



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**  
**CARRERA DE PETRÓLEOS**

**TEMA:**

**“DISEÑO DE UN PROGRAMA DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN  
PARA UN POZO (AUCA J-153) DE TIPO J DEL CAMPO AUCA DEL  
ORIENTE ECUATORIANO.”**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**AUTORA:**

**KIARA CARELIS MARTINEZ TAILOR**

**TUTOR:**

**ING. XAVIER ERNESTO VARGAS GUTIÉRREZ, MSc.**

**LA LIBERTAD, ECUADOR**

**2026**

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA**

---

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
CARRERA DE PETRÓLEOS**

**TEMA:**

**DISEÑO DE UN PROGRAMA DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN  
PARA UN POZO (AUCA J-153) DE TIPO J DEL CAMPO AUCA  
DEL ORIENTE ECUATORIANO.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**AUTORA:**

**KIARA CARELIS MARTINEZ TAILOR**

**TUTOR:**

**ING. XAVIER ERNESTO VARGAS GUTIÉRREZ, MSc.**

**LA LIBERTAD – ECUADOR**

**2026**

# TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



**Ing. Marllelis del Valle Gutiérrez**

**Hinestroza, PhD.**

**DIRECTOR DE CARRERA**



**Ing. Xavier Vargas Gutiérrez, MSc.**

**DOCENTE TUTOR**



**Ing. Carlos Malavé Carrera, MSc.**

**DOCENTE ESPECIALISTA**



**Ing. Israel Yagual Pita, MSc.**

**DOCENTE GUIA DE UIC**



**Ing. David Vega González.**

**SECRETARIO DEL TRIBUNAL**

## DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado A Dios, por ser mi guía, mi refugio y mi mayor fortaleza durante este camino. Gracias por sostenerme en los momentos de dificultad, por darme sabiduría, perseverancia y la oportunidad de alcanzar una de las metas más importantes de mi vida. Sin Su infinita gracia este logro no habría sido posible.

A mi amada madre Mariana Tailor, por ser el pilar fundamental de mi vida. Gracias por criarme como una mujer fuerte, segura, valiente y capaz de alcanzar todo aquello que se propone. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba, por cada palabra de aliento que me impulsó a seguir adelante, por enseñarme que rendirse nunca fue una opción y por visualizarme desde siempre como una gran Ingeniera en Petróleo. Este triunfo también es tuyo.

A mi querido padre, Carlos Martínez por cada sacrificio, esfuerzo y enseñanza que hicieron posible este sueño. Gracias por ser quien despertó en mí el amor por esta hermosa carrera y por haber confiado en mis capacidades desde el primer día. Papá, tú me imaginaste con este título en mis manos cuando aún parecía un sueño lejano, hoy puedo decirte con inmensa felicidad: lo logramos. Este logro lleva tu nombre tanto como el mío.

A mis hermanos, Alexis y Jordy, a mi cuñada, a mis sobrinos y a toda mi familia, quienes siempre confiaron en mí, celebraron cada pequeño avance y jamás dejaron de motivarme. Gracias por desearme siempre lo mejor y por anhelar verme alcanzar esta meta con el mismo entusiasmo con el que yo la perseguía.

A mi novio Jairo Silvestre quien llegó a mi vida en la etapa más exigente de mi formación universitaria. Gracias por acompañarme en los días de cansancio, por cada palabra de motivación, por creer en mí cuando las fuerzas parecían agotarse y por recordarme constantemente que era capaz de llegar hasta el final. Tu apoyo fue un impulso invaluable para no rendirme jamás.

Y, finalmente, quiero dedicar este trabajo a la persona que comenzó este camino llena de sueños e incertidumbre: a mi yo del 2021. A aquella joven que veía muy lejano el día en que se convertiría en Ingeniera en Petróleo y que, aun con miedo, decidió intentarlo. Hoy quiero decirte con el corazón lleno de orgullo: Lo logramos. Cada desvelo, cada sacrificio, cada obstáculo y cada pequeño paso que parecía poco te acercaron a este momento. Nunca dejaste de creer, incluso cuando el camino parecía imposible. Hoy puedes sentirte orgullosa de la mujer en la que te has convertido y de todo lo que fuiste capaz de aprender.

Este no es solo el final de una etapa universitaria, es el comienzo de una vida llena de nuevos desafíos, sueños por cumplir y metas aún más grandes. Esta tesis representa la prueba de que la fe, el esfuerzo, la disciplina y el amor de quienes nos acompañan pueden convertir los sueños más lejanos en una hermosa realidad.

# CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En calidad de tutor del trabajo de investigación para titulación del tema “DISEÑO DE UN PROGRAMA DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN PARA UN POZO (AUCA J-153) DE TIPO J DEL CAMPO AUCA DEL ORIENTE ECUATORIANO.” elaborado por la estudiante Martinez Tailor Kiara Carelis , egresada de la carrera de Ingeniería en petróleo, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio COMPILATIO, luego de haber cumplido con los requerimientos exigidos de valoración, la presente tesis, se encuentra con un 0% de la valoración permitida.



Certificado de análisis  
Compilatio Studium

CERTIFICADO COMPILATIO TESIS KIARA MARTINEZ

ID : 6a2e8be1f580e1db024c669566a968b33eb18d94



0%

Textos sospechosos

Nombre del fichero : CERTIFICADO COMPILATIO TESIS KIARA  
MARTINEZ.txt  
Tamaño del archivo original : 40,48 kB  
Número de palabras : 7325

Depositante : XAVIER ERNESTO VARGAS GUTIÉRREZ  
Fecha de depósito : 24 de julio de 2026  
Tipo de carga : interface  
fecha de fin de análisis : 24 de julio de 2026

## FIRMA DEL TUTOR



Validar únicamente en FirmaEC.  
Firmado electrónicamente por:  
**XAVIER ERNESTO  
VARGAS GUTIÉRREZ**

Ing. Xavier Ernesto Vargas Gutiérrez, MSc.

C.I.: 0906392493

# DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Martinez Tailor Kiara Carelis , declaro bajo juramento que el presente trabajo de titulación denominado “DISEÑO DE UN PROGRAMA DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN PARA UN POZO (AUCA J-153) DE TIPO J DEL CAMPO AUCA DEL ORIENTE ECUATORIANO”, no tiene antecedentes de haber sido elaborado en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Petróleos, lo cual es un trabajo exclusivamente inédito y perteneciente de mi autoría.

Por medio de la presente declaración cedo los derechos de autoría y propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Kiara Carelis', is positioned above a horizontal line.

---

Martinez Tailor Kiara Carelis

Autor de tesis

C.I 2450280660

# **CERTIFICACIÓN DEL TUTOR**

Ing.Xavier Ernesto Vargas Gutiérre, MSc.

## **TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En mi calidad de Tutor del presente trabajo “DISEÑO DE UN PROGRAMA DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN PARA UN POZO (AUCA J-153) DE TIPO J DEL CAMPO AUCA DEL ORIENTE ECUATORIANO.” previo a la obtención del Título de Ingeniero en petróleos elaborado por la Srta. Martinez Tailor Kiara Carelis egresado de la carrera de Ingeniería en petróleos, Facultad Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado, la apruebo en todas sus partes.

FIRMA DEL TUTOR



---

Ing. Xavier Ernesto Vargas Gutiérrez, MSc.

C.I.: 0906392493

# CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA

*Lcda. Betty Ruth Gómez Suárez, Mgtr.*

*Celular: 0962183538*

*Correo: [bettyruthgomez@educacion.gob.ec](mailto:bettyruthgomez@educacion.gob.ec)*

## CERTIFICACIÓN GRAMATICAL Y ORTOGRÁFICA

Yo, **BETTY RUTH GÓMEZ SUÁREZ**, en mi calidad de **LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN Y MAGÍSTER EN DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MODELOS EDUCATIVOS**, por medio de la presente tengo a bien indicar que he leído y corregido el Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del Título de Ingeniera en Petróleos, denominado **"DISEÑO DE UN PROGRAMA DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN PARA UN POZO (AUCA J-153) DE TIPO J DEL CAMPO AUCA DEL ORIENTE ECUATORIANO."**, de la estudiante: **KIARA CARELIS MARTINEZ TAILOR**.

Certifico que está redactado con el correcto manejo del lenguaje, claridad en las expresiones, coherencia en los conceptos e interpretaciones, adecuado empleo en la sinonimia. Además de haber sido escrito de acuerdo a las normas de ortografía y sintaxis vigentes.

En cuanto puedo decir en honor a la verdad y autorizo a la interesada hacer uso del presente como estime conveniente.

Santa Elena, 22 de Julio del 2026



Lcda. Betty Ruth Gómez Suárez, Mgtr.

CI. 0915036529

LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN  
MAGÍSTER EN DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MODELOS EDUCATIVOS  
Nº DE REGISTRO DE SENECYT 1050-2014-86052892

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, expreso mi más profunda gratitud a Dios por concederme salud, fortaleza, sabiduría y la oportunidad de culminar con éxito este trabajo de titulación.

Mi más sincero agradecimiento a nuestra distinguida docente, Ing. Marllelis Gutiérrez, PhD, quien, además de desempeñarse como directora de Carrera, ha sido una guía invaluable durante mi formación académica, por compartir generosamente sus conocimientos, por su dedicación, y vocación de enseñanza los cuales enriquecieron significativamente mi crecimiento profesional y personal.

Expreso mi profundo agradecimiento a mi tutor de tesis, Ing. Xavier Vargas, MSc, por su valioso apoyo, orientación y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo de titulación. Su experiencia, conocimientos y disposición para brindar asesoramiento fueron fundamentales para la culminación de esta investigación.

Agradezco al Ing. Carlos Malavé, MSc, por su constante colaboración, disposición y orientación a lo largo del desarrollo de este proyecto. Sus consejos, observaciones fueron fundamentales para fortalecer la calidad de este trabajo de investigación, mi gratitud a todos los docentes que tuve el privilegio de conocer durante mi etapa universitaria. Cada uno de ellos contribuyó desde su experiencia y conocimientos a mi formación como futura profesional, dejando enseñanzas que llevaré conmigo a lo largo de mi vida.

A mi familia y a mis amigos, quienes estuvieron presentes en cada momento de este camino. Gracias por su amor, comprensión, apoyo incondicional y palabras de aliento que fueron mi mayor motivación para no rendirme y alcanzar esta meta.

# CONTENIDO

|                                                             |      |
|-------------------------------------------------------------|------|
| DEDICATORIA .....                                           | iii  |
| CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO .....                             | iv   |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....                                 | v    |
| CERTIFICACIÓN DEL TUTOR .....                               | vi   |
| CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA .....                           | vii  |
| AGRADECIMIENTOS .....                                       | viii |
| CAPITULO I: INTRODUCCIÓN .....                              | 21   |
| 1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....                         | 21   |
| 1.2 ANTEDECENTES.....                                       | 21   |
| 1.3 HIPÓTESIS.....                                          | 22   |
| 1.4 OBJETIVOS .....                                         | 23   |
| Objetivo General.....                                       | 23   |
| Objetivos Específicos.....                                  | 23   |
| 1.5 ALCANCE .....                                           | 23   |
| 1.6 VARIABLES .....                                         | 24   |
| Variables Dependientes: .....                               | 24   |
| Variables Independientes .....                              | 24   |
| CAPITULO II: MARCO TEÓRICO .....                            | 25   |
| 2.1. DESCRIPCIÓN GEOGRÁFICA Y UBICACIÓN DEL CAMPO AUCA..... | 25   |
| 2.1.1 Ubicación .....                                       | 25   |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1.2 Límites del campo .....                                         | 26 |
| 2.2 GEOLOGÍA .....                                                    | 27 |
| 2.2.1 Estructural .....                                               | 27 |
| 2.2.2 Estratigrafía .....                                             | 28 |
| 2.2.3 Formación Tiyuyacu (Eoceno) .....                               | 29 |
| 2.2.4 Formación Tena .....                                            | 30 |
| 2.2.5 Formación Napo .....                                            | 30 |
| 2.2.6 Formación Hollín.....                                           | 30 |
| 2.3 RESERVORIOS PRODUCTORES EN EL CAMPO AUCA.....                     | 30 |
| 2.4 FUNDAMENTOS DE LA INGENIERÍA DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN .....      | 31 |
| 2.3.1 Definición y funciones de los fluidos de perforación .....      | 31 |
| 2.3.2 Clasificación de los fluidos de perforación .....               | 32 |
| • Fluidos base agua (WBM - Water-Based Muds) .....                    | 32 |
| • Fluidos base aceite (OBM - Oil-Based Muds).....                     | 32 |
| • Fluidos base sintética (SBM - Synthetic-Based Muds) .....           | 33 |
| 2.3.3 Reología de los fluidos de perforación .....                    | 33 |
| • Comportamiento de fluidos newtonianos y no newtonianos .....        | 33 |
| • Comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento (Shear-Thinning) | 34 |
| • Modelos reológicos de fluidos no newtonianos.....                   | 34 |
| 2.3.4 Propiedades reológicas fundamentales .....                      | 35 |

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| • Viscosidad Plástica (PV).....                                              | 35 |
| • Punto de Cedencia (YP) .....                                               | 35 |
| • Resistencia de Geles .....                                                 | 35 |
| • Viscosidad de Embudo Marsh .....                                           | 36 |
| • Filtrado API / HPHT.....                                                   | 36 |
| • Contenido de sólidos y capacidad de azul de metileno (MBT).....            | 36 |
| • pH y alcalinidad.....                                                      | 36 |
| • Contenido de iones cloruro y dureza total .....                            | 36 |
| 2.3.6 Normativas API para ensayo de fluidos de perforación.....              | 36 |
| 2.3.7 Química de arcillas y coloides .....                                   | 37 |
| 2.4 SISTEMAS DE LODO APLICADOS AL POZO AUCA J-153 .....                      | 37 |
| 2.4.1 Sistema Nitrato de Calcio (Secciones Superficiales e Intermedia) ..... | 37 |
| 2.4.2 Sistema PER-FLEX (Sección Intermedia) .....                            | 38 |
| 2.4.3 Sistema BIO-LOSE (Sección Productora) .....                            | 39 |
| 2.5 HIDRÁULICA Y LIMPIEZA DEL HOYO EN POZOS DIRECCIONALES                    | 40 |
| 2.5.1 Desafíos de la limpieza en pozos direccionales .....                   | 40 |
| Mecanismos de transporte de recortes en pozos desviados.....                 | 41 |
| 2.5.2 Ecuaciones fundamentales de la hidráulica de perforación .....         | 42 |
| • Velocidad de deslizamiento de recortes .....                               | 43 |
| • Velocidad crítica de transporte ( $V_{crit}$ ) .....                       | 43 |
| • Caudal crítico ( $Q_{crit}$ ).....                                         | 44 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| • Número de Reynolds anular (Re).....                                 | 45 |
| • Densidad de Circulación Equivalente (ECD).....                      | 45 |
| 2.5.3 Estrategias de limpieza para el pozo Auca J-153.....            | 46 |
| • Selección de caudales óptimos .....                                 | 46 |
| • Control de la reología.....                                         | 46 |
| • Bombeo de píldoras de barrido.....                                  | 46 |
| • Rotación de la sarta.....                                           | 46 |
| • Consideración de la excentricidad de la sarta.....                  | 47 |
| • Monitoreo en tiempo real .....                                      | 47 |
| 2.6 NORMATIVAS Y ESTÁNDARES APLICABLES .....                          | 48 |
| 2.6.1 Normativas API para fluidos de perforación .....                | 48 |
| • API RP 13B-1: Ensayo de fluidos base agua.....                      | 48 |
| • API RP 13B-2: Ensayo de fluidos base aceite .....                   | 49 |
| • API RP 13D: Reología e hidráulica.....                              | 49 |
| • API RP 13C: Evaluación de sistemas de procesamiento de fluidos..... | 50 |
| • API SPEC 13A: Especificación de materiales para fluidos .....       | 50 |
| 2.6.2 Normativa ambiental ecuatoriana .....                           | 51 |
| 2.6.3 Otras normativas aplicables.....                                | 51 |
| 2.7 Sistemas de Lodos Aplicados al Pozo Auca J-153 .....              | 52 |
| CAPITULO III: METODOLOGÍA .....                                       | 53 |
| 3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....                          | 53 |

|                                                                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA .....</b>                                                                                    | <b>53</b> |
| <b>3.2.1. Población .....</b>                                                                                            | <b>53</b> |
| <b>3.2.2. Muestra .....</b>                                                                                              | <b>53</b> |
| <b>3.3. UNIDADES DE ANÁLISIS Y FUENTES DE INFORMACIÓN .....</b>                                                          | <b>54</b> |
| <b>3.4. MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....</b>                                                               | <b>54</b> |
| <b>3.5. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO .....</b>                                                                             | <b>56</b> |
| <b>3.5.1. Fase 1: Evaluación del comportamiento del lodo mediante la relación<br/>    Peso vs. Profundidad .....</b>     | <b>56</b> |
| <b>3.5.2. Fase 2: Optimización técnica del programa de fluidos base .....</b>                                            | <b>60</b> |
| <b>3.5.3 Fase 3. Definición de los procedimientos de control de calidad y monitoreo<br/>    en tiempo real .....</b>     | <b>65</b> |
| <b>3.5.4. Optimización de los parámetros hidráulicos y limpieza del hoyo en<br/>    trayectorias direccionales .....</b> | <b>69</b> |
| <b>CAPITULO IV. ANALISIS Y RESULTADOS .....</b>                                                                          | <b>75</b> |
| <b>4.1. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO POR SECCIÓN .....</b>                                                     | <b>75</b> |
| <b>4.1.1. Evaluación físico-química de los sistemas de lodo aplicados.....</b>                                           | <b>75</b> |
| <b>4.2. BALANCE VOLUMÉTRICO Y FORMULACIÓN QUÍMICA DE LOS<br/>SISTEMAS .....</b>                                          | <b>77</b> |
| <b>4.2.1. Cálculos de volúmenes de fluido y capacidad del sistema .....</b>                                              | <b>77</b> |
| <b>4.2.2. Formulación química y dosificación de los sistemas de fluidos .....</b>                                        | <b>79</b> |
| <b>4.3. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD MECÁNICA Y CONTROL DE<br/>CALIDAD.....</b>                                          | <b>81</b> |
| <b>4.3.1. Monitoreo de la estabilidad de lutitas y control de solidos reactivos ....</b>                                 | <b>82</b> |
| <b>4.3.2. Tratamiento químico y control de contaminantes en sitio .....</b>                                              | <b>83</b> |

|                                                                                                 |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.4. OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA Y EFICIENCIA DE LIMPIEZA EN LA TRAYECTORIA DIRECCIONAL.....</b> | <b>85</b> |
| <b>4.4.1. Análisis de velocidad anular y caudales de bombeo recomendados .....</b>              | <b>85</b> |
| <b>4.4.2. Eficiencia del transporte de ripios en la seccion de alta inclinacion .....</b>       | <b>86</b> |
| <b>CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>                                         | <b>89</b> |
| <b>5.1. CONCLUSIONES .....</b>                                                                  | <b>89</b> |
| <b>5.2. RECOMENDACIONES.....</b>                                                                | <b>90</b> |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                                         | <b>92</b> |

