

EVALUACIÓN DE LA PÉRDIDA DE INYECCIÓN EN EL YACIMIENTO PERALES A PARTIR DE DATOS DE LABORATORIO

Astrid Cheng¹

1: YPF S.A. astrid.c.cheng@ypf.com

Palabras clave: Recuperación Secundaria, Calidad de Agua, Mecanismo de Daño

ABSTRACT

Since the end of 2019, a significant decrease in the injection flow rate of the Perales field has been observed, going from 35,346 m³/d to values of 34,185 m³/d. If it continues under these conditions, the Proved and Developed (PD) reserves of the waterflooding project would be compromised. Therefore, it was necessary to carry out a study plan with the objective of evaluating the possible causes of said decrease and establishing strategies to increase the injectivity in the reservoir. This work was divided into 3 phases: data model, characterization of the reservoir from laboratory data, analysis and interpretation of results that allowed reducing the uncertainty about the root cause of the damage mechanism in the reservoir.

INTRODUCCIÓN

La zona de estudio se encuentra ubicada al norte de la provincia de Santa Cruz dentro de la Cuenca del Golfo de San Jorge. El yacimiento Los Perales – Las Mesetas descubierto en el año 1975 (Figura 1). Produce aproximadamente un 70% de su petróleo gracias a la recuperación

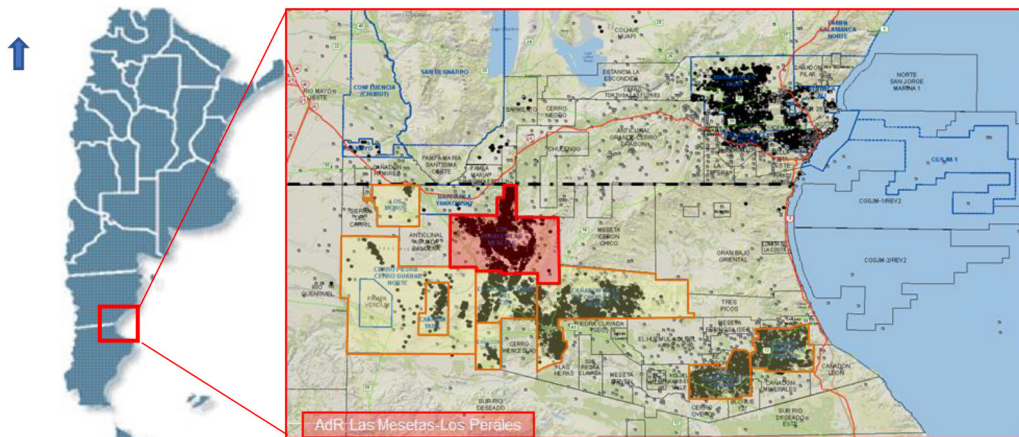


Figura 1. Ubicación Geográfica del Proyecto

Secundaria, por tal motivo es de suma importancia que el agua de inyección cumpla con los parámetros de calidad requeridos para lograr un barrido de petróleo eficiente.

Desde fines del año 2019 se observó un descenso significativo en el caudal de agua de inyección (Grafico 1) que de continuar bajo estas condiciones se verían comprometidas las reservas PD del activo. Por lo cual fue necesario realizar un plan de estudio con el objetivo de evaluar las posibles causas de dicha disminución y establecer estrategias para incrementar la Inyectividad en el yacimiento.

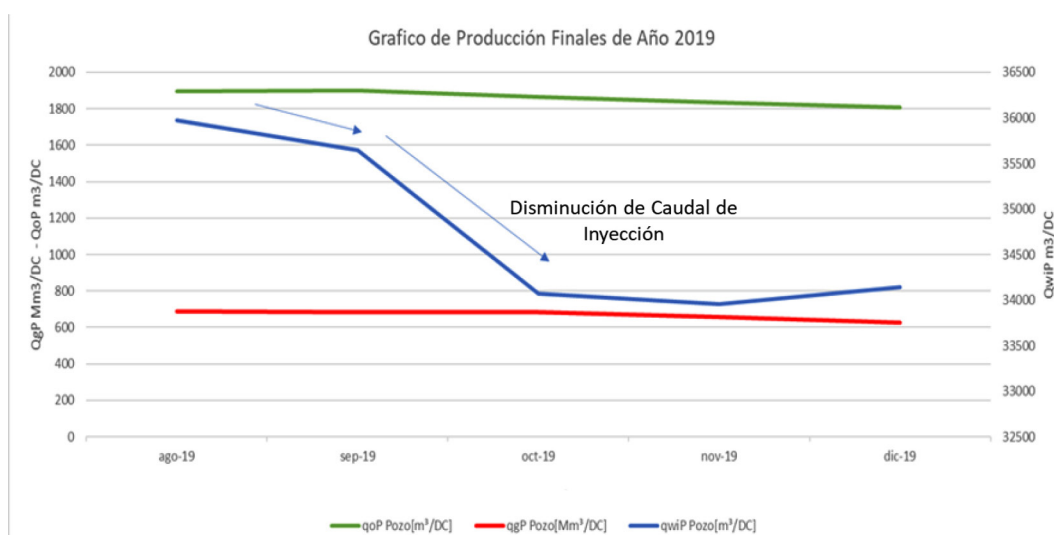


Grafico 1. Curvas de Producción e Inyección. Periodo comprendido entre agosto 2019 – diciembre 2019

Para poder comprender la pérdida de admisión en los diferentes pozos inyectoros distribuidos en todo el yacimiento es importante ubicarnos dentro del contexto geológico del área de reserva e indicar que en esta área coexisten dos estilos estructurales principales, un estilo compresivo correspondiente a la Faja Plegada, incluyendo una amplia zona con desarrollo de anticlinales fragmentados con orientación NNE-SSO, y otro extensional con un sistema de fallas normales con rechazos de 25 a 50 m de dirección ONO-ESE, que delimitan bloques basculados (fosas y hemi-fosas). Estas fallas son las que atraviesan la columna estratigráfica y pusieron en contacto la roca madre Fm. D-129 con los reservorios de las Fm Bajo Barreal y Castillo.

La estructura descrita, asociada a la componente estratigráfica generó un sistema de entrapamiento combinado de tipo estructural-estratigráfico. La migración vertical y lateral de los hidrocarburos, permitió la acumulación de petróleo y gas en los niveles productivos de las formaciones anteriormente descritas.

En la siguiente figura se puede observar la columna estratigráfica del flanco oeste de la Cuenca del Golfo de San Jorge, en la cual para el desarrollo del siguiente trabajo delimitaremos el sector

de estudio a la Sección Superior e Inferior de la Formación Bajo Barreal, la cual puede describirse como reservorios discontinuos, lenticulares y con espesores que van desde 1 a 5 metros. El ambiente en el cual se depositaron va desde fluvial a fluvio deltaico con alternancia de areniscas y arcillas como muestra la columna sintética (Figura 2).

