utilización de la herramienta para Lanzamiento trazadores PCC, en lugar de los sistemas convencionales para inyección de química, los cuales incluyen puntos de energía eléctrica, bombas de alta presión, tambores de química para almacenar del producto químico, tuberías y válvulas de control.

- 25 Esta herramienta utilizada para lanzar el trazador en la corriente de agua que ingresa al pozo inyector, consta de una tubería con diámetro entre 3 a 10" y longitud entre 3 y 10 ft, se puede fabricar en diversos materiales como aleaciones metálicas, polímeros de alta densidad, compuesto de carbón, fibra de vidrio, entre otros que puedan soportar una
- 30 presión hasta de 3000 psi. Esta herramienta se conecta en serie o paralelo con el patín de inyección en cabeza de pozo a través de un juego de válvulas. Fue implementada para el desplazamiento del producto (Trazador PCC) a altas concentraciones, utilizando la energía suministrada por la misma Agua de Inyección, permitiendo de esta forma realizar la operación de forma segura, rápida y económica.

- 35
- Figura 3. A) Herramienta Lanzador PCC. B) Montaje Herramienta lanzamiento PCC reemplazando parte de la sección del patín de inyección en serie. La instalación del herramienta para lanzamiento de PCC se puede realizar de (2) maneras: Para el caso de
- 40 la aplicación en la figura 3, se retira parte de la sección del patín de inyección y acondiciona en esa sección la herramienta con el objeto de usar el agua de inyección para desplazar el producto; sin embargo durante la ejecución de la actividad se identificó una oportunidad adicional para disminuir los tiempos de esta operación, la cual implica realizar una conexión paralela al patín de inyección.

## 45 2.3. Inyección del Trazador

Para la inyección del trazador se realiza un procedimiento que debe adaptarse en cada pozo en función a las facilidades de superficie instaladas, el cual se describe a continuación.

## 5 Conexión en Serie

- Se registra caudal de inyección y presión en cabeza del pozo inyector objeto del estudio.
- Se cierra la válvula (1) para cortar suministro de agua al patín de inyección. Se observa si hay caída de la presión en cabeza de pozo durante 5 minutos (registrar este valor).
- Se cierra la válvula (2) lateral del arbolito del pozo, observando si hay variación de la presión en cabeza de pozo durante 5 minutos (registrar este valor).
- Se drena al contrapozo la sección del patín de inyección que se está confinando entre las válvulas (1) y (2), a través de la válvula (3) toma muestras.
- En caso de no dar cierre total y el pozo presente retornos se debe cerrar la válvula master (7) de cabeza de pozo y se observa si hay variación de la presión en cabeza de pozo durante 5 minutos (registra este valor).
- Verifica con la ayuda de un manómetro que esta sección se encuentre despresurizada para realizar la desconexión de la sección del Patín con las herramientas apropiadas para soltar las uniones.
- Acople del HLT en la sección retirada del Patín, se debe verificar un correcto ajuste de las uniones rápidas.
- Realizar Prueba Hidrostática con agua de inyección para validar que no se tenga presencia de fugas (garantizar que en el área próxima al contrapozo y en el patín de inyección no haya personal más que el autorizado para el movimiento de válvulas), si todo está en condiciones normales se procede a drenar la sección por la válvula (4).
- Una vez el personal autorizado para realizar el trasiego tenga los EPP correspondientes (Máscara de vapores orgánicos, gafas, guantes de nitrilo, camisa manga larga) se deposita el trazador en el HLT por la válvula (5), puede utilizarse un embudo y bomba manual de dosificación.
- Cierre de Válvulas (4 y 5) y tapones del HLT.
- Reestablecer la Inyección al abrir la válvula (2) y (1).
- Esperar 20 min.
- Se cierra la válvula (1) para cortar suministro de agua al patín de inyección. Se observa si hay caída de la presión en cabeza de pozo durante 5 minutos (registrar este valor).
- Se cierra la válvula (2) lateral del arbolito del pozo, observando si hay variación de la presión en cabeza de pozo durante 5 minutos (registrar este valor).
- Abrir válvula (4) para drenar sección del HLT y verificar que no se tenga presencia de Trazador en el agua que va saliendo, de tenerse trazador, se debe cerrar la válvula (4) y al garantizar cierre total, volver a abrir las válvulas (2) y (1) por otros 10 min y repetir paso.
- Desacoplar la sección del HLT una vez drenada y reemplazar por la sección del Patín de Inyección.
- Restaurar Inyección del pozo al abrir las válvulas (2) y (1).