## **LISTA DE FIGURAS**

|                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Ubicación del Campo Sacha (Cevallos, 2015) .....                                                                                                                                                | 25 |
| Figura 2. Campos Cercano al Campo Sacha (Cevallos, 2015) .....                                                                                                                                            | 26 |
| Figura 3. Mapa de la geología estructural del campo (Cevallos, 2015).....                                                                                                                                 | 28 |
| Figura 4. Columna estratigráfica del campo Auca (Carrillo, 2018) .....                                                                                                                                    | 29 |
| Figura 5. Diagrama de flujo del procedimiento metodológico .....                                                                                                                                          | 56 |
| Figura 6. Curva Peso del Lodo vs Profundidad (Baker Hughes, 2022) .....                                                                                                                                   | 57 |
| Figura 7. Diagrama de flujo del plan de transferencia y reúso de fluidos inter-<br>secciones. 65                                                                                                          |    |
| Figura 8. Equipos estandarizados de laboratorio para el monitoreo de<br>propiedades reológicas y densidad (Balanza presurizada y Viscosímetro<br>rotacional) (Fajardo Vélez & Rojas Quimbaya, 2016) ..... | 66 |
| Figura 9. Formato estandarizado de reporte diario de propiedades del fluido<br>Baker Hughes (Baker Hughes, 2022).....                                                                                     | 68 |
| Figura 10. Esquema conceptual del comportamiento y asentamiento de ripios<br>en la sección tangente de un pozo direccional (Clavijo Martínez, 2022).....                                                  | 70 |
| Figura 11. Perfil técnico de la trayectoria direccional tipo J del pozo Auca J-<br>153 (Baker Hughes, 2022) .....                                                                                         | 73 |
| Figura 12. Distribución volumétrica del sistema de fluidos por fases operativas<br>en el pozo Auca J-153.....                                                                                             | 79 |
| Figura 13. Distribución de aditivos poliméricos y agentes de control para el<br>pozo Auca J-153. ....                                                                                                     | 80 |
| Figura 14. Comparativa de masa total entre agente de puenteo y aditivos<br>químicos activos para el pozo Auca J-153. ....                                                                                 | 81 |

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 15. Esquema metodológico para el tratamiento químico de la contaminación por cemento. ....                                   | 84 |
| Figura 16. Comparativa de velocidad anular real frente a la velocidad crítica de limpieza por sección para el pozo Auca J-153. .... | 86 |
| Figura 17. Efecto del angulo de inclinacion sobre el indice de transporte y la concentracion de ripios.....                         | 88 |

## LISTA DE TABLAS

|           |                                                                                                            |    |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1.  | Caudal mínimo recomendado (GPM) vs tamaño del hoyo y ángulo de inclinación (Clavijo Martínez, 2022).....   | 44 |
| Tabla 2.  | Sistema de fluido por sección del pozo (Clavijo Martínez, 2022) .....                                      | 52 |
| Tabla 3.  | Variables e indicadores de análisis (Baker Hughes, 2022).....                                              | 55 |
| Tabla 4.  | Resumen de parámetros de fluidos y arquitectura del pozo Auca J-153 (Baker Hughes, 2022).....              | 60 |
| Tabla 5.  | Matriz de aditivos, funciones y concentraciones típicas por sistema (Baker Hughes, 2022).....              | 62 |
| Tabla 6.  | Cronograma y frecuencias de monitoreo para propiedades del fluido de perforación (Baker Hughes, 2022)..... | 67 |
| Tabla 7.  | Matriz de acciones correctivas ante desviaciones de parámetros de diseño (Baker Hughes, 2022) .....        | 69 |
| Tabla 8.  | Matriz de parámetros hidráulicos y regímenes de flujo recomendados por sección (Baker Hughes, 2022).....   | 72 |
| Tabla 9.  | Rangos de propiedades de diseño de los fluidos por sección para el pozo Auca J-153                         | 76 |
| Tabla 10. | Balance volumétrico detallado por fases de perforación para el pozo Auca J-153                             | 78 |
| Tabla 11. | Dosificación química total estimada para los sistemas de lodo del pozo Auca J-153                          | 79 |
| Tabla 12. | Limites operativos de control de calidad y tolerancia para parámetros clave                                | 82 |
| Tabla 13. | Resumen de parámetros hidráulicos de diseño y velocidades anulares para el pozo Auca J-153.....            | 85 |

Tabla 14.      Parámetros de eficiencia de transporte de ripios segun la inclinación del  
pozo              87

# **“DISEÑO DE UN PROGRAMA DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN PARA UN POZO (AUCA J-153) DE TIPO J DEL CAMPO AUCA DEL ORIENTE ECUATORIANO.”**

**Autor:** Martinez Tailor Kiara Carelis

**Tutor:** Ing. Xavier Ernesto Vargas Gutiérrez, MSc.

## **RESUMEN**

Se diseñó y optimizó un programa de fluidos de perforación para el pozo direccional Auca J-153, ubicado en el Campo Auca del Oriente ecuatoriano, mediante un enfoque documental, descriptivo y no experimental basado en la recopilación, análisis e interpretación de información técnica de Baker Hughes y Petroamazonas EP. La optimización del programa original consistió en el ajuste de densidades (de 8.5-10.8 lpg a rangos de 8.5-10.4 lpg según sección), la selección de los sistemas Nitrato de Calcio, PER-FLEX y BIO-LOSE, y la definición de parámetros operativos. Los resultados numéricos obtenidos del análisis documental indican que el diseño propuesto permite mantener la capacidad de azul de metileno por debajo de 15.0 ppb, los sólidos de baja gravedad específica por debajo del 6.0% en volumen, y las pérdidas de circulación estimadas por debajo del 5% del volumen total circulante. Asimismo, los parámetros hidráulicos calculados (velocidades anulares de 120-225 ft/min y caudales de 350-1,000 GPM) superan las velocidades críticas de limpieza en todas las secciones, asegurando una adecuada remoción de recortes. Como resultado, se obtuvo un programa de fluidos adaptado a las condiciones geológicas del pozo, concluyéndose que la correcta selección y control de propiedades permite minimizar riesgos operacionales y mantener la estabilidad del hoyo.

**PALABRAS CLAVE:** FLUIDOS DE PERFORACIÓN, PROGRAMA DE FLUIDOS, PARAMETROS HIDRÁULICOS, ESTABILIDAD DEL POZO, PERFORACIÓN PETROLERA.

# **“DESIGN OF A DRILLING FLUID PROGRAM FOR A J-TYPE WELL (AUCA J-153) IN THE AUCA FIELD, ECUADORIAN ORIENTE”**

**Author:** Martinez Tailor Kiara Carelis

**Tutor:** Ing. Xavier Ernesto Vargas Gutiérrez, MSc.

## **ABSTRACT**

A drilling fluid program was designed and optimized for the directional well Auca J-153, located in the Auca Field of the Ecuadorian Oriente, using a documentary, descriptive, and non-experimental approach based on the collection, analysis, and interpretation of technical information from Baker Hughes and Petroamazonas EP. The optimization of the original program consisted of density adjustments (from 8.5-10.8 ppg to ranges of 8.5-10.4 ppg according to section), the selection of the Calcium Nitrate, PER-FLEX, and BIO-LOSE fluid systems, and the definition of operational parameters. The numerical results obtained from the documentary analysis indicate that the proposed design allows maintaining the methylene blue capacity below 15.0 ppb, low-gravity solids below 6.0% by volume, and estimated circulation losses below 5% of the total circulating volume. Likewise, the calculated hydraulic parameters (annular velocities of 120-225 ft/min and flow rates of 350-1,000 GPM) exceed the critical cleaning velocities in all sections, ensuring adequate cuttings removal. As a result, a fluid program adapted to the geological conditions of the well was obtained, concluding that proper selection and control of fluid properties allow minimizing operational risks and maintaining wellbore stability.

**KEYWORDS:** DRILLING FLUIDS, DRILLING FLUID PROGRAM, HYDRAULIC PARAMETERS, WELLBORE STABILITY, PETROLEUM DRILLIN.

# **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

## **1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

La perforación del pozo Auca J-153 presenta desafíos operativos significativos debido a la variedad de formaciones geológicas, muchas de ellas altamente reactivas, inestables o susceptibles a pérdidas de fluido. Estas condiciones pueden generar problemas críticos como inestabilidad del hoyo, embolamiento de la broca, pegaduras, aumento de torque y arrastre, contaminación del lodo, pérdidas de circulación y daño a la formación, comprometiendo la seguridad del personal y la continuidad de las operaciones. Además, el manejo inadecuado de los fluidos y productos químicos puede aumentar los costos, disminuir la eficiencia y generar riesgos ambientales y de salud ocupacional.

Frente a este escenario, la operación requiere un sistema de fluidos de perforación adecuado, capaz de responder a las características de cada sección del pozo, controlando la hidratación de lutitas, la pérdida de filtrado, la limpieza del hueco y la estabilidad mecánica de las formaciones atravesadas. Sin una planificación detallada y un control riguroso de las propiedades del fluido, existe un riesgo elevado de fallas operativas, retrasos, sobrecostos y afectación del yacimiento. De esta necesidad surge la elaboración del programa de fluidos, cuyo propósito es establecer las especificaciones, procedimientos y medidas de control que permitan mitigar estos riesgos y garantizar una perforación segura y eficiente.

## **1.2 ANTEDECENTES**

La ciencia y el estudio de la deformación y el flujo de la materia. El término también se utiliza para indicar las propiedades de un líquido dado, como en la reología de los lodos. La reología es una propiedad sumamente importante de los lodos de perforación, los fluidos de perforación de yacimiento, los fluidos de reacondicionamiento y terminación, los cementos y los fluidos y píldoras especializados. La reología del lodo se mide continuamente durante la perforación y se ajusta con aditivos o dilución para cumplir con las necesidades de la operación. En los fluidos a base de agua, la calidad del agua juega un papel importante en el desempeño de los aditivos. La temperatura afecta el

comportamiento y las interacciones del agua, la arcilla, los polímeros y los sólidos en el lodo. La presión de fondo de pozo debe ser tomada en cuenta al evaluar la reología de los lodos a base de aceite.(Guzman , 2021)

Los motores de turbinas son accionados por el fluido de perforación que mueve a la barrena, los PDM son accionados por un estator, por lo que no se asemejan a los motores de turbinas que utilizan láminas de metal que proporcionan gran resistencia a fluidos de perforación químicamente agresivos y a extremas temperaturas de fondo; sin embargo, la velocidad de la barrena decrece como la demanda del torque de la barrena aumenta, un incremento en el torque no resulta de un incremento de presión que pueda ser vista en la superficie, por lo tanto, la detección de atascamiento de la turbina es más difícil que en los PDM y su velocidad es mucho más alta, la cual está cerca de los 1000 rpm. Como muchos PDM, las turbinas pueden ser configuradas dada su capacidad orientada con curvaturas y estabilizadores.(Cuchicgo, 2022)

El programa de fluidos de perforación permite el buen desarrollo de la perforación al controlar las presiones de poro, evitando eventos no deseados de control de pozo. Lo primero que se debe hacer es determinar los pesos de lodo a utilizar durante la perforación, esto se logra construyendo la ventana de lodo para determinar la densidad del fluido de perforación a utilizar. Dicha ventana tiene como límite inferior la presión de poro y como límite superior el gradiente de fractura, la densidad estará ubicada entre estos dos límites para garantizar que se van a controlar las presiones de formación esperadas sin inducir pérdidas en la misma. (Carrillo, 2018)

### **1.3 HIPÓTESIS**

El programa de fluidos de perforación optimizado con los sistemas Nitrato de Calcio, PER-FLEX y BIO-LOSE, en comparación con el programa original, mejora la estabilidad del hoyo al mantener la concentración de sólidos de baja gravedad específica por debajo del 6% en volumen y reduce las pérdidas de circulación, permitiendo una disminución de los tiempos no operativos en la perforación del pozo Auca J-153.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Diseñar un programa de fluidos de la perforación para un pozo (AUCA J-153) de tipo J mediante la correcta selección, preparación, aplicación y control de los fluidos de perforación, que minimice los tiempos no operativos.

### **Objetivos Específicos**

- Evaluar el comportamiento del lodo de perforación mediante la representación gráfica de su peso vs profundidad.
- Identificar, documentar y justificar técnicamente las modificaciones realizadas al programa de fluidos de perforación original de Baker Hughes para Petroamazonas EP, mediante la comparación de las especificaciones técnicas iniciales con las propiedades finales del fluido, la verificación de los parámetros reológicos y volumétricos ajustados, y la validación de los cambios mediante los resultados operativos obtenidos durante la perforación del pozo Auca J-153.
- Definir los procedimientos de control de calidad y monitoreo de las propiedades del fluido en tiempo real, estableciendo planes de acción correctiva que mantenga el lodo de perforación con los parámetros requeridos.
- Establecer los parámetros hidráulicos de caudal, presión, velocidad del anular, mediante análisis de la viscosidad, asegurando una limpieza efectiva del hoyo.

## **1.5 ALCANCE**

El alcance de esta investigación se centra en el diseño y optimización de un programa de fluidos de perforación para el pozo AUCA J-153.

El enfoque de este estudio es técnico-documental orientado a establecer lineamientos operativos, de control necesario para la preparación, manejo y mantenimiento de los fluidos que se utilizarán durante la perforación del pozo.

Además, la investigación abarca las siguientes áreas principales:

- Selección de sistemas de lodo: Determinando los fluidos adecuados para cada sección del pozo (sistemas Nitrato de Calcio, PER-FLEX y BIO-LOSE).
- Asimismo, evaluación y control de parámetros hidráulicos como: volúmenes, caudales, presiones, y la velocidad en el espacio anular, basados en el análisis de la viscosidad del lodo.
- Esta planificación se desarrolla de manera detallada, comprendiendo las secciones superficiales 1, superficial 2, intermedia y productora.

La delimitación se define de la siguiente manera:

- Población: Está constituida por todos los pozos de tipo J del Campo Auca.
- Muestra: Es de tipo no estadístico y se restringe a un solo pozo seleccionado (AUCA J-153).

## **1.6 VARIABLES**

### **Variables Dependientes:**

- Desempeño operativo en la perforación del pozo
- Estabilidad del hoyo
- Control de pérdidas de circulación

### **Variables Independientes**

- Programa de fluidos de perforación
- Selección adecuada del sistema de lodo
- Control de propiedades reológicas

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. DESCRIPCIÓN GEOGRÁFICA Y UBICACIÓN DEL CAMPO AUCA.

#### 2.1.1 Ubicación

El área del proyecto se localiza en la región amazónica del Ecuador, asentado en la provincia de Orellana, específicamente dentro del cantón Joya de los Sacha.

El pozo Auca J-153 es un pozo de trayectoria direccional tipo J. se encuentra ubicado en el Bloque 61 del campo Auca y limita con el campo Sacha, bajo la operación actual de la empresa pública Petroecuador.

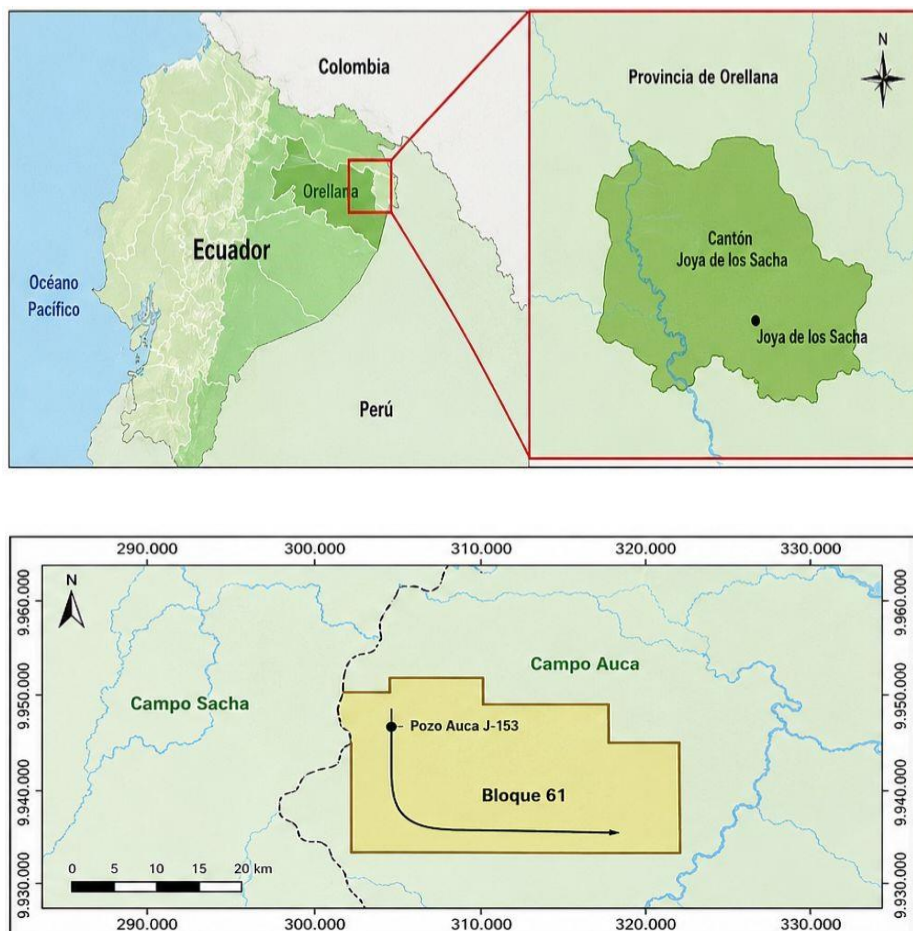


Figura 1. Ubicación del Campo Sacha (Cevallos, 2015)

## 2.1.2 Límites del campo

El Campo Auca se sitúa en la subcuenca Oriental del Ecuador. Sus límites referenciales dentro de la cuenca son:

- Norte: Limita directamente con el Campo Sacha.
- Sur: Limita con las concesiones de los campos Conaco y Shushufindi .
- Este y Oeste: Delimitado por fallas geológicas estructurales de orientación norte-sur que actúan como trampas para el atrapamiento de hidrocarburos.