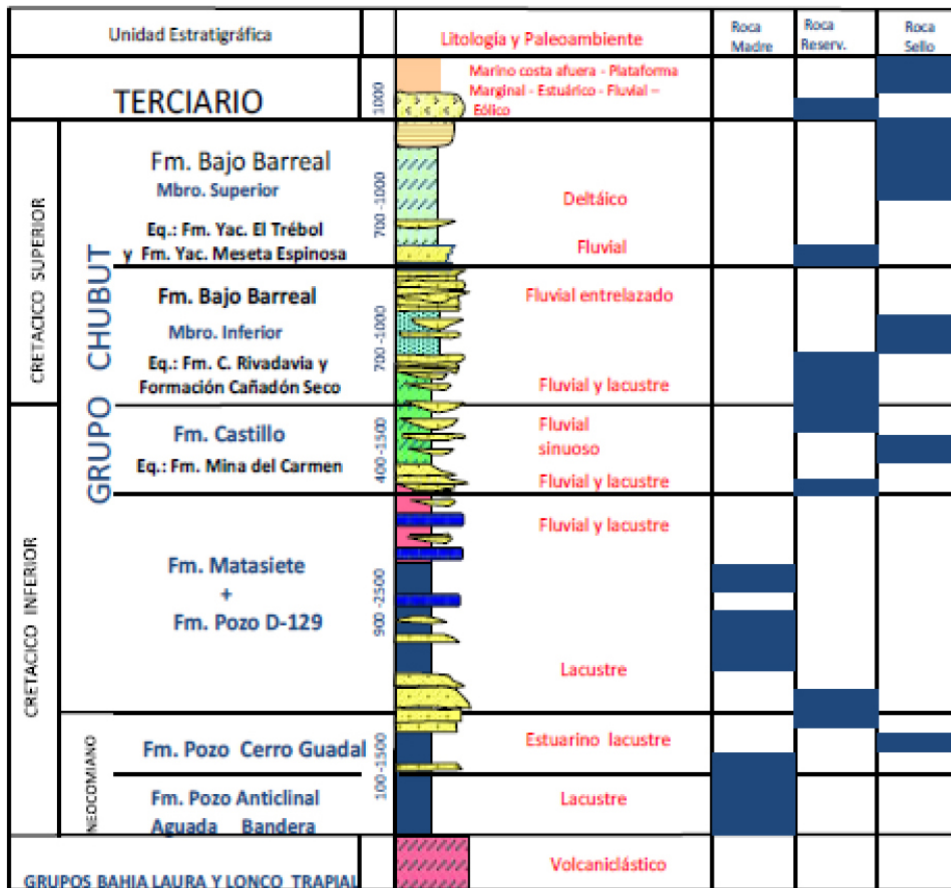


Figura 2. Columna Estratigráfica del flanco oeste de la Cuenca Golfo San Jorge.

La recuperación secundaria en el yacimiento Los Perales – Las Mesetas inicia en abril de 1997 logrando una extensión en la actualidad de más de 1.000 pozos productores activos y 375 pozos activos inyectoros de agua.

El objetivo de este proyecto está enfocado en identificar las posibles causas por las cuales los pozos inyectoros habrían perdido admisión en el transcurso del tiempo, para esto se identificaron los pozos que inyectan por debajo del caudal plan teniendo en cuenta los distintos bloques que conforman el yacimiento, considerando siempre que las capas tuvieron admisión originalmente y que a lo largo del tiempo fue disminuyendo la misma, este dato se cotejó con los perfiles de tránsito de fluido y el alocado de inyección por capa.

De este relevamiento de información surgió que el número de pozos que inyectan por debajo

del caudal plan es de 145 pozos. Por lo cual se procedió a elaborar un modelo de datos que comprendió la recopilación, revisión y clasificación de la información disponible de dichos pozos, para realizar el estudio de la pérdida de Inyectividad.

El modelo de datos es de suma importancia porque constituye la evidencia física de información para poder caracterizar el reservorio y los sólidos presentes en los pozos inyectoros con el fin de analizar las posibles causas de la pérdida de admisión en las capas.

Caracterización y determinación del mecanismo de daño en pozos inyectoros con datos de laboratorio y evaluación petrofísica.

En esta fase se realizó un relevamiento y categorización de los 145 pozos que presentaban a la fecha una disminución de caudal de inyección, asociándolos a sus satélites y plantas de agua de inyección respectivamente, se tomaron muestras del agua de inyección y muestras de sólidos en el fondo de los pozos, utilizando el equipo de slickline, así como también se recolectaron muestras sólidas de los filtros ubicados en el puente de inyección (Ver Figura 3), estas muestras fueron recolectadas por el personal del laboratorio tomando los cuidados necesarios para no contaminar las muestras y/o perdieran su representatividad.

En total se recolectaron 60 muestras representativas y las mismas se analizaron en dos grupos: 50 muestras:



Figura 3. Muestras solidas de los filtros ubicados en el puente de inyección

- Análisis Fisicoquímicos SyD, pH / Temperatura *in situ*
- Distribución de tamaño de partícula mediante microscopia óptica computarizada
- Test Millipore Índice de Taponamiento Relativo
- Caracterización de sólidos

- Determinación de tamaño de partículas por tamizado

10 muestras:

- Análisis mecánico de la granulometría
- Análisis mineralógico por Difracción de Rayos X (DRX)
- Análisis geoquímico por Fluorescencia portátil de Rayos X (FRX)
- Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

De las 10 muestras sólidas de pozos inyectoros, se llevaron a cabo los análisis, por un lado, sobre la muestra sin tratamiento previo de lavado de hidrocarburos (Figura 4A) y por otro lado sobre la muestra con tratamiento de lavado previo (muestra limpia) (Figura 4B) esto con el fin de comparar resultados

Sobre la muestra sin tratamiento de lavado (Figura 4 A) se procedió a realizar el análisis



Figura 4 A. Muestra sin tratamiento previo de lavado de hidrocarburos



Figura 4 B. Muestra con tratamiento de lavado de hidrocarburos

granulométrico mediante el tamizado mecánico utilizando el ro-tap aplicando zarandeo durante 10 minutos. Luego de este proceso se obtuvo el material retenido en el tamiz #200 (Figura 5) con diámetro de abertura de malla de 0,074 mm (74 μ m) y el material de fondo resultante del pasante tamiz #200 (Figura 6). Este limite de abertura de tamiz permite separar materiales de