5

**Conexión en Paralelo**

- Se registra caudal de inyección y presión en cabeza del pozo inyector objeto del estudio.
- Se cierra la válvula (1) para cortar suministro de agua al patín de inyección.
- 10 Se observa si hay caída de la presión en cabeza de pozo durante 5 minutos (registrar este valor).
- Se cierra la válvula (2) lateral del arbolito del pozo, observando si hay variación de la presión en cabeza de pozo durante 5 minutos (registrar este valor).
- 15 ○ Se acopla la herramienta para lanzamiento de trazadores PCC en paralelo al tren de inyección (ubicado sobre soportes) a través de la válvula (3) y (6), lateral del patín de inyección usando manguera flexible de alta presión, se debe asegurar que la manguera soporte la presión de inyección multiplicado por un factor de seguridad mínimo de 1.5.
- 20 ○ Posteriormente se debe revisar que todo este acoplado y torquado adecuadamente; solicitar al personal que se retire del área próxima al contrapozo y patín de inyección con el objeto de realizar Prueba hidrostática del Herramienta para lanzamiento de PCC y las conexiones utilizando agua de inyección, validando que no se presenten fugas (abrir lentamente la
- 25 válvula, igualar columnas y probar durante 5 minutos). Si no se evidencia fuga, se procede a drenar la sección a través de la válvula inferior (4) ubicada en la herramienta para lanzamiento de PCC hacia el contrapozo.
- Una vez el personal autorizado para realizar el trasiego tenga los EPP correspondientes (Máscara de vapores orgánicos, gafas, guantes de nitrilo,
- 30 camisa manga larga) se deposita el trazador en el HLT por la válvula (5), puede utilizarse un embudo y bomba manual de dosificación.
- Cierre de Válvulas (4) y (5) y tapones del HLT
- Reestablecer la Inyección al abrir la válvula (1).
- Esperar 20 min
- 35 ○ Se cierra la válvula (1) para cortar suministro de agua al patín de inyección. Se observa si hay caída de la presión en cabeza de pozo durante 5 minutos (registrar este valor).
- Se cierra la válvula (6) lateral del arbolito del pozo, observando si hay variación de la presión en cabeza de pozo durante 5 minutos (registrar este
- 40 valor).
- Abrir válvula (4) para drenar sección del HLT y verificar que no se tenga presencia de Trazador en el agua que va saliendo, de tenerse trazador, se debe cerrar la válvula (4) y al garantizar cierre total, volver a abrir las válvulas (6) y (1) por otros 10 min y repetir paso.
- 45 ○ Se desacopla la herramienta HLT que está en paralelo al tren de inyección (ubicado sobre soportes) a través de la válvula (3) y (6).
- Restaurar Inyección del pozo al abrir las válvulas (2) y (1).

**3. Seguimiento del trazador en pozos productores**

5     Constituido por las siguientes subetapas:

- Cronograma de monitoreo
- Muestreo de pozo
- Análisis de muestras

10

**3.1.   Cronograma de monitoreo**

Como se dijo, en la fase de diseño, la frecuencia de muestreo es mayor en la primera etapa hasta la irrupción del trazador y posteriormente se reduce de manera gradual a medida que se obtiene información suficiente para un análisis e interpretación adecuada. Esta frecuencia de muestreo se realizará de acuerdo a la planeación, y con los resultados en tiempo reales de masa recuperada se ajustará en el caso de que se requiera.

