

**MONITOREO EN TIEMPO REAL DE OPERACIONES DE INTERVENCIÓN A  
POZO: UNA SOLUCIÓN RENTABLE PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA  
OPERATIVA Y REDUCIR COSTOS.**

**ALEXANDER VELASCO ESCUDERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PETRÓLEOS Y GAS, ÉNFASIS EN GERENCIA  
Y ECONOMÍA DE LOS HIDROCARBUROS  
2026**

**MONITOREO EN TIEMPO REAL DE OPERACIONES DE INTERVENCIÓN A  
POZO: UNA SOLUCIÓN RENTABLE PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA  
OPERATIVA Y REDUCIR COSTOS.**

**ALEXANDER VELASCO ESCUDERO**

**Trabajo de grado para optar al título de Máster en Ingeniería de Petróleos y  
Gas, Énfasis en Gerencia y Economía de los Hidrocarburos**

**GERMÁN ZÁRATE ZÁRATE MBA.  
DIRECTOR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PETRÓLEOS Y GAS, ÉNFASIS EN GERENCIA  
Y ECONOMÍA DE LOS HIDROCARBUROS  
2026**

## **DEDICATORIA**

Primeramente, a Dios, por ser mi guía y fortaleza, por ser quien me ha dado sabiduría y por permitirme no solo alcanzar la meta de ser profesional en Ingeniería de Petróleos, sino también culminar este máster. Sin su bendición y providencia divina, este logro no habría sido posible.

A mi esposa, Claudia Marín, por su amor incondicional, su apoyo constante y sus palabras de aliento; por sacrificar tiempo en pareja para que pudiera dedicarme plenamente a este proyecto.

A mi hija, Laura Valentina, por creer siempre en mí y llenarme de orgullo con su confianza; gracias por comprender los momentos en que la familia debía ceder espacio al esfuerzo académico.

A mis padres, Carlos Arturo Velasco y María Emilia Escudero, por enseñarme con su ejemplo la perseverancia, el compromiso y la responsabilidad. Su apoyo incondicional ha sido fundamental en la consecución de todos mis logros, y este no fue la excepción.

A mis hermanos, Giancarlo, Marisol, Carlos Andrey y Frank Camilo, con quienes espero que mi trayectoria y este logro puedan servir de ejemplo y motivación para que continúen alcanzando sus propias metas académicas, profesionales y personales.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Ingeniero Germán Zárate Zárate, quien, con su experiencia profesional y personal, dedicó parte de su tiempo para guiar el desarrollo de este proyecto.

Al Ingeniero Daniel Moreno Carrillo, quien lideró el proyecto y su implementación en la compañía; sus consejos y orientación fueron de gran ayuda para el éxito de este trabajo.

Al Ingeniero Imam Abed, por su apoyo en campo y por brindarme explicaciones claras cuando fueron necesarias.

A la Universidad Industrial de Santander y a todos los profesionales que hicieron parte de esta Maestría; sus conocimientos y experiencias fueron clave en mi desarrollo profesional durante este programa.

A la Sala RTOC de la compañía, donde, guardando la debida confidencialidad, pude acceder a datos que sirvieron de base para la ejecución de este proyecto.

## CONTENIDO

|       |                                                                     |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------|----|
| 1.    | OPERACIONES DE SUBSUELO: PANORAMA GENERAL Y ANÁLISIS DETALLADO..... | 17 |
| 1.1   | UBICACIÓN GEOGRÁFICA .....                                          | 17 |
| 1.2   | DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA.....                                          | 18 |
| 1.3   | PRODUCCIÓN ACTUAL DE PETRÓLEO EN ARAUCA.....                        | 21 |
| 1.4   | OPERACIONES DE SUBSUELO REALIZADAS .....                            | 22 |
| 1.4.1 | Completamiento inicial.....                                         | 23 |
| 1.4.2 | Trabajos que requieren cañoneo .....                                | 24 |
| 1.4.3 | Trabajos que requieren bridge plug .....                            | 26 |
| 1.4.4 | Limpieza de arena (sand clean out, sco) .....                       | 28 |
| 1.4.5 | Trabajos con cementación forzada “squeeze” .....                    | 30 |
| 1.4.6 | Abandono definitivo (plug & abandonment) .....                      | 33 |
| 1.4.7 | cambio de sistema de levantamiento artificial (ALS Change).....     | 34 |
| 1.4.8 | Cambio de bomba electro sumergible (ESP) .....                      | 36 |
| 1.4.9 | Extracción o retiro de una sarta (Pulling) .....                    | 39 |
| 2.    | EQUIPOS DE SUBSUELO: ANÁLISIS DE EQUIPOS SELECCIONADOS<br>42        |    |
| 2.1   | SELECCION DE EQUIPOS.....                                           | 43 |
| 2.1.1 | Especificaciones técnicas .....                                     | 44 |
| 2.1.2 | Estructura del personal .....                                       | 46 |
| 2.1.3 | Costos de operación .....                                           | 46 |
| 2.1.4 | Impacto ambiental y seguridad .....                                 | 47 |
| 3.    | INDICADORES CLAVE EN OPERACIONES DE SUBSUELO .....                  | 48 |
| 3.1   | TIEMPO DE CONEXIÓN STS (SLIP TO SLIP) .....                         | 48 |
| 3.2   | VELOCIDAD DE VIAJE .....                                            | 49 |

|       |                                                                             |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3   | ILT (INVISIBLE LOST TIME) TIEMPO PERDIDO INVISIBLE .....                    | 49 |
| 3.4   | NPT (NON-PRODUCTIVE TIME) TIEMPO NO PRODUCTIVO.....                         | 49 |
| 3.5   | TIEMPOS PLANOS .....                                                        | 50 |
| 3.6   | OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS .....                                            | 51 |
| 4.    | IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO PILOTO.....                                     | 53 |
| 4.1   | DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO PILOTO Y CONTEXTO.....                             | 54 |
| 4.2   | IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE EN TIEMPO REAL.....                             | 54 |
| 4.3   | CHEQUEO DE LA SENSORICA Y CREACION DEL FLUJO DE TRABAJO .....               | 56 |
| 4.4   | RECURSOS OPERATIVOS .....                                                   | 58 |
| 4.4.1 | Personal asignado .....                                                     | 58 |
| 4.4.2 | Infraestructura y tecnología.....                                           | 58 |
| 4.4.3 | Herramientas y materiales .....                                             | 60 |
| 4.5   | INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO EN TIEMPO REAL (WITSML)<br>.....       | 60 |
| 5.    | MONITOREO Y OPTIMIZACIÓN EN TIEMPO REAL DE OPERACIONES<br>DE SUBSUELO ..... | 64 |
| 5.1   | DESARROLLO DEL PROYECTO PILOTO .....                                        | 64 |
| 5.1.1 | selección de operaciones.....                                               | 65 |
| 5.1.2 | Flujo de trabajo implementado .....                                         | 66 |
| 5.2   | MEDICIÓN DE INDICADORES DE DESEMPEÑO (KPI) .....                            | 69 |
| 5.2.1 | Desafíos en la medición.....                                                | 70 |
| 5.2.2 | Análisis del kpi medido.....                                                | 71 |
| 5.2.3 | Resultados estadísticos del piloto .....                                    | 71 |
| 5.3   | OPTIMIZACIÓN OPERATIVA.....                                                 | 73 |
| 5.3.1 | Ventana de sts promedio .....                                               | 74 |
| 5.3.2 | Oportunidades de mejora.....                                                | 74 |

|       |                                                       |    |
|-------|-------------------------------------------------------|----|
| 6.    | RESULTADOS Y EVALUACIÓN DEL MONITOREO EN TIEMPO REAL  | 75 |
| 6.1   | ANÁLISIS DE RESULTADOS OPERATIVOS .....               | 75 |
| 6.1.1 | Eficiencia en los tiempos de conexión STS .....       | 76 |
| 6.2   | IMPACTOS DEL MONITOREO EN TIEMPO REAL.....            | 77 |
| 6.2.1 | Ahorro de tiempo y recursos .....                     | 77 |
| 6.2.2 | Mejora en la toma de decisiones .....                 | 77 |
| 6.2.3 | Impacto en la seguridad operacional .....             | 78 |
| 6.3   | ANÁLISIS FINANCIERO .....                             | 79 |
| 6.3.1 | Síntesis de resultados operativos y financieros ..... | 79 |
| 6.3.2 | Evaluación económica del proyecto.....                | 80 |
| 7.    | CONCLUSIONES .....                                    | 84 |
| 8.    | RECOMENDACIONES .....                                 | 86 |
|       | BIBLIOGRAFIA.....                                     | 88 |

## LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Ubicación Geográfica del Departamento de Arauca y Mapa de Tierras ..17

Mapa 2. Cuenca Sedimentaria Llanos Orientales.....18

## LISTA DE ESQUEMAS

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Esquema 1. Columna Litológica de la Cuenca Sedimentaria Llanos Orientales ..                 | 20 |
| Esquema 2. Operación de Cañoneo.....                                                         | 24 |
| Esquema 3. Cargas y Ensamblaje de un Cañón .....                                             | 25 |
| Esquema 4. Empaque Tipo Bridge Plug .....                                                    | 27 |
| Esquema 5. Componentes básicos de los sistemas PCP y BM. ....                                | 35 |
| Esquema 6. Equipo de superficie y de fondo para una bomba electro-sumergible                 | 37 |
| Esquema 7. Especificaciones Tecnicas Torre 30 y Torre 43 .....                               | 45 |
| Esquema 8. Sensórica requerida para monitoreo en tiempo real en un taladro de subsuelo. .... | 59 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1. Producción Fiscalizada de Petróleo en Colombia enero 2026 .....                | 21 |
| Gráfico 2. Tiempos de conexión STS calculados a partir de la plantilla desarrollada ..... | 67 |
| Gráfico 3. Velocidad de viaje calculada a partir de la plantilla desarrollada.....        | 68 |
| Gráfico 4. Tiempos de conexión y velocidad de viaje obtenidos mediante el software .....  | 68 |
| Gráfico 5. Ahorros potenciales Implementando Sistema de Monitoreo en Tiempo Real .....    | 81 |
| Gráfico 6. Escenarios Probabilísticos para los Ahorros Potenciales .....                  | 82 |

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fotografía 1 Unidad de cable (wire line) .....                                       | 26 |
| Fotografía 2. Unidad de Coiled Tubing (Tubería Flexible) .....                       | 28 |
| Fotografía 3. Unidad de Cementación .....                                            | 32 |
| Fotografía 4. Unidad RSU que Opera en Arauca.....                                    | 42 |
| Fotografía 5. Equipo de Reacondicionamiento Usado por la Compañía en Arauca<br>..... | 43 |
| Fotografía 6. Ejemplo Leguaje WITSML Pozo Mandioca 097 .....                         | 61 |

## **LISTA DE DIAGRAMAS**

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Diagrama 1. Mapa mental del proceso de pulling en operaciones de subsuelo ....             | 40 |
| Diagrama 2. Proceso Implementación Monitoreo en Tiempo Real .....                          | 57 |
| Diagrama 3. Plantillas y diagramas de Gantt utilizados en el monitoreo operativo.<br>..... | 66 |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Operaciones de Subsuelo realizadas en Arauca por la Compañía .....                     | 22 |
| Tabla 2 Personal Asignado a las Torres en Arauca .....                                          | 46 |
| Tabla 3. Tarifa por día típica para un Equipo de Workover 450 y 550 HP .....                    | 46 |
| Tabla 4. Resumen Pozos y tipos de trabajos realizados durante la Prueba Piloto                  | 65 |
| Tabla 6. Estadísticas recopiladas durante la Prueba Piloto (Torre 30) .....                     | 72 |
| Tabla 7. Estadísticas recopiladas durante la Prueba Piloto (Torre 43) .....                     | 73 |
| Tabla 8 . Comparación de desempeño operativo antes y después del monitoreo en tiempo real ..... | 76 |
| Tabla 9. Costos Consolidados del proyecto .....                                                 | 82 |

## RESUMEN

**TÍTULO:** MONITOREO EN TIEMPO REAL DE OPERACIONES DE INTERVENCIÓN A POZO: UNA SOLUCIÓN RENTABLE PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA OPERATIVA Y REDUCIR COSTOS\*

**AUTOR:** ALEXANDER VELASCO ESCUDERO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** MONITOREO, TIEMPO, REAL, RTO, WITSML, OPTIMIZACION, OPERACIONES, SUBSUELO

**DESCRIPCIÓN:** Este proyecto implementó un sistema de monitoreo en tiempo real para operaciones de intervención a pozo, demostrando su efectividad en la mejora de la eficiencia operativa y la reducción del tiempo no productivo (NPT). La adquisición continua de datos permitió medir y optimizar los tiempos de conexión STS, logrando reducciones individuales entre 0,07 y 1,12 minutos por conexión, equivalentes a mejoras entre el 4 % y el 42 %, con una reducción promedio del 18 % por intervención.

Durante la fase piloto, que incluyó nueve operaciones, se registraron un total de 53 viajes de tubería y 8.419 conexiones, generando un ahorro total de 2.319 minutos (38,7 horas) y una reducción de costos estimada en 23.057 USD

Además de los beneficios directos en costos, el proyecto generó valor indirecto reduciendo la producción diferida, con ahorros estimados en 223 barriles. El piloto se ejecutó con costos mínimos, utilizando software gratuito y la infraestructura existente, logrando un Retorno de la Inversión (ROI) del 118 %. Incluso bajo escenarios futuros que contemplan el uso de software propio o comercial, el retorno se mantiene positivo, lo que demuestra la escalabilidad y la sostenibilidad financiera del sistema.

Asimismo, el monitoreo en tiempo real fortaleció la toma de decisiones operativas al permitir la detección temprana de incrementos en los tiempos STS, anomalías de presión, variaciones en la velocidad de viaje y patrones atípicos en los datos, facilitando la implementación de acciones correctivas oportunas y superando el enfoque tradicional basado en reportes diarios.

Finalmente, el piloto estableció las bases para expandir el análisis hacia nuevos indicadores clave de desempeño (KPI), incluyendo velocidad de viaje, reducción de ILT, NPT, tiempos planos y optimización de parámetros, incrementando el valor del monitoreo en tiempo real como una herramienta confiable para la toma de decisiones estratégicas.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Maestría en Ingeniería de Petróleos y Gas, Énfasis en Gerencia y Economía de los Hidrocarburos Director: Germán Zárate Zárate. Magister en Administración de Negocios MBA.

## ABSTRACT

**TITLE:** REAL-TIME MONITORING OF WELL INTERVENTION OPERATIONS: A COST-EFFECTIVE SOLUTION TO INCREASE OPERATIONAL EFFICIENCY AND REDUCE COSTS\*

**AUTHOR:** ALEXANDER VELASCO ESCUDERO\*\*

**KEY WORDS:** MONITORING, REAL-TIME, RTO, WITSML, OPTIMIZATION, OPERATIONS, SUBSURFACE

**DESCRIPTION:** This project implemented a real-time monitoring system for well interventions operations, demonstrating its effectiveness in improving operational efficiency and reducing non-productive time (NPT). Continuous data acquisition enabled the measurement and optimization of STS connection times, achieving individual reductions ranging from 0.07 to 1.12 min per connection, corresponding to performance improvements between 4% y 42%, with an average reduction of 18% per intervention.

During the pilot phase, which included nine operations, 53 tubing runs and 8,419 connections were recorded, resulting in a total saving of 2,319 minutes (38.7 hours) and an estimated cost reduction of USD 23,057.

In addition to direct cost benefits, the project generated indirect value by reducing deferred production, with estimated savings equivalent to approximately 223 barrels. The pilot was executed at minimal cost using free software and existing infrastructure, achieving a Return on Investment (ROI) of 118%. Even under future scenarios involving proprietary or commercial software, the return remains positive, demonstrating the scalability and financial sustainability of the system.

Furthermore, real-time monitoring enhanced operational decision-making by enabling immediate detection of STS time increases, pressure anomalies, variations in travel speed, and atypical data patterns, facilitating timely corrective actions and surpassing the traditional approach based solely on daily reports.

Finally, the pilot laid the groundwork to expand the analysis to additional operational KPIs, including travel speed, ILT reduction, NPT, flat times, and parameter optimization, increasing the potential value of real-time monitoring and providing a reliable tool for strategic decision-making.

---

\*Master Thesis

\*\*Faculty of Physical-Chemical Engineering, School of Petroleum Engineering. Master's in Petroleum and Gas Engineering, Emphasis in Hydrocarbon Management and Economics. Director: Germán Zárate Zárate, MBA.

## INTRODUCCIÓN

El monitoreo en tiempo real de operaciones de intervención a pozo se ha convertido en una herramienta clave para mejorar la eficiencia operativa y reducir los tiempos improductivos en la industria petrolera. La complejidad de las intervenciones de subsuelo y la necesidad de optimizar los recursos disponibles han impulsado el desarrollo de soluciones tecnológicas capaces de capturar, procesar y analizar datos de manera inmediata.

El proyecto surge de la necesidad de implementar un sistema de monitoreo que permita tomar decisiones oportunas durante las operaciones, disminuir la producción diferida y generar ahorros operativos significativos. Se fundamenta en antecedentes teóricos y prácticos relacionados con la optimización de tiempos de conexión STS, la reducción de costos y la aplicación de tecnologías como el monitoreo en tiempo real, utilizando el protocolo WITSML para la captura y transmisión de datos.

El objetivo principal de este estudio es diseñar e implementar un piloto de monitoreo en tiempo real para intervenciones de subsuelo, evaluando su impacto en la eficiencia de las operaciones y su rentabilidad. El alcance incluye la medición de tiempos de conexión STS y la demostración de la viabilidad de la solución tecnológica.

Metodológicamente, el proyecto integra el uso de software especializado, captura de datos operativos en campo y análisis de indicadores clave de desempeño (KPI). Este estudio aporta al conocimiento del área, evidenciando cómo el monitoreo en tiempo real puede convertirse en una herramienta para la optimización de operaciones de subsuelo, la toma de decisiones y la reducción de costos operativos.

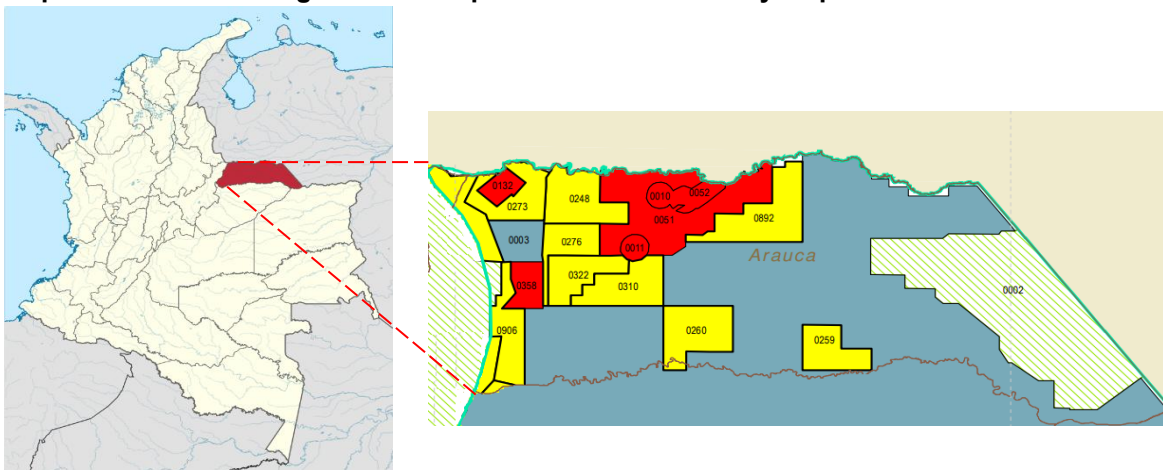
## 1. OPERACIONES DE SUBSUELO: PANORAMA GENERAL Y ANÁLISIS DETALLADO

Actualmente, la compañía opera tres activos en el país, localizados en los departamentos de Santander, Casanare y Arauca. En estos activos, se utilizan aproximadamente 15 equipos de subsuelo para llevar a cabo sus intervenciones a pozo. El desarrollo de este proyecto se enfocará específicamente en el departamento de Arauca, debido a su relevancia estratégica y las oportunidades que presenta para la optimización de sus operaciones.