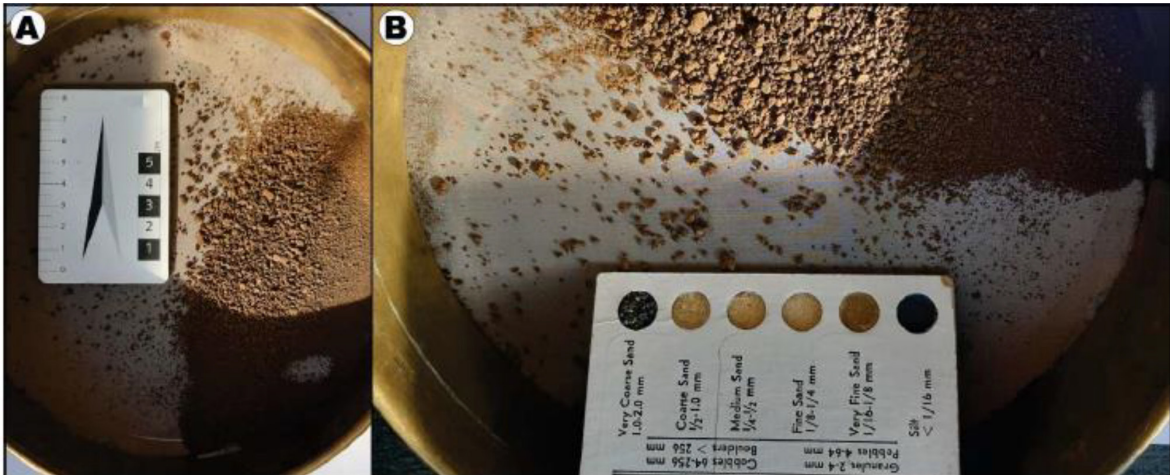


Figura 5. Material retenido en el tamiz #200 (0,074 mm) luego del tamizado mecánico. Nótese en la imagen B la presencia de micro-agregados de material fino de color pardo rojizo



Figura 6. Material resultante del pasante tamiz #200 (0.074 mm) nótese que el material posee una granulometría menor a 0.074 mm (tamaño limo y arcilla)

granulometría arena muy fina y materiales finos (limos y arcillas). Es importante mencionar que el material obtenido en el tamiz #200 retiene tamaños de arena muy fina y en este caso particular corresponden a micro-agregados de material fino que no se dispersan o desagregan mecánicamente durante el tamizado, y que conforman gránulos de tamaño mayor. Estas partículas micro-agregadas fueron observadas bajo la lupa binocular tanto en la muestra sin tratamiento de lavado, como en la muestra limpia (Figura 7).

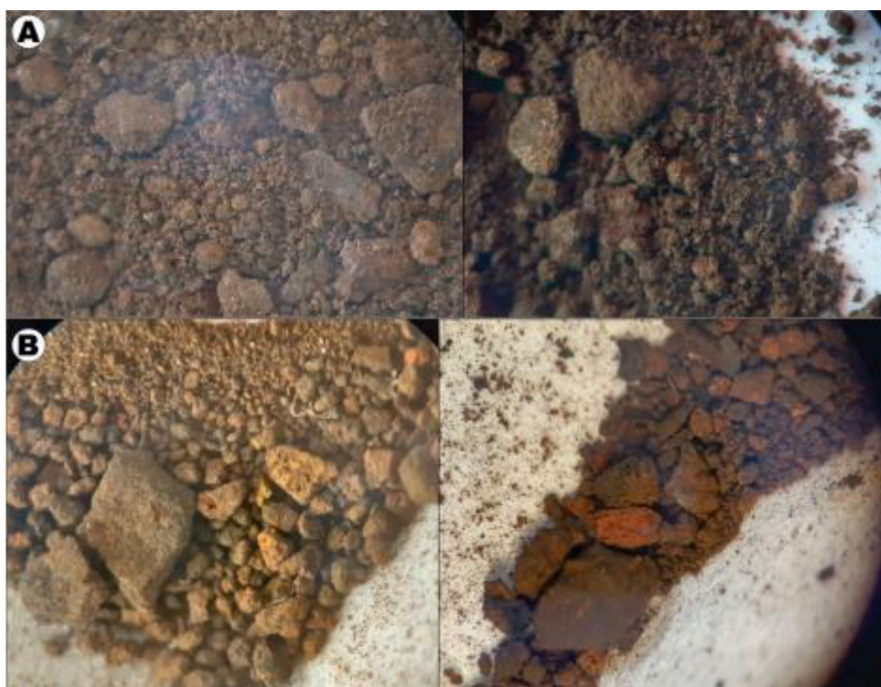


Figura 7 Fotografías tomadas con lupa binocular (aumento 10x). Muestra A sin tratamiento de lavado / B muestra limpia.

En ambas muestras se observa el color pardo rojizo y rojizo asociado a la presencia de hierro. La prueba de reacción al ácido clorhídrico (HCL) en frío fue negativa, es decir no fue efervescente.

Para determinar la composición mineralógica de la fracción fina resultante del pasante tamiz #200 Figura 6, se realizaron 3 sub muestras para el análisis de arcillas Figura 7B. Fueron realizadas a) al natural secada a temperatura ambiente para obtener el difractograma base; b) calcinada, la cual fue calentada a una temperatura constante de 550 °C durante 2 horas para identificar minerales que destruyen su estructura cristalina a dicha temperatura; y c) gliconada, expuesta a vapores de etilenglicol durante 24 horas en el desecador para reconocer minerales arcillosos expansibles.

El difractograma obtenido a partir del análisis de muestra total sin tratamiento de lavado expuso patrones irregulares, picos de difracción anchos y se observó un aumento en la intensidad de la señal. Se interpreta que este resultado obtenido es consecuencia de la presencia de hierro, de materia orgánica y/o hidrocarburos presentes en las muestras.

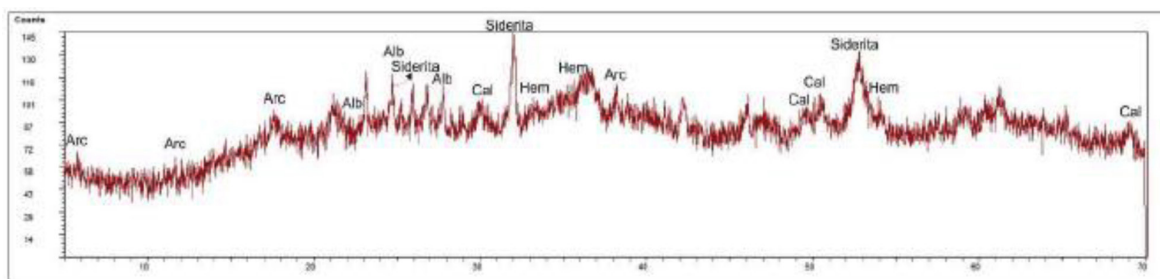


Figura 8. Difractograma correspondiente al análisis de muestra total. Arc (Arcilla), Alb (Albита), Cal (Calcita), Hem (Hematita).

Con los datos obtenidos mediante este análisis se identifican como minerales mayoritarios la siderita (Fe_2CO_3), la hematita (Fe_2O_3) y la calcita (CaCO_3).