Para el caso de los patrones trazados con PCCs, se ha usado como plan inicial la frecuencia de muestreo que se referencia en la tabla siguiente, la cual indica una alta densidad de muestras en las primeras semanas, y disminuye gradualmente después de la cuarta semana, esto abarcando los criterios estipulados en la fase de Diseño, como se presenta en la tabla 2.

25   **Tabla 2.** Cronograma de Seguimiento

| Semana | Muestreo por Pozo                                                         |
|--------|---------------------------------------------------------------------------|
| 1      | Primera muestra en el día de la inyección. Cada 8 horas en cabeza de pozo |
| 2      | Cada 12 horas en cabeza de pozo                                           |
| 3      | Cada 12 horas en cabeza de pozo                                           |
| 4      | Cada 12 horas en cabeza de pozo                                           |
| 5-8    | Cada 24 horas en cabeza de pozo                                           |

Durante el muestreo y con los resultados, se debe ir realizando el balance de materia, y evaluar el % de recuperación del trazador, para de esta manera poder estipular el momento en que se debe suspender la toma de muestras.

**Nota:** Es importante en lo posible, durante el análisis de trazador, mantener las condiciones constantes de Operación, Inyección y Producción.

35   **3.2.   Muestreo de Pozos**

De acuerdo con el cronograma de muestro descrito previamente, se toman las respectivas muestras en cabeza de pozo con el fin de monitorear la presencia de trazador en el fluido de inyección. Estas muestras se llevan al Laboratorio para su respectiva separación de fases y posterior análisis de fluorescencia.

40

- 5       • Diariamente debe separar y filtrar el agua de las muestras tomadas de tal forma que se obtenga un volumen mínimo de 100 cc que serán almacenados en recipientes de 150cc nuevos (no transparentes).

### 3.3. Análisis de muestras

10   El propósito de esta etapa es detectar tanto la presencia de trazador como su concentración. A continuación, se enumeran los pasos básicos para el análisis de muestras:

- **Separación de fases**

15       Una vez las muestras son llevadas al laboratorio se realiza la separación de crudo, gas y agua con trazador disuelto mediante medios físicos como decantación para evitar interferencia en su detección.

- **Recolección del fluido de inyección**

20       Luego de separar las fases se almacena la fase agua para determinar presencia de trazador y su concentración en recipientes de 150cc nuevos.

- **Medición de Fluorescencia y concentración del trazador**

25       A cada muestra de agua se le realiza una medición de la fluorescencia con la ayuda de un espectrofluorímetro y se calcula su concentración a través de una curva de calibración como se mencionó en líneas anteriores.

- **Aseguramiento de los datos.**

30       Durante el seguimiento del trazador, se debe asegurar el soporte de la siguiente información:

Por parte del laboratorio se debe tener la siguiente data:

- Concentración (PPM)
- Fluorescencia (Intensidad)
- Espectros
- Curvas de Excitación y emisión.
- 35       Graficas de dispersión por pozo.

La información debe contener:

40       Los datos de fluorescencia obtenidos en laboratorio para cada muestra recolectada y el volumen de agua producida por día en cada pozo, con lo cual se calcula la masa recuperada de trazador que irrumpe en los pozos objeto del estudio según el método de balance de masa (ver ítem: Método Analítico para Interpretación)

Es recomendable siempre tener el esquema de irrupción del trazador en cada pozo, como se observa en la figura 7.

- 5
  - Análisis de Intervalos Productores
  - Condiciones Operacionales para identificar posibles desviaciones
  - Balance de Masa
  - Visualización de Resultados en Mapa de Contornos
  - Informe Final

10

#### 4. Análisis e interpretación de resultados

Utilizando las cartas de control de fluorescencia, se procede a construir curvas de surgencia del trazador de acuerdo con la línea base fluorescencia evaluada para cada pozo, y convertida en data de concentración.

15

Como se ha explicado anteriormente, los datos de fluorescencia que se encuentren sobre la líneas de control (línea base) corresponden a la fluorescencia aportada por el trazador e indican la presencia del mismo.