### 1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El departamento de Arauca se encuentra en la región oriental del país, limitando al norte con Venezuela. Este departamento es conocido por sus extensas llanuras y su rica biodiversidad. La ubicación estratégica de Arauca permite un fácil acceso a recursos clave, lo que lo convierte en un área de gran interés para las operaciones de subsuelo de la compañía. Además, la infraestructura existente en la región facilita la logística y el transporte de equipos y personal necesario para las intervenciones a pozo.

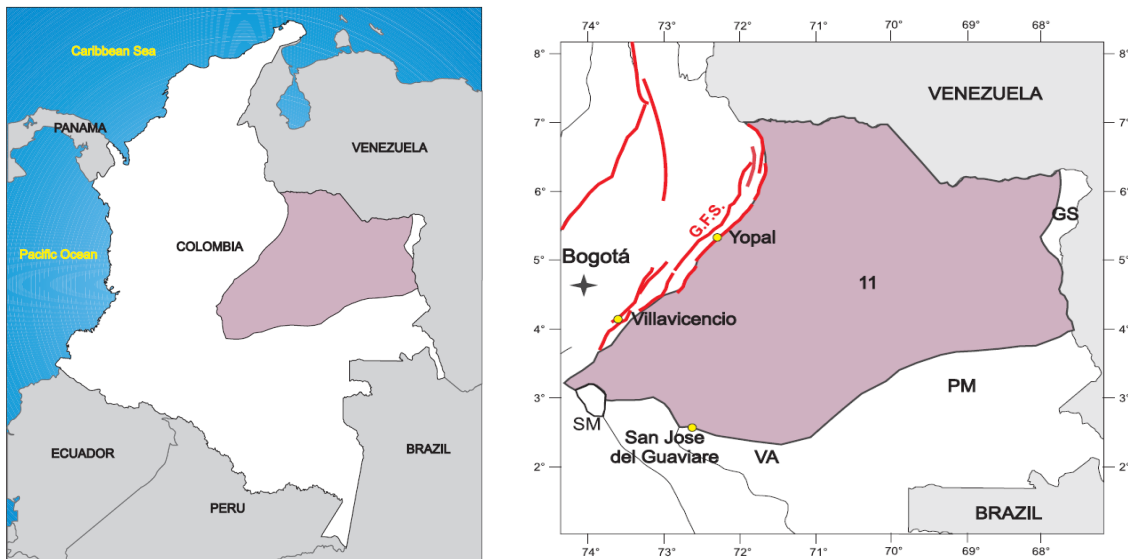
**Mapa 1. Ubicación Geográfica del Departamento de Arauca y Mapa de Tierras**



## 1.2 DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA

La cuenca de los Llanos Orientales, ubicada en la región oriental de Colombia, es la cuenca sedimentaria más productiva en generación de hidrocarburos. Limita al norte con Venezuela; al sur, con el alto de La Macarena, el Arco de Vaupés y las rocas metamórficas que afloran al sur del río Guaviare; al este, con los afloramientos del Escudo de Guayana; y al oeste, con el sistema de cabalgamiento frontal de la Cordillera Oriental.

**Mapa 2. Cuenca Sedimentaria Llanos Orientales**



Fuente: Adaptado de ANH (2007), Colombian Sedimentary Basins (p. 40).

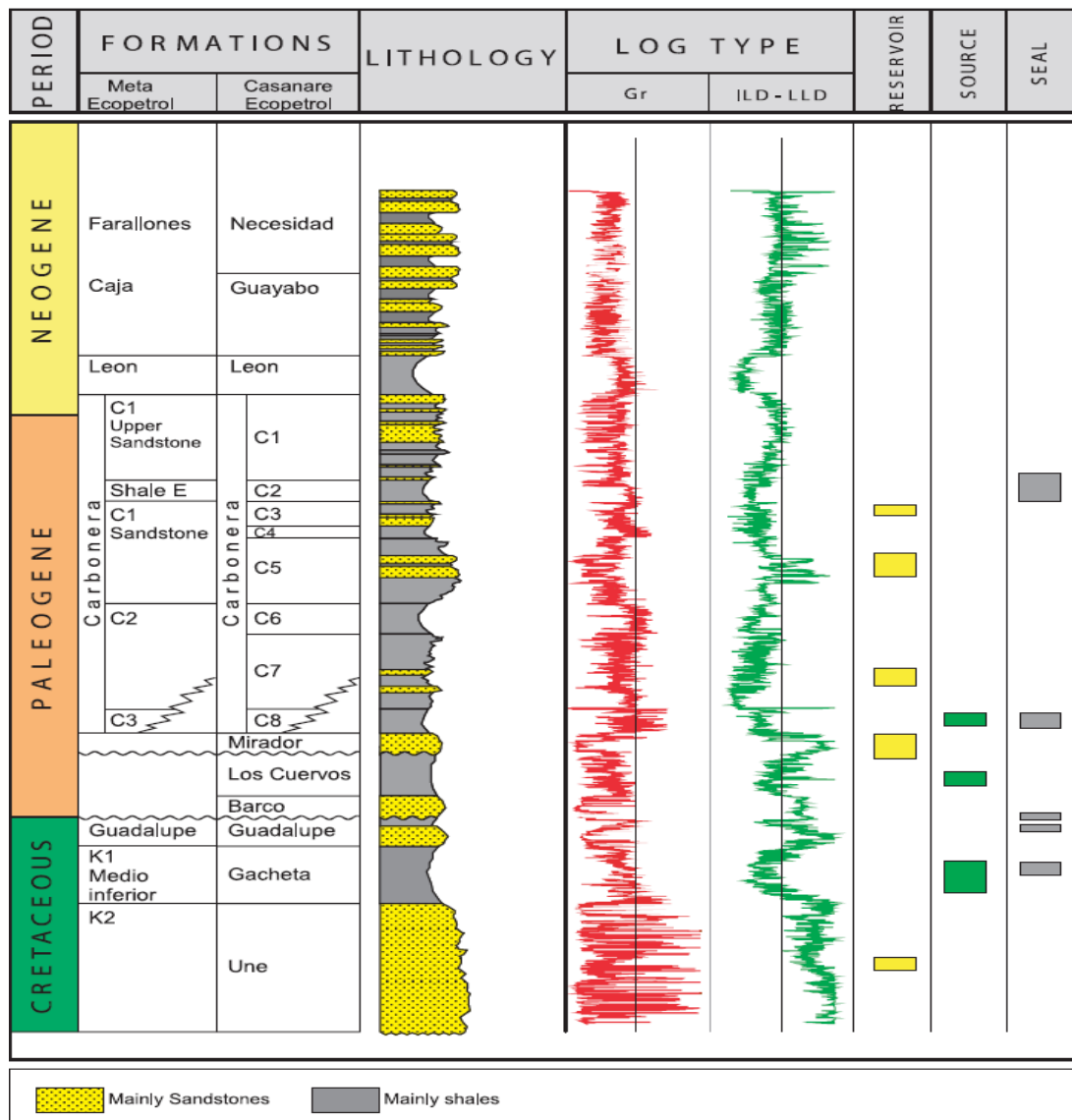
En cuanto a la geología del Petróleo, la cuenca Llanos Orientales, presenta las siguientes características:

- **Evidencia de hidrocarburos:** Se ha documentado oficialmente más de 1,500 MMBO de petróleo recuperable. Se han descubierto dos campos gigantes (Caño Limón y Castilla), tres importantes (Rubiales, Apiay y el Complejo Tame) y más de cincuenta campos menores.

- **Roca generadora:** Las rocas generadoras de la Cuenca de los Llanos se encuentran, de hecho, bajo el flanco oriental de la Cordillera Oriental. Las lutitas de origen mixto marino-continental de la Formación Gachetá, con querógeno de tipo II y III, un contenido orgánico total (TOC) que varía entre 1 y 3 %, y un espesor efectivo de 150 a 300 pies, son la principal fuente.
- **Migración:** Se han documentado dos pulsos de migración. El primero ocurrió durante el Eoceno Superior-Oligoceno. El segundo pulso de migración comenzó en el Mioceno y continúa en la actualidad.
- **Reservorio:** Las areniscas Paleógenas de la Carbonera (C-3, C-5 y C-7) y Mirador son excelentes unidades dentro de la secuencia del Cretácico, varios intervalos de areniscas también son excelentes reservorios. Sin excepción, el espesor sedimentario aumenta en dirección de este a oeste. La porosidad disminuye en la misma dirección, de 30 % a casi 10 %. El espesor de la zona productiva varía de unos pocos pies hasta 180 pies, dependiendo de la ubicación del pozo dentro de la cuenca. La gravedad API varía entre 12° y 42°.
- **Sello:** La unidad C-8 de la Formación Carbonera ha sido tradicionalmente considerada como el sello regional de la cuenca, pero debido a su extensión, el mejor sello es la Unidad C-2 de la Carbonera. Las unidades de Carbonera numeradas de manera par son reconocidas como sellos locales, al igual que las formaciones Gachetá y Guadalupe del Cretácico, que pueden ser auto-sellantes.
- **Trampa:** La perforación exploratoria se ha concentrado en fallas normales hacia la cuenca. Los anticlinales de fallas inversas poco estudiadas, las anticlinales de bajo relieve y las trampas estratigráficas (acuñamientos, paleoelevaciones, canales, etc.) son todos objetivos de exploración de alto potencial.

➤ **Prospectividad:** Esta cuenca ha sido moderadamente perforada y las trampas estratigráficas suaves no se han estudiado en profundidad. Las áreas potenciales para la acumulación de hidrocarburos están ubicadas en las porciones sur y este de la cuenca, donde el acuífero de los reservorios es afectado por agua meteórica, formando trampas hidrodinámicas. La parte suroccidental, al sur del Campo Castilla, también es un área de alta prospectividad.

**Esquema 1. Columna Litológica de la Cuenca Sedimentaria Llanos Orientales**



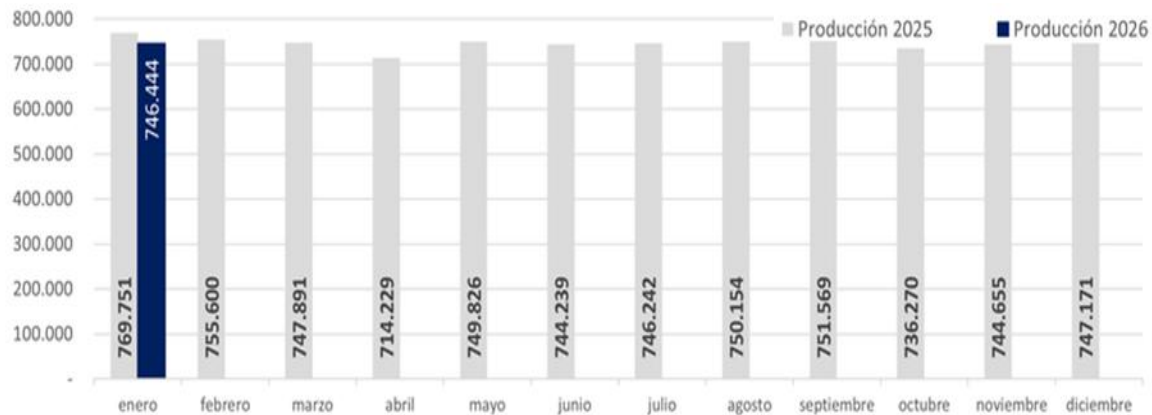
Fuente: Tomado de ANH (2007), Colombian Sedimentary Basins (p. 40).

### 1.3 PRODUCCIÓN ACTUAL DE PETRÓLEO EN ARAUCA

Los departamentos de Arauca, Casanare, Meta y Vichada pertenecen a la cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales, la cual es una cuenca madura, destacándose por ser la que más volumen de petróleo le aporta al país.

También es importante mencionar que la producción total de petróleo en Colombia en enero de 2026 fue de 746.444 barriles de petróleo por día (BOPD). En ese mismo periodo, la Cuenca de los Llanos Orientales alcanzó una producción total de 591.145 BOPD, lo que representa el 79,2% de la producción nacional. Del total, el departamento de Arauca contribuyó con 49.407 BOPD, equivalente al 6.6% de la producción nacional.

Gráfico 1. Producción Fiscalizada de Petróleo en Colombia enero 2026



|                           | Departamento        | BOPD    | Participación Nacional |
|---------------------------|---------------------|---------|------------------------|
| Cuenca Llanos Orientales  | Arauca              | 49.407  | 6,6%                   |
|                           | Casanare            | 108.359 | 14,5%                  |
|                           | Meta                | 433.379 | 58,1%                  |
|                           | Total Cuenca Llanos | 591.145 | 79,2%                  |
| Producción Total Colombia |                     | 746.444 |                        |

Fuente: Adaptado de ANH (s. f.), Estadísticas de producción.

## 1.4 OPERACIONES DE SUBSUELO REALIZADAS

Como se mencionó al inicio de este capítulo, el proyecto se enfocará en los activos que la compañía opera en el departamento de Arauca, donde se llevan a cabo diversas actividades de reacondicionamiento y servicio a pozo. La Tabla 2, muestra las diferentes operaciones de subsuelo que se realizan en esta área.

**Tabla 1. Operaciones de Subsuelo realizadas en Arauca por la Compañía**

| Nombre del Trabajo     | Tipo de Operación      | Requiere Cañoneo | Requiere Bridge Plug | Descripción                                                                                                                                           |
|------------------------|------------------------|------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Completamiento Inicial | Completamiento Inicial | Si               | No                   | Primera intervención colocando bomba, tubería y accesorios necesarios para poner en producción inicial el pozo.                                       |
| WO Bridge Plug         | Reacondicionamiento    | No               | Si                   | Operación en la que se aísla una zona utilizando un tapón tipo (Bridge Plug)                                                                          |
| WO BP + Perf           | Reacondicionamiento    | Si               | Si                   | Operación en la que se aísla una zona utilizando un tapón tipo (Bridge Plug), además de eso se cañonea un intervalo existente.                        |
| WO Add Perf            | Reacondicionamiento    | Si               | No                   | Operación en la que se cañonea un intervalo adicional a los existentes.                                                                               |
| WO SQZ + Perf          | Reacondicionamiento    | Si               | Si                   | Operación en la que se aísla una zona utilizando una cementación forzada tipo "squeeze", además de eso se cañonea un intervalo existente.             |
| WO ALS Change          | Reacondicionamiento    | No               | No                   | Operación en la que se cambia un sistema de levantamiento artificial por otro, ejemplo pasar de bombeo mecánico a bombeo electro-sumergible.          |
| WS with SCO            | Servicio a Pozo        | No               | No                   | Operación en la que se cambia el sistema de levantamiento por uno en óptimas condiciones, se aprovecha este servicio para realizar limpieza de arena. |
| WS ESP                 | Servicio a Pozo        | No               | No                   | Operación en la que se cambia el sistema de levantamiento ESP por uno en óptimas condiciones.                                                         |
| Pulling                | Servicio a Pozo        | No               | No                   | Servicio cuyo objetivo es sacar a superficie la sarta de tubería, accesorios y equipo de subsuelo en fondo.                                           |
| Plug & Abandonment     | Abandono de Pozo       | No               | Si                   | Trabajo realizado para abandonar definitivamente el pozo.                                                                                             |

Fuente: Elaboración propia

Las operaciones de subsuelo son actividades fundamentales en la industria petrolera, diseñadas para optimizar la producción y prolongar la vida útil de los pozos. Existen diversos tipos de trabajos de subsuelo, cada uno con objetivos específicos y metodologías adaptadas a las condiciones del pozo y del yacimiento. A continuación, se describen los principales tipos de trabajos de subsuelo que realiza la compañía en el departamento de Arauca.

#### 1.4.1 Completamiento Inicial

Es el proceso mediante el cual un pozo se prepara para la producción de hidrocarburos después de finalizar la perforación, garantizando su productividad y confiabilidad. Sus actividades varían según el tipo de pozo (vertical, direccional u horizontal), las características del yacimiento.

El completamiento inicial incluye actividades técnicas y operativas, entre las cuales se encuentran:

- **Tubería de producción:** transporta hidrocarburos desde el fondo hasta la superficie, soportando condiciones extremas.
- **Empaques aislantes:** sellan el pozo e contaminación y preservar la integridad estructural.
- **Sistema de levantamiento artificial (ALS):** incorpora equipos como bombas de cavidad progresiva (PCP), de varilla (bombeo mecánico) o electrosumergibles (ESP), adaptados a las características del yacimiento.

Tras completar el pozo, se realizan pruebas de producción, que permiten ajustar equipos y optimizar el flujo de hidrocarburos. De otra parte, los sistemas de monitoreo garantizan un control continuo y mejoran la operación.

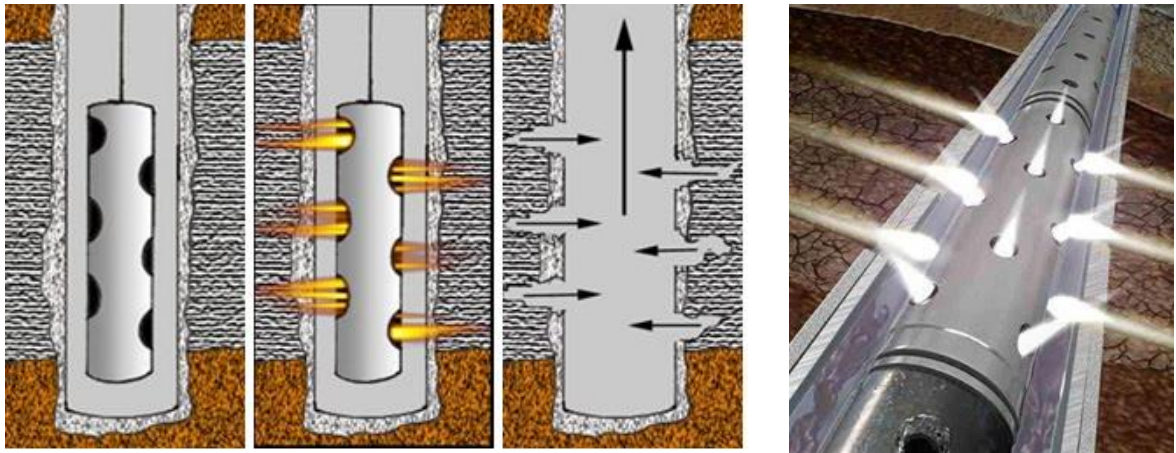
Un completamiento bien diseñado y ejecutado maximiza la producción y reduce los costos operativos. Finalizado el proceso, el pozo queda en condiciones de iniciar su producción y contribuir al aprovechamiento de los recursos energéticos en la región.

#### 1.4.2 Trabajos que requieren cañoneo

Actualmente, la compañía realiza cuatro (4) tipos de trabajos de subsuelo, que incluyen la operación de cañoneo, los cuales son: Completamiento Inicial, *WO Bridge Plug + Perf*, *WO Add Perf* y *WO SQZ Perf* (ver Tabla 1).

Un trabajo de cañoneo, en el contexto de las operaciones de subsuelo, consiste en realizar perforaciones en la tubería de revestimiento (casing), el cemento y la formación productora de petróleo o gas, con el fin de permitir el flujo de hidrocarburos hacia el pozo y su posterior extracción. Este proceso es fundamental para conectar el yacimiento con el pozo y facilitar la producción eficiente de fluidos. Como se observa en la Figura 5.