Para determinar la composición química de la muestra sin tratamiento de lavado mediante FRX permitió determinar la concentración (%) de 39 elementos: Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Ba, Ta, W, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi y U. los resultados obtenidos mediante FRX mostraron una composición química dominada por el elemento mayoritario hierro (Fe) con valores promedios de 50,8%. Este elemento se puede vincular a la presencia de siderita (Fe_2CO_3) y hematita (Fe_2O_3), minerales reconocidos mediante el análisis de muestra total por DRX y asociado a los colores rojizos observados bajo la lupa binocular. De acuerdo a la bibliografía la siderita puede vincularse: a) la corrosión de caños y la presencia de CO_2 en el reservorio en altas condiciones de temperatura, presión y Ph (Taleb *et al.* 2017), b) la biodegradación bacteriana del petróleo (Abdulkarim *et al.* 2022), c) a condiciones diagenéticas asociadas a la migración vertical de hidrocarburos, la presión de CO_2 y la disponibilidad de Fe^{+2} (Abdulkarim *et al.* 2022).

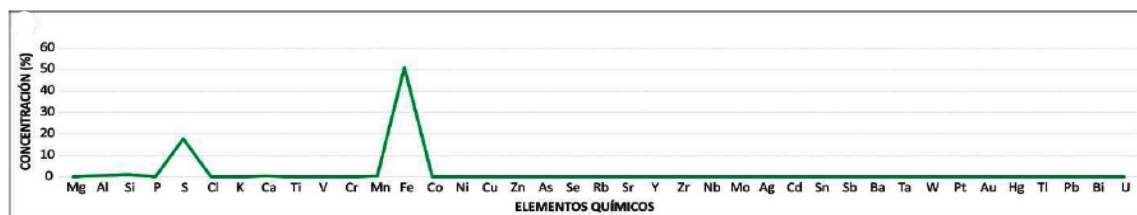


Figura 9. Datos promedios de las mediciones FRX, considerando los 39 elementos químicos detectados.

El análisis microtextural de los componentes y/o minerales no pudo realizarse sobre las muestras debido a que las muestras rechazaron el proceso de metalizado.

Paralelamente sobre las 50 muestras adicionales a las cuales se les practico el análisis de caracterización de sólidos se pudo corroborar que las muestras presentaban color marrón con patinas ocre, de textura granulada y terrosa con presencia de sulfuros, la humedad se eliminó mediante el secado a 105 °C y los hidrocarburos se eliminaron mediante el lavado de solvente Percloroetileno (C_2Cl_4). La Figura 9 muestra la totalidad en porcentaje de los elementos encontrados en las 50 muestras analizadas.

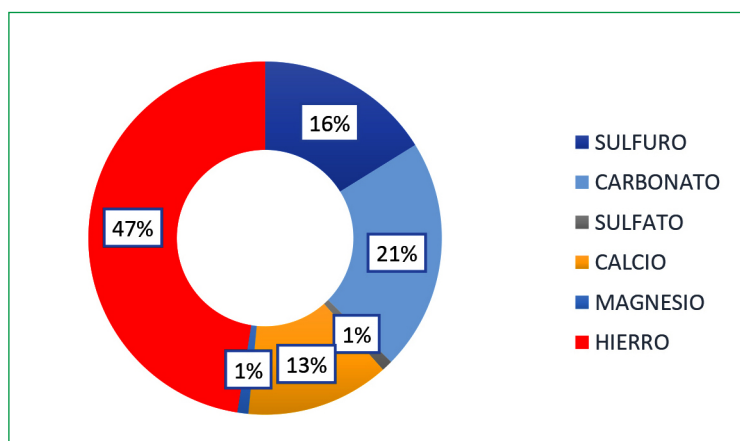


Figura 10. Distribución en porcentajes de elementos presentes en las muestras solidas

Para ubicarnos regionalmente se realizó la carga de información sobre un mapa (Figura 11) del yacimiento con el fin de ubicar visualmente los principales bloques con presencia de hierro y carbonato de calcio siendo estos los elementos mayoritarios encontrados a través de este análisis.

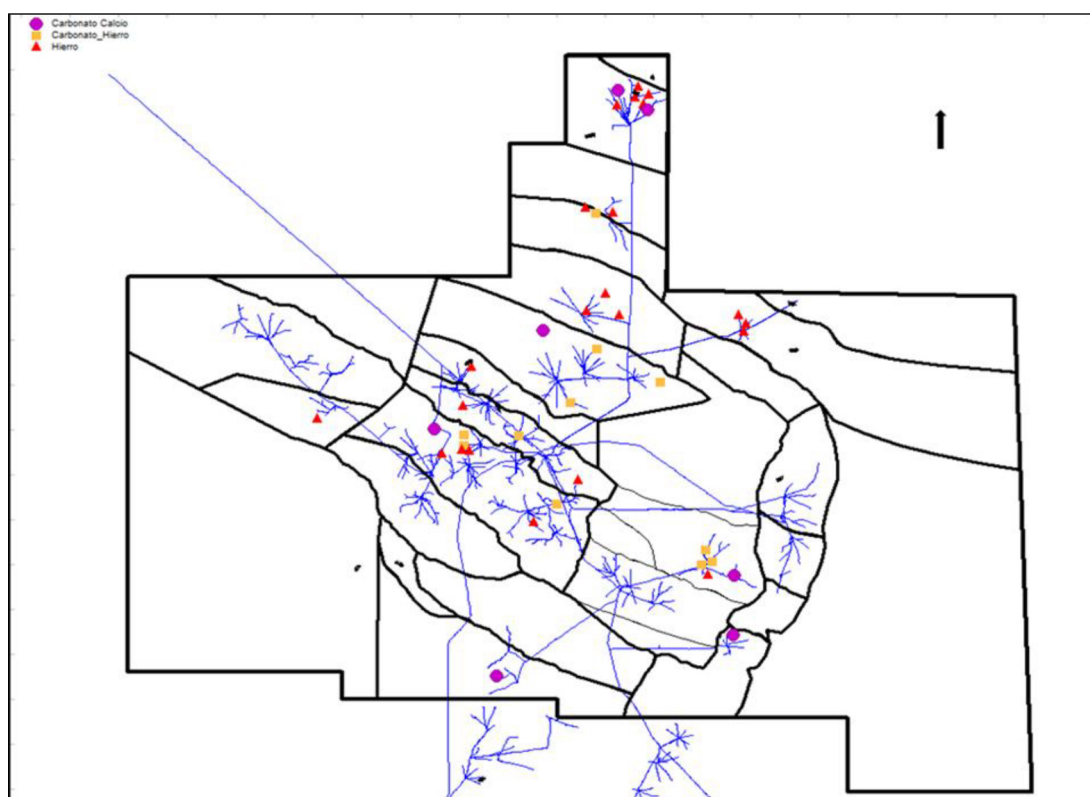


Figura 11. Mapa de Caracterización de Solidos – Yacimiento Perales – Las Mesetas

Los bloques con mayor % de hierro total (Método HACH DR 1900) fueron Los Perales Centro Bloque II y III, Los Perales Sur, La Itala Bloque I y II, Huétel y Cerro Bayo.