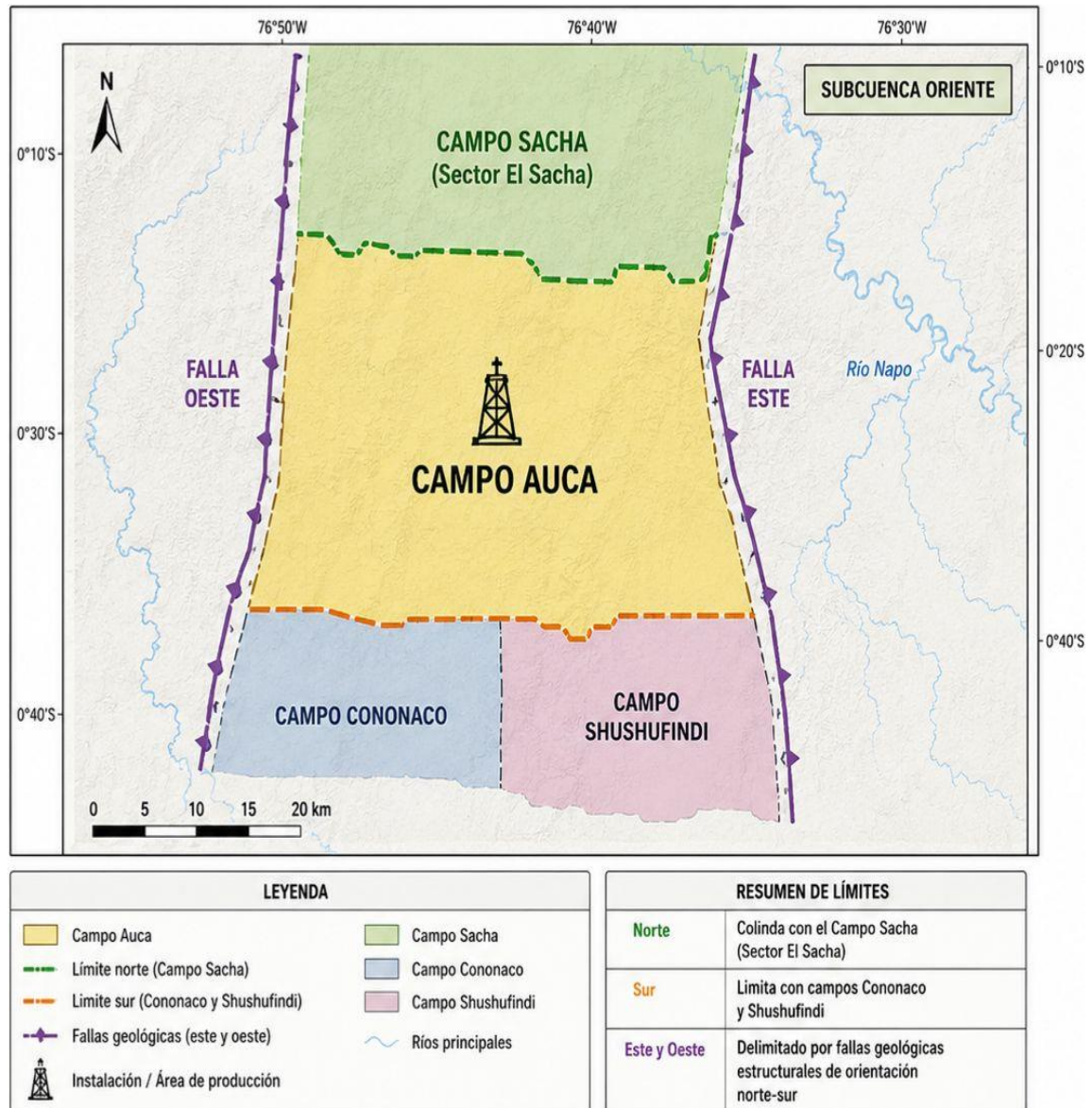


Figura 2. Campos Cercano al Campo Sacha (Cevallos, 2015)

## 2.2 GEOLOGÍA

### 2.2.1 Estructural

Estructuralmente, el Campo Auca se caracteriza por ser anticlinal asimétrico, con una orientación preferencial Norte-Noroeste a Sur-Suroeste (NNW-SSE). El relieve estructural de este plegamiento muestra un ensanchamiento hacia la zona norte (justo en el área de influencia del pozo Auca J-153 con el Campo Sacha). Desde el punto de vista tectónico, el campo está afectado por fallamientos de rumbo e inversos que controlan la geometría de los reservorios registrando fallas principales con saltos verticales promedio entre 10 y 30 pies.

La caracterización estructural moderna no solo describe la forma estática de la roca, sino también el estado dinámico de las fuerzas que actúan sobre ella hoy en día. Para la perforación del pozo direccional Auca J-153, el campo se rige bajo un régimen tectónico compresivo/transpresivo donde interactúan tres esfuerzos principales:

1. **Esfuerzo Vertical ( $\sigma_v$ ):** Generado por el peso de las capas de roca superiores.
2. **Esfuerzo Horizontal Máximo ( $\sigma_H$ ):** De orientación preferencial Oeste-Este (W-E), impulsado por el empuje de la Placa de Nazca contra el continente americano.
3. **Esfuerzo Horizontal Mínimo ( $\sigma_h$ ):** De orientación Norte-Sur (N-S).

Dentro del marco geológico del área, un rasgo estructural indispensable es la presencia de una discordancia angular en la base del Cretácico. Antes del depósito de la Formación Hollín, las rocas preexistentes sufrieron levantamiento y erosión.

Esto significa que cuando la broca del pozo Auca J-153 pasa de la sección intermedia a la productora, cruza una frontera donde el orden e inclinación de las capas cambia sutilmente. Esta transición estructural representa un cambio abrupto en la competencia de la roca y en los gradientes de presión, marcando el punto exacto donde operacionalmente se debe sustituir el lodo polimérico de perforación por el sistema de fluidos de reservorio (BIO-LOSE) para mitigar pérdidas asociadas al cambio de régimen de esfuerzos.



## COLUMNA ESTRATIGRÁFICA – CAMPO AUCA

Cuenca Oriente, Ecuador

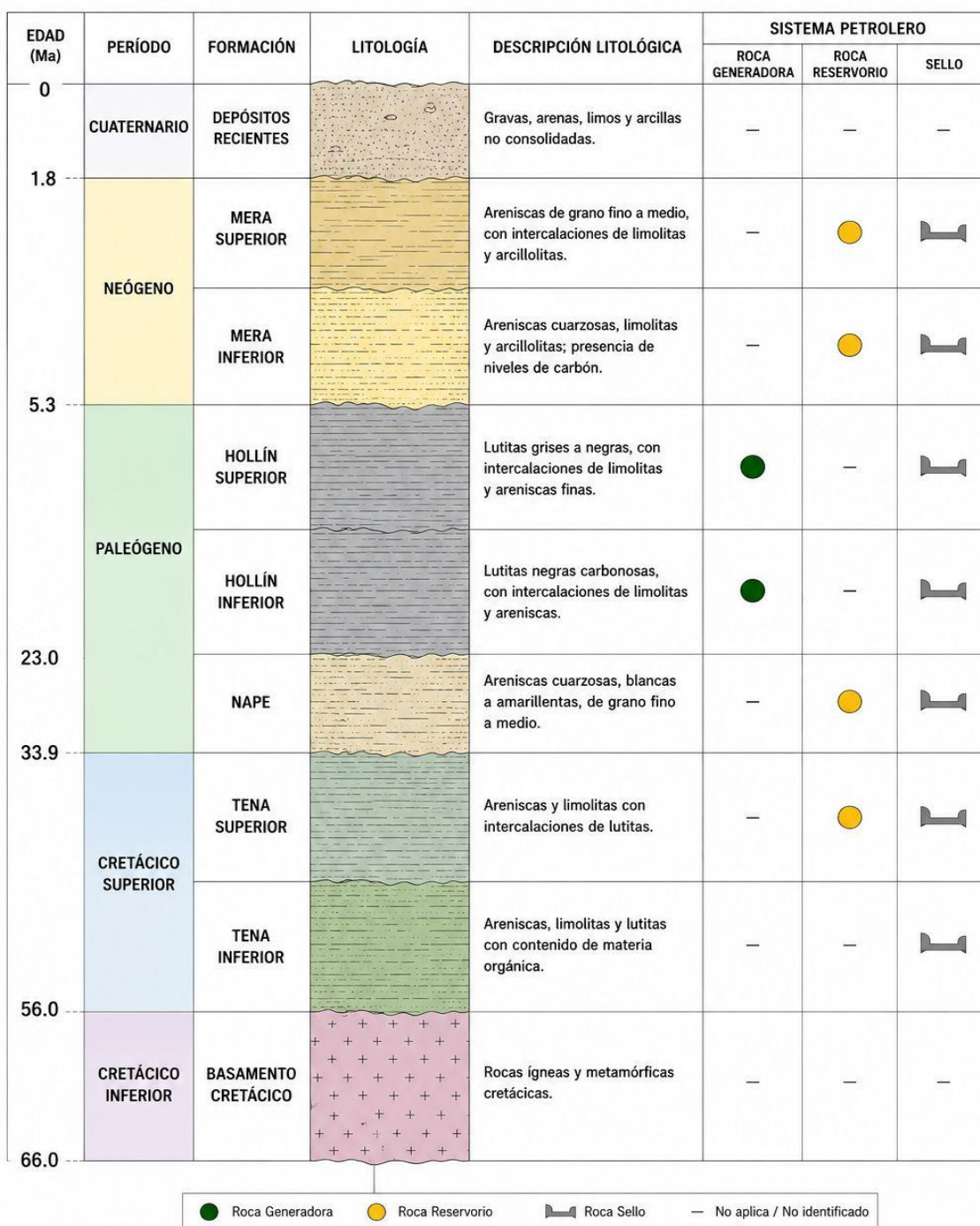


Figura 4. Columna estratigráfica del campo Auca (Carrillo, 2018)

### 2.2.3 Formación Tiuyacu (Eoceno)

Compuesta por gruesas secuencias de conglomerados, areniscas cuarcíticas de grano grueso a medio y limolitas multicolores (principalmente rojizas y verdes) depositadas en un ambiente fluvial. Operativamente, demanda un fluido con excelente capacidad de acarreo y viscosidad controlada para remover fragmentos y cortes gruesos.

#### **2.2.4 Formación Tena**

Representa una potente secuencia continental transicional formada por arcillas abigarradas, limolitas y lutitas calcáreas de colores rojo, marrón y gris.

- **Riesgo Operativo:** Esta formación aloja altos contenidos de arcillas y lutitas reactivas. Al entrar en contacto con fluidos base agua convencionales, sufren procesos de hidratación e hinchamiento, derivando en inestabilidad mecánica del hoyo, reducción del diámetro del pozo, torque y arrastre severo.

#### **2.2.5 Formación Napo**

Es una de las mega-secuencias de mayor complejidad litológica debido a su naturaleza marina somera. Está constituida por la intercalación cíclica de tres componentes: calizas grises (Miembros Caliza A, B y C), lutitas negras altamente orgánicas (Miembros Lutita U y T) y cuerpos de areniscas.

- **Riesgo Operativo:** Las lutitas de Napo tienden al desmoronamiento (sloughing shales), mientras que sus calizas densas pueden presentar microfracturas propensas a pérdidas de circulación.

#### **2.2.6 Formación Hollín**

Corresponde al depósito basal del Cretácico y descansa en discordancia sobre el basamento pre-cretácico. Litológicamente, se subdivide en dos cuerpos principales:

- **Hollín Principal:** Una arenisca cuarzosa homogénea, de grano fino a medio, porosa y permeable, depositada en un sistema fluvial de ríos trenzados (braided stream).
- **Hollín Superior (o Miembro Arenisca Basal de Napo):** Caracterizado por areniscas glauconíticas estuarinas e intercalaciones de lutitas marinas.

### **2.3 RESERVORIOS PRODUCTORES EN EL CAMPO AUCA**

El hidrocarburo se encuentra entrampado en estructuras anticlinales y fallas que actúan como sellos. En el Campo Auca, los horizontes productores de interés comercial e industrial donde se completan los pozos son:

- Basal Tena: Reservorio secundario discontinuo que rellena paleovalles fluviales.
- Napo U (Areniscas U Principal e Inferior): Uno de los reservorios con mayor concentración de reservas acumuladas en el play petrolero.
- Napo T (Areniscas T Superior e Inferior): Secuencias de canales y barras de marea de alta productividad.
- Hollín Principal: El yacimiento de mayor extensión regional, caracterizado por poseer excelentes propiedades petrofísicas (elevada porosidad y permeabilidad), que produce crudos de alta calidad (alrededor de 31° API).

## **2.4 FUNDAMENTOS DE LA INGENIERÍA DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN**

### **2.3.1 Definición y funciones de los fluidos de perforación**

Un fluido de perforación, también conocido como lodo de perforación, es un fluido circulante que se bombea desde la superficie hacia el fondo del pozo a través de la sarta de perforación, retornando al espacio anular y regresando a la superficie. Su importancia en las operaciones de perforación es tal que se le considera equivalente a la sangre en el cuerpo humano: la bomba de lodo es el corazón y los recortes perforados representan los productos de desecho que deben ser transportados y eliminados (Saffari et al., 2018).

Las funciones principales de los fluidos de perforación, según la normativa API y la práctica de la industria, abarcan múltiples aspectos operativos y de seguridad:

1. Transporte de recortes: Remover los fragmentos de roca generados por la broca desde el fondo del pozo hacia la superficie, evitando su acumulación en el espacio anular y previniendo el empaquetamiento de la sarta.
2. Control de presiones: Ejercer una presión hidrostática suficiente para contrarrestar las presiones de poro de las formaciones, previniendo influjos de fluidos de la formación (kicks) y manteniendo la integridad del pozo.
3. Estabilización del hoyo: Sostener mecánicamente las paredes del pozo, prevenir derrumbes o colapsos, y controlar la reactividad de las formaciones arcillosas mediante la inhibición química.
4. Refrigeración y lubricación: Enfriar y lubricar la broca y la sarta de perforación, reduciendo el torque, el arrastre y el desgaste de los componentes metálicos.

5. Formación del revoque: Depositar una capa delgada e impermeable (mud cake) sobre las paredes del pozo para reducir la pérdida de filtrado y la invasión de fluidos hacia la formación.
6. Suspensión de sólidos: Mantener en suspensión los recortes y el material densificante cuando la circulación se detiene, evitando su sedimentación en el fondo del pozo.
7. Transmisión de información hidráulica: Actuar como medio para transmitir información desde el fondo del pozo hacia la superficie a través de la pulsación de la presión (mediciones durante la perforación - MWD).
8. Control de corrosión: Minimizar los efectos corrosivos sobre la sarta de perforación y los equipos de superficie mediante el control del pH y la adición de inhibidores de corrosión (Houston, 1991).

### **2.3.2 Clasificación de los fluidos de perforación**

Los fluidos de perforación se clasifican en tres grandes categorías según su fase continua (Ghosn, 2017):

- **Fluidos base agua (WBM - Water-Based Muds)**

Son los más comunes y económicos. Utilizan agua dulce, agua salada o salmuera como fase continua. Su reología y control de filtrado se ajustan mediante la adición de arcillas (bentonita), polímeros y otros aditivos. Se subdividen en:

- Lodos no inhibitorios: Contienen arcillas nativas o bentonita y no suprimen significativamente la hinchazón de lutitas.
- Lodos inhibitorios: Retardan apreciablemente la hinchazón de arcillas y lutitas mediante el uso de cationes como Sodio ( $\text{Na}^+$ ), Calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ) y Potasio ( $\text{K}^+$ ).
- Lodos poliméricos: Utilizan polímeros como modificadores reológicos y controladores de filtrado.

- **Fluidos base aceite (OBM - Oil-Based Muds)**

Utilizan aceite (diesel, mineral o sintético) como fase continua. Ofrecen excelente estabilidad térmica y lubricidad, y son altamente inhibitorios para las arcillas (Wallace, 2004). Son la elección preferida para perforación en aguas profundas, pozos de alta inclinación y alcance extendido, así como para la mayoría de los entornos de alta temperatura. Sus ventajas incluyen:

- Altas tasas de penetración
- Excelente lubricidad y estabilidad térmica
- Reducida tendencia a la pegadura diferencial
- Estabilidad de lutitas e inhibición
- Resistencia a la contaminación química
- Reducción de la corrosión

Sin embargo, presentan desventajas como la necesidad de control de contaminación, alto costo en caso de pérdidas de circulación, emisión de vapores peligrosos, requisitos de herramientas de registro especializadas, y problemas de extracción de gas.

- **Fluidos base sintética (SBM - Synthetic-Based Muds)**

Son fluidos base aceite con fases continuas sintéticas (ésteres, olefinas, parafinas) que ofrecen un perfil ambiental más favorable que los aceites minerales o diesel.

### 2.3.3 Reología de los fluidos de perforación

La reología es la parte de la física que estudia la deformación y el flujo de la materia sometida a diferentes tipos de esfuerzos de corte. En el contexto de los fluidos de perforación, la reología determina cómo el lodo fluye a través del sistema circulatorio y cómo ejerce esfuerzos de corte sobre las paredes del pozo y los recortes (Fajardo Vélez y Rojas Quimbaya, 2016).

- **Comportamiento de fluidos newtonianos y no newtonianos**

Los fluidos se clasifican según la relación entre el esfuerzo de corte ( $\tau$ ) y la tasa de corte ( $\gamma$ ):

- Fluidos newtonianos: El esfuerzo de corte es proporcional a la tasa de corte. La viscosidad es constante y la relación se representa gráficamente por una línea recta que pasa por el origen.

$$\tau = \mu \cdot \gamma$$

Donde  $\tau$  es el esfuerzo de corte,  $\mu$  la viscosidad dinámica y  $\gamma$  la tasa de corte.

- Fluidos no newtonianos: La viscosidad no es constante, sino que puede depender de la tasa de corte o del tiempo. La mayoría de los fluidos de perforación son no newtonianos.