#### Esquema 2. Operación de Cañoneo



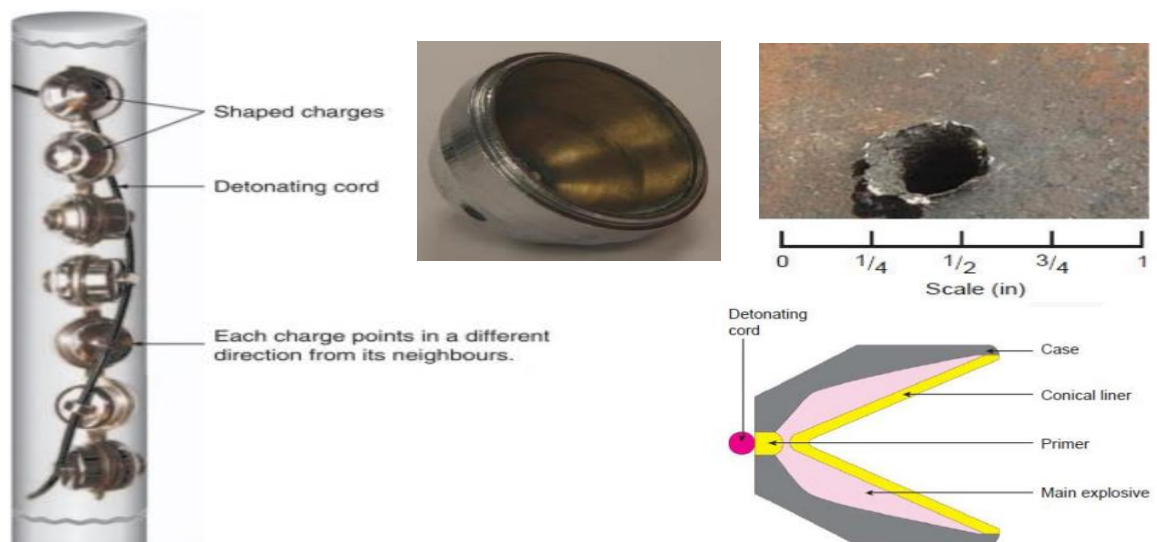
Fuente: Adaptado de Samad (2011). *Perforating of Oil and Gas Wells*, p. 15.

Es importante destacar que existen dos alternativas: la primera consiste en cañonear un intervalo nuevo; la segunda, en intervenir una zona previamente

cañoneada y puesta en producción. Cuando este proceso se realiza nuevamente sobre un intervalo ya intervenido, se denomina re-cañoneo.

- **Planificación y diseño:** Se definen la profundidad, el intervalo a cañonear, el tipo de cargas y la densidad de disparos, con base en el análisis geológico, la ubicación de las zonas productivas y las características de la formación. Asimismo, se seleccionan las herramientas y el método de cañoneo más adecuados, considerando factores como presión, temperatura y tipo de formación.
- **Selección del sistema de cañoneo:** Los sistemas más comunes incluyen cargas perforantes (shaped charges) y cañones de perforación (perforating guns), los cuales generan perforaciones en el revestimiento, el cemento y la formación. Dependiendo de la técnica empleada, el cañoneo puede realizarse mediante cable (wireline), tubería de producción (tubing-conveyed perforating, TCP) o tubería flexible (coiled tubing), cada uno adaptado a diferentes condiciones operativas del pozo y del yacimiento.

**Esquema 3. Cargas y Ensamblaje de un Cañón**



Fuente: Adaptado de Bellarby (2009). Well Completion Design, pp. 46–47, 50.

➤ **Ejecución del trabajo de cañoneo:** Las herramientas de cañoneo, se bajan al pozo hasta la profundidad deseada, comúnmente con una unidad de cable (ver Figura 7). Una vez posicionado el cañón, se activan las cargas perforantes mediante sistemas eléctricos o hidráulicos, creando explosiones controladas que perforan la tubería de revestimiento, el cemento y la formación de interés, estableciendo canales de comunicación entre la formación y el pozo.

La operación se monitorea para garantizar un cañoneo controlado sin comprometer la integridad del pozo.

**Fotografía 1 Unidad de cable (wire line)**



Fuente: Elaboración propia a partir de SLB (s.f.), y Goes Well (s.f.).

Un trabajo de cañoneo o re-cañoneo exitoso maximiza el flujo de hidrocarburos sin comprometer la integridad del pozo. La selección adecuada de técnicas y herramientas, junto con una ejecución precisa, son fundamentales para garantizar la seguridad, eficiencia y productividad del pozo a lo largo de su vida útil.

#### 1.4.3 Trabajos que requieren Bridge Plug

La compañía realiza cuatro (4) tipos principales de trabajos de subsuelo que involucran el uso de Bridge Plug: *WO Bridge Plug + Perf*, *WO SQZ + Perf*, *WO Bridge Plug* y *Plug & Abandonment*.

Estos trabajos de reacondicionamiento utilizan un dispositivo de aislamiento conocido como **Bridge Plug**, que se emplea en pozos para bloquear de manera temporal o permanente el flujo de petróleo y/o gas en un intervalo específico del pozo. El **Bridge Plug** se diseña para resistir las condiciones de presión y temperatura del pozo, este dispositivo se utiliza en diversas operaciones, como el abandono de pozos, el aislamiento de zonas específicas, y para la realización de pruebas de presión en diferentes secciones del pozo.

El proceso de instalación de un empaque o tapón tipo Bridge Plug en un pozo de petróleo o gas implica el uso de varios métodos según el diseño del pozo y los equipos disponibles. Aquí están los métodos más comunes:

#### Esquema 4. Empaque Tipo Bridge Plug



Fuente: Adaptado de Bellarby (2009). Well Completion Design, pp. 581.

➤ **Cable de acero (wireline):** El Bridge Plug se conecta a una unidad de wireline, que baja el dispositivo hasta la profundidad deseada en el pozo, una vez en posición, se activa mediante un explosivo y expande para sellar la tubería en esa zona. Este método es rápido y es ideal cuando se requiere una colocación precisa en pozos verticales.

➤ **Tubería de perforación (Drill Pipe):** Este método usa una sarta de perforación para descender el Bridge Plug, ideal en condiciones donde el cable de acero no puede ser utilizado (por ejemplo, en pozos con alta inclinación). Al alcanzar la profundidad deseada, el Bridge Plug se coloca en su posición, y el mecanismo de

sellado se activa mediante presión hidráulica o mecánica. brindando un control más preciso durante la instalación.

➤ **Tubería Flexible (Coiled Tubing):** Aquí se utiliza tubería continua para bajar el Bridge Plug, una opción ventajosa en pozos de alta desviación o bajo condiciones de presión elevada. La tubería continua permite aplicar presión controlada mientras se posiciona el Bridge Plug y activa el mecanismo de sellado.

**Fotografía 2. Unidad de Coiled Tubing (Tubería Flexible)**



Fuente: Adaptado de Tempresstech (s.f.).

En cualquiera de las técnicas anteriores, una vez colocado y activado el Bridge Plug, este se expande contra las paredes del revestimiento, formando un sello que aísla la sección del pozo deseada.

#### **1.4.4 Limpieza de Arena (Sand Clean Out, SCO)**

La limpieza de arena es una operación de mantenimiento crítico en pozos de producción que presentan acumulación de arena y otros sedimentos en su interior. La presencia de partículas sólidas puede generar daños en los equipos de fondo,

reducir el flujo de producción y comprometer la integridad del pozo al obstruir la tubería, válvulas y herramientas de subsuelo.

Para la remoción de estos sólidos, se emplean diferentes métodos operativos, entre los cuales se destacan:

- **Tubería flexible (coiled tubing):** Técnica ampliamente utilizada que permite la inyección de fluidos a presión mediante una sarta continua, facilitando la desintegración y movilización de la arena hacia superficie. Adicionalmente, permite la inyección de productos químicos, como disolventes y surfactantes, que favorecen la limpieza del pozo y la remoción de sólidos adheridos, empleando unidades de superficie como las ilustradas en la Figura 9.
- **Lavado con tubería de trabajo (work string):** Alternativa empleada en ausencia de tubería flexible. Permite bombear fluidos a través de la sarta de trabajo para arrastrar los sólidos acumulados.
- **Aire comprimido o nitrógeno:** Utilizados en operaciones donde se requiere evitar el uso de fluidos líquidos, generando un flujo de gas que moviliza los sólidos hacia superficie. Este método es especialmente útil en pozos que requieren una limpieza en seco o en zonas con alta sensibilidad a la invasión de fluidos.
- **Hidráulica de alta presión (jetting):** Consiste en la aplicación de chorros de fluido a alta presión para remover depósitos de arena adheridos en el fondo o en las paredes del pozo.

Las principales aplicaciones de la limpieza de arena incluyen:

- **Recuperación de producción:** Eliminación de obstrucciones que afectan el

flujo de hidrocarburos.

- **Protección de equipos:** Reducción del desgaste en válvulas, bombas y revestimientos causado por abrasión.
- **Estabilidad estructural del pozo:** Prevención de problemas estructurales asociados a la acumulación de sólidos.

Equipos clave en la limpieza de arena:

- **Equipo de workover y tubería de trabajo:** Permiten la manipulación de la sarta y la inyección de fluidos a presión..
- **Coiled tubing:** Facilita operaciones continuas con alta eficiencia en la remoción de sólidos.
- **Bomba de alta presión:** Utilizadas para generar el flujo necesario para desplazar la arena.
- **Herramientas de limpieza mecánica:** Incluyen boquillas, raspadores, cepillos (scrapers), herramientas de impacto y dispositivos de suabeo.
- **Sistemas de monitoreo y control:** Permiten supervisar variables operativas como presión, caudal y volumen de sólidos recuperados.

En conjunto, la limpieza de arena permite restaurar la capacidad de flujo, proteger los equipos de producción y mantener la integridad estructural del pozo, contribuyendo a la continuidad operativa y a la optimización de la producción.

#### 1.4.5 Trabajos con Cementación Forzada “Squeeze”

El término “squeeze” hace referencia a un proceso de cementación forzada utilizado para sellar filtraciones, fracturas en el pozo, aislar zonas problemáticas y realizar reparaciones. Este proceso consiste en la inyección de una lechada de cemento a presión en zonas específicas donde se requiere sellar espacios no deseados, como

el espacio anular del revestimiento o formaciones que permiten la migración de fluidos entre diferentes capas geológicas.

La cementación forzada tiene diversas aplicaciones operativas, entre las que se destacan:

- **Aislamiento de zonas problemáticas:** Se emplea para bloquear intervalos con presencia de fluidos no deseados, como agua o gas, o zonas productivas no rentables, evitando su impacto en la producción.
- **Sellado de fugas:** Permite corregir pérdidas ocasionadas por corrosión del revestimiento o fallas en la formación, restaurando la integridad del pozo.
- **Reparación de zonas de producción:** Se utiliza para recuperar la integridad de intervalos dañados y mejorar la comunicación entre el yacimiento y el pozo.
- **Control de migración de fluidos:** Actúa como medida preventiva para evitar el desplazamiento no controlado de fluidos hacia zonas productivas.
- **Rehabilitación de pozos:** Contribuye a la recuperación de pozos maduros mediante el sellado de zonas no productivas y la mejora de su desempeño
- **Relleno de cavidades:** Se emplea para estabilizar formaciones con vacíos o colapsos, evitando fallas estructurales en el pozo.

En términos generales, la cementación squeeze constituye una técnica clave tanto para la reparación como para el mantenimiento de la integridad del pozo, contribuyendo a la seguridad operativa y a la optimización de la producción.

El proceso de cementación forzada se realiza generalmente a través de tubería de trabajo o tubería flexible, utilizando equipos especializados como los mostrados en la Figura 10.

**Fotografía 3. Unidad de Cementación**



Fuente: Elaboración propia a partir de SLB (s.f.), PEP-USA (s.f.)

- **Bomba de cementación:** Encargada de inyectar la lechada a alta presión hacia la zona objetivo.
- **Tubería de cementación:** Permite transportar el cemento desde superficie hasta el punto de aplicación.
- **Dispositivos de control de presión:** Regulan y monitorean la presión durante la operación.
- **Empaques (Plugs):** Se utilizan para aislar zonas y dirigir el flujo del cemento.
- **Equipo de registro (logging):** Permiten verificar la calidad y ubicación de la cementación.

Estos equipos son fundamentales en el proceso de squeeze, pues permiten asegurar que el cemento sea colocado con precisión y efectividad en la zona

objetivo del pozo, formando un sellado hermético y garantizando el correcto fragüe de la lechada, evitando la migración no deseada de fluidos.

#### 1.4.6 **Abandono Definitivo (Plug & Abandonment)**

El abandono definitivo de un pozo se realiza cuando se ha agotado el yacimiento o cuando las condiciones técnicas y económicas no justifican su explotación continua. Este proceso comprende un conjunto de actividades orientadas a garantizar que el pozo no represente riesgos futuros para el medio ambiente ni para operaciones en el área.

Las principales actividades asociadas al abandono definitivo incluyen:

- **Retiro de equipos de subsuelo:** Se extraen la sarta de producción, empaques, válvulas, niples, camisas de circulación y demás accesorios instalados en el pozo. En sistemas de levantamiento artificial, como bombeo mecánico o bombeo por cavidades progresivas (PCP), se retira previamente la sarta de varillas. En pozos con sistemas electro-sumergibles (ESP), se extraen el cable, la bomba, los sellos y los componentes asociados
- **Retiro de equipos de superficie:** Incluye la desinstalación de las facilidades de producción, tales como el árbol de Navidad, la cabeza de pozo, separadores, tanques de almacenamiento, líneas de flujo, unidades de bombeo e instalaciones eléctricas y de control.
- **Sellado del pozo:** Se instalan tapones de cemento en zonas críticas, incluyendo la formación productora, intervalos intermedios y superficie, con el fin de aislar completamente el pozo y prevenir la migración de fluidos.

➤ **Restauración ambiental del área:** : Consiste en la recuperación del área intervenida, eliminando las instalaciones y acondicionando el terreno de acuerdo con los usos futuros definidos para la zona

En conjunto, estas actividades permiten garantizar un cierre seguro e irreversible del pozo, asegurando la integridad a largo plazo y minimizando impactos ambientales

#### 1.4.7 Cambio de Sistema de Levantamiento Artificial (ALS Change)

El cambio de sistema de levantamiento artificial se realiza cuando el método de producción existente deja de ser eficiente para la extracción de hidrocarburos, como consecuencia de variaciones en las condiciones del pozo o del yacimiento. Este proceso implica la evaluación del desempeño del sistema actual y la selección de una alternativa más adecuada que permita optimizar la producción y reducir costos operativos.

Entre los sistemas de levantamiento artificial utilizados en los activos operados en el departamento de Arauca se encuentran:

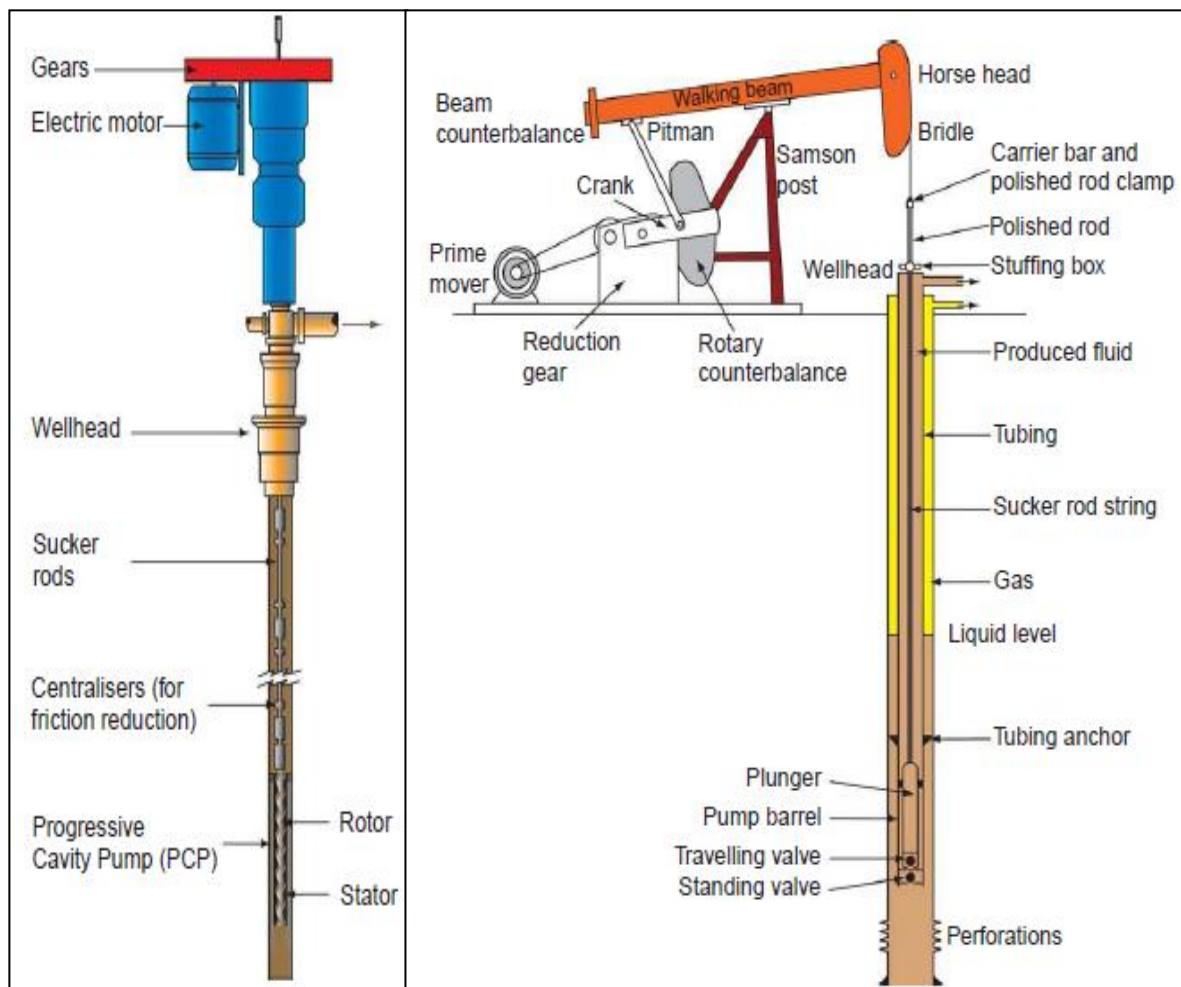
**Bombeo Electro-sumergible (ESP):** Adecuado para pozos de alta profundidad y altas tasas de producción. Emplea una bomba eléctrica instalada en fondo, capaz de manejar grandes volúmenes de fluido.

**Bombeo Mecánico (BM):** Sistema ampliamente utilizado en pozos de profundidad moderada y tasas de producción bajas a medias. Consiste en una bomba de subsuelo accionada desde superficie mediante una unidad de bombeo y una sarta de varillas que transmite el movimiento hasta el fondo del pozo.

**Bombas de Cavity Progresiva (PCP):** Empleado en pozos con fluidos de alta viscosidad, alto corte de agua y presencia de sólidos (arena). Es especialmente eficiente en condiciones de producción complejas.

Los principales componentes de los sistemas de bombeo mecánico y bombeo por cavidades progresivas se presentan en la Figura 11, donde se ilustran los elementos de superficie y subsuelo involucrados en cada método.

**Esquema 5. Componentes básicos de los sistemas PCP y BM.**



Fuente: Adaptado de Bellarby (2009). Well Completion Design, pp. 350,354

El cambio de sistema de levantamiento requiere un análisis detallado de las condiciones operativas del pozo, incluyendo variables como caudal, presión, propiedades del fluido y estado mecánico. Asimismo, se consideran aspectos económicos y de confiabilidad para garantizar la selección del método más adecuado.

Una vez implementado el nuevo sistema, se realiza el monitoreo continuo de sus parámetros operativos con el fin de verificar su desempeño, detectar desviaciones y asegurar la optimización de la producción.

#### 1.4.8 Cambio de Bomba Electro Sumergible (ESP)

El cambio de bomba electro-sumergible (ESP) se realiza cuando el sistema de levantamiento artificial presenta fallas operativas o ha alcanzado el final de su vida útil, afectando la eficiencia y la producción del pozo. Esta intervención tiene como objetivo restablecer las condiciones óptimas de producción mediante la instalación de un nuevo sistema ESP acorde con las condiciones actuales del pozo.