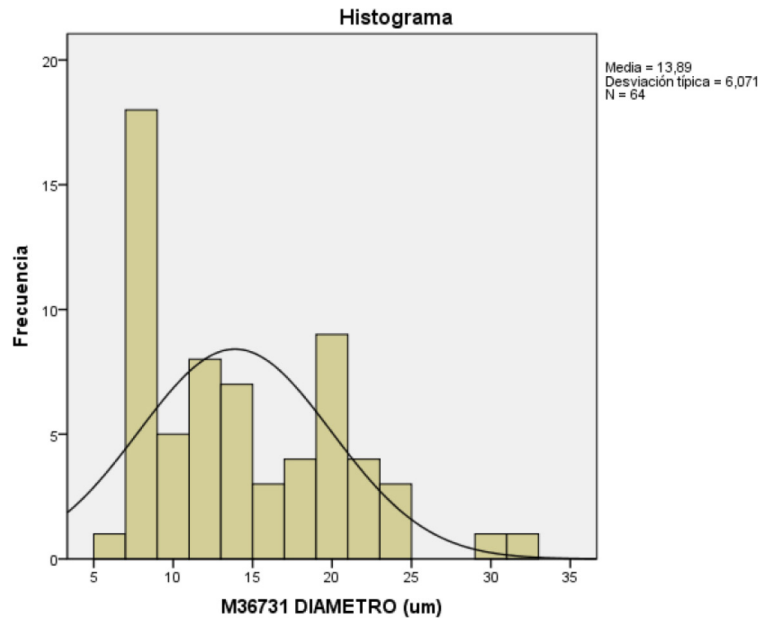


Figura 12. Distribución de tamaño de partículas

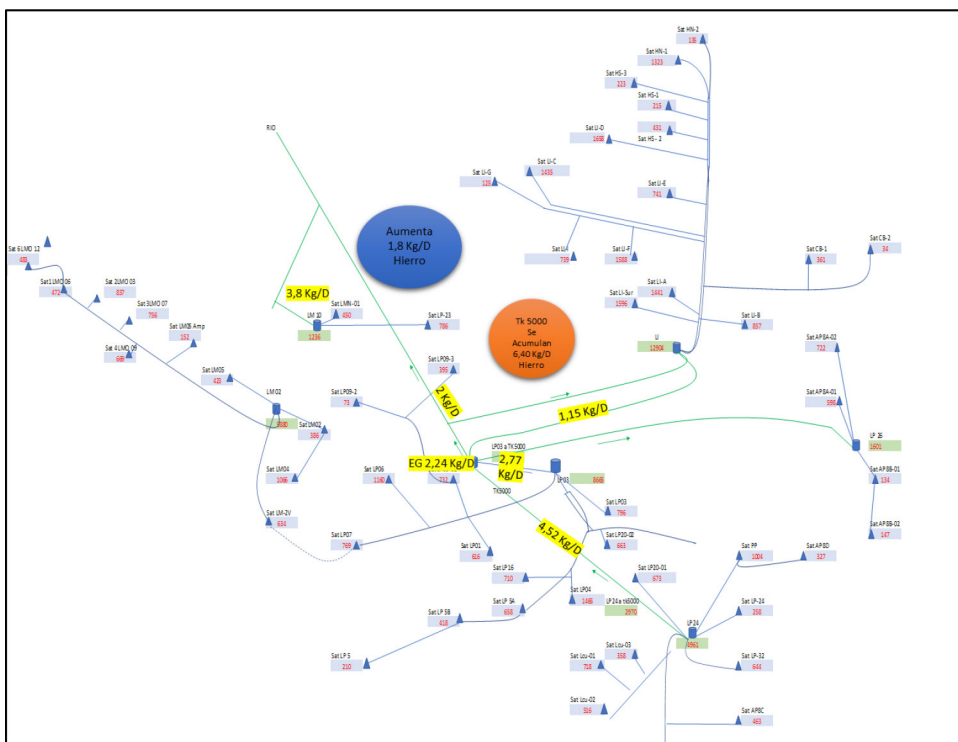


Figura 13. Red de Agua de Inyección y las posibles gentes de Hierro en el Sistema – Yacimiento Perales.

El análisis de distribución de partículas (Figura 11) de las diferentes muestras de agua tomadas en varios puntos de las plantas que conforman la red de inyección (Figura 12) nos indica que el tamaño de partículas oscila entre 5 micrones y 25 micrones en su mayoría.

En vista de los resultados, se estableció un plan de trabajo en conjunto con Ingeniería de Procesos para determinar el origen del hierro en el sistema, el mismo se puede dar por corrosión química, corrosión microbiológica, rozamiento en aparatos de bombeo, erosión por alta velocidad del fluido, aportes de formación y/o recirculación de ion ferroso en reservorio.

El análisis fisicoquímico del agua de inyección y la determinación de tamaño de partículas se realizó con la finalidad de detectar las posibles fuentes de hierro, a nivel de superficie (acueductos, plantas, satélites, tanques) detectando que en el TK 5000 se acumulan 6,40 kg/d de hierro, valor puntual a la fecha de los análisis. Por lo que se realizó énfasis en determinar el valor de hierro a la salida del tanque y a la entrada de las principales plantas (LP26, LM10, LI, LP03). Los altos valores a la entrada de LM10 generaron dudas ya que para el momento del análisis el acueducto había sido reemplazado, esto permitió encontrar un punto de corrosión en el trayecto entre el Tanque y LM10 el cual fue solventado a raíz de este estudio.

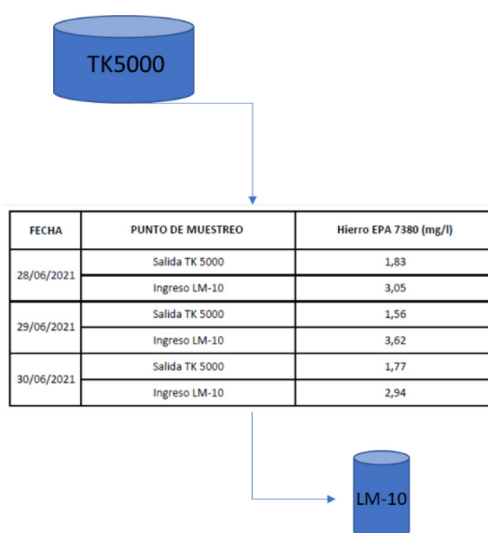


Figura 14. Análisis de muestras de agua seriada desde salida TK500 hacia entrada de Planta LM10.

Paralelamente con la asesoría del petrofísico del equipo, se realizó la evaluación petrofísica con datos de coronas, para definir a partir de la relación entre gargantas porales y tamaño de partículas el grado de afectación por deposición de sólidos suspendidos en el agua de inyección. Esto específicamente para la Formación Bajo Barreal.