- **Comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento (Shear-Thinning)**

La mayoría de los fluidos de perforación presentan un comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento, donde la viscosidad efectiva disminuye al aumentar la tasa de corte. Esta es una característica altamente deseable porque permite que el fluido tenga una viscosidad relativamente alta a bajas tasas de corte (en el espacio anular, para una mejor limpieza del hoyo) y relativamente baja a altas tasas de corte (en la broca y toberas, para reducir las pérdidas de presión).

- **Modelos reológicos de fluidos no newtonianos**

Existen varios modelos matemáticos que describen el comportamiento de fluidos no newtonianos en flujo laminar. No existe un único modelo que se ajuste exactamente a todos los fluidos en todo el rango de tasas de corte, por lo que los modelos de mayor interés para la ingeniería de fluidos de perforación incluyen:

- **Modelo de Bingham:** Asume que el fluido se comporta como un sólido elástico hasta que se alcanza un esfuerzo de corte mínimo (punto de cedencia), a partir del cual el esfuerzo de corte es proporcional a la tasa de corte. Es el modelo más utilizado en la industria por su simplicidad.
- **Modelo de la Ley de Potencia:** Describe fluidos donde la viscosidad depende de la tasa de corte, siendo útil para fluidos poliméricos.
- **Modelo de Herschel-Bulkley:** Generaliza la Ley de Potencia incorporando un punto de cedencia.

La utilización de estos modelos, combinada con los datos de esfuerzo de corte vs. tasa de corte medidos con instrumentos adecuados, permite determinar con precisión el comportamiento del fluido bajo diferentes condiciones de flujo y calcular aspectos críticos como:

- Pérdidas de presión
- Hidráulica de la broca y toberas
- Eficiencia de limpieza del hoyo
- Densidad de circulación equivalente (ECD)

### 2.3.4 Propiedades reológicas fundamentales

- **Viscosidad Plástica (PV)**

La viscosidad plástica es una medida de la resistencia al flujo generada por la fricción entre las partículas suspendidas y la viscosidad de la fase continua. Depende directamente de la concentración de sólidos presentes, así como de su tamaño y forma. Se obtiene por la diferencia entre la lectura a 600 rpm y la lectura a 300 rpm en el viscosímetro rotacional, y su unidad de medida es el centipoise (cP) (Fajardo Vélez y Rojas Quimbaya, 2016):

$$PV = R_{600} - R_{300}$$

Donde  $R_{600}$  y  $R_{300}$  son las lecturas del viscosímetro a 600 y 300 RPM respectivamente.

- **Punto de Cedencia (YP)**

El punto de cedencia representa una medida de la capacidad de limpieza del lodo en el pozo. Se evidencia en las fuerzas de atracción entre las partículas de arcilla cuando el fluido se encuentra en movimiento, como resultado de las cargas eléctricas en la superficie de cada partícula (Fajardo Vélez y Rojas Quimbaya, 2016). Su valor se obtiene restando a la medida a 300 RPM el valor de la viscosidad plástica y su unidad de medida es lb/100 ft<sup>2</sup>:

$$YP = R_{300} - PV$$

Esta propiedad se ve afectada por la presencia de sólidos reactivos de la formación, carbonatos y calcio, mostrando valores elevados en lodos floculados. Un punto de cedencia alto combinado con una viscosidad plástica baja permite una evacuación eficiente de sólidos del pozo manteniendo una alta tasa de penetración.

- **Resistencia de Geles**

La resistencia de geles es una medida de las fuerzas de atracción entre las partículas suspendidas en un fluido en condiciones estáticas. Está relacionada con la capacidad del fluido de suspender sólidos, siendo indispensable cuando el fluido llega a los tanques en superficie pues permite la decantación en la trampa de arena y la separación del gas que pueda tener el fluido. En el pozo, reduce el efecto de succión cuando se procede a sacar la tubería. Su unidad de medida es lb/100 ft<sup>2</sup> y se mide a 3 rpm en dos momentos: gel inicial (10 segundos) y gel final (10 minutos).

- **Viscosidad de Embudo Marsh**

Es una medida empírica de la viscosidad del lodo, obtenida mediante el embudo Marsh, que expresa el tiempo en segundos que tarda un cuarto de galón de fluido en pasar por el embudo (Schlumberger, Energy Glossary, 2022). Se utiliza como un indicador rápido de cambios en la viscosidad.

- **Filtrado API / HPHT**

El filtrado es una medida relativa del fluido que atraviesa una formación porosa y permeable, así como del revoque que se forma en la pared de la misma. Para su medición se utiliza el filtro prensa API, que trabaja a condiciones de temperatura ambiente y presión de 100 lpc, midiendo los centímetros cúbicos de fluido filtrados en 30 minutos ( $\text{cm}^3/30 \text{ min}$ ). La prueba HPHT (High Temperature High Pressure) se realiza para simular condiciones de fondo de pozo (Vera Beteta, 2013).

- **Contenido de sólidos y capacidad de azul de metileno (MBT)**

El contenido de sólidos, incluyendo sólidos de baja gravedad específica (LGS) y material densificante, se determina mediante retorta (API, 2024). La capacidad de azul de metileno (MBT) es una medida de la cantidad de arcillas activas presentes en el lodo, indicando su potencial reactividad.

- **pH y alcalinidad**

El pH mide la acidez o alcalinidad del lodo, afectando la solubilidad de los aditivos, la corrosión y la actividad de los inhibidores. La alcalinidad y el contenido de cal se determinan mediante titulación con ácido sulfúrico (Wahrung, 2020).

- **Contenido de iones cloruro y dureza total**

La concentración de cloruros indica la salinidad de la fase acuosa y afecta la inhibición de arcillas. La dureza total como calcio se determina por titulación con EDTA.

### **2.3.6 Normativas API para ensayo de fluidos de perforación**

La ingeniería de fluidos de perforación se rige por normativas técnicas establecidas por el American Petroleum Institute (API), que garantizan la estandarización de los procedimientos de medición, control de calidad y seguridad operativa:

- API RP 13B-1 (2019): Práctica recomendada para el ensayo de fluidos de perforación base agua. Establece procedimientos estandarizados para determinar densidad, viscosidad, resistencia de geles, filtración, contenido de agua, aceite y

sólidos, contenido de arena, capacidad de azul de metileno, pH, alcalinidad y contenido de cal, contenido de cloruros, dureza total como calcio, y concentraciones de sólidos de baja gravedad y material densificante.

- API RP 13B-2 (2023): Práctica recomendada para el ensayo de fluidos de perforación base no acuosa. Establece procedimientos para determinar densidad, viscosidad, resistencia de geles, filtración, concentraciones de fluido no acuoso, agua y sólidos, alcalinidad, concentración de cloruros y calcio, estabilidad eléctrica, y filtración HPHT.

Estas prácticas recomendadas han sido objeto de mejoras continuas. Por ejemplo, entre 1997 y 2004, un grupo de trabajo de API trabajó en mejorar los procedimientos de análisis químico para lodos base aceite, logrando reducir la desviación estándar de los análisis de hasta un 50% a menos del 10%, mejorando significativamente la calidad de las decisiones operativas basadas en los datos de campo (Wallace, 2004).

### **2.3.7 Química de arcillas y coloides**

El comportamiento de los fluidos base agua está íntimamente relacionado con la química de las arcillas. La bentonita, una arcilla del grupo de las esmectitas, tiene una estructura laminar con carga eléctrica negativa en su superficie, lo que atrae cationes y moléculas de agua, provocando su hidratación y dispersión. La comprensión de estos fenómenos coloidales es fundamental para diseñar sistemas de lodo que controlen la hidratación de las arcillas y mantengan la estabilidad reológica.

## **2.4 SISTEMAS DE LODO APLICADOS AL POZO AUCA J-153**

El programa de fluidos de perforación para el pozo Auca J-153 contempla la aplicación de tres sistemas de lodo diferenciados, seleccionados en función de las características litológicas y los requerimientos operativos de cada sección del pozo (Sanchez Mejía & Villavicencio González, 2014).

### **2.4.1 Sistema Nitrato de Calcio (Secciones Superficiales e Intermedia)**

El sistema Nitrato de Calcio es un lodo base agua de alta inhibición, utilizado principalmente en las secciones superficiales e intermedias del pozo. Su formulación incluye nitrato de calcio  $[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2]$  como agente inhibidor principal, el cual aporta iones

de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) que estabilizan las arcillas por intercambio iónico, suprimiendo su tendencia al hinchamiento y dispersión (Martínez Pérez, 2012).

#### **Funciones y ventajas:**

- **Inhibición de arcillas:** Los iones de calcio reducen la hidratación de las arcillas reactivas, evitando el empaquetamiento de la broca y el torque excesivo.
- **Resistencia a contaminantes:** El sistema es menos susceptible a la contaminación por anhidrita o cemento en comparación con los lodos poliméricos convencionales.
- **Alta tasa de penetración (ROP):** La floculación controlada de los sólidos permite una alta velocidad de perforación.

#### **Aditivos principales:**

- **Nitrato de Calcio:** Agente inhibidor (4.0 - 6.0 ppb).
- **Xanplex D (Goma Xántica):** Viscosificante de alto rendimiento (0.5 - 1.5 ppb).
- **Kem-Seal:** Controlador de filtrado API (1.0 - 3.0 ppb).

### **2.4.2 Sistema PER-FLEX (Sección Intermedia)**

El sistema PER-FLEX es un fluido base agua polimérico de alta inhibición, diseñado específicamente para la perforación de lutitas problemáticas y reactivas. Su base química está compuesta por polímeros encapsulantes y poliacrilamidas que forman una película protectora sobre las partículas arcillosas, evitando su dispersión en el fluido y reduciendo drásticamente el torque y el arrastre en trayectorias direccionales. (Baker Hughes, 2022).

El sistema AQUA-DRILL™ de Baker Hughes utiliza poliglicoles de bajo peso molecular que son bajos en toxicidad y fácilmente biodegradables. La combinación de glicol/sal se diseña de manera que el "punto de nube" del sistema se encuentre por debajo de la temperatura de los recortes recién perforados, permitiendo que el glicol forme una capa protectora que minimiza la reacción de los recortes con el agua.

#### **Funciones y ventajas:**

- **Encapsulación química:** Los polímeros encapsulan las arcillas, impidiendo su hidratación e hinchamiento, incluso en presencia de agua de formación de alta salinidad.

- **Estabilidad térmica:** Mantiene sus propiedades reológicas a temperaturas de fondo elevadas.
- **Lubricidad:** Los polímeros reducen el coeficiente de fricción entre la sarta y las paredes del pozo, disminuyendo el torque y el arrastre en la sección tangente del pozo tipo J.
- **Amigable con el medio ambiente:** El sistema es no tóxico, no produce brillo en el agua y utiliza polioles fácilmente biodegradables.

#### **Aditivos principales:**

- **Per-Flex Base:** Polímero encapsulante avanzado (2.0 - 4.0 ppb).
- **Kem-Seal:** Controlador de filtrado (1.0 - 3.0 ppb).
- **Kem-Thin:** Adelgazante polimérico (0.5 - 1.5 ppb).

#### **2.4.3 Sistema BIO-LOSE (Sección Productora)**

El sistema BIO-LOSE es un fluido base agua diseñado específicamente para la perforación de la zona de yacimiento (Drill-In Fluid). Su formulación incluye polímeros orgánicos modificados y carbonato de calcio seleccionado como agente de puenteo, con el objetivo de minimizar el daño a la formación y preservar la permeabilidad de los reservorios productores.

#### **Funciones y ventajas:**

- **Control de filtrado de bajo daño:** Los polímeros y el carbonato de calcio crean un revoque delgado e impermeable sobre las paredes del pozo, minimizando la invasión de filtrado hacia los poros de la arenisca.
- **Puenteo de microfracturas:** El carbonato de calcio de granulometría controlada sella las microfracturas y los poros de la formación, evitando pérdidas de circulación.
- **Removibilidad:** El revoque formado es fácilmente removible durante las operaciones de completación y producción.
- **Optimización para el Campo Auca:** Estudios realizados en el laboratorio de Baker Hughes han permitido optimizar el fluido "Drill-In" para las zonas

productoras del Campo Auca, disminuyendo el daño causado a las formaciones (Morales Hernández, 2014).

#### **Aditivos principales:**

- **Bio-Lose:** Polímero orgánico controlador de filtrado (2.0 - 5.0 ppb).
- **Carbonato de Calcio Seleccionado:** Agente de puenteo y densificante (10.0 - 20.0 ppb).
- **Xanplex D:** Viscosificante de alto rendimiento (0.5 - 1.5 ppb).

## **2.5 HIDRÁULICA Y LIMPIEZA DEL HOYO EN POZOS DIRECCIONALES**

La hidráulica de perforación y la limpieza del hoyo constituyen dos de los pilares fundamentales para el éxito de cualquier operación de perforación, adquiriendo una relevancia crítica en pozos direccionales como el Auca J-153. La adecuada gestión de estos aspectos no solo garantiza la integridad del pozo, sino que también previene costosos tiempos no operativos asociados a problemas de empaquetamiento, pegaduras de tubería y pérdidas de circulación.

### **2.5.1 Desafíos de la limpieza en pozos direccionales**

La perforación de pozos direccionales presenta desafíos adicionales en la limpieza del hoyo en comparación con los pozos verticales. En una trayectoria inclinada, la gravedad desplaza los recortes hacia la parte baja del espacio anular, formando capas o lechos de recortes (cuttings beds) que pueden acumularse y causar empaquetamientos, atascamiento de la sarta e incremento del torque y arrastre (Sun, Zhou, Cui, & Xu, 2026).

Uno de los aspectos más críticos en pozos direccionales es el desarrollo de camas de recortes estacionarias. Cuando la velocidad del fluido es inferior a un valor crítico, se forma una cama de recortes en la parte inferior del pozo, particularmente en ángulos de inclinación entre 20° y 30°, fenómeno que se agrava en la sección tangente de pozos tipo J. Estudios experimentales han demostrado que la velocidad crítica de transporte del fluido anular corresponde a la velocidad mínima para una adecuada limpieza del pozo, estableciéndose que para inclinaciones menores de 35°, la velocidad crítica debe resultar en una concentración de recortes no mayor al 5% en volumen en el espacio anular;

mientras que para ángulos superiores a  $40^\circ$ , corresponde a la velocidad anular mínima donde no se genere una cama estacionaria de recortes (Clavijo Martínez, 2022).

Los principales factores que afectan la limpieza del hoyo en pozos direccionales incluyen:

- **Ángulo de inclinación:** A mayor ángulo, los recortes tienden a asentarse lateralmente, dificultando su transporte. La velocidad anular requerida para pozos desviados con  $50-60^\circ$  de inclinación es aproximadamente el doble de la necesaria para pozos verticales.
- **Velocidad anular:** La velocidad de ascenso del fluido debe ser suficiente para vencer la velocidad de caída de los recortes. Para una limpieza efectiva, la velocidad promedio en el espacio anular debe ser mayor que la velocidad promedio de deslizamiento de los recortes.
- **Reología del lodo:** Un punto de cedencia (YP) alto y una viscosidad plástica controlada mejoran la capacidad de suspensión y arrastre de los sólidos.
- **Rotación de la sarta:** La rotación de la tubería de perforación ayuda a romper los lechos de recortes y a reincorporarlos al flujo principal.
- **Caudal de bombeo:** Un caudal óptimo garantiza una velocidad anular adecuada sin fracturar la formación.
- **Tasa de penetración (ROP):** Un aumento en la ROP resulta en una mayor concentración de recortes en el anular, requiriendo caudales mayores para compensar la generación de sólidos.

### **Mecanismos de transporte de recortes en pozos desviados**

En pozos desviados, el transporte de recortes se caracteriza por tres patrones principales de flujo:

1. **Transporte por dunas:** La arena en la parte superior de la cama se desplaza sobre la arena inmóvil inferior, simulando un movimiento de "salto de rana". La duna completa se desplaza hacia adelante.
2. **Lecho móvil continuo:** Todos los recortes se mueven hacia adelante, aunque a diferentes velocidades, con los granos finos desplazándose a lo largo de la parte baja.

3. **Cama estacionaria:** Se forma una cama gruesa donde solo los recortes en la parte superior avanzan, mientras que el resto permanece estacionario. Este es el modelo menos eficiente de transporte de recortes.

Las camas estacionarias tienden a formarse en ángulos superiores a 65°, mientras que los patrones de duna y lecho móvil continuo son más frecuentes en secciones con ángulos moderados, donde las camas de recortes deben tener la suficiente capacidad de flujo para evitar el deslizamiento y avalanchamiento. Investigaciones recientes han clasificado los patrones de flujo de recortes en cinco tipos: cama estacionaria, duna continua, duna separada, lecho móvil y flujo heterogéneo, estableciendo diagramas de identificación de patrones basados en parámetros adimensionales (Sun, Zhou, Cui, & Xu, 2026).

### 2.5.2 Ecuaciones fundamentales de la hidráulica de perforación

La hidráulica de perforación se rige por las leyes de la mecánica de fluidos, adaptadas a las condiciones no newtonianas de los fluidos de perforación. La normativa API RP 13D (2026) establece los lineamientos para el cálculo de la reología e hidráulica de fluidos de perforación, proporcionando las bases para determinar pérdidas de presión por fricción, densidad de circulación equivalente (ECD), regímenes de flujo y eficiencia de limpieza del hoyo.

- **Velocidad anular (AV)**

La velocidad anular expresa la velocidad lineal con la que el lodo asciende por el espacio anular, medida en pies por minuto (ft/min). Su cálculo se ejecuta mediante la siguiente relación:

$$AV = \frac{24,51 \times Q}{D_{hoyo}^2 - d_{tubería}^2}$$

**Donde:**

$AV$  = Velocidad anular ft/min

$Q$  = Caudal de bombeo (GPM)

$D_{hoyo}$  = Diámetro del hoyo o ID del revestidor (in)

$d_{tubería}$  = Diámetro exterior de la sarta de perforación (in)

La velocidad anular es el parámetro operativo más directamente controlable para influir en la limpieza del hoyo. Sin embargo, en pozos desviados, la velocidad anular requerida para prevenir la formación de camas de recortes es significativamente mayor que en pozos verticales.