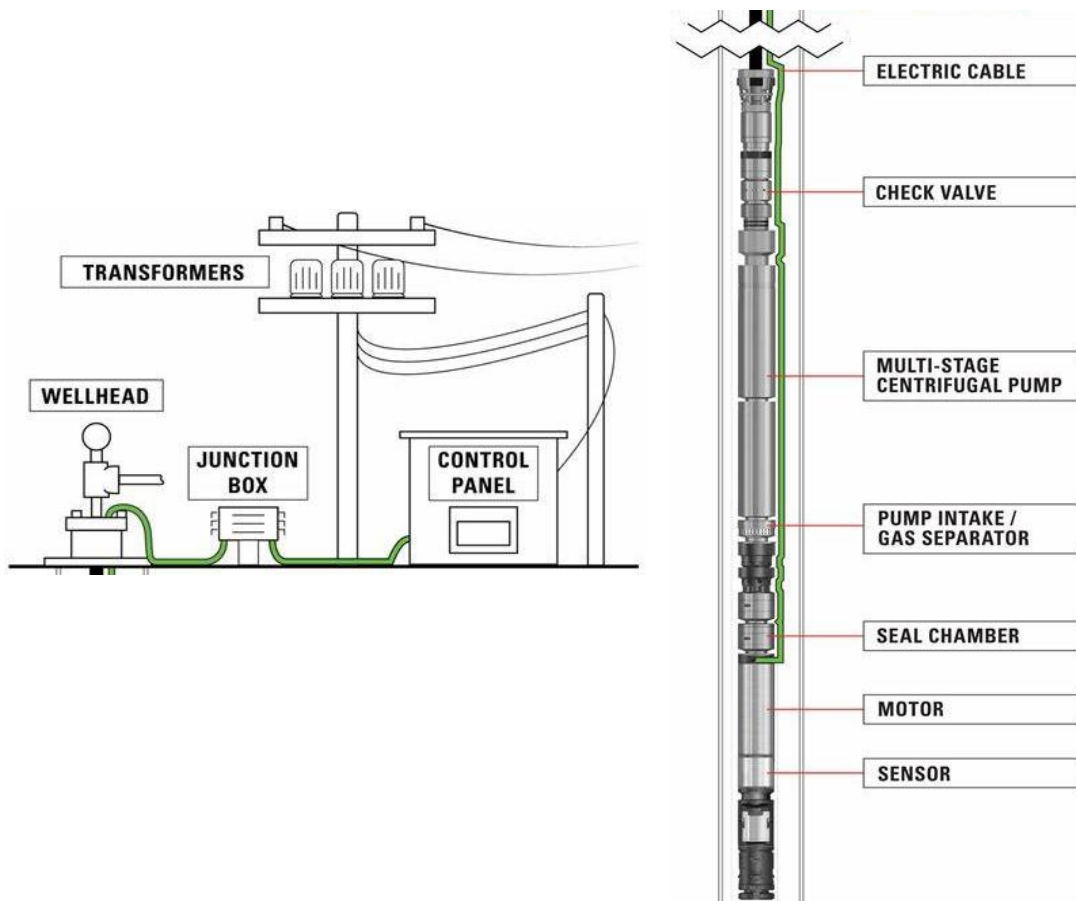
Las principales causas que pueden requerir el reemplazo de la bomba ESP incluyen:

- **Desgaste de componentes:** El impulsor, motor y demás elementos del sistema pueden deteriorarse debido al uso continuo, la presencia de arena, corrosión o la acción abrasiva de los fluidos producidos.
- **Fallas eléctricas:** Problemas como sobrecalentamiento, sobretensiones o cortocircuitos pueden afectar el funcionamiento del motor eléctrico.
- **Pérdida de rendimiento:** Disminución en la capacidad de generar presión o en la eficiencia del sistema, lo que impacta negativamente la producción.

- **Cambio en las condiciones del yacimiento:** Variaciones en la presión, caudal o propiedades del fluido pueden requerir un rediseño del sistema de levantamiento.

Los componentes principales del sistema ESP, tanto de superficie como de fondo, se presentan en la Figura 12.

**Esquema 6. Equipo de superficie y de fondo para una bomba electro-sumergible**



Fuente: Adaptado de Borkil Oil Tech (s.f.).

El procedimiento general para el cambio de la bomba ESP comprende las siguientes etapas:

- **Evaluación inicial:** Se realiza un análisis detallado de las condiciones operativas del pozo y del sistema existente, considerando parámetros como presión, caudal y desempeño del equipo
- **Planificación de la intervención:** Se selecciona el sistema ESP según las condiciones del pozo, se programa la operación, se movilizan los equipos requeridos y se realizan los cálculos necesarios para garantizar que la bomba opere adecuadamente bajo condiciones como caudal, presión y temperatura.
- **Extracción del sistema existente:** Se realiza el retiro de la bomba, el cable de potencia y los demás componentes mediante una unidad de workover, utilizando equipos de izaje como una grúa para la manipulación y levantamiento de la sarta, así como herramientas especializadas en caso de condiciones adversas.
- **Inspección de componentes asociados:** Verificación del estado del cable, conexiones eléctricas y otros elementos que puedan requerir reemplazo.
- **Instalación del nuevo sistema ESP:** Se instala la nueva bomba en el pozo junto con el cable de potencia hasta la profundidad de operación. Posteriormente, se realizan las conexiones eléctricas y se verifica el correcto funcionamiento.
- **Comisionamiento del sistema ESP:** Incluye la puesta en marcha y verificación operativa del sistema, mediante el monitoreo de variables como caudal, corriente y temperatura, con el fin de asegurar su correcto desempeño bajo las condiciones del pozo
- **Monitoreo y seguimiento:** Se lleva a cabo el seguimiento continuo del desempeño del sistema mediante la evaluación de parámetros operativos y, en algunos casos, mediante sistemas de monitoreo remoto.

#### 1.4.9 Extracción o Retiro de una Sarta (Pulling)

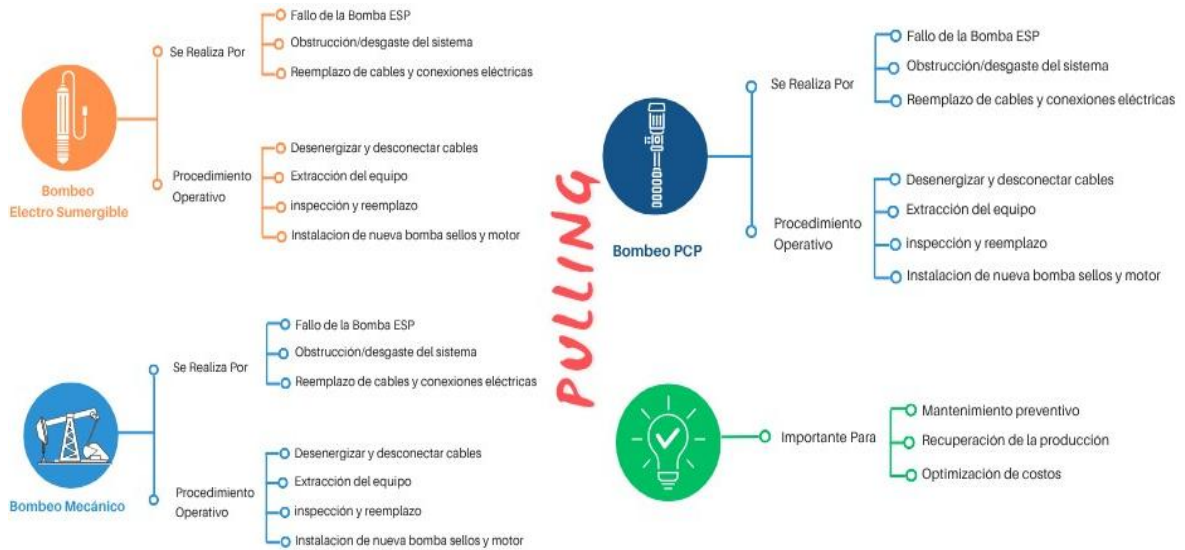
El proceso de pulling en la industria petrolera se refiere a la extracción de equipos o componentes desde el fondo del pozo, ya sea por mantenimiento, reparación o reemplazo. Este procedimiento es común en trabajos de subsuelo y resulta fundamental para garantizar la continuidad de la producción de hidrocarburos.

Los sistemas de levantamiento artificial utilizados en los activos del departamento de Arauca incluyen el bombeo electro-sumergible (ESP), el bombeo mecánico (BM) y el bombeo por cavidades progresivas (PCP). El pulling se aplica en todos ellos, aunque con ciertas diferencias según el tipo de sistema.

- **Bombeo Electro-Sumergible (ESP):** Utilizado para levantar grandes volúmenes de fluido. La bomba y el motor se encuentran instalados en el fondo del pozo y operan mediante energía eléctrica
- **Bombeo Mecánico (BM):** Sistema ampliamente utilizado que emplea una bomba de fondo accionada desde superficie mediante una unidad de bombeo (balancín) y una sarta de varillas. Es común en pozos con baja presión natural.
- **Bombeo de Cavidad Progresiva (PCP):** Utiliza una bomba helicoidal instalada en el fondo del pozo, siendo adecuado para la producción de fluidos viscosos y con presencia de sólidos.

Las características, razones y procedimiento operativo del *pulling* según el sistema de levantamiento artificial se presentan en la Figura 13.

**Diagrama 1. Mapa mental del proceso de pulling en operaciones de subsuelo**



Fuente: Elaboración propia

El trabajo de pulling en los sistemas ESP, BM y PCP es esencial para mantener la producción de los pozos y asegurar el correcto funcionamiento de los equipos. Este proceso permite:

- **Mantenimiento preventivo:** La extracción periódica de los equipos permite evaluar su estado y ejecutar las actividades de mantenimiento necesarias.
- **Recuperación de la producción:** El reemplazo o reparación de equipos defectuosos permite restablecer las condiciones operativas del pozo.
- **Optimización de costos:** Reduce el riesgo de fallas no planificadas y mejora la confiabilidad operativa a largo plazo.

En este capítulo se presentó un panorama general de las operaciones de subsuelo, con énfasis en la Cuenca de los Llanos Orientales, particularmente en el departamento de Arauca, donde se ubican activos relevantes de la compañía.

Asimismo, se describieron las características generales de la cuenca y los principales tipos de intervenciones, destacando su importancia en la optimización de la producción.

El siguiente capítulo abordará los equipos de workover utilizados en las operaciones de subsuelo, describiendo sus características, aplicaciones y su relevancia dentro de los procesos de reacondicionamiento, así como aquellos que serán objeto de análisis en el presente proyecto.

## 2. EQUIPOS DE SUBSUELO: ANÁLISIS DE EQUIPOS SELECCIONADOS

En el departamento de Arauca, la compañía emplea dos tipos de equipos de subsuelo: las unidades rápidas de servicio RSU, por sus siglas en inglés, y los equipos de reacondicionamiento, conocidos como “Chivos”

Se puede decir que tanto los equipos de reacondicionamiento como las RSU en principio son similares, aunque tienen diferencias principalmente en su tamaño, capacidad, versatilidad para arme, desarme, mantenimiento y movilizaciones. A continuación, una breve comparación de estos equipos:

- **Unidades Rápidas de Servicio (RSU):** Equipos más ligeros y compactos en comparación con los chivos. Aunque también cuentan con mástil, su diseño permite una instalación y movilización más ágil. Son ideales para tareas menos complejas, como mantenimiento ligero, limpiezas o instalación de herramientas específicas, destacándose por su eficiencia en tiempo y costos operativos. (Ver Figura 1.)

**Fotografía 4. Unidad RSU que Opera en Arauca.**



Fuente: Elaboración propia

➤ **Chivos (Equipos de reacondicionamiento):** Equipos tradicionales con estructuras grandes y pesadas, que incluyen un mástil o torre, y sistemas robustos de izaje. Son ideales para operaciones complejas y pesadas, aunque su movilización y configuración pueden ser más lentas. Se utilizan principalmente en trabajos mayores de reacondicionamiento, como el reemplazo de tuberías, cementaciones forzadas, o intervenciones de hasta 10.000 ft. (Ver Figura 15.)

**Fotografía 5. Equipo de Reacondicionamiento Usado por la Compañía en Arauca**



Fuente: Elaboración propia

## **2.1 SELECCION DE EQUIPOS**

La compañía cuenta con un sistema de medición que permite la visualización en tiempo real de los parámetros de las operaciones de subsuelo más robustas. Sin embargo, aunque esta información está disponible en tiempo real, los datos generados se analizan de forma mensual, lo que resulta en estadísticas posteriores a la ejecución de las operaciones. Esto implica que no se aproveche la información en tiempo real para tomar decisiones inmediatas. Los equipos que cuentan este

sistema de visualización en tiempo real, son los equipos de reacondicionamiento denominados Torre 30 y Torre 43.

La compañía, con el fin de realizar un piloto, busca aprovechar la información generada en tiempo real a través del sistema de visualización actual. Debido a que este sistema está disponible únicamente en los equipos de reacondicionamiento, se ha decidido excluir a las unidades RSU de esta iniciativa. Por esta razón, el proyecto se limitará a los trabajos realizados con la Torre 30 y Torre 43 durante tres meses.

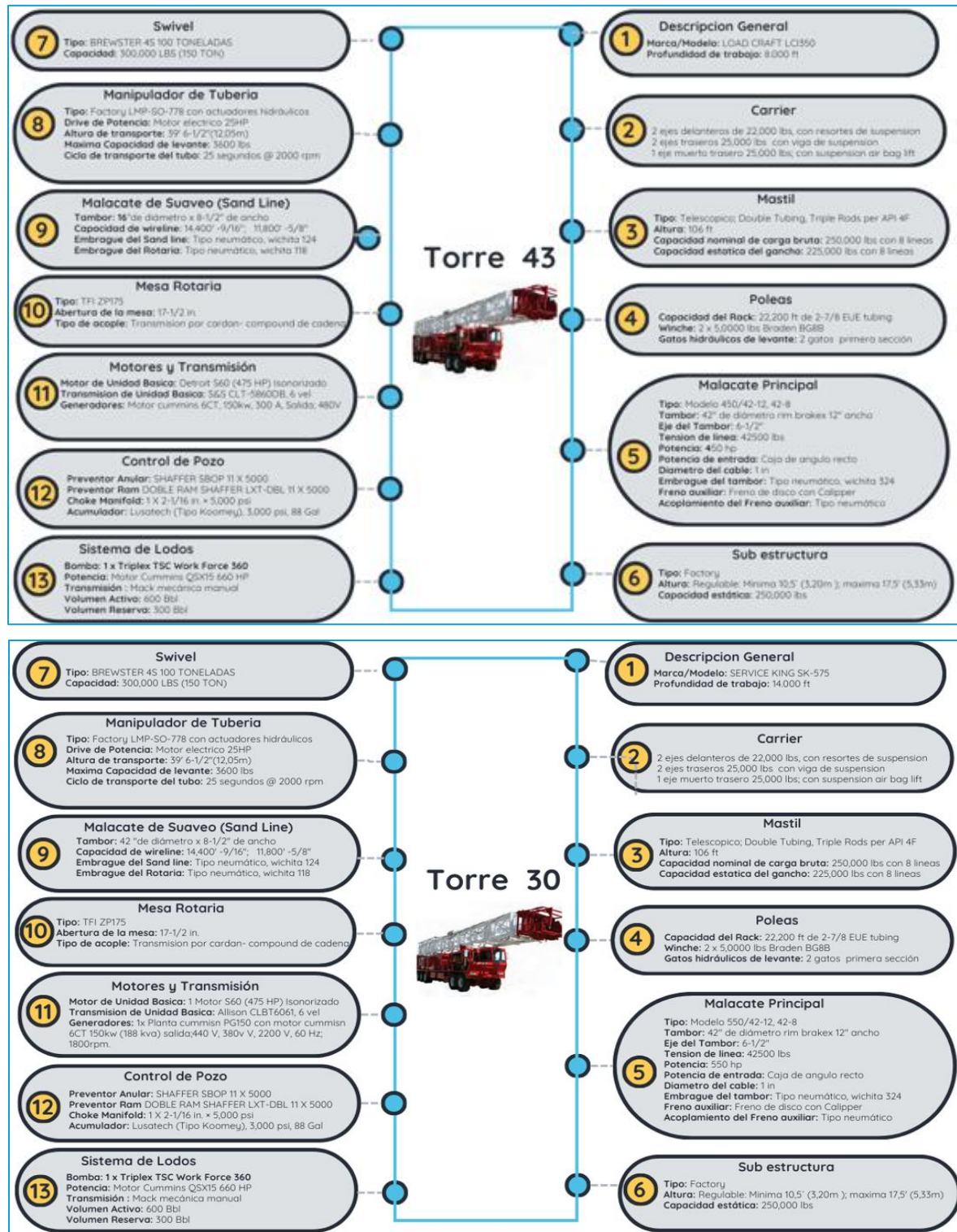
### **2.1.1 Especificaciones Técnicas**

La Torre 30 y la Torre 43 son equipos de reacondicionamiento con una torre telescópica montada sobre un vehículo autopropulsado (unidad básica). Estos equipos cuentan con tanques para almacenamiento de fluidos (agua, salmuera o lodo), una bomba triplex, una mesa de trabajo, sistema de poleas y swivel, winches, una rampa, racks para tuberías, sistema de control de pozo, un generador, un pequeño campamento y herramientas especializadas para la manipulación, torque y levantamiento de tuberías y cargas.

A continuación se muestra una diagrama (Ver figura 16.), con las especificaciones técnicas de cada una de las Torres usadas para los trabajos de intervención a pozo en el departamento de Arauca.

Ambas torres son muy similares; la única diferencia es su potencia, ya que una es de 450 HP y la otra de 550 HP.

## Esquema 7. Especificaciones Técnicas Torre 30 y Torre 43



Fuente: Elaboración propia

### 2.1.2 Estructura del Personal

Además del equipo físico (torre), todo equipo de subsuelo requiere personal calificado. A continuación, se presentan los cargos y la estructura de personal asignados a las Torres 30 y 43 en el departamento de Arauca.

**Tabla 2 Personal Asignado a las Torres en Arauca**

| Cargo                | Disponibilidad | Jornada   | Observaciones                                   |
|----------------------|----------------|-----------|-------------------------------------------------|
| Ing Company Man (1)  | 24 horas       | 14X14     | Presente en el equipo en todo momento.          |
| Supervisor (2)       | 12 horas       | 14X7      | Supervisan las operaciones en turnos rotativos. |
| Mecánico (1)         | 24 horas       | 14X14     | Disponible para atender cualquier eventualidad. |
| Electricista (1)     | 24 horas       | 14X14     | Disponible para atender cualquier eventualidad. |
| Operador de Grúa (1) | 8 horas        | 21X7      | Opera la grúa de 50 Toneladas                   |
| Supervisor HSE (1)   | 24 horas       | 14X14     | Supervisa aspectos de seguridad y ambiente.     |
| Maquinista (3)       | 8 horas        | 21X7      | Rotación para cubrir operaciones continuas.     |
| Cuñero (3)           | 8 horas        | 21X7      | Rotación para cubrir operaciones continuas.     |
| Obrero de patio (2)  | 8 horas        | 21X7      | Rotación para cubrir operaciones continuas.     |
| Enfermero (1)        | Según llamado  | No aplica | Está en Arauca y acude al equipo si necesario.  |

Fuente: Elaboración propia

### 2.1.3 Costos de operación

A continuación, se presenta una estimación de los costos operativos asociados a las Torres 30 y 43. Esta estimación se ha elaborado tomando como referencia precios de equipos de workover similares disponibles en el mercado. Es importante enfatizar que los valores indicados no representan los precios reales de las Torres 30 y 43, sino que corresponden a una aproximación de referencia, basada en condiciones de mercado actuales.

**Tabla 3. Tarifa por día típica para un Equipo de Workover 450 y 550 HP**

| Ítem                  | Torre 43 (450 HP) | Torre 30 (550 HP) |
|-----------------------|-------------------|-------------------|
| Company Man           | \$1,000           | \$1,000           |
| Taladro               | \$7,524           | \$8,271           |
| Tarifa Patieros       | \$984             | \$984             |
| Cama Alta/Baja        | \$860             | \$860             |
| Grúa                  | \$1,493           | \$1,493           |
| Técnico Eléctrico ESP | \$147             | \$147             |
| Sensórica             | \$290             | \$290             |
| <b>Total Día</b>      | <b>\$12,298</b>   | <b>\$13,045</b>   |

Fuente: Elaboración propia

#### **2.1.4 Impacto Ambiental y Seguridad**

La selección de equipos de subsuelo debe considerar no solo su eficiencia operativa y costos asociados, sino también su impacto ambiental y los riesgos para la seguridad de los trabajadores. En el contexto de las operaciones de workover, es fundamental evaluar cómo el uso de ciertos equipos puede afectar el entorno natural y la salud ocupacional. Adicionalmente, la seguridad de los operadores y el personal en campo depende en gran medida de la correcta selección y mantenimiento de los equipos. La implementación de dispositivos de control de presión, sistemas de bloqueo de energía, y procedimientos de inspección periódica contribuyen a mitigar riesgos asociados a fallas mecánicas o errores humanos.