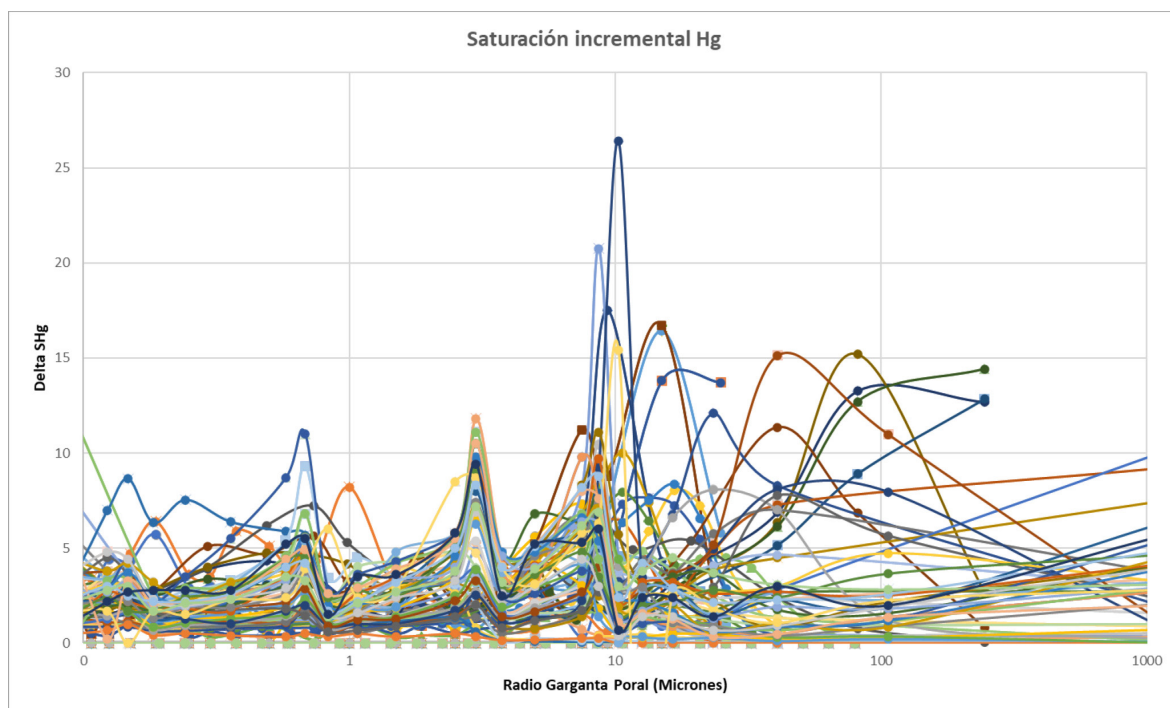


Figura 15. Distribución de Tamaños de Gargantas Porales. Los Perales Formación Bajo Barreal.

La Figura 15 muestra como el gráfico de intrusión de mercurio, método purcell, es un rápido indicador del tamaño de la garganta poral que domina el flujo para cada una de las muestras analizadas. Se puede observar el incremento de volumen de mercurio que ocupa el espacio poroso para un radio de garganta de poro de 10 micrones. Cabe destacar que el reservorio es muy heterogéneo con porosidades que pueden ir desde el 10% hasta 26%.

Una vez determinado este importante parámetro, se decide aplicar la regla del arte (Barkman y Davidson SPE 3543) adaptada a medios porosos, ya que operativamente este método nos indica un tipo de mecanismo de daño que puede estar presente en el reservorio:

- 1) Partículas mayores que $1/3$ del diámetro poral forman un revoque externo.
- 2) Partículas menores que $1/3$ pero mayores que $1/7$ del diámetro poral quedan atrapadas en el medio y forman revoques internos.
- 3) Partículas menores que $1/7$ del diámetro poral no causan daño de formación porque son transportadas a través de la formación.

Análisis e interpretación de resultados

El principal desafío para la evaluación de la pérdida de inyección fue determinar que mecanismo de daño puede predominar en los pozos inyectoras, por evaluación petrofísica obtuvimos que el diámetro de garganta poral para Bajo Barreal es de 20 μm , con este valor se definieron los límites para daño externo y daño interno.

Parámetros de Calculo para $D_g = 20 \mu m$	Límites μm	
Partículas Mayores a $1/3$ del D_g (Daño Externo)	6,66	
Partículas Menores a $1/3$ pero Mayores a $1/7$ del D_g (Daño Interno)	6,65	2,85
Partículas Menores a $1/7$ del D_g (Sin Daño)	2,84	

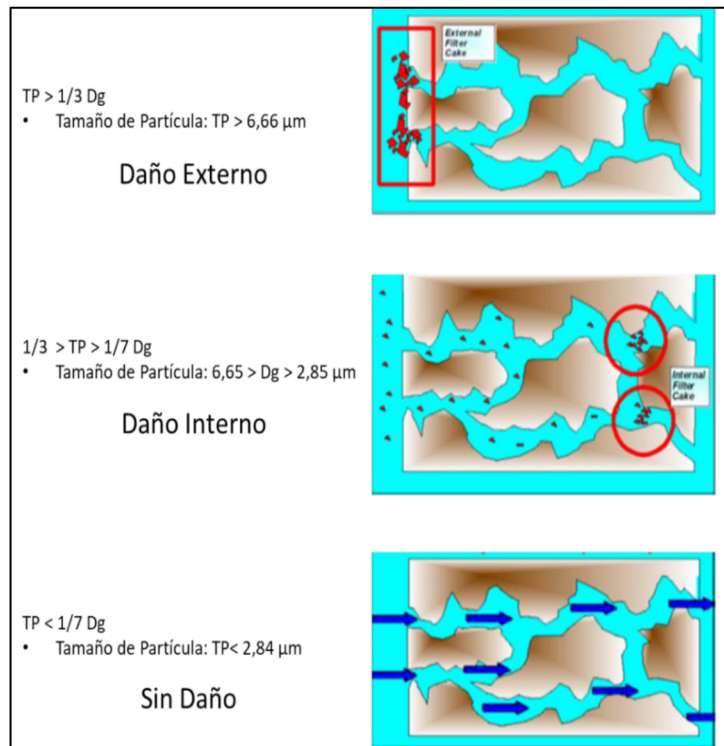


Figura 16. Representación gráfica del Método de Barkman y Davidson (SPE3543).

Debido a que el tamaño de partículas que pueden viajar a través del agua de inyección y que generan el daño interno en el reservorio oscila entre 6,65 micrones y 2,85 micrones, se consideró como valor representativo la mediana de la serie de datos mostrados en la Figura 12. El informe de laboratorio sobre las muestras analizadas de las salidas de las plantas para el momento del estudio permitió conocer que la mediana de diámetros de partículas es de $7,5 \mu m$ (Figura 12). Concluyendo que el 85,9% de las partículas presentes en el agua tienen un tamaño mayor, y que el mecanismo de daño predominante en el reservorio es del tipo externo, sin embargo, no se descarta la formación de daño interno por migración de partículas de menor tamaño en el agua de inyección.