- **Velocidad de deslizamiento de recortes**

La velocidad de deslizamiento (slip velocity) es la velocidad terminal de caída de los recortes a través del fluido. Para que el lodo pueda levantar los recortes a la superficie, la velocidad anular debe ser mayor que la velocidad de deslizamiento. La diferencia entre ambas es la velocidad de transporte:

$$\bar{v}_t = \bar{v}_a - \bar{v}_s$$

Donde  $\bar{v}_t$  es la velocidad de transporte,  $\bar{v}_a$  la velocidad anular y  $\bar{v}_s$  la velocidad de deslizamiento.

En espacios anulares inclinados, la velocidad de deslizamiento se descompone en dos componentes:

$$\bar{v}_{sa} = \bar{v}_s \cos \theta_1$$

$$\bar{v}_{sr} = \bar{v}_s \sin \theta_1$$

Donde  $\bar{v}_{sa}$  es la componente axial y  $\bar{v}_{sr}$  la componente radial. A medida que aumenta la inclinación, la componente axial disminuye, llegando a cero en pozos horizontales, mientras que la componente radial alcanza su máximo, empujando los recortes hacia la pared inferior y favoreciendo la formación de camas de recortes. Esta es la razón por la cual las velocidades anulares en pozos direccionales deben ser mayores que en pozos verticales.

- **Velocidad crítica de transporte ( $V_{crit}$ )**

La velocidad crítica de transporte es la velocidad mínima del fluido necesaria para levantar los recortes y prevenir la formación de una cama estacionaria. Existen varios métodos para su determinación:

- **Método de Larsen:** Desarrollado mediante extensos trabajos experimentales, analiza factores como el ángulo de inclinación, la velocidad anular, la reología, el peso del fluido, la excentricidad, el tamaño del recorte, la ROP y la rotación de la tubería. Este método genera tres ecuaciones matemáticas: velocidad de transporte

del recorte, velocidad de deslizamiento equivalente y velocidad de transporte crítica, desarrolladas para pozos con inclinación entre 55° y 90°.

- **Método de Rubiandini:** Basado en el método de Moore para pozos verticales, el modelo empírico de Larsen y datos experimentales de Peden. Considera que el peso del fluido, el ángulo de inclinación y las RPM son los principales factores que afectan el transporte de recortes. Sus conclusiones principales incluyen:
  - Para ángulos de inclinación mayores de 45°, los resultados son comparables al modelo de Larsen.
  - Para ángulos inferiores a 45°, el caudal crítico calculado es menor que el de otros métodos.

Estudios recientes han demostrado la existencia de una "velocidad de flujo crítica" y una "velocidad de rotación crítica". Por debajo de estos umbrales, el transporte de recortes es más difícil en secciones de alta inclinación; por encima de ellos, el mayor desafío se presenta en secciones horizontales.

- **Caudal crítico (Qcrit)**

El caudal crítico se determina a partir de la velocidad mínima requerida para la limpieza:

$$Q_{crit} = 0.04079 \times (d_h^2 - d_p^2) \times V_{min}$$

Donde  $d_h$  es el diámetro del hoyo,  $d_p$  el diámetro de la tubería y  $V_{min}$  la velocidad mínima de transporte. La guía operativa de BP Amoco establece caudales mínimos recomendados según el tamaño del hoyo y el ángulo de inclinación:

*Tabla 1. Caudal mínimo recomendado (GPM) vs tamaño del hoyo y ángulo de inclinación (Clavijo Martínez, 2022)*

| Tamaño del hoyo | 0°-35°  | 35°-55°  | 55°+     |
|-----------------|---------|----------|----------|
| 26"             | 700 GPM | 1250 GPM | -        |
| 17½" - 16"      | 500 GPM | 950 GPM  | 1100 GPM |
| 12¼"            | 400 GPM | 650 GPM  | 750 GPM  |

|     |         |         |         |
|-----|---------|---------|---------|
| 8½" | 300 GPM | 450 GPM | 500 GPM |
| 6½" | 200 GPM | 250 GPM | 350 GPM |

- **Número de Reynolds anular (Re)**

El número de Reynolds anular determina el régimen de flujo en el espacio anular (laminar, transicional o turbulento):

$$Re = \frac{928 \times \rho \times AV \times (D_{hoyo} - d_{tubería})}{PV}$$

Donde:

- $Re$  = Número de Reynolds anular (adimensional)
- $\rho$  = Densidad del lodo (ppg)
- $AV$  = Velocidad anular (ft/min)
- $D_{hoyo} - d_{tubería}$  = Diámetro hidráulico (in)
- $PV$  = Viscosidad plástica (cP)

- **Densidad de Circulación Equivalente (ECD)**

La ECD representa la densidad efectiva del fluido en el espacio anular considerando las pérdidas de presión por fricción. Su monitoreo es crítico en pozos direccionales, ya que un ECD elevado puede exceder el gradiente de fractura de la formación y provocar pérdidas de circulación.

La API RP 13D establece que el cálculo de la ECD es fundamental para determinar la presión hidrostática y las pérdidas por fricción en tuberías y anulares. Investigaciones recientes han demostrado que la ECD fluctúa según el historial de perforación, aumentando con la concentración de recortes durante la perforación y disminuyendo durante la circulación. En pozos con secciones de alta inclinación, la ECD aumenta con el crecimiento de la cama de recortes, por lo que un lodo con alto punto de cedencia o alta resistencia de geles inicial es preferible para una buena limpieza, especialmente cuando se desea mantener la ECD baja.

### 2.5.3 Estrategias de limpieza para el pozo Auca J-153

Para garantizar una limpieza efectiva del hoyo en la trayectoria direccional tipo J del pozo Auca J-153, se establecen las siguientes estrategias operativas basadas en la literatura técnica y las buenas prácticas de la industria (Morán Félix, 2017):

- **Selección de caudales óptimos**

Mantener los caudales de bombeo en los rangos recomendados para asegurar velocidades anulares superiores a la velocidad crítica de limpieza en todas las secciones. La tabla de caudales mínimos proporcionada por BP Amoco (Tabla 2.1) sirve como guía inicial, ajustable según las condiciones específicas del pozo. Para la sección de 12¼", que contiene la sección de construcción de ángulo, se recomienda un caudal mínimo de 650 GPM para ángulos entre 35° y 55°.

- **Control de la reología**

Mantener el punto de cedencia (YP) en valores que maximicen la suspensión y el arrastre de recortes. La reología del lodo afecta la limpieza dependiendo del régimen de flujo:

- **Flujo laminar:** Incrementar la viscosidad del lodo puede mejorar la limpieza, siendo efectivo con una reología de corte bajo y una relación YP/PV alta.
- **Flujo turbulento:** Reducir la viscosidad del lodo ayuda a remover los recortes.

Es crucial evitar la zona de transición entre ambos regímenes, ya que esta es la peor región para operar con propiedades de lodo intermedias. Para pozos desviados, generalmente se prefieren fluidos viscosos en flujo laminar porque permiten alcanzar una alta capacidad de limpieza y mejores características de suspensión cuando la circulación se detiene.

- **Bombeo de píldoras de barrido**

Aplicar píldoras de alta viscosidad (Hi-Vis) y alta densidad (Hi-Dens) antes de viajes de tubería para remover mecánicamente los lechos de recortes en la sección tangente. Las píldoras de barrido son efectivas para interrumpir las camas de recortes y reincorporar los sólidos al flujo principal.

- **Rotación de la sarta**

Mantener una rotación constante en los intervalos de alta inclinación para romper los lechos de recortes. La rotación de la tubería tiene un efecto significativo en la limpieza

del hoyo a altos ángulos de inclinación, ya que rompe las camas de recortes. Velocidades de rotación de 150 RPM han demostrado experimentalmente un incremento dramático en la remoción de recortes.

Estudios han demostrado que la rotación de la sarta mejora significativamente el transporte de recortes, especialmente cuando la tubería realiza un movimiento orbital. Además, la rotación reduce drásticamente la velocidad crítica del fluido requerida para eliminar completamente la cama de recortes estacionaria. Sin embargo, existe un "umbral" de velocidad de rotación por encima del cual no se observa contribución adicional. Para que la rotación sea efectiva en la alteración de las camas de recortes, debe alcanzarse primero este umbral; a grandes ángulos y bajas velocidades, la tubería tiende a deslizarse hacia abajo (Zurita Dávila, 2017).

Un avance tecnológico reciente en este campo es el uso de herramientas agitadoras de lecho de recortes (Cuttings Bed Agitators) como el sistema Rebel de Paradigm. Estas herramientas generan un flujo espiral en el espacio anular que transporta los recortes desde la parte baja del pozo hacia la corriente de flujo, mejorando significativamente la eficiencia de limpieza sin aumentar la ECD y reduciendo el tiempo de circulación.

- **Consideración de la excentricidad de la sarta**

La excentricidad de la tubería tiene un efecto significativo en pozos de alto ángulo debido a su influencia sobre el perfil de flujo. Con mayores ángulos de inclinación, cuando la tubería está en la parte baja del hoyo, la reducción de velocidad dificulta en gran medida el transporte de recortes. Estos efectos son más pronunciados con flujo laminar que con flujo turbulento. En el pozo Auca J-153, donde la sección tangente alcanza 34.67°, la excentricidad debe ser considerada en el diseño hidráulico.

- **Monitoreo en tiempo real**

Realizar un seguimiento continuo de los parámetros de torque, arrastre y presión de bomba para detectar tempranamente la acumulación de recortes y tomar acciones correctivas inmediatas. La incorporación de modelos de simulación en tiempo real para el transporte de recortes permite predecir la formación de camas y optimizar los parámetros de perforación.

Investigaciones recientes en pozos de alcance extendido han demostrado que los lechos de recortes se forman predominantemente en las secciones de alta inclinación, y que la rotación de la sarta introduce una asimetría significativa en la distribución de recortes.

Estos estudios han permitido desarrollar modelos predictivos para la velocidad de desarrollo del lecho de recortes con una precisión superior al 85%.

## 2.6 NORMATIVAS Y ESTÁNDARES APLICABLES

La ingeniería de fluidos de perforación se rige por un conjunto de normativas técnicas establecidas por el American Petroleum Institute (API) y otras organizaciones internacionales, las cuales garantizan la estandarización de los procedimientos de medición, control de calidad, seguridad operativa y gestión ambiental. Para el pozo Auca J-153, la aplicación rigurosa de estas normativas resulta fundamental para asegurar la confiabilidad de los datos obtenidos durante el monitoreo del lodo, la optimización de los parámetros hidráulicos y la minimización de los impactos ambientales asociados a las operaciones de perforación en la Amazonía ecuatoriana.

### 2.6.1 Normativas API para fluidos de perforación

El American Petroleum Institute ha desarrollado un conjunto de prácticas recomendadas (Recommended Practices - RP) y especificaciones (Specifications - SPEC) que constituyen el estándar de referencia a nivel mundial para la industria petrolera. Estas normativas son actualizadas periódicamente para incorporar los avances tecnológicos y las lecciones aprendidas en operaciones de campo.

- **API RP 13B-1: Ensayo de fluidos base agua**

La API RP 13B-1, titulada "Recommended Practice for Field Testing Water-based Drilling Fluids", constituye el documento normativo fundamental para el ensayo de fluidos de perforación base agua en condiciones de campo. Su quinta edición, publicada en enero de 2023, establece procedimientos estandarizados para determinar las siguientes características de los fluidos base agua:

- **Densidad del fluido (peso del lodo):** Medición mediante balanza de lodos presurizada o convencional.
- **Viscosidad y resistencia de geles:** Determinación mediante embudo Marsh y viscosímetro rotacional directo.
- **Filtración:** Pruebas a baja temperatura/baja presión (API) y alta temperatura/alta presión (HPHT).
- **Contenidos de agua, aceite y sólidos:** Determinación por retorta de destilación.

- **Contenido de arena:** Separación y cuantificación mediante tamizado.
- **Capacidad de azul de metileno (MBT):** Medida de la actividad de arcillas presentes en el fluido.
- **pH:** Medición potenciométrica o mediante tiras indicadoras.
- **Alcalinidad y contenido de cal:** Titulación con ácido sulfúrico.
- **Contenido de iones cloruro:** Titulación con nitrato de plata.
- **Dureza total como calcio:** Titulación con EDTA.
- **Concentraciones de sólidos de baja gravedad específica (LGS) y material densificante:** Cálculo a partir de los datos de retorta y densidad.

La implementación de estos procedimientos estandarizados en el taladro SINOPEC 248 garantiza que las mediciones realizadas sean comparables y reproducibles, facilitando la toma de decisiones operativas basadas en datos confiables.

- **API RP 13B-2: Ensayo de fluidos base aceite**

La API RP 13B-2, "Recommended Practice for Field Testing Oil-based Drilling Fluids", establece los procedimientos equivalentes para fluidos de perforación base no acuosa (aceite o sintéticos). Esta norma cubre la determinación de densidad, viscosidad, resistencia de geles, filtración, concentraciones de fluido no acuoso, agua y sólidos, alcalinidad, concentración de cloruros y calcio, estabilidad eléctrica, y filtración HPHT. La versión más reciente de esta norma data de 2023, reflejando la evolución de los fluidos base sintética y su creciente uso en pozos de alta complejidad.

- **API RP 13D: Reología e hidráulica**

La API RP 13D, "Recommended Practice on Rheology and Hydraulics of Oil-well Drilling Fluids", proporciona los fundamentos y procedimientos para el análisis reológico y el diseño hidráulico de sistemas de fluidos de perforación. El objetivo principal de esta práctica recomendada es ofrecer una comprensión básica y orientación sobre la reología e hidráulica de fluidos de perforación para asistir en la perforación de pozos de diversas complejidades, incluyendo pozos de alta presión y temperatura (HPHT), alcance extendido (ERD) y pozos altamente direccionales.

La séptima edición, publicada en mayo de 2023, y la octava edición, programada para 2026, incorporan los avances en modelos reológicos y métodos de cálculo. Entre los aspectos clave que cubre esta norma se incluyen:

1. **Cálculo de pérdidas de presión por fricción:** En tuberías y espacios anulares.
2. **Determinación de la Densidad de Circulación Equivalente (ECD):** Condición de fondo de pozo durante la circulación.
3. **Determinación de regímenes de flujo:** Laminar, transicional o turbulento.
4. **Estimación de la eficiencia de limpieza del hoyo:** Capacidad de transporte de recortes.
5. **Estimación de presiones de pistoneo (swab/surge):** Durante el movimiento de la sarta.
6. **Optimización del sistema circulatorio:** Mejora de la eficiencia de perforación.

- **API RP 13C: Evaluación de sistemas de procesamiento de fluidos**

La API RP 13C, "Recommended Practice on Drilling Fluids Processing Systems Evaluation", establece los criterios para la evaluación y optimización de los equipos de control de sólidos en el sistema de circulación. Esta norma es fundamental para garantizar la eficiencia en la remoción de sólidos perforados, la recuperación de fluido base y la reducción de los costos operativos. Su aplicación en el pozo Auca J-153 asegura que las zarandas vibratorias, desarenadores, deslimadores y centrífugas operen dentro de los parámetros de diseño.

- **API SPEC 13A: Especificación de materiales para fluidos**

La API SPEC 13A, "Specification for Drilling-Fluid Materials", establece los requisitos de calidad para los materiales utilizados en la formulación de fluidos de perforación, incluyendo:

- **Barita (barite):** Material densificante para control de presiones.
- **Hematita (hematite):** Material densificante alternativo de alta densidad.
- **Bentonita (bentonite):** Arcilla viscosificante y controladora de filtrado.
- **Bentonita no tratada:** Para aplicaciones específicas.

- **Bentonita grado OCMA:** Para uso en operaciones costa afuera.
- **Attapulgita y sepiolita:** Arcillas para fluidos salinos.
- **Carboximetilcelulosa (CMC):** Polímero controlador de filtrado.

El cumplimiento de esta especificación garantiza que los aditivos químicos utilizados en el pozo Auca J-153 cumplan con los estándares de calidad requeridos, asegurando un desempeño predecible y confiable.

### 2.6.2 Normativa ambiental ecuatoriana

En el contexto ecuatoriano, las operaciones de perforación están sujetas al cumplimiento de la normativa ambiental establecida en el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (TULAS), que regula el manejo, tratamiento y disposición final de los fluidos de perforación y sus residuos. Esta normativa establece:

- **Límites de descarga:** Parámetros máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos.
- **Manejo de residuos sólidos:** Procedimientos para el manejo de recortes de perforación contaminados con fluidos.
- **Planes de contingencia:** Requisitos para la preparación y respuesta ante derrames o fugas.
- **Monitoreo ambiental:** Obligación de realizar monitoreos periódicos de calidad de agua, suelo y aire en las áreas de operación.

El cumplimiento de esta normativa es supervisado por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) y constituye un requisito indispensable para la obtención y renovación de las licencias ambientales de operación en el Campo Auca.

### 2.6.3 Otras normativas aplicables

Además de las normativas específicas de fluidos, las operaciones de perforación en el pozo Auca J-153 deben cumplir con un conjunto de estándares adicionales que cubren otros aspectos operativos. Entre ellas se incluyen:

- **API SPEC 7K:** Especificación para equipos de perforación y sistemas de circulación.
- **API SPEC Q1:** Sistema de gestión de calidad para la industria petrolera.

- **API RP 54:** Prácticas recomendadas para la seguridad ocupacional en operaciones de perforación.
- **API SPEC 9A:** Especificación para cables de acero utilizados en equipos de elevación.
- **API SPEC 4F:** Especificación para estructuras de taladros de perforación.
- **API SPEC 8C:** Especificación para equipos de elevación y manipulación.
- **API 5D:** Especificación para tubería de perforación (drill pipe).
- **API 5CT:** Especificación para tubería de revestimiento y producción (casing y tubing).

## 2.7 Sistemas de Lodos Aplicados al Pozo Auca J-153

*Tabla 2. Sistema de fluido por sección del pozo (Clavijo Martínez, 2022)*

| Sistema de Fluido        | Sección del Pozo  | Función Principal y Fundamento Técnico                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nitrato de Calcio</b> | Superficial 1 y 2 | Aporta estabilidad inicial y una alta tasa de penetración (ROP). Los iones de calcio ayudan a la floculación controlada de los sólidos perforados y confieren resistencia contra contaminantes cementantes.                                       |
| <b>PER-FLEX</b>          | Intermedia        | Sistema polimérico altamente inhibido. Encapsula químicamente las lutitas reactivas de las Formaciones Tena y Napo, impidiendo su hidratación e hinchamiento, lo que reduce drásticamente el torque, el arrastre y los derrumbes.                 |
| <b>BIO-LOSE</b>          | Productora        | Sistema de fluido de reservorio diseñado para la zona de yacimiento (Hollín). Su formulación sella las microfracturas y crea un revoque ( <i>cake</i> ) fino e impermeable que minimiza la invasión de filtrado, evitando el daño a la formación. |

## **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA**

### **3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN**

La presente investigación se define como un estudio de tipo documental y de carácter descriptivo. Es documental porque se fundamenta en la recopilación, revisión crítica, análisis e interpretación de datos e informes técnicos preexistentes, tales como programas operacionales, registros de perforación e información geológica del Campo Auca. No se realiza una manipulación deliberada de variables en un entorno de laboratorio o de campo, sino que se examina la información técnica real para proponer una optimización técnica viable.