Según la Tabla 2, Las torres 30 y 43, requieren un mínimo de 16 personas para su operación. Dado que esta es un área operativa que demanda mano de obra calificada, es fundamental considerar todos los aspectos relacionados con la seguridad y salud en el trabajo.

Además de la eficiencia operativa, otro aspecto relevante es el impacto ambiental que pueden generar las operaciones. Es importante destacar estos dos elementos, ya que son fundamentales para el desarrollo seguro y responsable de las actividades en campo.

El objetivo de este proyecto es implementar un sistema de monitoreo en tiempo real enfocado en mejorar la eficiencia de las operaciones, reducir tiempos perdidos y aumentar la rentabilidad de la compañía. Asimismo, se dará prioridad a monitorear los temas de seguridad y salud en el trabajo que puedan ser gestionados a través del sistema, así como los aspectos ambientales, siempre en concordancia con la normativa colombiana vigente y dentro del alcance del proyecto.

### 3. INDICADORES CLAVE EN OPERACIONES DE SUBSUELO

Cuando se ejecuta una operación de subsuelo, el principal indicador suele ser el tiempo total de ejecución, el cual, idealmente, no debe exceder el tiempo planeado. Sin embargo, este indicador global no refleja con precisión las diversas actividades involucradas. Como se analizó en el capítulo 1, entre estas actividades se incluyen: movilización y armado de equipos, conexiones y viajes de tubería, limpieza de arena, cementaciones, asentamiento de empaques, trabajos de cañoneo, *pulling*, cambios de sistemas de levantamiento, entre otras tareas clave.

Dado que cada tipo de operación tiene particularidades, se han definido seis indicadores clave, basados en la experiencia operativa de la compañía, el conocimiento técnico de sus profesionales y la documentación técnica disponible en la industria a nivel global. Estos indicadores permitirán evaluar el desempeño de los trabajos con las Torres 30 y 43, los cuales se describen a continuación:

#### 3.1 TIEMPO DE CONEXIÓN STS (SLIP TO SLIP)

El tiempo de conexión cuña a cuña se refiere al intervalo de tiempo que transcurre entre dos operaciones consecutivas de liberación y aseguramiento de la tubería. Este indicador mide la eficiencia en la manipulación de la tubería durante las conexiones, desde el momento en que se asegura con la cuña (slip) hasta que se libera la sarta con la cuña (slip).

La fórmula para calcular el **tiempo STS (Slip to Slip)** es bastante directa, ya que se mide el tiempo entre dos eventos consecutivos (aseguramiento de la tubería y liberación de la misma), su fórmula es:

$$\text{Tiempo STS} = \text{Hora de Slip Final} - \text{Hora de Slip inicial}$$

**Ecuación 1. Calculo Tiempo STS (minutos)**

Este cálculo determina el tiempo total transcurrido en minutos durante la operación de aseguramiento y liberación de la tubería por parte la cuña.

### **3.2 VELOCIDAD DE VIAJE**

Velocidad con la que la torre de trabajo mueve la tubería hacia dentro o fuera del pozo, indica la rapidez de las operaciones, contribuyendo a la minimización de tiempos no productivos.

$$\frac{\text{Longitud de la tubería (ft)}}{\text{Tiempo Efectivo del viaje (minutos)}}$$

**Ecuación 2. Velocidad de viaje (ft/min)**

### **3.3 ILT (INVISIBLE LOST TIME) TIEMPO PERDIDO INVISIBLE**

El ILT hace referencia al tiempo perdido en las operaciones que no es fácilmente visible o directamente registrado en los sistemas de monitoreo. Este tipo de pérdida de tiempo es difícil de identificar y cuantificar debido a su naturaleza indirecta, e incluye factores como demoras causadas por problemas no reportados, retrasos imprevistos o ineficiencias operativas.

$$ILT = \text{Tiempo Planeado} - \text{Tiempo Ejecutado} + NPT$$

**Ecuación 3. Cálculo del Tiempo Perdido Invisible.**

El ILT se expresa en unidades de tiempo como minutos, horas o días, dependiendo de la duración de las operaciones y el contexto.

### **3.4 NPT (NON-PRODUCTIVE TIME) TIEMPO NO PRODUCTIVO**

Es el tiempo durante las operaciones en el que no se realiza trabajo efectivo que contribuya directamente al progreso de la tarea planificada. Este tiempo se considera una pérdida, ya que no genera valor inmediato para la operación. El NPT

puede ser causado por una variedad de factores, tales como fallas técnicas, espera de material o equipos, retrasos operativos, condiciones climáticas adversas, o factores sociales como conflictos con comunidades, paros laborales o bloqueos sindicales.

El NPT refleja cualquier interrupción en las operaciones que impida el avance eficiente de las tareas. Este tipo de interrupciones puede prolongar las actividades y generar tiempos muertos que no se contabilizan en el trabajo productivo.

$$NPT = \text{Tiempo Planeado} - (\text{Tiempo Productivo} + \text{Tiempo Perdido por Causas Externas})$$

#### **Ecuación 4. Cálculo de Tiempo No Productivo NPT**

El NPT se expresa en unidades de tiempo como minutos, horas o días, dependiendo de la duración de la operación y los factores que lo ocasionen.

### **3.5 TIEMPOS PLANOS**

Son actividades dentro de una operación de subsuelo que constituyen tiempo productivo, cuya duración ha sido previamente estimada con base en estadísticas de actividades similares realizadas anteriormente. Estas actividades son esenciales para el desarrollo de la operación y se incluyen dentro del tiempo operativo total, algunos ejemplos típicos incluyen el armado y desarmado de un ensamblaje, un set de preventoras, unidades de cementación o registros, entre otras.

$$\text{Tiempo Plano} = \text{Tiempo Plano Planeado} - \text{Tiempo Plano Ejecutado}$$

#### **Ecuación 5. Cálculo del Tiempo Plano**

En el proceso de evaluación, se realizará una confrontación entre la duración reportada como tiempo plano en los informes diarios y la duración real observada a través de las cámaras y el sistema de monitoreo. Esta comparación permitirá ajustar

las estimaciones previas y mejorar la precisión en el análisis del desempeño operativo.

### **3.6 OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS**

La optimización de parámetros es un proceso fundamental en las operaciones de subsuelo, cuyo objetivo es maximizar la eficiencia y la seguridad operativa mediante el ajuste continuo de los factores que afectan el rendimiento de las actividades. Este proceso se basa en la mejora continua de las configuraciones operativas, con el fin de identificar y aplicar las mejores prácticas en cada etapa de la operación.

Aspectos clave como la velocidad de rotación, el peso sobre broca, la presión hidráulica, y los modelos de torque y arrastre son esenciales para determinar el comportamiento de la operación. A través del monitoreo y análisis de estos parámetros, se pueden hacer ajustes que optimicen tanto la productividad como la seguridad. La comparación de los parámetros iniciales y finales permite evaluar el impacto de los ajustes realizados en términos de productividad y eficiencia operativa.

Además, la optimización de parámetros involucra el uso de tecnologías avanzadas, como los sistemas de monitoreo en tiempo real, que proporcionan datos precisos y actualizados, lo que facilita la toma de decisiones informadas. Este enfoque integral no solo busca reducir los tiempos de ejecución y los costos, sino también garantizar que las operaciones se realicen bajo las condiciones más seguras posibles, alineadas con los estándares de calidad establecidos.

En resumen, los seis indicadores clave definidos en este capítulo proporcionan una base sólida para evaluar el desempeño en las operaciones de subsuelo, permitiendo un análisis detallado de las actividades realizadas con las Torres 30 y 43. Estos indicadores facilitan la identificación de áreas de mejora y la toma de decisiones.

Con su implementación, se busca optimizar el rendimiento de las operaciones, garantizando ejecuciones más eficientes y seguras. El análisis continuo de estos indicadores será clave para mejorar las operaciones y proporcionar insumos valiosos para las etapas posteriores del proyecto.

#### **4. IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO PILOTO**

Con el propósito de mejorar la toma de decisiones operativas y optimizar el rendimiento en las operaciones de subsuelo, la compañía decidió implementar un proyecto piloto enfocado en el uso del sistema de visualización en tiempo real, el cual ya está disponible en los equipos de reacondicionamiento, específicamente en las Torres 30 y 43. Aunque el sistema actual permite la visualización de parámetros operativos en tiempo real, los datos generados se analizan mensualmente, lo que limita la capacidad para tomar decisiones inmediatas. Este piloto tiene como propósito aprovechar la información en tiempo real, validando su efectividad para mejorar la eficiencia, seguridad y productividad durante tres meses de operaciones con estas torres.

Este capítulo describe el proceso de implementación del proyecto piloto, que excluye a las Unidades de Servicio Rápido (RSU) debido a que no cuentan con la instalación del sistema de visualización en tiempo real.

Aprovechando la infraestructura de su sala RTO para perforación, la compañía decidió llevar a cabo este piloto, utilizando un software suministrado gratuitamente por un contratista. Este software calcula variables operativas como velocidades de viaje, tiempos de conexión, modelos de arrastre e hidráulicos, y ofrece un entorno de visualización en tiempo real para monitorear estas variables. El proyecto se implementó en lo que se denominaran Torres 30 y 43, ubicadas en el departamento de Arauca.

Con los recursos del proyecto, se estableció que las operaciones se monitorearían en turnos de 12 horas diurnas de lunes a viernes, durante los tres meses de duración. Además, se verificó la correcta funcionalidad de los sensores de las torres y se construyó el flujo de trabajo correspondiente. Un aspecto clave fue asegurar

que el sistema de visualización en tiempo real de las torres enviara la información en formato WITSML<sup>1</sup>, lenguaje que garantiza una integración eficiente con los sistemas de monitoreo.

#### **4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO PILOTO Y CONTEXTO**

A inicios de 2022, la compañía implementó una sala de monitoreo en tiempo real (RTO) para sus proyectos de perforación, gestionando operaciones en dos taladros: uno ubicado en el departamento de Arauca y otro en Santander. Esta implementación requirió la adecuación de equipos como: computadoras, pantallas, televisores y la creación de un espacio dedicado en las oficinas principales en Bogotá. Además, se contrató un equipo compuesto por cinco profesionales: tres ingenieros monitoristas trabajando en turnos rotativos de 12 horas (14 días de trabajo por 7 de descanso), un coordinador de la sala y un analista de datos, estos dos últimos, quienes trabajan de lunes a viernes.

Debido al éxito operativo y financiero de la sala RTO en el área de perforación, y aprovechando la infraestructura existente, la compañía busca extrapolar esta experiencia a sus operaciones de subsuelo en el departamento de Arauca. En este contexto, un contratista ofreció una prueba gratuita de un software de analítica en tiempo real para operaciones de subsuelo, lo que impulsó la iniciativa de realizar un piloto de tres meses en esta área.

#### **4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE EN TIEMPO REAL**

Con el objetivo de extender el monitoreo en tiempo real a las operaciones de subsuelo, se evaluaron diferentes áreas dentro de la compañía para determinar cuál sería la más adecuada para un proyecto piloto. Tras el análisis, se concluyó que las

---

<sup>1</sup> ENERGISTICS. *WITSML Standard Version 2.0*. Energistics Organization, 2019. Disponible en: <https://www.energistics.org>

operaciones en el departamento de Arauca eran las más viables, debido a que sus taladros de reacondicionamiento ya cuentan con un sistema básico de visualización en tiempo real. Este sistema permite la lectura de parámetros operativos clave y generaba estadísticas mensuales, lo que representó un primer paso hacia la integración completa del monitoreo en tiempo real.

La implementación del piloto se centró en la transmisión de los datos generados por el software existente a través del formato WITSML, un lenguaje desarrollado en 2003 por el consorcio Energistics. Este formato, reconocido como el estándar global en la industria petrolera para la transmisión de datos, garantizó la eficiencia en el intercambio de información entre los diferentes sistemas. Asegurar que la información se transmitiera en WITSML fue crucial para el desarrollo del proyecto, ya que permitió que los datos de los taladros se enviaran de manera precisa y directa a un servidor. A través de este protocolo, la información fue capturada y monitoreada en tiempo real desde la Sala RTO en Bogotá. Allí se emplearon hojas de cálculo personalizadas y el software proporcionado gratuitamente por el contratista, lo que permitió un análisis continuo de las variables operativas y contribuyó significativamente a la optimización de las operaciones.

Como parte de la innovación tecnológica de la compañía, la iniciativa del piloto fue impulsada por la Sala RTO del Departamento de Perforación, en colaboración con el Superintendente de Perforación de Santander. Juntos presentaron el proyecto al Departamento de Operaciones, responsable de las operaciones de subsuelo, destacando los beneficios y el valor agregado que la tecnología de monitoreo en tiempo real podía ofrecer. Este enfoque tiene como objetivo optimizar las actividades de reacondicionamiento mediante herramientas avanzadas que mejoran la eficiencia y seguridad en las operaciones.

### **4.3 CHEQUEO DE LA SENSORICA Y CREACION DEL FLUJO DE TRABAJO**

Parte del desarrollo del proyecto incluyó un viaje de campo al departamento de Arauca, donde se visitaron las Torres 30 y 43. Durante la visita, se compartió, explicó y sensibilizó a todo el Departamento de Operaciones acerca del funcionamiento, valor agregado y propósitos de la prueba piloto de monitoreo en tiempo real para las operaciones de subsuelo.

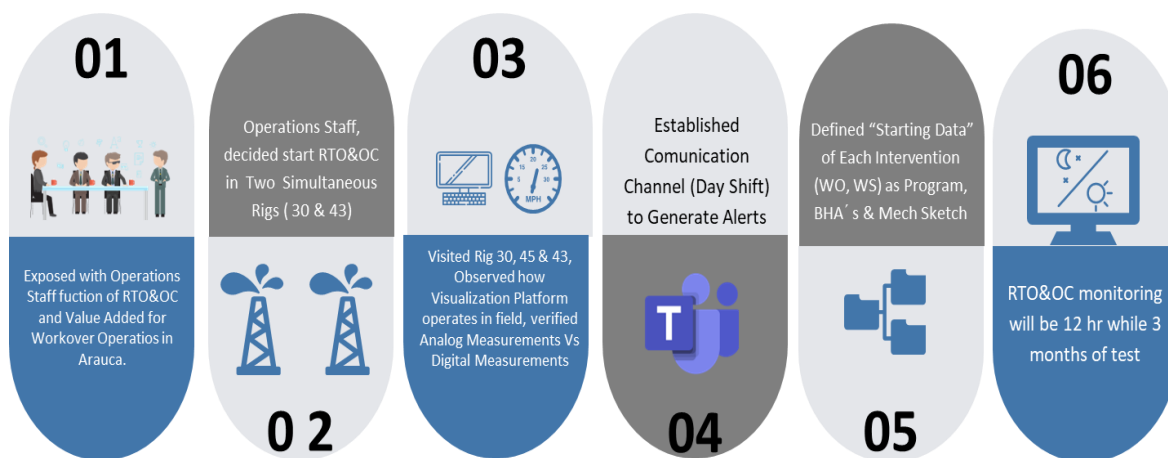
El propósito principal de la visita fue demostrar el funcionamiento de la sala RTO y su integración con las operaciones de subsuelo, destacando cómo esta tecnología contribuye a mejorar la eficiencia y seguridad operativa. Además, se inspeccionaron los equipos de monitoreo instalados en las torres para verificar que los sensores estuvieran operativos y generaran datos confiables. Este proceso incluyó un análisis de la calidad de la información transmitida y la validación de la funcionalidad de los sistemas de medición, se verificó que las medidas analógicas medidas en las torres correspondieran con los mismos valores que se generaban en la plataforma de visualización.

Un aspecto crucial del viaje fue garantizar que los datos fueran transmitidos en el formato estándar WITSML, esencial para asegurar la compatibilidad con el software de análisis en tiempo real utilizado en el proyecto.

Asimismo, se estableció un canal de comunicación formal entre el equipo de campo y la sala RTO mediante la plataforma Microsoft Teams, lo que facilitó una coordinación eficiente y un intercambio constante de información.

Por último, se diseñó un flujo de trabajo integral que abarcó las etapas de programación, planificación y ejecución de las operaciones, ajustándolo a los objetivos del piloto para aprovechar el monitoreo en tiempo real en las actividades regulares de subsuelo, cuyo proceso se ilustra en la Figura 17.

**Diagrama 2. Proceso Implementación Monitoreo en Tiempo Real**



Fuente: Elaboración propia

El proceso del flujo de trabajo inició con la recepción del presupuesto anual en formato Excel y los planes operativos de las intervenciones en documentos Word. Con esta información, la sala RTO desarrolló una plantilla personalizada en formato gráfico de Gantt, diseñada para comparar las ejecuciones reales con las planeadas. Además, se elaboró una hoja de Excel con lógica integrada y visualizaciones gráficas que permitieron calcular y analizar tiempos de conexión, así como velocidades de ingreso y salida del equipo.

Se tuvo en cuenta los estados mecánicos de los pozos a los cuales se realizó monitoreo, y adicionalmente, se utilizó el software proporcionado por el contratista para complementar el análisis y garantizar una evaluación precisa de los datos operativos. Finalmente, se realizó una verificación cruzada entre los reportes diarios generados en OpenWells® y la información cruda obtenida, asegurando la consistencia y confiabilidad de los datos utilizados en el piloto.

#### **4.4 RECURSOS OPERATIVOS**

Dado que el proyecto piloto tuvo una duración de tres meses, se asignó un ingeniero monitorista, quien fue responsable de la supervisión diaria de las operaciones en jornada de 12 horas diurnas, de lunes a viernes.

La Sala RTO, ubicada en Bogotá, fue el centro neurálgico del monitoreo, con los recursos necesarios como computadores, pantallas y el espacio adecuado para gestionar la supervisión remota. El mismo ingeniero monitorista se encargó de la implementación y supervisión de las operaciones remotas durante todo el proyecto, asegurando la coordinación y el análisis de datos en tiempo real.

##### **4.4.1 Personal Asignado**

En cada una de las torres, el ingeniero encargado de las operaciones, conocido como *Company Man*, supervisaba y coordinaba directamente las actividades en el campo. Este ingeniero, responsable de la ejecución en terreno, mantenía una comunicación constante con la Sala RTO, donde el ingeniero monitorista se encargaba de supervisar y analizar los datos en tiempo real, asegurando la correcta integración del sistema. Adicionalmente, se contó con la participación de un analista de datos, quien desarrolló la lógica para el cálculo de velocidades de viaje y tiempos de conexión, realizó análisis estadísticos predictivos y diseñó plantillas de visualización para presentar las métricas clave

##### **4.4.2 Infraestructura y Tecnología**

En las operaciones de subsuelo, cada parámetro crítico como el movimiento de la sarta, rotación, movimiento del bloque viajero, profundidad, presión, caudal, torque, entre otros, son medidos mediante transductores especializados instalados en los equipos de campo (Ver Figura 18). Estos transductores convierten las variaciones de estas magnitudes físicas en señales analógicas (por ejemplo, voltaje o corriente), que luego se digitalizan mediante un convertidor analógico-digital (ADC).

The diagram illustrates the sensor and actuator network for a ship's crane system. Key components and their locations are as follows:

- Antenna Ruckus:** Located at the top of the crane structure, used for communication.
- Monitor:** A computer monitor displaying system data, connected to the data acquisition unit.
- Depth Encoder:** A sensor used to measure the depth of the crane's components.
- RPM Rotary Table:** A sensor used to measure the rotation of the crane's table.
- Pump Sensors:** Sensors used to monitor the pressure and flow of the crane's hydraulic system.
- Control Panel:** The central control unit for the crane system, located on the ship's deck.
- Rotary Swivel RPM Assembly:** A sensor used to measure the rotation of the crane's swivel.
- Lifting Pins Proximity:** A sensor used to detect the proximity of lifting pins.
- SSS HWS:** A sensor used to measure the height of the ship's water level.
- Depth Encoder:** A sensor used to measure the depth of the crane's components.
- Rotary Torque:** A sensor used to measure the torque of the crane's rotation.
- Long Torque:** A sensor used to measure the torque of the crane's rotation.
- Main Line Compression Load Cells with Transducers:** Sensors used to measure the compression of the crane's main line.
- Temperature Probe:** A sensor used to measure the temperature of the crane's components.
- DATA ACQUISITION:** The central unit that collects data from all sensors and sends it to the monitor.
- TCE HOOKLOAD Deadline Anchor:** A sensor used to measure the hookload of the crane.
- Standing Pressure 5k e-Cup Transducer:** A sensor used to measure the standing pressure of the crane's hydraulic system.
- Sensors:** Various sensors used to monitor the crane's performance.
- Main pumps:** The hydraulic pumps that power the crane's movements.