- 20 La data de fluorescencia, debe graficarse para cada pozo del patrón, incluyendo el inyector. (Figura 7)

Estas curvas relacionan los datos de concentración del trazador recuperado con el tiempo y se identifica parámetros como tiempo de irrupción, máxima concentración en la detección del trazador, posible estratificación de la formación, volumetría aproximada de canales (dependiendo de la masa de trazador recuperada), dispersión y tiempo de finalización (cuando la concentración del trazador llega a ser cero por un período prolongado), aunque en algunas ocasiones, al existir altos contrastes de permeabilidad, el trazador puede llegar a niveles muy bajos o cercanos a cero y volver a incrementarse, esto se debe a la tardía irrupción de intervalos de menor permeabilidad.

30

Dependiendo del comportamiento de estas variables se puede obtener un indicativo de comunicación entre pozos y estratos, dirección general de movimiento del fluido y la existencia de zonas de alta y baja permeabilidad en el yacimiento.

35

#### Interpretación de resultados

De acuerdo con la curva de aprendizaje que se construyó con los trazadores PCCs, se analizó que para la interpretación cuantitativa de los resultados, se pueden usar los métodos analíticos y numéricos convencionales, siempre y cuando se tenga en cuenta que, para los cálculos cuantitativos se debe utilizar únicamente la data aportada por el trazador, esto significa descontar el valor de fluorescencia obtenido durante la línea base en cada pozo (Considerando como línea base las 3 desviaciones estándar a partir de la fluorescencia promedio).

40

- 45 La etapa de interpretación de resultados debe realizarse con el equipo interdisciplinario de yacimientos, geología, producción e ingeniería del mismo campo, para evaluar curvas de

- 5 irrupción, las cuales en términos generales dan un indicativo de la comunicación entre pozos y estratos. Figura 7.

### Método Analítico para Interpretación.

10 Los métodos analíticos se basan en el balance de masa en donde el porcentaje de masa recuperada en cada pozo deben corresponder a la fracción de masa inyectada, para los casos de aplicación de PCCs se evaluaron recuperaciones hasta del 90%, con lo cual se corrobora las propiedades de mínima adsorción de los PCCs obtenidas previamente en laboratorio.

15 Inicialmente con los datos de fluorescencia convertidos a unidades de concentración en ppm, se procede a evaluar la concentración diaria por pozo de acuerdo al volumen de agua producida.

Ejemplo:

- 20
- Data de Intensidad de fluorescencia evaluada: 10 unidades de Intensidad /100 cc.
  - Con la curva de calibración se convierte las unidades de intensidad a concentración. Para el caso del ejemplo corresponde a 2.1 ppm.

La masa de trazador recuperada diaria se estima de la siguiente manera:

25

$$Masa_{Recuperada\ pozo/dia} = Concentracion_{trazador} (Pozo\ Productor) * Caudal\ de\ agua\ producido$$

Donde:

30  $Concentración_{trazador} = Concentración_{diaria\ de\ muestra} - Concentración_{línea\ base}$

Con el volumen de agua producida se calcula la masa de trazador recuperada por pozo, relacionándola con la masa inyectada. Este cálculo se realiza diariamente, siendo el valor acumulado la masa total recuperada en cada pozo productor.

35

$$Factor_{Recuperación\ acumulado} = \int_0^t \frac{q_p * Concentracion_{trazador} (Pozo\ Productor)}{m_{trazador\ inyectado}} dt$$

Para cada pozo entonces se tendrá un total de masa recuperada.

40 Para la interpretación cuantitativa de los datos, se usó los mecanismos existentes y aplicados en la industria con trazadores convencionales. Siendo el más utilizado el Método de momentos que tiene como principio la conservación de la masa y que permite definir la fracción recuperada acumulada de trazador y el volumen de agua contactado.

45 Con el modelo de *Felsenthal*, utilizando el tiempo real de *breakthrough* puede realizar una estimación de permeabilidades de las posibles zonas ladronas, basado en el modelo de dos regímenes de flujo radial donde el flujo diverge del pozo inyector y converge a un pozo productor (González, 2015).