El diseño de la investigación es de corte transversal y no experimental. El enfoque principal está orientado a la validación, ajuste y optimización de las especificaciones de un programa de fluidos de perforación desarrollado previamente por la empresa de servicios Baker Hughes para la operadora Petroamazonas EP, adaptándolo rigurosamente a la trayectoria tipo J del pozo Auca J-153 y a los requerimientos geomecánicos de las formaciones del Oriente Ecuatoriano.

### **3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA**

En los proyectos de investigación documental técnica, la delimitación de la población y la muestra no responde a criterios estadísticos tradicionales, sino a la representatividad del caso de estudio dentro del contexto operativo.

#### **3.2.1. Población**

La población de esta investigación está constituida por el conjunto de todos los pozos con trayectoria direccional tipo J que han sido planificados o perforados en el Campo Auca, perteneciente al Oriente Ecuatoriano.

#### **3.2.2. Muestra**

La muestra es de tipo no probabilística e intencional, seleccionando un único caso de estudio específico: el pozo Auca J-153. Esta elección se justifica por la disponibilidad de un paquete de datos técnicos completos y la pertinencia de su diseño direccional para evaluar la eficiencia de los sistemas de lodo propuestos.

### **3.3. UNIDADES DE ANÁLISIS Y FUENTES DE INFORMACIÓN**

Para el cumplimiento de los objetivos planteados, se definen como unidades de análisis los diferentes parámetros operativos, reológicos e hidráulicos contenidos en la ingeniería de diseño del pozo. Las fuentes de información empleadas son de carácter primario y secundario, detalladas a continuación:

- Programa Direccional del pozo Auca J-153: Proporciona la trayectoria exacta, los ángulos de inclinación, el azimut y los puntos de inicio de desvío (KOP), indispensables para evaluar las fuerzas de fricción y el transporte de ripios.
- Programa de Perforación: Detalla la arquitectura del pozo, los asentamientos de las tuberías de revestimiento (casing) y los desafíos geológicos esperados por sección.
- Programa de Fluidos de Perforación (Baker Hughes / Petroamazonas EP): Documento base que contiene las densidades iniciales, los sistemas de lodo seleccionados (Nitrato de Calcio, PER-FLEX y BIO-LOSE) y las propiedades deseadas.
- Programa de Brocas: Aporta información sobre los tipos de brocas (PDC o triconas), las tasas de penetración estimadas (ROP) y la generación de sólidos en el fluido.
- Programa de Registros Eléctricos: Proporciona datos sobre las litologías de las formaciones, porosidades y características petrofísicas de la zona productora.

### **3.4. MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES**

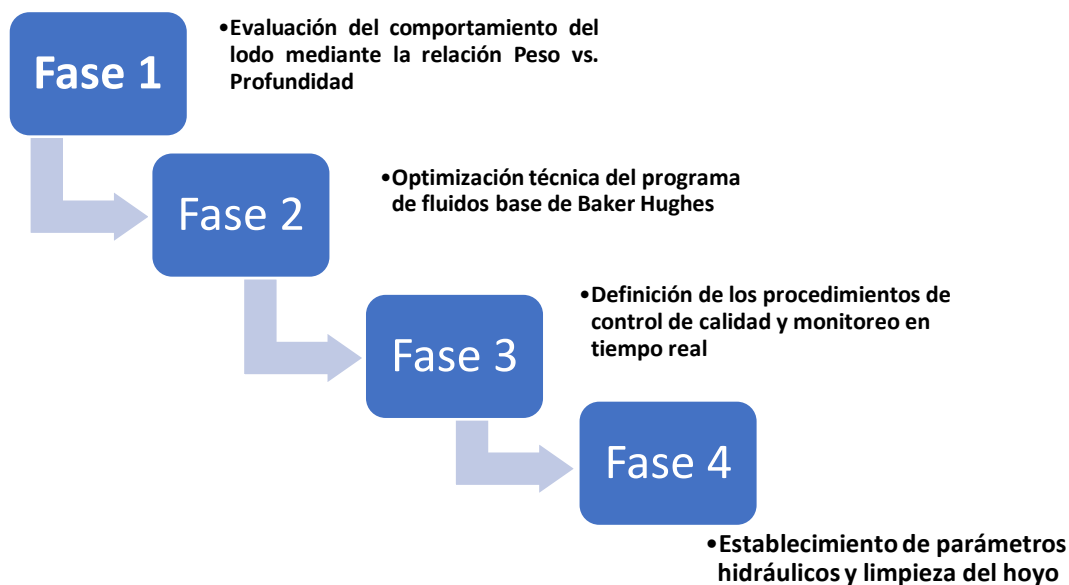
A continuación, se presenta la estructuración interna del problema de investigación mediante la definición de las variables que intervienen en el diseño y optimización del programa de fluidos.

**Tabla 3. Variables e indicadores de análisis (Baker Hughes, 2022)**

| <b>Variable</b>                    | <b>Tipo</b>   | <b>Definición conceptual</b>                                                                                                   | <b>Indicadores / Parámetros</b>                                                      | <b>Fuentes de datos</b>                                                 |
|------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Programa de fluidos de perforación | Independiente | Conjunto de directrices técnicas, químicas y logísticas que determinan el tipo de lodo a usar en cada etapa de la perforación. | Sistema de lodo por sección, concentraciones de aditivos, plan de reúso.             | Programa de fluidos base, programa de perforación                       |
| Selección del sistema de lodo      | Independiente | Elección del fluido base y aditivos según la reactividad y requerimientos de la formación geológica.                           | Nitrato de Calcio (secciones superiores), PER-FLEX (lutitas), BIO-LOSE (productora). | Geología del Campo Auca, especificaciones de Baker Hughes.              |
| Propiedades reológicas y densidad  | Independiente | Características físicas y de flujo del fluido que garantizan el control de presiones y transporte de cortes.                   | Peso del lodo (PPG), viscosidad plástica, punto de cedencia, geles, filtrado API.    | Reportes de laboratorio, ventana de lodo (presión de poro vs fractura). |
| Desempeño operativo                | Dependiente   | Eficiencia de las operaciones en función del tiempo y la mitigación de problemas mecánicos.                                    | Tiempos no operativos (NPT), tasa de penetración (ROP), torque y arrastre.           | Programa de perforación, historial de pozos vecinos.                    |
| Estabilidad del hoyo               | Dependiente   | Capacidad del fluido para mantener la integridad mecánica y química de las paredes del pozo.                                   | Calibre del hoyo (Caliper), ausencia de derrumbes, inhibición de arcillas.           | Programa de registros eléctricos, descripción de lutitas.               |
| Control de pérdidas de circulación | Dependiente   | Capacidad del fluido para evitar la invasión excesiva hacia formaciones permeables o fracturadas.                              | Volumen de lodo perdido, efectividad de píldoras de llenado o de control (LCM).      | Recomendaciones generales, historial de pérdidas del campo.             |

### 3.5. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

El desarrollo práctico de la investigación se estructuró en cuatro fases secuenciales, planificadas para dar respuesta directa a cada uno de los objetivos específicos sin incurrir en complejidades operativas innecesarias.



*Figura 5. Diagrama de flujo del procedimiento metodológico*

*Elaborado por: Kiara Martínez*

#### 3.5.1. Fase 1: Evaluación del comportamiento del lodo mediante la relación Peso vs. Profundidad

En esta etapa se procedió a recopilar los datos geomecánicos del Campo Auca y la arquitectura del pozo Auca J-153. El enfoque principal consistió en la confrontación de la densidad del lodo propuesta frente a la ventana operativa del pozo (presión de poro y gradiente de fractura).

Para definir las profundidades de asentamiento de las zapatas correspondientes a las cuatro secciones del pozo —superficial 1, superficial 2, intermedia y productora— se consideraron los principales topes formacionales identificados en la trayectoria. La Formación Ortegaaza se ubicó a 5 902 ft MD, Tiyuyacu a 6 904 ft MD, Tena a 8 834 ft

MD, Napo a 9 595 ft MD y Hollín a 10 829 ft MD. Estos valores sirvieron como referencia para establecer los intervalos de perforación y estructurar la representación gráfica de la densidad del lodo, expresada en libras por galón (ppg), en función de la profundidad medida (MD) y la profundidad vertical verdadera (TVD).

La gráfica permite verificar que la densidad del lodo diseñada se mantenga por encima del gradiente de presión de poro, con el fin de evitar el ingreso no controlado de fluidos de formación al pozo, conocido como influjo o kick. Al mismo tiempo, debe permanecer por debajo del gradiente de fractura para prevenir la ruptura de la formación y las consecuentes pérdidas de circulación.

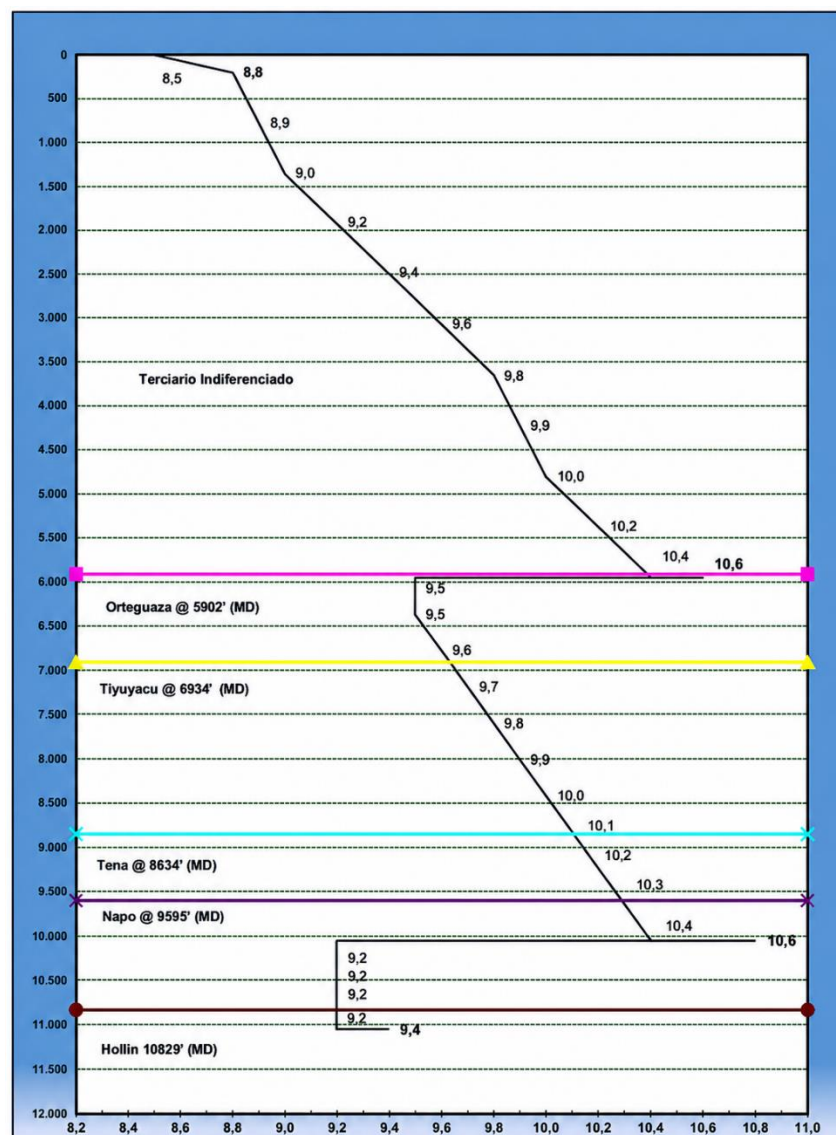


Figura 6. Curva Peso del Lodo vs Profundidad (Baker Hughes, 2022)

La figura 6 presenta el perfil de densidad del fluido de perforación en función de la profundidad medida del pozo. El eje horizontal (X) representa la densidad o peso del lodo, expresada en libras por galón (ppg), con un intervalo aproximado de 8,2 a 11,0 ppg.

Por su parte, el eje vertical (Y) corresponde a la profundidad medida (MD), expresada en pies (ft), cuyo valor aumenta en sentido descendente desde la superficie hasta aproximadamente 12 000 ft, de acuerdo con la convención utilizada en los perfiles de pozos.

La línea continua de color negro representa la variación programada de la densidad del lodo a lo largo de las distintas secciones perforadas. Asimismo, las líneas horizontales de colores señalan los principales topos formacionales considerados en el diseño: Ortegua a 5 902 ft MD, Tiyuyacu a 6 904 ft MD, Tena a 8 834 ft MD, Napo a 9 595 ft MD y Hollín a 10 829 ft MD. Esta representación permite relacionar los cambios en el peso del lodo con las formaciones geológicas atravesadas y verificar la adecuación del programa hidráulico para mantener la estabilidad del pozo y el control de las presiones durante la perforación.

La optimización de los fluidos de perforación exige un análisis riguroso de cómo la densidad del lodo responde a los cambios litológicos y mecánicos a medida que se profundiza en el subsuelo. En el diseño operativo del pozo direccional Auca J-153, que toma como objetivo productivo la arenisca Hollín Inferior, se ha establecido una planificación que subdivide el comportamiento del lodo en cuatro fases operativas bien diferenciadas. Cada una de estas secciones responde directamente a las necesidades de estabilidad de las paredes del pozo, el control de las presiones de las formaciones y la minimización de problemas operacionales comunes en la cuenca oriente ecuatoriana.

A continuación, se detalla el análisis del comportamiento de la densidad del lodo planificado frente a las profundidades de diseño para cada fase del hoyo:

1. Hoyo conductor de 26 pulgadas (0 pies - 200 pies) Para el inicio de las operaciones en los niveles más someros, correspondientes a la formación Terciario Indiferenciado, se contempla el uso de un sistema base agua tipo gel polímero. El comportamiento del peso del lodo en este tramo se caracteriza por un rango operativo bajo, estimado entre 8.5 lpg y 8.8 lpg. El objetivo primordial de esta densidad es proveer la presión hidrostática suficiente para soportar los sedimentos no consolidados y mitigar riesgos someros como la inundación de la plataforma. No obstante, el programa técnico de perforación faculta al ingeniero de fluidos a elevar este peso de manera paulatina hasta un techo de 9.0 lpg en caso de que las condiciones mecánicas del agujero o la inestabilidad de las arenas superficiales lo demanden.

2. Hoyo superficial de 16 pulgadas (200 pies - 5952 pies) Al ingresar a la sección superficial principal, donde se atraviesan secuencias de las formaciones Chalcana (superior e inferior) y Orteguaza, la ventana de densidad experimenta su primer incremento significativo debido a la complejidad de las arcillas y lutitas reactivas de la zona. El lodo planificado opera en un rango que va desde los 8.9 lpg hasta los 10.4 lpg en la parte final de la perforación. Este incremento progresivo del peso del lodo es fundamental para contrarrestar la presión de poro de las formaciones arcillosas y evitar fallas por empaquetamiento o el efecto de "gumbo shale", recurrente en Chalcana. Adicionalmente, el programa estipula que previo a las maniobras de viaje de tubería y asentamiento del revestidor de 13 3/8 pulgadas, el peso del lodo se debe densificar intencionalmente entre 10.6 lpg y 10.8 lpg. Esta densidad superior actúa como un margen de seguridad mecánica para estabilizar el pozo abierto durante el tiempo en que no haya circulación activa.
3. Hoyo intermedio de 12 1/4 pulgadas (5952 pies - 10049 pies) La sección intermedia representa uno de los desafíos mecánicos y químicos más severos del pozo, ya que se atraviesan las formaciones Orteguaza, Tiyuyacu (conocida por sus secciones de conglomerados y alta inestabilidad), Tena y la parte superior de Napo. El comportamiento de la densidad inicia con un valor base de 9.5 lpg al salir del zapato anterior. Conforme se profundiza y se exponen las secciones arcillosas propensas al hinchamiento e hidratación, el peso del lodo se incrementa gradualmente hasta alcanzar un valor de 10.4 lpg hacia el final de la fase de perforación. Al igual que en la fase anterior, para mitigar los riesgos de colapso de las paredes o atrapamientos mecánicos durante el viaje para bajar el revestidor de 9 5/8 pulgadas, la densidad del fluido se eleva a un valor preventivo de 10.8 lpg. Mantener este perfil de peso ayuda a compensar la presión hidrostática frente a formaciones problemáticas como la Caliza M2 donde se asienta el zapato.
4. Hoyo de producción de 8 1/2 pulgadas (10049 pies - 11042.53 pies) En la sección productora profunda se emplea un lodo especializado para proteger las zonas de interés (arenas U, T y Hollín). Aunque los documentos generales plantean mantener la densidad controlada en torno a los 10.3 lpg (especialmente al pasar tramos arcillosos pesados como Tena o las intercalaciones de Napo), el enfoque principal en este tramo cambia hacia la optimización de la densidad para controlar la presión equivalente de circulación (ECD). Un peso de lodo mal calculado en

esta fase podría exceder fácilmente el gradiente de fractura de las arenas productoras, provocando pérdidas severas de circulación o daño por invasión de filtrado al yacimiento.