El daño causado por los sólidos suspendidos en el agua de inyección es un factor importante a considerar en un proyecto de secundaria, debido a que éste puede originar el taponamiento e invasión de partículas en las paredes del pozo, ocasionando por consiguiente la reducción de la porosidad, permeabilidad y por ende de la producción. Con el test *millipore* (Norma NACE TM 173) (Índice de taponamiento relativo) el cual consiste en cuanto más caudal pueda pasar por el

filtro sin taparlo, mejor es la calidad de agua de inyección, fue realizado a la salida de cada planta, hacia los satélites y posteriormente pozos inyectoras, dió como resultado un agua de inyección con alta tendencia al taponamiento y pobre calidad de agua (véase Figuras 17 – 22).

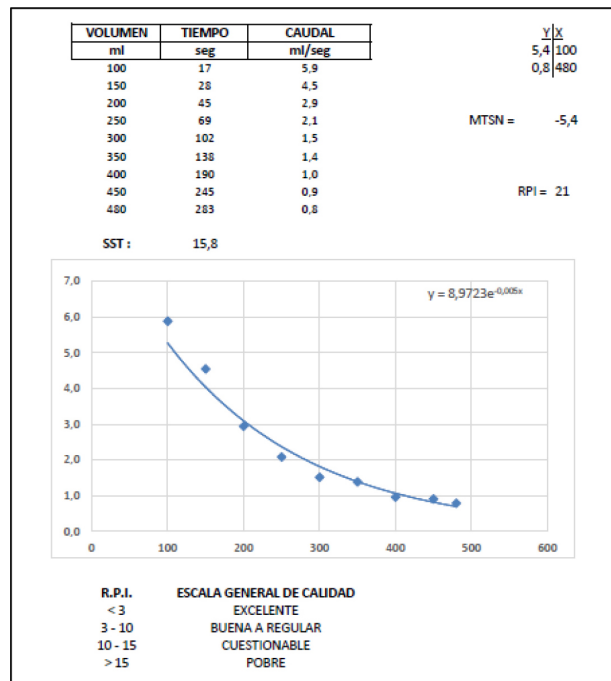


Figura 17. Índice de Taponamiento Relativo Planta LP 26 Yacimiento Los Perales.

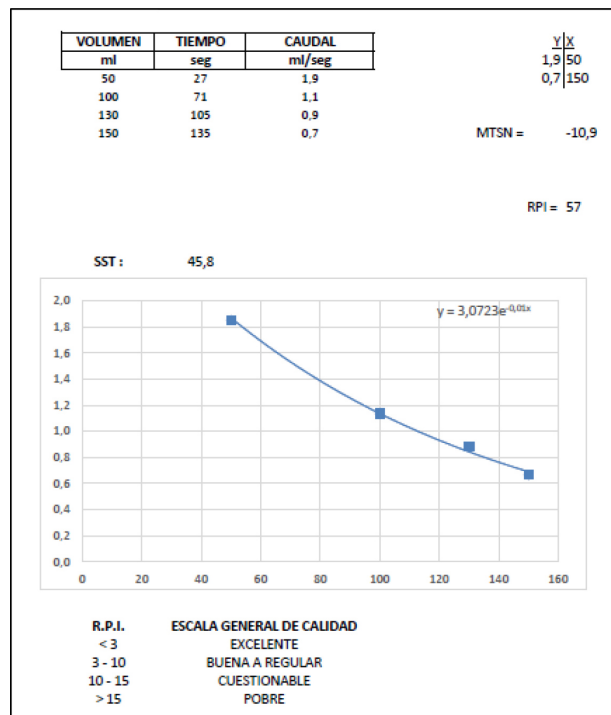


Figura 18. Índice de Taponamiento Relativo Planta LM02 Yacimiento Los Perales.