59

Este proceso de conversión permite transformar las señales continuas en datos discretos, que pueden ser procesados, transmitidos en tiempo real a través de redes de comunicación cableadas o inalámbricas y visualizados de forma precisa en las pantallas locales en el pozo.

Los mismos datos transmitidos son enviados al servidor central utilizando el protocolo WITSML, que asegura la transferencia estandarizada y confiable de la información. Desde este servidor, los datos son accesibles para la Sala RTO en Bogotá, donde se puede monitorear y analizar cada parámetro a intervalos hasta de un segundo, asegurando una supervisión continua y precisa de las operaciones.

#### **4.4.3 Herramientas y Materiales**

Se diseñaron herramientas como gráficos de Gantt y hojas de Excel con lógica integrada para la planificación, ejecución y seguimiento de las operaciones. Estas herramientas permitieron un análisis detallado de los tiempos de conexión y las velocidades operativas.

### **4.5 INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO EN TIEMPO REAL (WITSML)**

La integración del sistema de monitoreo en tiempo real utilizando el estándar WITSML (Wellsite Information Transfer Standard Markup Language) es fundamental para el monitoreo efectivo de las operaciones de reacondicionamiento. Uno de los principales retos para la transmisión de datos en tiempo real es la disponibilidad y estabilidad del servicio de internet en los taladros de reacondicionamiento, especialmente en áreas remotas donde opera la compañía. Por lo tanto, es crucial que el proveedor del servicio garantice una conectividad confiable.

Además, los protocolos de comunicación empleados no deben presentar restricciones que interfieran con la conexión al servidor de destino, donde la información se procesa en el formato WITSML. Para asegurar la sincronización de datos, es indispensable que la hora regional sea consistente en todos los sistemas utilizados. Asimismo, la configuración del sistema debe incluir datos básicos, como el nombre del pozo, la fecha y la hora de inicio y finalización de cada operación, lo que facilita el análisis posterior (Ver Figura 19).

#### Fotografía 6. Ejemplo Leguaje WITSML Pozo Mandioca 097

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<witsml version="2.0" xmlns="http://www.energistics.org/energyml/data/witsmlv2">
  <well>
    <name>Mandioca 097</name>
    <wellID>MD097</wellID>
    <location>
      <country>Colombia</country>
      <region>Arauca</region>
    </location>
  </well>