Como síntesis de los requerimientos mecánicos y las variaciones operativas analizadas a lo largo de la trayectoria del pozo, se presenta un cuadro técnico consolidado. Este compendio estructural vincula las dimensiones geométricas de cada sección con los rangos específicos de densidad y los sistemas químicos formulados para contrarrestar los desafíos litológicos de cada formación atravesada en el Campo Auca:

*Tabla 4. Resumen de parámetros de fluidos y arquitectura del pozo Auca J-153 (Baker Hughes, 2022)*

| <b>Fase del Hoyo (pulgadas)</b> | <b>Intervalo de Profundidad (pies MD)</b> | <b>Rango de Densidad Planificado (lpg)</b> | <b>Formaciones Principales Atravesadas</b>      | <b>Tipo de Sistema de Fluido Utilizado</b> |
|---------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 26"                             | 0 – 200                                   | 8.5 – 8.8 (Máx. 9.0)                       | Terciario Indiferenciado                        | Gel Polímero                               |
| 16"                             | 200 – 5952                                | 8.9 – 10.4 (10.6 - 10.8 preventivo)        | Chalcana Superior, Chalcana Inferior, Orteguaza | Gel Polímero / Nitrato de Calcio           |
| 12 1/4"                         | 5952 – 10049                              | 9.5 – 10.4 (10.8 preventivo)               | Orteguaza, Tiyyacu, Tena, Napo                  | Gel Polímero / Nitrato de Calcio           |
| 8 1/2"                          | 10049 – 11042.53                          | 10.3 constante                             | Napo (Arenas U, T), Hollín Inferior             | Base Agua Polimérico Inhibido (Bio-Lose)   |

### **3.5.2. Fase 2: Optimización técnica del programa de fluidos base**

Esta etapa se enfoca en el análisis, desglose y adaptación de las formulaciones químicas propuestas por la empresa de servicios, complementado con la ingeniería de procesos requerida para el manejo físico del lodo. El propósito es transformar un programa genérico en una secuencia de ingeniería adaptada a la geometría y desafíos geológicos reales del pozo Auca J-153.

- **Desglose químico y dosificación de los sistemas de lodo**

Para asegurar la estabilidad del pozo en cada formación, se analizó la composición química de los tres sistemas de fluidos seleccionados, evaluando la función técnica y concentración recomendada de sus aditivos principales:

- **Sistema Nitrato de Calcio (Secciones Superficiales e Intermedia):** Formulado principalmente para mitigar los problemas de reactividad de las arcillas superiores y tolerar la presencia de contaminantes como la anhidrita sin degradar sus propiedades.
  - *Nitrato de Calcio:* Actúa como el agente inhibidor principal, aportando iones de calcio que estabilizan las arcillas mecánicamente por intercambio iónico y suprimen su tendencia al hinchamiento. Se maneja en concentraciones variables según la severidad de la sección.
  - *Xanplex D / Goma Xántica:* Viscosificante de alto rendimiento que incrementa la capacidad de acarreo de recortes en el espacio anular, manteniendo valores de geles adecuados para evitar el asentamiento de ripios durante los periodos de bomba apagada.
  - *Kem-Seal:* Polímero diseñado para el control de filtrado API a altas temperaturas, sellando los poros de la formación y reduciendo la invasión de agua hacia las zonas arcillosas.
- **Sistema PER-FLEX (Sección Intermedia - Alternativa/Optimización):** Un sistema polimérico altamente inhibido, diseñado de manera específica para la perforación de lutitas problemáticas y reactivas.
  - *Per-Flex Base:* Mezcla polimérica que encapsula los ripios de perforación y las paredes del hoyo expuestas, evitando la dispersión de las arcillas en el fluido y ayudando a reducir de manera drástica el torque y arrastre mecánico en trayectorias direccionales.
- **Sistema BIO-LOSE (Sección Productora):** Fluido base agua especialmente diseñado para la perforación del yacimiento (Arenas U, T y Hollín), enfocado en la minimización del daño a la formación activa.
  - *Bio-Lose:* Almidón modificado o polímero especializado que actúa como el principal controlador de filtrado en la zona de pago. Su función es crear

un revoque (mud cake) delgado, impermeable y de fácil remoción posterior, sellando microfracturas y previniendo la pérdida de fluidos hacia los poros productivos.

*Tabla 5. Matriz de aditivos, funciones y concentraciones típicas por sistema (Baker Hughes, 2022)*

| <b>Aditivo</b>                  | <b>Función Técnica</b>                                                                                                                           | <b>Concentración Recomendada (ppb)</b> | <b>Sección de Aplicación</b>                                      |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| <b>Nitrato de Calcio</b>        | Inhibidor principal de arcillas por aporte de iones de calcio; proporciona estabilidad frente a la presencia de anhídrita.                       | 4.0 – 6.0                              | Hoyo superficial de 16" e Intermedio de 12 1/4"                   |
| <b>Xanplex D (Goma Xántica)</b> | Viscosificante primario; incrementa el poder de suspensión de ripios en el espacio anular y mejora los geles con la bomba apagada.               | 0.5 – 1.5                              | Hoyo Conductor de 26", Superficial de 16" e Intermedio de 12 1/4" |
| <b>Kem-Seal</b>                 | Polímero sintético para el control de filtrado API a altas temperaturas; reduce la invasión de agua hacia las formaciones arcillosas.            | 1.0 – 3.0                              | Hoyo superficial de 16" e Intermedio de 12 1/4"                   |
| <b>Per-Flex Base</b>            | Polímero de encapsulación avanzado; sella mecánicamente las lutitas reactivas expuestas, reduciendo el torque, el arrastre y la ROP.             | 2.0 – 4.0                              | Hoyo Intermedio de 12 1/4" (Fase de lutitas problemáticas)        |
| <b>Bio-Lose</b>                 | Polímero orgánico modificado; actúa como controlador de filtrado premium de bajo daño para proteger la permeabilidad de la formación productora. | 2.0 – 5.0                              | Hoyo de Producción de 8 1/2" (Arenas U, T y Hollín)               |

- **Metodología matemática para el cálculo volumétrico de fluidos**

Una operación fundamental de la ingeniería de fluidos consiste en determinar con exactitud los volúmenes de lodo requeridos para llenar el sistema circulatorio. Esto asegura un control adecuado de las presiones y evita la falta de fluidos en superficie. El

procedimiento matemático para el cálculo de los volúmenes se rige bajo las siguientes ecuaciones estandarizadas de la industria petrolera:

- **Capacidad de tuberías, revestidores y hoyo abierto (Cap):** Determina el volumen interno por unidad de longitud basándose en el diámetro interno correspondiente.

$$Cap = \frac{D^2}{1029,4}$$

Donde D representa el diámetro interno del casing o el diámetro nominal de la broca en pulgadas.

- **Capacidad del espacio anular (Cap<sub>anular</sub>):** Permite conocer el volumen que se aloja entre el diámetro exterior de una tubería y el diámetro internos del hoyo o del revestidor exterior.

$$Cap_{anular} = \frac{D_{ext}^2 - d_{int}^2}{1029,4}$$

Donde D<sub>ext</sub> es el diámetro del hoyo abierto o ID del revestidor, y d<sub>int</sub> es el diámetro externo de la tubería de perforación (drill pipe) o collares (drill collars).

- **Volumen total del sistema (V<sub>total</sub>):** Es la sumatoria de todos los volúmenes parciales del pozo más el factor de reserva en los tanques de superficie.

$$V_{total} = (Cap \times L) + (Cap_{anular} \times L_{anular}) + V_{superficie} + V_{contingencia}$$

Donde L representa la longitud del tramo analizado en pies, V<sub>superficie</sub> es el volumen operativo en las piscinas del taladro y V<sub>contingencia</sub> es el margen de seguridad para cubrir pérdidas por filtración o atrapamiento en los equipos de control de sólidos.

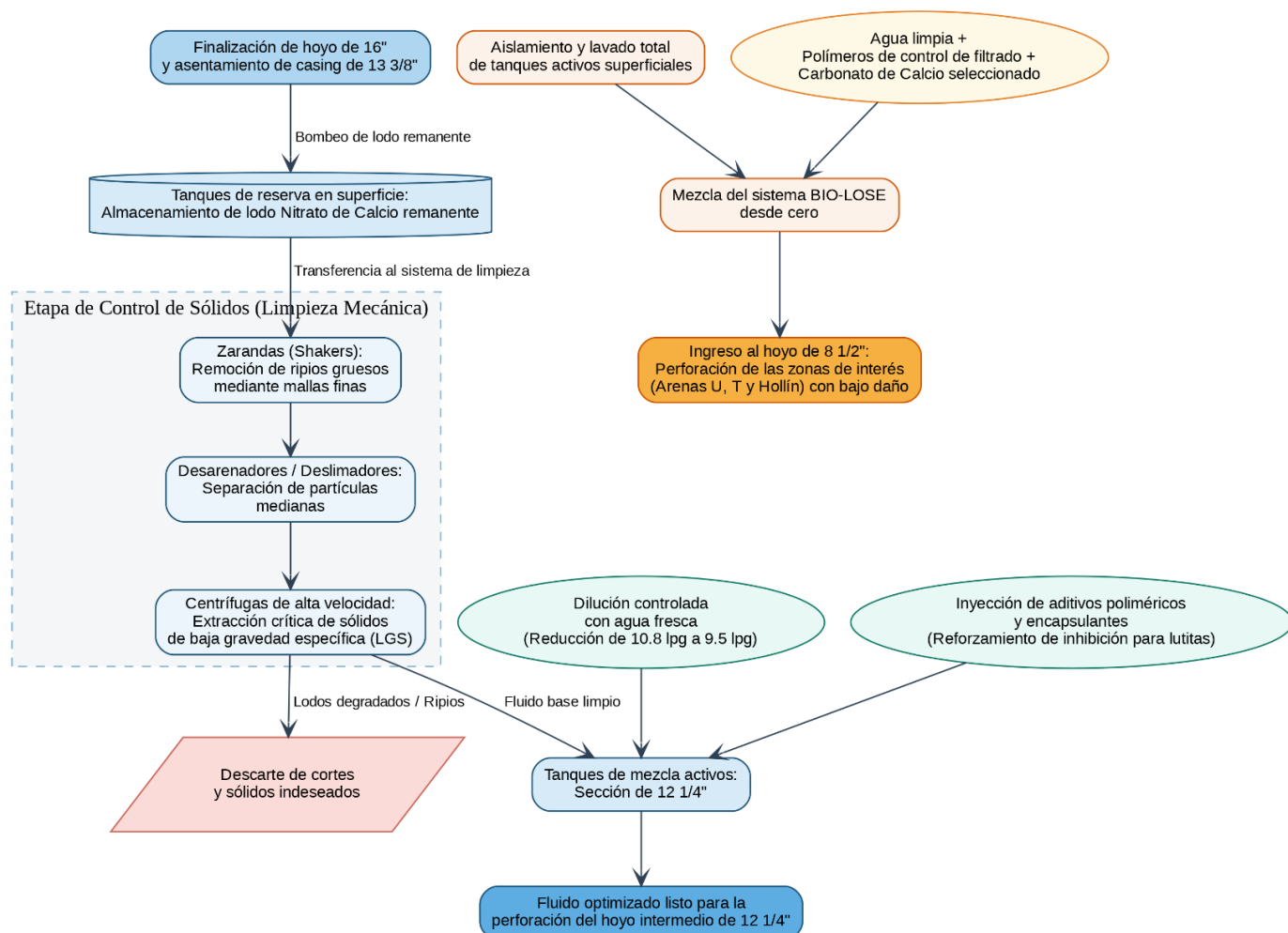
Para el cálculo final de los volúmenes del pozo Auca J-153, los diámetros de broca (26", 16", 12 1/4" y 8 1/2") y las especificaciones de los revestidores de 20", 13 3/8", 9 5/8" y

7" se extrajeron fielmente de la sección de Arquitectura del Pozo del Programa de Perforación de Baker Hughes.

- **Secuencia operacional del plan de reúso de fluidos**

Para minimizar el impacto ambiental y reducir los costos por consumo de aditivos químicos en el Campo Auca, la metodología establece un plan secuencial de transferencia y reúso del lodo entre las distintas secciones del pozo. Este proceso operativo se estructuró de la siguiente manera:

- **Tratamiento al finalizar la sección de 16 pulgadas:** Al alcanzar la profundidad de asentamiento del revestidor de 13 3/8", el lodo Nitrato de Calcio remanente en el sistema no se descarta. Se bombea hacia los tanques de almacenamiento en superficie para iniciar una fase de acondicionamiento mecánico intensivo.
- **Acondicionamiento y control de sólidos:** El fluido almacenado se somete a un proceso de limpieza a través de los equipos de control de sólidos del taladro (shakers con mallas finas, desarenadores y centrífugas). El objetivo es reducir el porcentaje de sólidos de baja gravedad específica (LGS) acumulados durante la perforación, los cuales afectan la reología y aumentan el peso del lodo de forma indeseada.
- **Dilución y conversión química para la sección de 12 1/4 pulgadas:** Una vez limpio mecánicamente, el volumen de lodo recuperado se transfiere a los tanques activos para la sección intermedia. Debido a que el lodo requiere un ajuste de densidad (bajando de los valores de viaje de 10.8 lpg a un peso inicial de 9.5 lpg), se ejecuta una dilución controlada con agua fresca. Posteriormente, se dosifican nuevos polímeros encapsulantes y poliacrilamidas para reforzar la inhibición química necesaria frente a las lutitas de Ortegúaza y Tiyuyacu.
- **Aislamiento del sistema productivo (Sección de 8 1/2 pulgadas):** La secuencia operativa estipula que el lodo de las secciones superiores no debe mezclarse con el sistema de la sección productora. Debido a las exigencias de bajo daño a la formación de las arenas U, T y Hollín, el sistema BIO-LOSE se prepara desde cero en tanques previamente lavados y aislados, garantizando que no existan contaminantes ni sólidos abrasivos heredados de las fases previas.



*Figura 7. Diagrama de flujo del plan de transferencia y reúso de fluidos inter-secciones.*

### 3.5.3 Fase 3. Definición de los procedimientos de control de calidad y monitoreo en tiempo real

Esta etapa establece los mecanismos técnicos de supervisión continua para asegurar que las propiedades del lodo de perforación se mantengan dentro de los umbrales de diseño aprobados por Baker Hughes para el pozo Auca J-153. En un pozo de trayectoria tipo J, la detección temprana de anomalías físicas o químicas evita desviaciones severas que impactan directamente en la estabilidad mecánica del hoyo y en los tiempos no operativos.

- **Protocolo operativo de monitoreo basado en estándares API**

Para garantizar la precisión de las lecturas analíticas en la locación del taladro SINOPEC 248, se determina que todos los ensayos de campo deben ejecutarse bajo los lineamientos de la normativa API RP 13B-1. El monitoreo en tiempo real no se limita al registro pasivo de datos, sino que funciona como un sistema de alerta temprana. Las propiedades clave se clasifican según su impacto directo en la operación:

- **Control de Presiones e Hidráulica:** Mediciones constantes de densidad mediante la balanza presurizada para mitigar influjos o pérdidas.
- **Capacidad de Transporte y Limpieza:** Evaluación del perfil reológico (viscosidad plástica, punto de cedencia y resistencia de geles) utilizando el viscosímetro rotacional de campo (Fann 35), asegurando que los ripios no se decanten en la sección inclinada del pozo.
- **Integridad Química y Filtración:** Registro del filtrado API y el análisis de químicos latentes (concentración de calcio, cloruros y pH) para mantener activa la inhibición de las lutitas de las formaciones Chalcana, Ortegua y Tena.



*Figura 8. Equipos estandarizados de laboratorio para el monitoreo de propiedades reológicas y densidad (Balanza presurizada y Viscosímetro rotacional) (Fajardo Vélez & Rojas Quimbaya, 2016)*

Como base estructural para el control operativo, se establece la regularidad con la que el personal técnico debe ejecutar y reportar cada ensayo de laboratorio en las diferentes secciones del pozo:

*Tabla 6. Cronograma y frecuencias de monitoreo para propiedades del fluido de perforación (Baker Hughes, 2022)*

| <b>Propiedad Crítica</b>                | <b>Equipo de Medición Estándar</b> | <b>Frecuencia en Hoyo Abierto</b> | <b>Justificación Técnica en el Pozo Auca J-153</b>                                  |
|-----------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Densidad del lodo</b>                | Balanza presurizada API            | Cada 15 - 30 minutos              | Control de la ventana operativa frente a la presión de poro de arcillas.            |
| <b>Viscosidad de embudo</b>             | Embudo Marsh y jarra graduada      | Cada 30 minutos                   | Diagnóstico rápido y cualitativo de cambios abruptos en el lodo.                    |
| <b>Viscosidad Plástica (PV)</b>         | Viscosímetro rotacional de paletas | Cada 4 - 8 horas                  | Control del contenido de sólidos finos y eficiencia de las centrífugas.             |
| <b>Punto de Cedencia (YP)</b>           | Viscosímetro rotacional de paletas | Cada 4 - 8 horas                  | Garantía del esfuerzo de corte para levantar ripios en la sección tipo J.           |
| <b>Resistencia de Geles (10s / 10m)</b> | Viscosímetro rotacional de paletas | Cada 4 - 8 horas                  | Capacidad de suspender recortes durante las conexiones de tubería.                  |
| <b>Filtrado API / HPHT</b>              | Prensa de filtrado estándar / HPHT | Cada 12 horas o por sección       | Minimización del espesor del revoque para evitar pegaduras por presión diferencial. |
| <b>Contenido de Sólidos y Agua</b>      | Kit de retorta de fluidos          | Diaria o por fase de interés      | Evaluación del porcentaje de sólidos de baja gravedad específica (LGS).             |
| <b>pH y Análisis Químico</b>            | Tiras indicadoras / Potenciómetro  | Cada 4 - 12 horas                 | Monitoreo de la concentración de Nitrato de Calcio e inhibición activa.             |

Para asegurar el registro sistemático y el control de calidad de cada una de las propiedades descritas en el cronograma de monitoreo, se adopta el formato oficial de reporte diario de fluidos provisto por la empresa de servicios en la locación. Este documento permite

asentar en tiempo real los valores medidos en cada turno de trabajo, sirviendo como el instrumento de auditoría técnica que avala el cumplimiento de los rangos de diseño FIG

| PAIS (COUNTRY):                   |                         | ECUADOR | FECHA EVALUACIÓN (EVALUATION DATE):                           | 7/15/2013 | NOMBRE DEL POZO: (WELL NAME): |  |
|-----------------------------------|-------------------------|---------|---------------------------------------------------------------|-----------|-------------------------------|--|
| CLIENTE (CUSTOMER):               | <--- Sin Selección ---> |         | REPRESENTANTE DEL CLIENTE: (CUSTOMER REPRESENTATIVE):         |           |                               |  |
| LINEA DE PRODUCTO (PRODUCT LINE): | <--- Sin Selección ---> |         | REPRESENTANTE DE BAKER HUGHES: (BAKER HUGHES REPRESENTATIVE): |           |                               |  |

**EVALUACION DEL SERVICIO PRESTADO POR BAKER HUGHES. (EVALUATION OF SERVICES RENDERED BY BAKER HUGHES)**

Necesitamos algunos minutos de su tiempo para responder algunas preguntas que nos ayudaran a evaluar y mejorar nuestros servicios.  
Please take a minute of your time to reply to some questions which will help us to evaluate and improve our services.