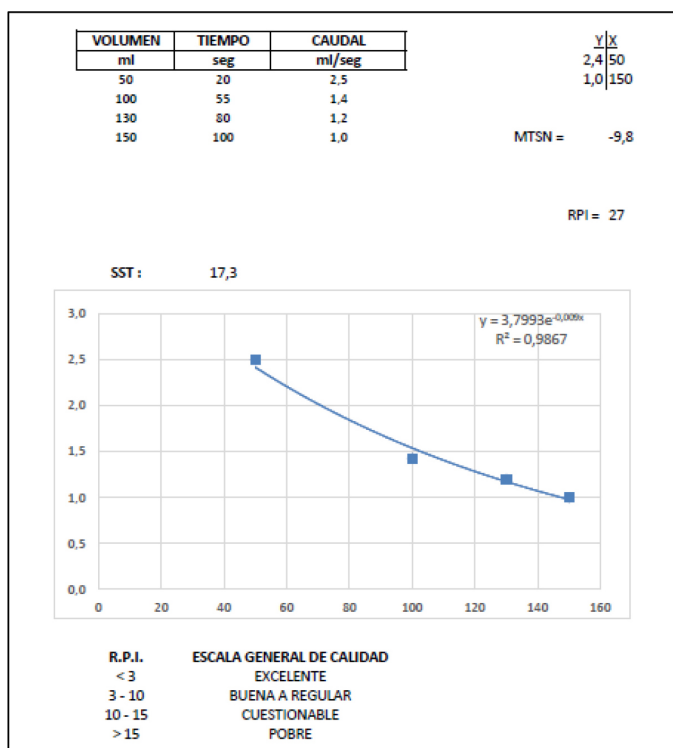


Figura 19. Índice de Taponamiento Relativo Planta LM10 Yacimiento Los Perales

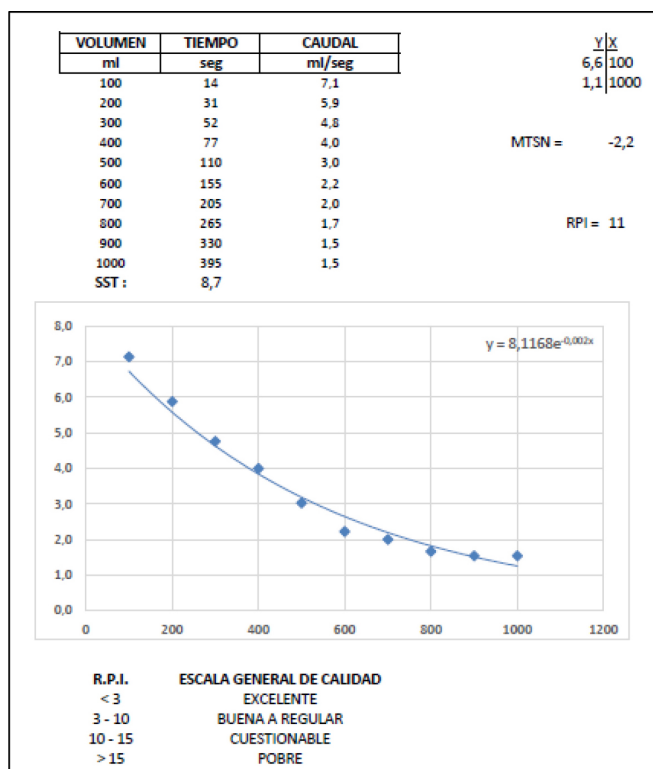


Figura 20. Índice de Taponamiento Relativo Planta LP03 Yacimiento Los Perales

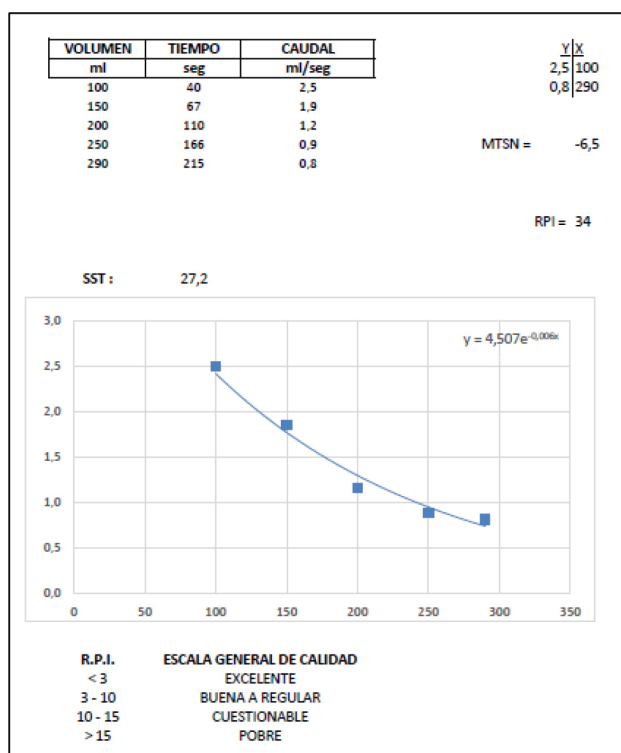


Figura 21. Índice de Taponamiento Relativo Planta La Itala Yacimiento Los Perales

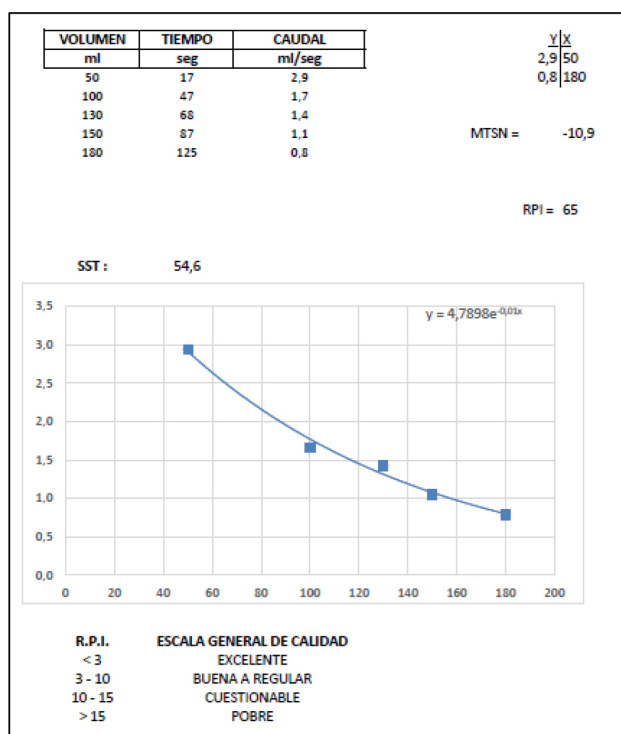


Figura 22. Índice de Taponamiento Relativo Planta LP24 Yacimiento Los Perales

Este estudio permitió conformar un trabajo multidisciplinario de alto impacto con el objetivo de evaluar las causas de las pérdidas de inyectividad, determinar el mecanismo de daño en el reservorio, identificar cuál es el principal agente taponante y evaluar las diferentes alternativas operacionales para brindar una solución oportuna al activo.

Como resultado podemos concluir los siguientes puntos:

- Con el análisis de muestra total se identificaron especies minerales de siderita (Fe_2CO_3), la hematita (Fe_2O_3) y la calcita (CaCO_3). Este fue el punto de partida para comprender la problemática planteada, evaluando la presencia de siderita y óxidos de hierro en las muestras.
- El estudio geoquímico mediante FRX resultó fundamental para identificar un dominio de hierro (Fe), seguido de azufre (S).
- Se determinó por evaluación petrofísica y datos de coronas que las arenas de la Formación Bajo Barreal poseen un diámetro de garganta poral de 20 μm .
- La relación entre tamaño de garganta poral y tamaño de partículas indican que en las capas de la Formación Bajo Barreal puede formarse un daño externo, sin embargo, no se descarta la formación de daño interno.
- Los altos porcentajes de hierro en las muestras sólidas analizadas y en las muestras de agua sumado a los resultados mineralógico por DRX encontrándose la presencia de siderita (FeCO_3), hematita (Fe_2CO_3) y calcita (CaCO_3) y el estudio geoquímico mediante FRX identificando que el hierro (Fe) predomina en la muestra. Confirma y concluye que uno de los principales agentes taponantes del reservorio es el hierro.
- Para mitigar la pérdida de inyectividad en el reservorio, se deben realizar limpiezas mecánicas y tratamientos químicos haciendo énfasis en la remoción del hierro.
- En aquellos pozos donde se visualice una pérdida de admisión del 100% en la capa, se recomienda realizar estimulación matricial selectiva con bombeador.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdulkarim, M., Muxworthy, A., Fraser, A., Neumaier, M., Hu, P., Cowan, A. 2022. Siderite occurrence in petroleum systems and its potential as a hydrocarbon-migration proxy: A case study of the catcher Area Development and the Bittern area, UK North Sea. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 212, 2022, 110248.
- Taleb, W., Pessu, F., Wang, C., Charpentier, T., Barker, R., y Neville, A. 2017. Siderite micro-modification for enhanced corrosion protection. *Npj Mater Degrad* 1, 13. <http://doi.org/10.1038/s41529-017-0014-1>
- Oya Karazincir; Sandra Gomez-Nava; Paul Evans; Ruiting Wu; Wade Williams; Colin Jones; Peggy Rijken. Impact of Injection Water Quality on Injectivity – A Lab Study. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Calgary, Alberta, Canada, September 2019.

- Paper Number: SPE-195983-MS <https://doi.org/10.2118/195983-MS>
- J.G. R. Eylander. Suspended Solids Specifications for Water Injection From Coreflood Tests. Paper presented at the SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, February 4–6, 1987
- <https://doi.org/10.2118/16256-MS>
- Donald H. Davidson. Invasion And Impairment Of Formations By Particulates. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, Nevada, September 1979. <https://doi.org/10.2118/8210-MS>