  <job>
    <jobID>WS-ESP-2025-001</jobID>
    <jobType>WS ESP</jobType>
    <startTime>2025-01-13T05:00:00Z</startTime>
    <endTime>2025-02-01T02:30:00Z</endTime>
    <status>Completed</status>
```

Fuente: Elaboración propia

En el contexto de este proyecto, se disponía de un sistema básico de visualización en tiempo real, el cual fue adaptado al estándar WITSML mediante la implementación de un conversor de datos. Este conversor transformaba la información generada en el pozo al formato requerido, permitiendo que los datos fueran capturados y procesados por la empresa de servicios que ofreció el monitoreo en tiempo real durante el piloto, sin costo alguno.

Una fase crítica de esta integración fue la verificación de la consistencia de los datos entre el conversor y el servidor del proveedor de monitoreo en tiempo real. Este proceso garantizó la calidad de la información transmitida desde las torres de perforación, evitando discrepancias que pudieran afectar el análisis operativo.

Durante el desarrollo de este capítulo se ha mencionado repetidamente el protocolo WITSML, y es importante resaltarlo nuevamente, ya que la efectividad de la calidad de los datos dependió de que la transmisión en tiempo real se realizara en este formato. A continuación, se describen las principales razones por las que se debe utilizar el formato WITSML:

- **Estándar de la Industria:** WITSML fue desarrollado específicamente para el sector de petróleo y gas por Energistics, con el apoyo de empresas líderes del sector. Actualmente, se ha convertido en el estándar global para la transmisión de datos en tiempo real. Al ser ampliamente adoptado, garantiza la compatibilidad e interoperabilidad entre equipos y plataformas de diferentes proveedores.
- **Transmisión en Tiempo Real:** Está diseñado para el intercambio continuo de datos en tiempo real, lo que es crucial en operaciones de perforación, workover y completamiento. Además, permite que múltiples sistemas (varias plataformas, aplicaciones o dispositivos) reciban información simultáneamente, facilitando el monitoreo remoto y garantizando que todos los involucrados tengan acceso a la información más actualizada sin tener que esperar sincronizaciones manuales.
- **Flexibilidad y Escalabilidad:** Utiliza un formato basado en XML (Extensible Markup Language), lo que facilita su interpretación por diferentes sistemas y plataformas. Además, puede manejar grandes volúmenes de datos operativos, como presiones, velocidades de viaje, torque, rotación, carga en el gancho, entre otros. Su estructura modular permite integrar nuevos parámetros sin modificar el

núcleo del sistema. Es decir, si queremos agregar un sensor de niveles en tanques, un sensor de rotación, presión, etc., se puede hacer rápidamente y sin problemas.

➤ **Soporte Multiplataforma:** Todas las compañías petroleras a nivel mundial utilizan la transmisión de datos en tiempo real en el formato WITSML, lo que facilita la integración de servicios de terceros. Esto permite que operadoras, contratistas y empresas de servicio compartan datos sin problemas.

➤ **Seguridad y Trazabilidad:** Los datos se almacenan en servidores con trazabilidad y registros completos, lo que garantiza la integridad y verificación de los datos. Además, los permisos y niveles de acceso pueden ser controlados de manera centralizada.

➤ **¿Por qué no utilizar otro lenguaje?** Otros lenguajes o formatos de datos, como JSON o simplemente archivos CSV, no están diseñados específicamente para el entorno de perforación y workover, y no ofrecen el nivel de estandarización, interoperabilidad y compatibilidad que WITSML garantiza. Aunque otros lenguajes pueden ser más ligeros o rápidos, no cumplen con los requisitos específicos de la industria en cuanto a manejo de datos de subsuelo.

Transmitir datos en WITSML permite uniformidad, compatibilidad y monitoreo efectivo en tiempo real, lo que es esencial para optimizar las operaciones en el sector de petróleo y gas. Otros lenguajes simplemente no ofrecen el mismo nivel de integración y soporte especializado para operaciones de subsuelo.

## **5. MONITOREO Y OPTIMIZACIÓN EN TIEMPO REAL DE OPERACIONES DE SUBSUELO**

El monitoreo en tiempo real permite mejorar el control y la toma de decisiones en operaciones de subsuelo, al facilitar la identificación de patrones operacionales, la detección de anomalías y la optimización de los tiempos operativos.

En el Capítulo 3, se analizaron los principales indicadores de desempeño en las operaciones de reacondicionamiento, tales como los tiempos de conexión STS, la velocidad de viaje, la reducción de ILT y la optimización de parámetros. Posteriormente, en el Capítulo 4, se presentó la implementación del proyecto piloto de monitoreo en tiempo real, abordando la integración del software, el chequeo de la sensórica y la estructuración del flujo de trabajo.

Con base en lo anterior, este capítulo describe la gestión de operaciones en tiempo real, incluyendo el flujo de datos desde el pozo hasta la sala RTO, el análisis de tendencias, la detección de anomalías y la generación de alertas tempranas para optimizar la toma de decisiones.

El objetivo de este capítulo es analizar la aplicación del monitoreo en tiempo real en operaciones de subsuelo, evaluando su impacto en la toma de decisiones operativas.

### **5.1 DESARROLLO DEL PROYECTO PILOTO**

Como se mencionó en capítulos anteriores, se seleccionaron las Torres 30 y 43, ubicadas en el departamento de Arauca, debido a que eran las únicas que contaban con sensórica habilitada para la adquisición de datos en tiempo real. El piloto tuvo una duración de tres meses, durante los cuales se evaluaron nueve (9) operaciones: cinco (5) en la Torre 30 y cuatro (4) en la Torre 43.

### 5.1.1 Selección de Operaciones

Las Torres 30 y 43, con potencias de 550 HP y 450 HP respectivamente, fueron seleccionadas no solo por su capacidad para ejecutar operaciones más robustas que las unidades Rapid Service Unit (RSU), sino también porque ya contaban con la sensórica necesaria para enviar datos en tiempo real. Su mayor potencia y estructura les permitió llevar a cabo tareas complejas, como completamientos iniciales y reacondicionamientos de pozo (ver Tabla 4).

Las RSU son equipos compactos y versátiles para intervenciones en áreas de difícil acceso, utilizados en cambio de bomba, pruebas de presión, flushing y abandono técnico; no obstante, no contaban con sensórica y fueron excluidas del piloto.

Por razones de confidencialidad, los nueve (9) pozos analizados se identifican con nombres ficticios: Monteoscuro 06, Monteoscuro 98, Mandioca 097, Mandioca 169, Mandioca 144, Mandioca 003, Esmeralda 14, Esmeralda 12 y Esférico 11.

A continuación, se presenta la Tabla 4, que resume la torre utilizada, el nombre del pozo, el tipo de operación realizada y la duración de cada intervención en días.

**Tabla 4. Resumen Pozos y tipos de trabajos realizados durante la Prueba Piloto**

| Torre | Pozo           | Tipo Trabajo | Fecha de Inicio | Fecha Final     | Días Operativos |
|-------|----------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 43    | Monteoscuro 06 | SQZ+ Perf    | 12/17/24 5:00   | 1/13/25 5:00    | 27.00           |
| 43    | Mandioca 097   | WS ESP       | 1/13/25 5:00    | 2/1/25 2:30     | 18.90           |
| 43    | Mandioca 169   | SQZ+ Perf    | 2/1/25 2:30     | 2/13/2025 0:00  | 11.90           |
| 43    | Monteoscuro 98 | WS ESP       | 2/13/2025 0:00  | 2/21/2025 6:30  | 8.27            |
| 43    | Mandioca 144   | WO BP        | 2/21/2025 6:30  | 3/2/2025 0:00   | 8.73            |
| 30    | Mandioca 003   | SQZ+ Perf    | 12/12/24 22:30  | 1/4/25 4:00     | 22.23           |
| 30    | Esmeralda 14   | SQZ+ Perf    | 1/4/25 4:00     | 1/19/2025 16:00 | 15.50           |
| 30    | Esférico 11    | SQZ+ Perf    | 1/19/2025 16:00 | 2/4/25 4:00     | 15.50           |
| 30    | Esmeralda 12   | SQZ+ Perf    | 2/4/25 8:00     | 2/17/2025 6:00  | 12.92           |

Fuente: Elaboración propia

De las nueve (9) operaciones analizadas durante la prueba piloto, siete (7) corresponden a reacondicionamientos y dos (2) a servicio a pozo.

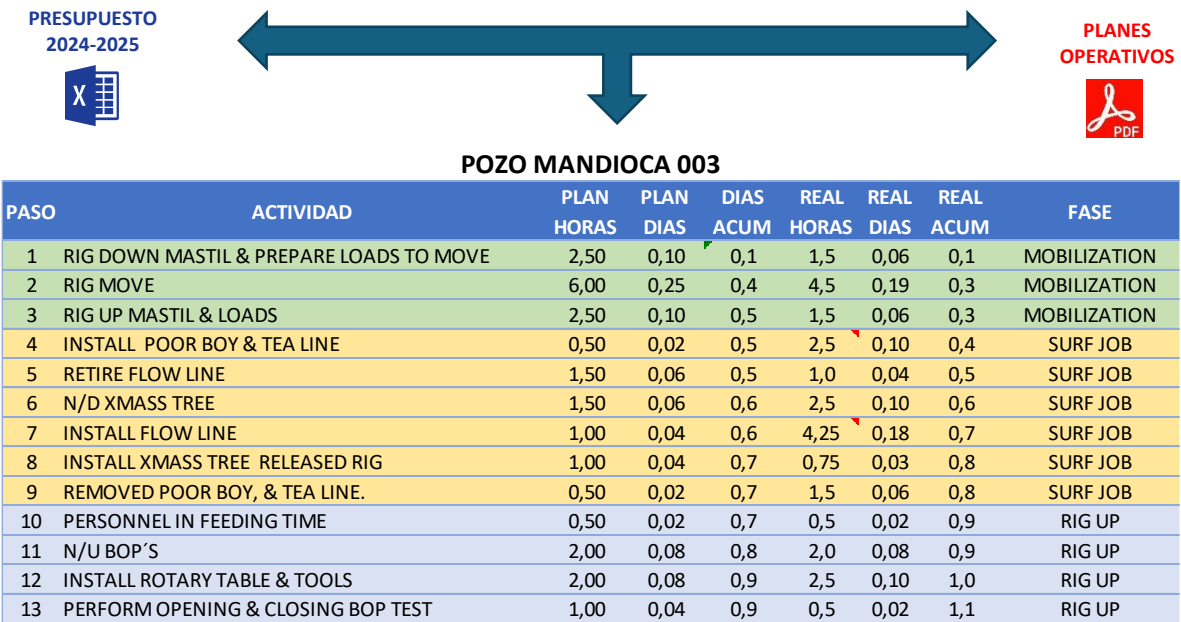
### 5.1.2 Flujo de Trabajo Implementado

En el capítulo anterior se presentó de manera general el flujo de trabajo implementado. En esta sección se describe en detalle el proceso desarrollado durante el piloto:

#### ➤ Recepción de Presupuesto y Planes Operativos

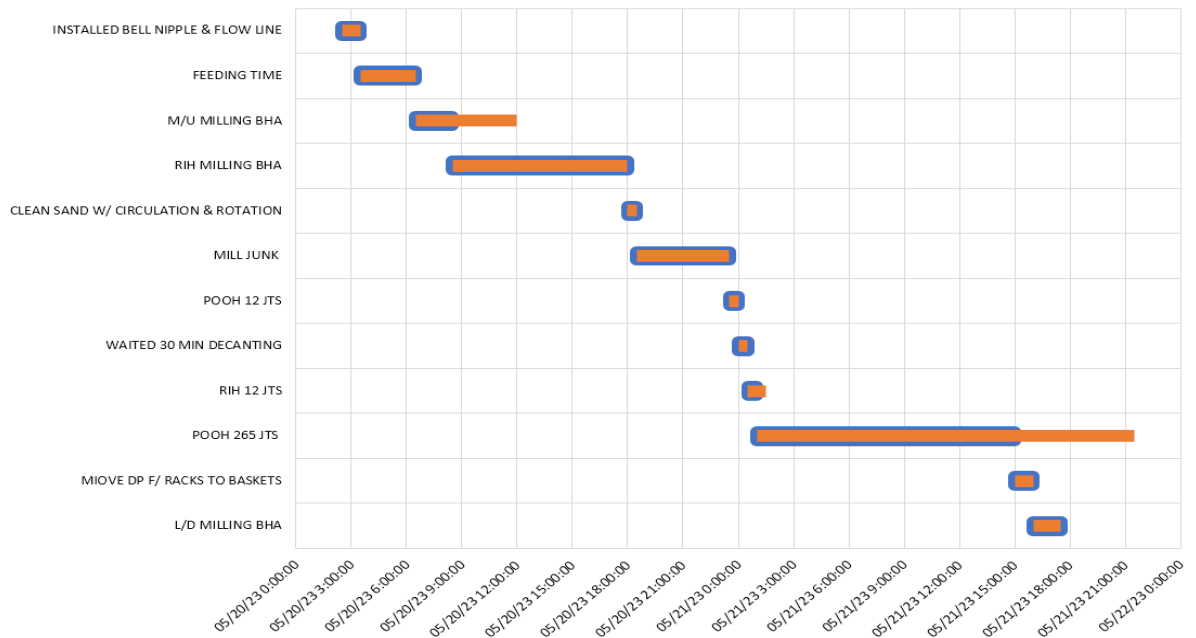
Se recibió el presupuesto anual de las operaciones de subsuelo en formato Excel. Asimismo, se recibieron los planes operativos en formato PDF de las nueve (9) intervenciones a monitorear. Con esta información, se elaboraron diagramas de Gantt en los que se desglosó cada actividad, permitiendo comparar los tiempos planeados con los ejecutados, como se muestra en la Figura 20.

**Diagrama 3. Plantillas y diagramas de Gantt utilizados en el monitoreo operativo.**



Fuente: Elaboración propia

**Diagrama 3. (Continuación)**

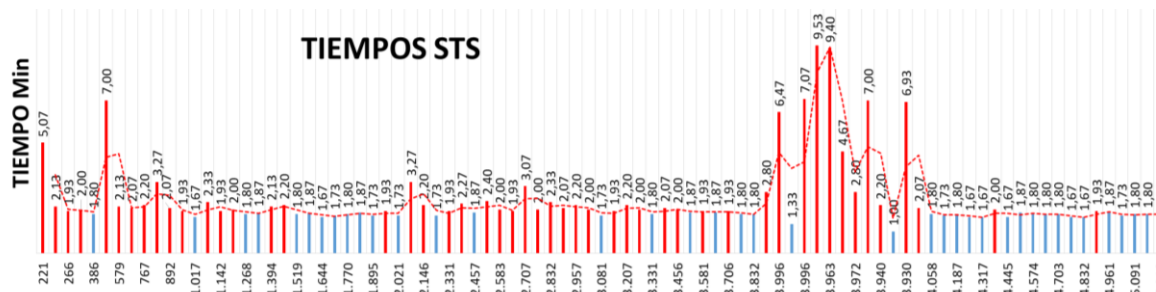


### ➤ Cálculo de Conexiones STS y Velocidad de Viaje

El cálculo de conexiones cuña a cuña (STS) por sus siglas en inglés y las velocidades de viaje se realizó mediante dos enfoques:

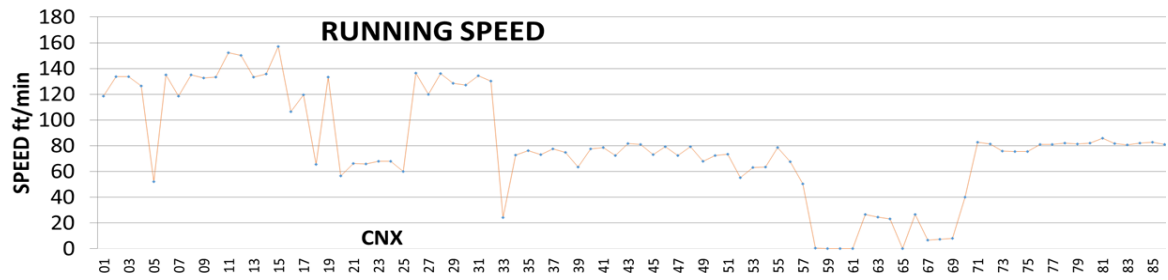
- ✓ **Hoja de Excel:** Se desarrolló por parte del analista de datos, una plantilla con lógica integrada y visualizaciones gráficas para el cálculo y análisis de estos indicadores, que se pueden apreciar en las Figuras 21 y 22.

**Gráfico 2. Tiempos de conexión STS calculados a partir de la plantilla desarrollada**



Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3. Velocidad de viaje calculada a partir de la plantilla desarrollada**



Fuente: Elaboración propia

- ✓ **Software Gratuito:** Durante el periodo del piloto, se utilizó un software sin costo, con el fin de comparar y validar los resultados obtenidos con el método manual, la Figura 23 presenta la visualización de los tiempos de conexión y velocidades de viaje obtenidas con esta herramienta.

**Gráfico 4. Tiempos de conexión y velocidad de viaje obtenidos mediante el software**



Fuente: Elaboración propia

➤ **Recepción de Estados Mecánicos**

Se recibieron los estados mecánicos actualizados de los pozos intervenidos, lo que permitió contar con información de referencia para el monitoreo en tiempo real y la validación de los datos recopilados.

➤ **Cálculo de Modelos de Arrastre e Hidráulicos**

El cálculo de los modelos de arrastre e hidráulicos se realizó de dos formas:

- ✓ **Software WellPlan®:** Utilizando la licencia disponible en la compañía.
- ✓ **Software sin costo:** Empleado para contrastar y validar los resultados obtenidos.

➤ **Verificación Cruzada de Datos**

Se realizó una verificación cruzada de la información registrada en **OpenWells®** con la data cruda recibida en formato WITSML, asegurando la coherencia y consistencia de los datos monitoreados.

## **5.2 MEDICIÓN DE INDICADORES DE DESEMPEÑO (KPI)**

De acuerdo con el Capítulo 3, las intervenciones pueden evaluarse utilizando los seis indicadores clave previamente definidos. Estos KPI se establecieron con base en la experiencia operativa de la compañía, el conocimiento técnico de sus profesionales y la documentación técnica disponible en la industria a nivel global. Sin embargo, debido a la corta duración de la prueba piloto, en este proyecto únicamente fue posible medir uno de estos indicadores.

### 5.2.1 Desafíos en la Medición

Previo al inicio del proyecto, se realizó una visita a campo en la que se llevaron a cabo actividades fundamentales para el desarrollo del piloto. Se efectuó la socialización con el departamento de operaciones y se verificaron en sitio las condiciones de las torres, incluyendo sensores, conectividad y transmisión de datos. Asimismo, se estableció comunicación directa con los Company Man, quienes serían el enlace durante el monitoreo.

A pesar de estos esfuerzos, se presentaron los siguientes desafíos durante la implementación:

- **Uso de nueva tecnología:** La compañía estaba utilizando este tipo de tecnología por primera vez, generando cierta curva de aprendizaje en su adopción.
- **Comunicación limitada:** La comunicación con el personal en campo se realizaba únicamente durante el día, lo que dificultaba el seguimiento continuo.
- **Percepción de vigilancia:** En algunos casos, el monitoreo en tiempo real fue percibido como supervisión constante, generando cierta resistencia.
- **Falta de líneas base:** Al ser una tecnología nueva, no se contaba con referencias históricas para comparar el desempeño operativo.
- **Problemas de conectividad:** En algunas ocasiones, las condiciones climáticas adversas (fuertes lluvias y tormentas eléctricas) afectaron la transmisión de datos, con interrupciones de hasta tres días.

### 5.2.2 Análisis del KPI Medido

Por experiencia, una intervención de pozo implica múltiples viajes de ingreso y salida, en los cuales se realizan numerosas conexiones. Durante cada conexión, la sarta se posiciona en la cuña mientras se adiciona o retira tubería, aplicando torque mediante llave; este proceso se denomina conexión.

Las operaciones pueden requerir entre 1600 y 2000 conexiones por intervención, con un promedio cercano a 1800 conexiones. Debido a su alta frecuencia, **el tiempo de conexión STS fue el KPI que pudo capturarse de manera inmediata.**

A partir de estos datos, se establecieron líneas base y, mediante estadística descriptiva, se identificaron oportunidades de mejora en los tiempos STS, las cuales se traducen en mayor eficiencia operativa, reducción de costos y mejora en la rentabilidad.

### 5.2.3 Resultados Estadísticos del Piloto

Durante la ejecución del proyecto, se registraron un total de 53 viajes de tubería, 8.419 conexiones y un ahorro acumulado de 2.319 minutos, equivalentes a 38,7 horas de operación. Estos resultados corresponden a las nueve (9) intervenciones monitoreadas.

Las Tablas 6 y 7 presentan el detalle de las estadísticas recopiladas para las Torres 30 y 43, respectivamente.

**Tabla 5. Estadísticas recopiladas durante la Prueba Piloto (Torre 30)**

| Pozo           | Tipo de Operacion | Actividad    | Tubería $\phi$ | Número de Conexiones | Tiempo STS Promedio     | Diferencia | % Reducción Tiempo STS | Ahorro minutos | Potencial BOPD | Ahorro Bbl |
|----------------|-------------------|--------------|----------------|----------------------|-------------------------|------------|------------------------|----------------|----------------|------------|
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | RIH MILL #1  | 3 1/2          | 140                  | 2.29                    |            | 12%                    | 71.68          | 150            | 7.47       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | RIH MILL #2  | 3 1/2          | 256                  | 2.01                    | 0.28       | 12%                    | 71.68          | 150            | 7.47       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | RIH MILL     | 3 1/2          | 115                  | 2.13                    | 0.16       | 7%                     | 18.4           | 150            | 1.92       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | RIH MILL     | 3 1/2          | 123                  | 2.29                    | 0          | 0%                     | 0              | 270            | 0.00       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | RIH MILL     | 3 1/2          | 242                  | 2                       | 0.29       | 13%                    | 70.18          | 90             | 4.39       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | RIH SCO      | 3 1/2          | 120                  | 1.85                    | 0.44       | 19%                    | 52.8           | 90             | 3.30       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | POOH MILL #1 | 3 1/2          | 254                  | 1.67                    |            | 0%                     | 0              | 150            | 0.00       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | POOH MILL #2 | 3 1/2          | 254                  | 1.67                    | 0          | 0%                     | 0              | 150            | 0.00       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | POOH MILL    | 3 1/2          | 250                  | 1.52                    | 0.15       | 9%                     | 37.5           | 150            | 3.91       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | POOH MILL    | 3 1/2          | 126                  | 1.6                     | 0.07       | 4%                     | 8.82           | 270            | 1.65       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | POOH MILL    | 3 1/2          | 234                  | 1.56                    | 0.11       | 7%                     | 25.74          | 90             | 1.61       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | POOH SCO     | 3 1/2          | 126                  | 1.5                     | 0.17       | 10%                    | 21.42          | 90             | 1.34       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | RIH STINGER  | 3 1/2          | 120                  | 2.15                    |            | 11%                    | 59.04          | 150            | 6.15       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | RIH FISH     | 3 1/2          | 246                  | 1.91                    | 0.24       | 11%                    | 59.04          | 150            | 6.16       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | RIH STINGER  | 3 1/2          | 228                  | 1.76                    | 0.39       | 18%                    | 88.92          | 150            | 9.26       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | RIH STINGER  | 3 1/2          | 230                  | 2.04                    | 0.11       | 5%                     | 25.3           | 270            | 4.74       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | RIH STINGER  | 3 1/2          | 93                   | 2.29                    | 0          | 0%                     | 0              | 90             | 0.00       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | POOH STINGER | 3 1/2          | 114                  | 1.66                    |            | 0%                     | 0              | 150            | 0.00       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | POOH FISH    | 3 1/2          | 138                  | 1.66                    | 0          | 0%                     | 0              | 150            | 0.00       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | POOH STINGER | 3 1/2          | 117                  | 1.66                    | 0          | 0%                     | 0              | 150            | 0.00       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | POOH STINGER | 3 1/2          | 120                  | 1.8                     | 0          | 0%                     | 0              | 270            | 0.00       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | POOH STINGER | 3 1/2          | 104                  | 1.46                    | 0.2        | 12%                    | 20.8           | 90             | 1.30       |
| Mandioca 003   | WO SQZ + Perf     | RIH ESP      | 5 1/2          | 150                  | 4.01                    |            | 14%                    | 71.82          | 150            | 7.48       |
| Esmeralda 14   | WO SQZ + Perf     | RIH ESP      | 3 1/2          | 126                  | 3.44                    | 0.57       | 14%                    | 71.82          | 150            | 7.48       |
| Esferico 11    | WO SQZ + Perf     | RIH ESP      | 3 1/2          | 79                   | 3.03                    | 0.98       | 24%                    | 77.42          | 270            | 14.52      |
| Esmeralda 12   | WO SQZ + Perf     | RIH ESP      | 3 1/2          | 46                   | 3.74                    | 0.27       | 7%                     | 12.42          | 90             | 0.00       |
| Esmeralda 14   | WO SQZ + Perf     | POOH ESP     | 5 1/2          | 208                  | 2.79                    |            | 18%                    | 116.5          | 90             | 7.28       |
| Esmeralda 12   | WO SQZ + Perf     | POOH ESP     | 2 3/8          | 233                  | 2.29                    | 0.5        | 18%                    | 116.5          | 90             | 7.28       |
| Viajes Totales |                   | 28 Viajes    | # Conexiones   | 4592                 | Ahorros Totales Minutos |            | 779                    | Bbl Ahorrados  |                | 77.71      |
|                |                   |              |                |                      | Ahorros Totales Horas   |            | 13.0                   |                |                |            |

Fuente: Elaboración propia

La Torre 30, por su parte, registró la intervención de cuatro pozos, con un total de 28 viajes realizados, 4,592 conexiones y 779 minutos ahorrados, equivalentes a 13 horas. Además, se incluyó el potencial de cada pozo, es decir, la tasa de producción diaria antes de ser intervenido. Con base en este potencial, se estima que durante esas 13 horas se evitó una producción diferida de aproximadamente 77 barriles de aceite.

Por su parte, la Torre 43 intervino cinco pozos, realizó 25 viajes, 3.827 conexiones y alcanzó un ahorro de 25,7 horas, lo que permitió evitar una producción diferida estimada en 146 barriles de aceite.

**Tabla 6. Estadísticas recopiladas durante la Prueba Piloto (Torre 43)**

| Pozo           | Tipo de Operacion | Actividad    | Tubería $\phi$ | Número de Conexiones | Tiempo STS Promedio | Diferencia | % Reducción Tiempo STS | Ahorro minutos | Potencial BOPD | Ahorro Bbl |
|----------------|-------------------|--------------|----------------|----------------------|---------------------|------------|------------------------|----------------|----------------|------------|
| Monteoscuro 06 | WO SQZ + Perf     | POOH BES     | 5 1/2          | 100                  | 3.06                |            |                        |                |                |            |
| Mandioca 097   | WS ESP            | POOH BES     | 5 1/2          | 183                  | 2.46                | 0.6        | 20%                    | 109.80         | 127            | 9.7        |
| Mandioca 169   | WO SQZ + Perf     | POOH BES     | 2 7/8          | 103                  | 2.33                | 0.73       | 24%                    | 75.19          | 78             | 4.1        |
| Monteoscuro 06 | WO SQZ + Perf     | RIH MILL     | 3 1/2          | 108                  | 2.32                |            |                        |                |                |            |
| Mandioca 097   | WS ESP            | RIH SCO # 1  | 3 1/2          | 190                  | 2.06                | 0.26       | 11%                    | 49.40          | 127            | 4.4        |
| Mandioca 097   | WS ESP            | RIH SCO # 2  | 3 1/2          | 99                   | 2.48                | 0          | 0%                     | 0              | 127            | 0.0        |
| Mandioca 097   | WS ESP            | RIH MILL     | 3 1/2          | 125                  | 2.02                | 0.3        | 13%                    | 37.50          | 127            | 3.3        |
| Mandioca 097   | WO SQZ + Perf     | RIH MILL     | 3 1/2          | 110                  | 1.94                | 0.38       | 16%                    | 41.8           | 78             | 2.3        |
| Mandioca 097   | WS ESP            | RIH MILL     | 3 1/2          | 211                  | 1.89                | 0.43       | 19%                    | 90.73          | 216            | 13.6       |
| Mandioca 097   | WO BP             | RIH MILL     | 3 1/2          | 234                  | 2.16                | 0.16       | 7%                     | 37.44          | 144            | 3.7        |
| Mandioca 097   | WO SQZ + Perf     | POOH MILL    | 3 1/2          | 105                  | 2.68                |            |                        |                |                |            |
| Mandioca 097   | WS ESP            | POOH SCO # 1 | 3 1/2          | 96                   | 2.48                | 0.2        | 7%                     | 19.2           | 127            | 1.7        |
| Mandioca 097   | WS ESP            | POOH SCO # 2 | 3 1/2          | 102                  | 1.67                | 1.01       | 38%                    | 103.02         | 127            | 9.1        |
| Mandioca 097   | WS ESP            | POOH MILL    | 3 1/2          | 244                  | 1.56                | 1.12       | 42%                    | 273.28         | 127            | 24.1       |
| Mandioca 097   | WO SQZ + Perf     | POOH MILL    | 3 1/2          | 224                  | 1.72                | 0.96       | 36%                    | 215.04         | 78             | 11.6       |
| Mandioca 097   | WS ESP            | POOH MILL    | 3 1/2          | 227                  | 1.58                | 1.1        | 41%                    | 249.7          | 216            | 37.5       |
| Mandioca 097   | WO BP             | POOH MILL    | 3 1/2          | 114                  | 1.71                | 0.97       | 36%                    | 110.58         | 144            | 11.1       |