5

$$k = \frac{\mu \dot{\phi}_{ef} d^2}{2Tbt\Delta} \ln(\frac{d}{2r_w})$$

5

EJEMPLOS

**Ejemplo 1.** En la tabla 3. Se muestran los resultados de los cálculos para el diseño de la cantidad de masa de trazador a dosificar.

| Formaciones | Volumen de Agua en Formación, bbl | Volumen de Agua en Formación, m3 | Volumen de Agua en Formación, kg | Límite de detección, PPB | Factor de Seguridad | Factor de dilución | Masa de Trazador, Kg |
|-------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------|----------------------|
| F-1         | 21,761,845.40                     | 3,561,326.00                     | 3,570,857,112.65                 | 1.2E-10                  | 20                  | 4                  | 33.42                |

| Pozo Inyector | Tipo de Trazador | Color del Trazador | Cantidad de Trazador, kg | Caudal de Inyección, bbl/día | Concentración de Trazador, ppm | Volumen de Trazador, bbl | Concentración Final del Trazador, ppm |
|---------------|------------------|--------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| P-1           | PCC              | Azul               | 34.19                    | 1650                         | 500,000                        | 0.435                    | 13,518                                |

10      Tabla 3. Formato Diseño cálculo de Trazador de referencia

**Ejemplo 2.** La Figura 4 representa los puntos para construcción de la Curva de Calibración (Blanco) con Espectrofluorómetro, se elabora a partir de una serie de diluciones con concentración conocida para ajustar el instrumento y así calcular la concentración del trazador en función de la fluorescencia, el solvente utilizado es el agua desionizada.

**Ejemplo 3.** Un ejemplo de selección del color de trazador , se muestra en la Figura 5 que presenta las líneas bases evaluadas a dos colores de PCC, en la parte a) se encuentran los resultados de fluorescencia para cada pozo del patron usando el color azul de PCCs y se tiene una variacion considerable de los datos de fluorescencia “natural del agua”, con una dispersión alta, por lo cual la aplicación del PCC azul tendría alta interferencia en las lecturas de fluorescencia, complicando la cuantificacion del trazador al momento de ser analizado.

El caso contrario se presenta en la parte b) de la figura 5, donde se evaluó la fluorescencia del agua a las longitudes de onda asociadas al PCC de color Rojo, mostrando mínimas variaciones y desviaciones bajas, lo que indica que al momento de evaluar el trazador la cuantificacion del mismo es más confiable y corresponde a una línea base optima con la cual se seleccionaria este color del trazador PCC.

**Ejemplo 4.** Con base en los resultados obtenidos en el estudio de fluorescencia natural en los pozos del patrón se establecen las cartas de control para cada pozo (figura 6), determinando el valor de fluorescencia promedio y las tres (3) desviaciones estándar donde se deben encontrar el 97% de los datos registrados. Este formato permite realizar la cuantificacion del trazador PCC en cada pozo una vez se realice la inyeccion en el yacimiento, debido a que permite discretizar los valores que corresponden a trazador y lo que corresponde a “fluorecencia natural”.

La figura 6, muestra la carta de control de fluorescencia que se debe elaborar para cada pozo, en este se incluye el promedio de intesidad medido durante la linea base, y se considera un rango adicional de linea base de +/- 3 desviaciones estandar. Los valores de intensidad de fluorescencia medidios en este rango, se consideran como fluorescencia natural y los valores que superan las 3 desviaciones estandar se consideran como trazador recuperado.

- 5 **Ejemplo 5.** En la figura 7 se muestran los Resultados obtenidos de las lecturas de Intensidad durante el seguimiento del trazador de PCCs para un pozo productor, en ellas es posible determinar los tiempos de irrupción del Trazador, máxima detección de Florescencia, dispersión y tiempo de finalización (cuando la concentración del trazador llega a ser cero por un período prolongado), aunque en algunas ocasiones, al existir altos
- 10 contrastes de permeabilidad, el trazador puede llegar a niveles muy bajos o cercanos a cero y volver a incrementarse, esto se debe a la tardía irrupción de intervalos de menor permeabilidad.