| Mandioca 097   | WO SQZ + Perf     | RIH STINGER  | 3 1/2          | 143                  | 2.3                 |            |                        |                |                |            |
| Mandioca 097   | WO SQZ + Perf     | RIH STINGER  | 3 1/2          | 226                  | 2.04                | 0.26       | 11%                    | 58.76          | 78             | 3.2        |
| Mandioca 097   | WO SQZ + Perf     | POOH STINGER | 3 1/2          | 117                  | 1.94                |            |                        |                |                |            |
| Mandioca 097   | WO SQZ + Perf     | POOH STINGER | 3 1/2          | 111                  | 1.57                | 0.37       | 19%                    | 41.07          | 78             | 2.2        |
| Mandioca 097   | WO SQZ + Perf     | RIH BES      | 2 7/8          | 183                  | 3.37                |            |                        |                |                |            |
| Mandioca 097   | WS ESP            | RIH BES      | 2 7/8          | 185                  | 3.59                | 0          | 0%                     | 0              | 127            | 0.0        |
| Mandioca 169   | WO SQZ + Perf     | RIH BES      | 3 1/2          | 122                  | 4.14                | 0          | 0%                     | 0              | 78             | 0.0        |
| Monteoscuro 98 | WS ESP            | RIH BES      | 2 3/8          | 165                  | 3.2                 | 0.17       | 5%                     | 28.05          | 216            | 4.2        |

|                |           |              |      |
|----------------|-----------|--------------|------|
| Viajes Totales | 25 Viajes | # Conexiones | 3827 |
|----------------|-----------|--------------|------|

|                         |      |
|-------------------------|------|
| Ahorros Totales Minutos | 1541 |
| Ahorros Totales Horas   | 25.7 |

|               |     |
|---------------|-----|
| Bbl Ahorrados | 146 |
|---------------|-----|

Fuente: Elaboración propia

En conjunto, la reducción en los tiempos de conexión STS generó un impacto significativo en la eficiencia operativa, alcanzando un ahorro total de 38,7 horas. Este resultado permitió evitar una producción diferida estimada de aproximadamente 223 barriles de aceite, consolidando el valor operativo del monitoreo en tiempo real. En el siguiente capítulo se analizará este resultado desde una perspectiva económica.

### 5.3 OPTIMIZACIÓN OPERATIVA

Tan pronto como se inició el proyecto y se capturó data cruda en tiempo real, con una resolución temporal de hasta un (1) segundo, esto quiere decir que, cada segundo, se registraron valores de todos los sensores como peso, torque, presión, profundidad, carga en el gancho, rotación, entre otros.

Como se mencionó previamente, debido a la frecuencia de las conexiones y a la duración del piloto, **el tiempo de conexión STS fue el único KPI que pudo medirse**. Para ello, se establecieron líneas base (resaltadas en las Tablas 6 y 7), a partir de las cuales se calcularon los ahorros en tiempo.

#### 5.3.1 Ventana de STS Promedio

Lo primero que se realizó fue establecer las líneas base para cada actividad de salida e ingreso de las sargas, clasificadas de la siguiente manera: POOH BES, POOH MIL, POOH STINGER, RIH STINGER, RIH BES y RIH MIL. La línea base se definió calculando el promedio de los tiempos de conexión de cada uno de estos viajes. A partir de este valor base, se realizaron las comparaciones correspondientes para evaluar el progreso o la mejora en los tiempos de conexión.

Con base en este análisis, se identificó un potencial de mejora en las conexiones en un rango de 0,07 a 1,12 minutos. Este resultado evidencia que la medición de los tiempos permite gestionar y optimizar las operaciones.

#### 5.3.2 Oportunidades de Mejora

La principal oportunidad de mejora identificada fue la reducción de los tiempos de conexión STS. No obstante, existen otros indicadores que pueden evaluarse en futuros trabajos, tales como la velocidad de viaje, la reducción de ILT, la disminución de NPT, la disminución de tiempos planos y la optimización de parámetros operativos.

## **6. RESULTADOS Y EVALUACIÓN DEL MONITOREO EN TIEMPO REAL**

Este capítulo presenta el análisis de los resultados obtenidos tras la implementación del sistema de monitoreo en tiempo real, destacando su impacto en la eficiencia operativa, la reducción de tiempos no productivos y la optimización de recursos.

A partir de estos resultados, se evalúa el impacto del monitoreo en la gestión de operaciones de subsuelo y se plantean oportunidades para su implementación a largo plazo, con el fin de mejorar el rendimiento operativo y la rentabilidad

### **6.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS OPERATIVOS**

En esta sección se presentan los resultados cuantitativos obtenidos durante el monitoreo en tiempo real en las Torres 30 y 43, con énfasis en el tiempo de conexión cuña a cuña (STS), indicador clave para evaluar la eficiencia en las operaciones de subsuelo.

Durante el piloto, el monitoreo en tiempo real permitió identificar variaciones, retrasos y condiciones operativas que afectaban las conexiones, facilitando la toma de decisiones oportunas para optimizar el proceso.

El monitoreo de las conexiones STS en tiempo real también ayudó a detectar oportunamente situaciones atípicas como fallas en equipos, condiciones climáticas adversas y variabilidad en el desempeño de las cuadrillas, lo que permitió implementar acciones correctivas y mejorar la continuidad operativa.

Con el fin de evidenciar de manera clara el impacto del monitoreo en tiempo real sobre la eficiencia operativa, se presenta en la Tabla 8 una comparación de los principales indicadores antes y después de la implementación del sistema.

**Tabla 7 . Comparación de desempeño operativo antes y después del monitoreo en tiempo real**

| <b>Indicador</b>                         | <b>Torre 30</b> | <b>Torre 43</b> | <b>Total/Impacto</b> |
|------------------------------------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| Número de conexiones                     | <b>4,592</b>    | 3,827           | 8,419                |
| STS promedio antes (min)                 | 2.42            | 2.61            | -                    |
| STS promedio después (min)               | 2.25            | 2.21            | ↓ Mejora             |
| <b>Reducción STS (min/conexión)</b>      | <b>0.17</b>     | <b>0.4</b>      | <b>↓ Tiempo</b>      |
| <b>Tiempo ahorrado (min)</b>             | <b>779</b>      | <b>1,541</b>    | <b>2,320</b>         |
| <b>Tiempo ahorrado (horas)</b>           | <b>13</b>       | <b>25.7</b>     | <b>38.7</b>          |
| <b>Producción diferida evitada (Bbl)</b> | <b>77</b>       | <b>146</b>      | <b>223</b>           |
| <b>Ahorro económico (USD)</b>            | <b>7,061</b>    | <b>13,172</b>   | <b>20,233</b>        |

Fuente: Elaboración propia

#### **6.1.1 Eficiencia en los Tiempos de Conexión STS**

La comparación entre los tiempos de conexión STS antes y después de la implementación del monitoreo en tiempo real permitió evaluar su impacto en la optimización de las operaciones.

Los resultados evidencian una reducción entre el 4 % y el 42 %, equivalente a disminuciones de entre 0,07 y 1,12 minutos por conexión. Esta mejora refleja una mayor eficiencia operativa, mejor coordinación de actividades y una respuesta más ágil ante condiciones no previstas.

En conjunto, estos resultados demuestran que el monitoreo en tiempo real permite optimizar los ciclos operativos, mejorar la productividad y reducir tiempos improductivos en las intervenciones de subsuelo

## **6.2 IMPACTOS DEL MONITOREO EN TIEMPO REAL**

La implementación del monitoreo en tiempo real en las operaciones de subsuelo generó impactos significativos a nivel operativo y económico. Entre los principales resultados se destaca la reducción de tiempos operativos, lo que permitió evitar una producción diferida estimada en aproximadamente 223 barriles de aceite, evidenciando el valor del sistema en la optimización de las operaciones.

### **6.2.1 Ahorro de Tiempo y Recursos**

Durante el proyecto piloto, el monitoreo en tiempo real permitió alcanzar ahorros significativos en tiempo y recursos operativos, evidenciados en la reducción de los tiempos de conexión STS y en la optimización de las actividades críticas.

Este ahorro se traduce en una mayor eficiencia operativa y en un impacto económico positivo, al reducir el uso de recursos logísticos y humanos durante las intervenciones.

Adicionalmente, la reducción de tiempos permitió disminuir la producción diferida, estimada en aproximadamente 223 barriles de aceite, lo que representa un beneficio directo en la continuidad operativa de los pozos.

### **6.2.2 Mejora en la Toma de Decisiones**

Desde el inicio del monitoreo en tiempo real, se evidenció que esta herramienta es fundamental para la toma de decisiones durante las operaciones de subsuelo. Aunque la operación fue monitoreada remotamente durante 12 horas diarias, la supervisión continua y la generación de alertas tempranas permitieron a los equipos anticiparse a posibles problemas e implementar acciones correctivas de manera oportuna.

Una de las principales ventajas de este enfoque es la capacidad de detectar

anomalías en tiempo real, facilitando la identificación de condiciones operativas que pueden afectar la eficiencia o la seguridad.

Por ejemplo, durante las intervenciones en las Torres 30 y 43, el sistema detectó incrementos en los tiempos de conexión STS, lo que permitió ajustar la coordinación de actividades y evitar retrasos significativos.

Asimismo, se identificaron variaciones en los parámetros operativos durante los viajes de tubería, lo que permitió ajustar la velocidad y garantizar mayor estabilidad en el proceso.

En conjunto, el monitoreo en tiempo real permitió una gestión más proactiva, basada en información precisa y actualizada, optimizando el desempeño de las operaciones

### **6.2.3 Impacto en la Seguridad Operacional**

La implementación del monitoreo en tiempo real demostró ser una herramienta efectiva para fortalecer la seguridad operacional, al permitir la supervisión continua de parámetros críticos y la anticipación de situaciones de riesgo.

Durante el proyecto piloto, se identificaron casos en los que el monitoreo permitió prevenir incidentes. En una intervención en la Torre 30, se detectó una fluctuación anómala en la presión de Stand Pipe (SPP), lo que permitió detener la operación y verificar la integridad de los equipos.

Este monitoreo asegura que el SPP se mantenga dentro de rangos operativos seguros, evitando incrementos que puedan comprometer la integridad de los equipos y del personal.

Asimismo, se controló el torque de apriete recomendado por el fabricante, garantizando que las conexiones se realizaran dentro de los límites adecuados.

En otro caso, en la Torre 43, el sistema generó una alerta ante un incremento inesperado en la tensión de la línea de trabajo, lo que permitió corregir la situación sin comprometer la seguridad ni la integridad de la operación.

Estos resultados evidencian que el monitoreo en tiempo real no solo optimiza el desempeño operativo, sino que también contribuye significativamente a la gestión de riesgos, fortaleciendo la cultura de seguridad en campo y reduciendo la probabilidad de eventos no deseados

### **6.3 ANÁLISIS FINANCIERO**

En esta sección se presenta un resumen de los principales resultados obtenidos a partir de la implementación del sistema de monitoreo en tiempo real, destacando la cuantificación de los ahorros operativos y la reducción de tiempos. Estos resultados se exponen mediante tablas y gráficos que facilitan su interpretación y análisis.

#### **6.3.1 Síntesis de Resultados Operativos y Financieros**

El monitoreo en tiempo real de las operaciones de subsuelo demostró ser una herramienta efectiva para la optimización de procesos, la reducción de costos y la mejora de la eficiencia operativa. A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos:

##### **➤ Mejora en la Eficiencia Operativa**

Uno de los principales beneficios fue la reducción de los tiempos de conexión STS. El monitoreo en tiempo real permitió identificar cuellos de botella en esta etapa crítica, logrando una disminución promedio del 9% en comparación con operaciones sin monitoreo.

➤ **Impacto Financiero**

Con base en tarifas de mercado, se estimaron costos diarios de 13.045 USD para la Torre 30 y 12.298 USD para la Torre 43. Como resultado de la optimización en los tiempos de conexión, se logró una reducción estimada de costos operativos de **20.233 USD** durante el piloto.

➤ **Incremento en la Productividad**

La mejora en la eficiencia operativa permitió recuperar 38,7 horas de operación, las cuales, en condiciones tradicionales, habrían sido destinadas a maniobras. Este tiempo fue aprovechado para ejecutar nuevas intervenciones y acelerar la reincorporación de pozos a producción, incrementando la productividad y la rentabilidad del proceso.

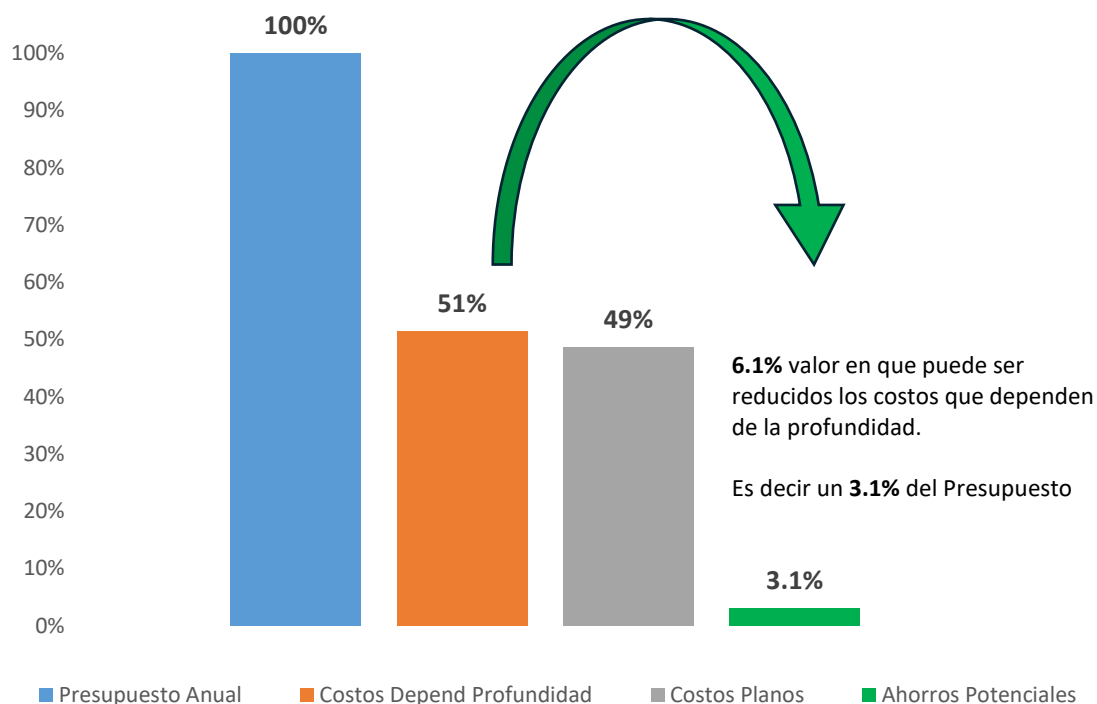
### 6.3.2 **Evaluación Económica del Proyecto**

La evaluación económica del sistema de monitoreo en tiempo real se desarrolló con base en un análisis estructurado del presupuesto anual de operaciones de subsuelo. Debido a la confidencialidad de la información, los resultados se presentan en términos relativos y mediante escenarios probabilísticos.

➤ **Clasificación del presupuesto y oportunidad de mejora**

El presupuesto anual fue clasificado en dos categorías: costos dependientes de profundidad y costos planos. El análisis identificó que aproximadamente el **51 % del presupuesto total** corresponde a costos dependientes de profundidad, los cuales son susceptibles de optimización mediante la reducción de tiempos de conexión.

**Gráfico 5. Ahorros potenciales Implementando Sistema de Monitoreo en Tiempo Real**



Fuente Elaboración propia

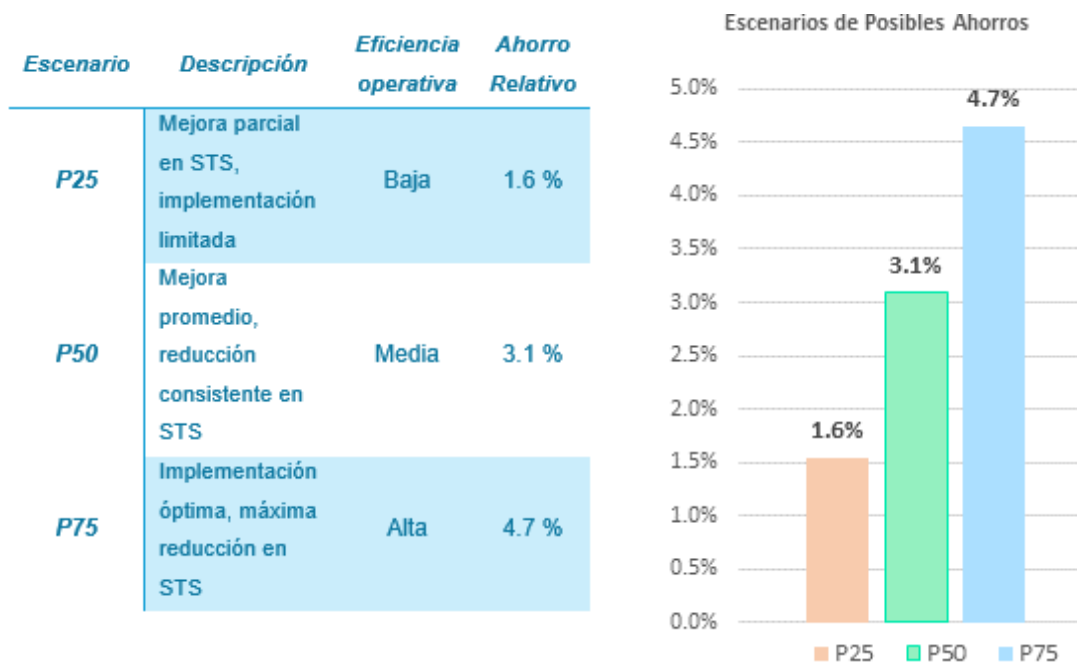
### ➤ **Valor capturado mejora en tiempos STS**

El impacto directo del monitoreo en tiempo real se refleja en la optimización de los tiempos de conexión STS. Esta mejora, validada con datos del piloto, representa un ahorro estimado del **6,1 %** sobre el presupuesto contactable asociado a los costos dependientes de profundidad.

### ➤ **Análisis de escenarios**

Dado que el proyecto se encuentra en una etapa inicial y únicamente se ha evaluado una de las variables de optimización, se desarrolló un análisis de escenarios basado en percentiles (P25, P50 y P75), con el fin de estimar el ahorro económico bajo distintos niveles de eficiencia operativa

**Gráfico 6. Escenarios Probabilísticos para los Ahorros Potenciales**



Fuente Elaboración propia

Los resultados se presentan en términos relativos al presupuesto contactable dependiente de profundidad, garantizando la confidencialidad de la información.

### ➤ **Costos del Proyecto**

La implementación del sistema de monitoreo en tiempo real se realizó bajo condiciones económicas favorables, aprovechando recursos existentes y soluciones de bajo costo. A continuación, se detalla la estructura de costos y beneficios asociados al piloto de tres meses

**Tabla 8. Costos Consolidados del proyecto**

| Concepto               | Piloto<br>(Software gratuito) | Futuro<br>(Software in-house) | Futuro<br>(Software comercial) |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Software               | \$0                           | \$1.050                       | \$2.100                        |
| Ingeniero de monitoreo | \$9.750                       | \$9.750                       | \$9.750                        |
| Infraestructura RTO    | \$0                           | \$0                           | \$0                            |

|                                                  |                 |                 |                 |
|--------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Viaje a campo (14 días)<br>Comidas y alojamiento | \$280           | \$280           | \$280           |
| Tiquete (Bog-Arauca-Bog)                         | \$300           | \$300           | \$300           |
| Transporte terrestre<br>(Arauca-Campo)           | \$200           | \$200           | \$200           |
| <b>Costo total (3 meses)</b>                     | <b>\$10.530</b> | <b>\$11.580</b> | <b>\$12.630</b> |
| Valor capturado (ahorro)                         | <b>\$20.233</b> | ~\$20.233       | ~\$20.233       |
| <b>Retorno estimado (ROI)</b>                    | <b>92.14 %</b>  | <b>74.7 %</b>   | <b>60.2 %</b>   |

Fuente: Elaboración propia

Los resultados evidencian que el proyecto es altamente rentable, con un retorno estimado (ROI) del **92.14 %** en el escenario piloto, manteniéndose positivo incluso en escenarios futuros con implementación de software propio o comercial. Esto demuestra la viabilidad económica y la escalabilidad del sistema de monitoreo en tiempo real.

#### ➤ **Consideraciones de confidencialidad**

Con el fin de proteger la información estratégica de la compañía, el análisis se desarrolló utilizando valores relativos y escenarios probabilísticos. Este enfoque permite presentar resultados técnicos consistentes y replicables, manteniendo la confidencialidad de los datos financieros.

## 7. CONCLUSIONES

El monitoreo en tiempo real aplicado a las operaciones de subsuelo se consolida como una herramienta efectiva para mejorar la eficiencia operativa, al permitir la identificación, medición y optimización de los tiempos de conexión STS. Su implementación logró reducciones entre el **4% y el 42%**, evidenciando su capacidad para disminuir tiempos improductivos y optimizar los ciclos operativos.

Los resultados obtenidos durante el piloto confirman que la medición del tiempo de conexión STS constituye un indicador clave para la gestión de la eficiencia en intervenciones de subsuelo. A partir de su medición, se logró recuperar aproximadamente **38,7 horas de operación**, lo que incrementa la continuidad operativa y mejora la disponibilidad de los pozos.

Desde el punto de vista productivo, la optimización de los tiempos operativos permitió evitar una producción diferida estimada en **223 barriles** de petróleo, demostrando que la mejora en la eficiencia no solo reduce tiempos, sino que impacta directamente la producción y el aprovechamiento del activo.

En términos económicos, el proyecto evidenció su viabilidad al generar ahorros operativos del orden de **23.057 USD** durante el piloto, con una inversión mínima. Estos resultados confirman que el monitoreo en tiempo real es una solución rentable, capaz de generar valor incluso en escenarios de implementación a mayor escala.

Adicionalmente, el análisis del presupuesto permitió identificar que aproximadamente el 51 % de los costos operativos está asociado a variables dependientes de profundidad, las cuales pueden optimizarse mediante la reducción de los tiempos de conexión. En este sentido, se concluye que el monitoreo en

tiempo real no solo mejora la eficiencia operativa, sino que permite capturar valor económico directo sobre una proporción significativa del presupuesto.

El monitoreo en tiempo real representa un cambio en el enfoque tradicional de supervisión de operaciones, pasando de un modelo reactivo basado en reportes diarios a un modelo proactivo basado en datos continuos. Esta capacidad permitió detectar desviaciones operativas en tiempo real y tomar decisiones oportunas, fortaleciendo la gestión operativa y reduciendo riesgos.

Finalmente, aunque el piloto se enfocó en un único KPI, la infraestructura y el flujo de trabajo implementados establecen una base sólida para la expansión del análisis hacia otros indicadores operativos, como velocidad de viaje, ILT, NPT y optimización de parámetros. Esto demuestra que el monitoreo en tiempo real tiene el potencial de consolidarse como una herramienta integral para la optimización y control de las operaciones de subsuelo.

## 8. RECOMENDACIONES

**Fortalecimiento de la Infraestructura Tecnológica:** Se recomienda avanzar hacia la implementación de soluciones de monitoreo en tiempo real mediante software especializado, ya sea propio o adquirido, que permita automatizar el cálculo de indicadores clave como tiempos de conexión, velocidades de viaje y modelos de torque y arrastre. Esto permitirá mejorar la eficiencia del ingeniero monitorista y ampliar la capacidad de supervisión simultánea de múltiples taladros, incrementando la rentabilidad operativa.

Adicionalmente, se sugiere promover el desarrollo de herramientas internas utilizando lenguajes como **Python o R**, así como plataformas de visualización como **Power BI**, con el fin de adaptar el análisis de datos a las necesidades específicas de la compañía y facilitar la toma de decisiones en tiempo real.

**Expansión de la Cobertura del Monitoreo:** Es fundamental garantizar la instalación de sensores en todos los equipos de subsuelo que aún no cuentan con esta tecnología. La disponibilidad de datos en tiempo real es un elemento clave para la digitalización de las operaciones, por lo que su expansión permitirá estandarizar el monitoreo y maximizar los beneficios observados durante el piloto

**Fortalecimiento del Talento Humano:** Se recomienda consolidar equipos multidisciplinarios que integren conocimientos en operaciones de subsuelo y análisis de datos. El perfil del ingeniero monitorista debe evolucionar hacia competencias en manejo de bases de datos, herramientas analíticas y programación, además del dominio de software especializado de la industria.

Asimismo, se sugiere implementar programas de capacitación continua enfocados en el análisis de datos en tiempo real, con el fin de fortalecer la toma de decisiones y maximizar el valor generado por el monitoreo.

**Integración de Sistemas de Monitoreo:** Para potenciar el alcance del monitoreo en tiempo real, se recomienda integrar herramientas complementarias que permitan una visión más completa de la operación:

- **Integración de Sistemas de Video:** La instalación de cámaras en puntos estratégicos del taladro, como portería, mesa rotatoria, preventoras, tanques, catwalk y, si es posible, una cámara 360°, permitirá correlacionar los eventos operativos con los datos registrados, mejorando la capacidad de análisis y diagnóstico

- **Integración de Fuentes de Datos:** Es fundamental consolidar la información proveniente de sistemas como **OpenWells®** y la data cruda en formatos como **WITSML**, con el fin de asegurar la consistencia de los reportes y detectar oportunidades de mejora en tiempos no productivos.

**Adopción Estratégica del Monitoreo en Tiempo Real:** Finalmente, se recomienda la adopción de sistemas de monitoreo en tiempo real no solo a nivel interno, sino también en otras compañías operadoras que busquen avanzar hacia la digitalización de sus operaciones. La implementación de este tipo de soluciones ha demostrado su capacidad para mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y fortalecer la toma de decisiones basada en datos, constituyéndose en una herramienta clave para la optimización de las operaciones de subsuelo a largo plazo

## **BIBLIOGRAFIA**

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS, Mapa de Tierras, 2024

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal, Bogotá: ANH and B&M Exploration Ltda, 2007, ISBN: 978-958-98237-0-5)

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS, Sistemas Integrados Operaciones / Estadísticas de Producción, 2026

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS, Sistema Oficial de Liquidación y Administración de Regalías – SOLAR, 2026)

Bellarby Jonathan, Well Completion Design. Burlington, MA: Elsevier Science, 2009, ISBN 978-0-444-53210-7

BORKIT OILTECH [Sitio web] Astana Kazajistán [Consulta 17 de Marzo 2025] Disponible en: <https://borkitoiltech.com/electricpumps>

PRECISE ENERGY PRODUCTS [Sitio web] Colleyville, Texas USA [Consulta 21 marzo 2026] Disponible en: <https://www.pep-usa.com/fluid-pumping>

GOES [Sitio web] Wesendorf Alemania [Consulta 17 de enero 2025] Disponible en: <https://goes-well.com/wireline-slickline-units/wireline-special-units/>

Kirkman M.A, Symmonds M.E, Harbinson S.W, Shields J.A, Will M. y Doniger A. (2003), Wellsite Information Transfer Standard Markup Language, WITSML, an Update, Paper SPE 84066, 1-6

Reddick C. (2006), Field of the Future: Making BP's Vision a Reality, Paper SPE 99777, 1-6

Kirkman M, Chapman P, Greaves C, Turnbull H, y Johnson D. (2006), Efficient Data Management on the Rig of the Future, Paper SPE 99805, 1-4

Muhab Jalbout M, Al Hai A, Chammout O, Al-Rahma R, Mohamed Al Benali K, Al Blooshi S, El Bagoury A, Dubey A y Siddique A. (2023) Remote Drilling Supervisor – Step Changing Approach Aided by RTOC and 5G Technology, Paper SPE 214530, 1-8

Portilla H, Mejía Y, Suarez D y Sara H. Revista Fuentes: El Reventón Energético, 12,(2), 45-54

SLB [Sitio web] [Consulta 17 de enero 2025] Disponible en: <https://www.slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/well-construction/well-cementing/cement-trucks-and-trailers>

TRUFAX [Sitio web] Nova Scotia Canada [Consulta 15 de enero 2025] Disponible en: <https://truckfax.blogspot.com/2011/11/no-dinky-toy.html>