Por favor marque "Si/No" para determinar si las siguientes preguntas son Conformes, las preguntas no conformes deben ser comentadas para tomar acciones correctivas.  
Please mark "Yes/No" to determine if the following questions are conforming, the No Conforming questions have to be commented to take corrective actions.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Si/Yes                   | No                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <b>SALUD Y SEGURIDAD</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                          |                          |
| 1 ¿SE REALIZARON LOS ANÁLISIS DE RIESGO PREVIOS AL TRABAJO (ANÁLISIS DE TRABAJO SEGURO - ATS) Ó SE PARTICIPÓ EN LA REUNIÓN DE SEGURIDAD DE PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO?<br>WERE RISK ASSESSMENTS CONDUCTED PRIOR TO WORK (JOB SAFETY ANALYSIS - JSA) OR WAS BH PERSONNEL INVOLVED IN THE SAFETY MEETING WORK PLANNING? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2 ¿EL TRABAJO SE REALIZÓ DE MANERA SEGURA, USANDO LOS EPP, SIGUIENDO LOS ESTÁNDARES Y PROCEDIMIENTOS DE HSE?<br>WAS THE WORK DONE SAFELY, USING THE PPE, FOLLOWING THE STANDARDS AND PROCEDURES OF HSE?                                                                                                              | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3 ¿EL PERSONAL DE BAKER HUGHES PARTICIPÓ EN LOS PROGRAMAS DE HSE DE LA LOCACIÓN COMO OBSERVACIONES DE SEGURIDAD, DIVULGACIÓN DE ALERTAS O SIMULACROS?<br>DID BH PERSONNEL PARTICIPATED IN HSE PROGRAMS OF THE LOCATION AS SECURITY OBSERVATIONS, DISSEMINATION OF ALERTS OR DRILLS?                                  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <b>COMUNICACION</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                          |                          |
| 4 ¿SE DISCUTIÓ EL PROGRAMA DE TRABAJO, LAS PRUEBAS Y ACTIVIDADES DE ALISTAMIENTO ANTES DEL INICIO DE LAS OPERACIONES?<br>WERE THE WORK PROGRAM, TESTING AND READINESS ACTIVITIES DISCUSSED BEFORE THE START OF OPERATIONS?                                                                                           | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5 ¿LOS CANALES DE COMUNICACIÓN AL LLENAR, DURANTE Y AL FINALIZAR LA OPERACIÓN FUERON EFICIENTES Y APROPIADOS?<br>WAS KEPT COMMUNICATION IN A EFFICIENT AND APPROPRIATE WAY AT THE BEGINNING, DURING AND AFTER THE OPERATION ACTIVITIES?                                                                              | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <b>DESEMPEÑO DEL SERVICIO</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                          |                          |
| 6 ¿EL APRECIÓ PROFESIONAL, EL SOPORTE TECNICO Y CAPACIDAD DE RESPUESTA DE NUESTRO PERSONAL?<br>DID BH PERSONNEL GIVE YOU PROFESSIONAL TECHNICAL SUPPORT AND HAVE GOOD CAPACITY OF RESPONSE?                                                                                                                          | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 7 ¿SE CUMPLIÓ CON EL OBJETIVO DEL TRABAJO PARA EL CUAL FUE CONTRATADO BAKER HUGHES?<br>DID BAKER HUGHES MEET THE OBJECTIVE OF THE WORK FOR WHICH WE WAS HIRED?                                                                                                                                                       | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 8 ¿LOS REPORTES Y DOCUMENTACIÓN ESTÁN COMPLETOS Y FUERON ENTREGADOS A TIEMPO?<br>ARE THE REPORTS AND DOCUMENTATION COMPLETE AND WERE DELIVERED ON TIME?                                                                                                                                                              | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 9 ¿RECOMENDARÍA LOS PRODUCTOS/SERVICIOS DE BAKER HUGHES PARA UN NUEVO TRABAJO? Si su respuesta es No, por favor justifique en comentarios.<br>WOULD YOU RECOMMEND PRODUCTS / SERVICES FROM BAKER HUGHES FOR A NEW JOB? If your answer is no, please justify in comments.                                             | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <b>USO DEL TIEMPO</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                          |                          |
| 10 ¿LA EJECUCIÓN DE LAS OPERACIONES FUE REALIZADA DE ACUERDO A LOS TIEMPOS ACORDADOS?<br>DID OPERATIONAL ACTIVITIES PERFORM ACCORDING TO THE AGREED TIME?                                                                                                                                                            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

El Total se obtiene al sumar cada respuesta positiva (Si), equivalente al 10% por pregunta / The total is obtained by summing each positive answer (Yes), equivalent to 10% per question.

TOTAL: | %

COMENTARIOS/COMMENTS:

INCIDENTE (INCIDENT): ☐ SI/YES ☐ NO NPT  0 | Hrs

MUCHAS GRACIAS POR DARNOS SU OPINION, SUS COMENTARIOS SON IMPORTANTES PARA NOSOTROS.  
ESTAMOS TRABAJANDO ARDUAMENTE PARA ASEGURARLE A NUESTROS CLIENTES LA CALIDAD DE NUESTROS PRODUCTOS Y SERVICIOS

Figura 9. Formato estandarizado de reporte diario de propiedades del fluido Baker Hughes (Baker Hughes, 2022)

- **Matriz lúdica de contingencias y acciones correctivas inmediatas**

La efectividad del control de calidad radica en la velocidad de respuesta ante desviaciones de los parámetros requeridos. Para evitar la improvisación en el taladro, la metodología incorpora una guía de acciones correctivas inmediatas diseñada específicamente para mitigar los problemas potenciales identificados en la prognosis geológica del Campo Auca:

*Tabla 7. Matriz de acciones correctivas ante desviaciones de parámetros de diseño (Baker Hughes, 2022)*

| <b>Desviación Detectada</b>                                                 | <b>Causa Probable en el Campo Auca</b>                                                                                           | <b>Acción Correctiva e Ingeniería Química Aplicada</b>                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Incremento abrupto de la viscosidad plástica y densidad.</b>             | Incorporación excesiva de sólidos reactivos finos procedentes de las lutitas de Chalcana o Orteguaza (acumulación de LGS).       | Activar al 100% las centrífugas de alta velocidad, realizar diluciones controladas con agua fresca y dosificar dispersantes poliméricos según las recomendaciones de Baker Hughes.        |
| <b>Caída del punto de cedencia y geles por debajo del mínimo de diseño.</b> | Dilución excesiva durante tratamientos mecánicos o degradación térmica de los polímeros.                                         | Dosificar paulatinamente viscosificante de alta eficiencia Xanplex D (Goma Xántica) a través del embudo de mezcla para recuperar la capacidad de acarreo de ripios.                       |
| <b>Aumento del volumen de filtrado API y revoque grueso esponjoso.</b>      | Contaminación química del sistema o degradación de los agentes controladores de filtrado por temperatura.                        | Incorporar polímero controlador de filtrado Kem-Seal en las secciones intermedias, o Bio-Lose si la desviación ocurre durante la perforación de la zona productora (8 1/2").              |
| <b>Reducción drástica del volumen en los tanques activos de superficie.</b> | Pérdida de circulación por apertura de microfracturas o zonas de alta permeabilidad en las calizas de Napo o arenas de Tiyuyacu. | Reducir el caudal de bombeo dentro de los límites seguros, bombear píldoras de material de pérdida de circulación (LCM) de granulometría fina a media y evaluar el asentamiento del lodo. |
| <b>Incremento del pH y floculación del lodo base agua.</b>                  | Contaminación por cemento durante las operaciones de perforación de zapatas o tapones.                                           | Tratar químicamente el sistema mediante la adición controlada de bicarbonato de sodio para precipitar los iones de calcio libres y restaurar las propiedades reológicas normales.         |

#### **3.5.4. Optimización de los parámetros hidráulicos y limpieza del hoyo en trayectorias direccionales**

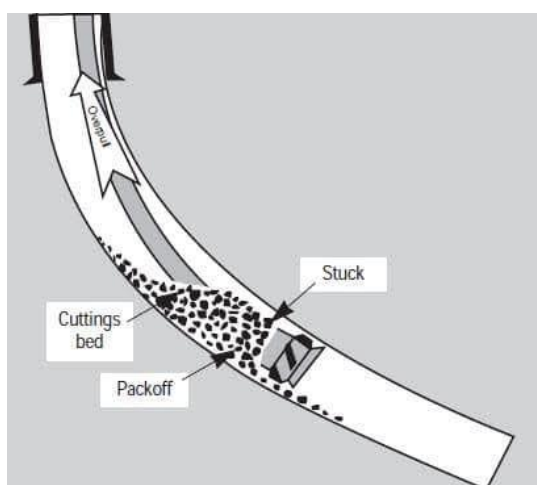
Esta última etapa metodológica aborda la interacción directa entre la reología de los sistemas de lodo diseñados por Baker Hughes y el perfil geométrico tridimensional del pozo Auca J-153. Perforar un pozo con trayectoria direccional tipo J implica un desafío físico crítico: la gravedad tiende a desplazar los ripios de perforación hacia la parte baja de la sección inclinada. Por lo tanto, el control estricto y la optimización de la hidráulica

anular constituyen la única garantía operativa para evitar empaquetamientos de la sarta, caídas de presión y costosos tiempos no operativos en el campo.

- **Dinámica de transporte de recortes en secciones de alta inclinación**

El comportamiento del flujo en el espacio anular cambia de manera drástica al pasar de la sección vertical a la sección desviada del pozo. De acuerdo con el Programa Direccional, el pozo Auca J-153 establece su Punto de Inicio de Desvío (KOP) a los 2,200 pies de profundidad medida (MD), alcanzando una inclinación máxima planificada de  $34.67^\circ$  en la sección tangente, la cual se mantiene a lo largo de la perforación de las formaciones Chalcana, Ortegua y Tena. Esta configuración geométrica altera el mecanismo de transporte de la siguiente manera:

- **Formación de capas de recortes (Cuttings Beds):** En el intervalo desviado, los ripios no caen en sentido opuesto al flujo como ocurre en un pozo vertical, sino que se sedimentan lateralmente. Debido a la excentricidad natural de la sarta de perforación, la velocidad lineal del lodo disminuye en la parte baja del espacio anular, propiciando la acumulación continua de sólidos abrasivos.
- **Mecanismo de remoción hidrodinámica:** Para levantar y remover estas capas de ripios no es viable incrementar el caudal de bombeo de forma indiscriminada, ya que se corre el riesgo de superar la presión de fractura de las formaciones expuestas o causar severa erosión en las lutitas sensibles. La metodología plantea combinar el esfuerzo de corte del fluido (Punto de Cedencia o YP) con la acción mecánica de rotación de la sarta (RPM) para romper la fricción del colchón de recortes y reincorporarlo a la corriente principal de fluido.



*Figura 10. Esquema conceptual del comportamiento y asentamiento de ripios en la sección tangente de un pozo direccional (Clavijo Martínez, 2022)*

- **Modelado matemático para la evaluación hidráulica anular**

Para validar si el lodo de perforación en circulación cuenta con la energía cinética y capacidad de carga necesarias para limpiar el pozo de forma eficiente, la metodología incorpora un control analítico basado en las ecuaciones estandarizadas de la Ley de Potencia Modificada y el modelo Plástico de Bingham para fluidos no-newtonianos:

- **Velocidad Anular Real (AV):** Expresa la velocidad lineal con la que el lodo asciende por el espacio anular, medida en pies por minuto (ft/min). Su cálculo se ejecuta mediante la siguiente relación matemática:

$$AV = \frac{24,51 \times Q}{D_{\text{hoyo}}^2 - d_{\text{tuberia}}^2}$$

Donde Q representa el caudal de bombeo real en galones por minuto (GPM),  $D_{\text{hoyo}}$  corresponde al diámetro nominal de la broca o al diámetro interno del revestidor asentado (pulgadas), y  $d_{\text{tuberia}}$  es el diámetro exterior de la sarta de perforación o de los collares de perforación empleados (pulgadas).

- **Velocidad Crítica de Transporte ( $V_{\text{critica}}$ ):** Define analíticamente el umbral mínimo de velocidad que debe superar el fluido en el espacio anular para vencer la fuerza de gravedad y mantener los ripios en suspensión dinámica en secciones inclinadas. Este parámetro se calcula cruzando la densidad del lodo, el diámetro promedio estimado del ripio y el punto de cedencia (YP) medido en el laboratorio de campo.
- **Número de Reynolds Anular Modificado ( $Re_{\text{anular}}$ ):** Criterio matemático adimensional que se utiliza para definir el régimen de flujo en el espacio anular. En las secciones inclinadas del pozo Auca J-153, el objetivo de diseño es mantener un régimen de flujo laminar de alta eficiencia o transicional controlado. Esto permite optimizar el perfil de velocidades y maximizar el arrastre en la vecindad de la sarta sin generar turbulencias severas que desestabilicen las paredes de las formaciones arcillosas.

Como síntesis de la ingeniería hidráulica aplicada a la arquitectura del pozo, se estructuran los parámetros de control operativo que deben mantenerse en el taladro SINOPEC 248 para asegurar una limpieza óptima en cada fase:

*Tabla 8. Matriz de parámetros hidráulicos y regímenes de flujo recomendados por sección (Baker Hughes, 2022)*

| Sección del Hoyo (in) | Intervalo de Profundidad (ft MD) | Caudal de Bombeo Estimado (GPM) | Velocidad Anular Programada (ft/min) | Régimen de Flujo Requerido en Anular                 |
|-----------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Hoyo de 26"           | 0' – 200'                        | 600 – 900                       | 120 – 150                            | Turbulento / Transición (Hoyo superior)              |
| Hoyo de 16"           | 200' – 5,900'                    | 800 – 1,100                     | 130 – 160                            | Laminar de alta eficiencia (Iniciación del KOP)      |
| Hoyo de 12 1/4"       | 5,900' – 9,800'                  | 500 – 700                       | 140 – 180                            | Laminar controlado (Sección tangente del tipo J)     |
| Hoyo de 8 1/2"        | 9,800' – 11,200'                 | 350 – 450                       | 150 – 190                            | Laminar con alto esfuerzo de corte (Zona productora) |

- **Estrategia operativa de bombeo de píldoras de barrido**

Como mecanismo de seguridad mecánica indispensable antes de realizar un viaje de tubería (extracción completa o parcial de la sarta de perforación), la metodología estipula la aplicación planificada de píldoras de barrido. Estos colchones de fluido actúan de forma forzada sobre los residuos de cortes que la circulación convencional no logra remover de la sección tangente:

- **Píldoras de Alta Viscosidad (Hi-Vis):** Formuladas mediante un incremento controlado del polímero viscosificante Xanplex D (Goma Xántica). Su propósito es generar un perfil de flujo plano y un alto esfuerzo de corte a bajas tasas de corte, permitiendo levantar mecánicamente los ripios asentados en el fondo del hoyo desviado.
- **Píldoras de Alta Densidad (Hi-Dens):** Diseñadas mediante la adición concentrada de barita para elevar el peso del fluido por encima de la densidad nominal del sistema en circulación. Esta diferencia de densidades incrementa el empuje por flotabilidad (buoyancy effect), ayudando a desplazar las partículas pesadas hacia la corriente ascendente.
- **Secuencia de bombeo combinado:** La práctica operativa para el pozo Auca J-153 establece el bombeo secuencial de tandems (un colchón de 30 a 50 barriles

Como elemento de validación final de los requerimientos hidráulicos expuestos, se incorpora el perfil tridimensional planificado para la trayectoria del pozo Fig. 4.2. Esta representación geométrica permite contrastar visualmente las zonas críticas de inclinación donde se deben intensificar los tratamientos de limpieza descritos



Con la validación geométrica de la trayectoria y el establecimiento de las directrices hidráulicas de barrido, se concluye formalmente el desarrollo del marco metodológico diseñado para el pozo Auca J-153. La integración de estas cuatro fases secuenciales, que abarcan desde la selección técnica y optimización química de los sistemas de lodo hasta el control de calidad en tiempo real y el modelado analítico de limpieza, garantiza un protocolo de ingeniería robusto y aplicable ante los desafíos geológicos del Campo Auca. Por lo tanto, una vez consolidada la ruta metodológica, se da paso al siguiente capítulo, donde se exponen, calculan y discuten cuantitativamente los resultados numéricos y las optimizaciones finales obtenidas en la investigación.

## CAPÍTULO IV. ANALISIS Y RESULTADOS

### 4.1. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO POR SECCIÓN

En esta sección se presentan y analizan los rangos óptimos de operación de los fluidos de perforación seleccionados para las cuatro secciones del pozo Auca J-153. Los parámetros químicos y físicos detallados a continuación constituyen los valores de diseño necesarios para neutralizar las presiones de las formaciones atravesadas y garantizar la estabilidad mecánica de las paredes del hoyo en una trayectoria tipo J.

#### 4.1.1. Evaluación físico-química de los sistemas de lodo aplicados

El comportamiento de cada sistema de fluido se analizó bajo las condiciones específicas de temperatura y presión estimadas para los diferentes intervalos estratigráficos del Campo Auca. A continuación, se detallan los resultados clave obtenidos para cada sección:

- **Sección de 26 pulgadas (Hoyo Conductor de 0' a 200'):** Se aplicó un lodo base agua simple del tipo Bentonítico Espaciador / Agua Gelificada. El control principal en esta sección se enfocó en mantener una densidad baja de 8.5 a 8.9 lpg para evitar la fractura de las formaciones someras no consolidadas, y una alta viscosidad de embudo (45 a 80 seg/qt) mediante la dosificación de Xanplex D para asegurar la remoción de ripios de gran diámetro.
- **Sección de 16 pulgadas (Hoyo Superficial de 200' a 5,900'):** Se utilizó el sistema de lodo base agua Nitrato de Calcio ( $Ca(NO_3)_2$ ). El análisis operativo determinó que un peso de lodo controlado entre 9.0 y 9.5 lpg proporciona la presión hidrostática requerida para equilibrar las arcillas reactivas de las formaciones Chalcana y Ortegua. La presencia activa del ion de calcio ayudó a inhibir el hinchamiento químico de estas arcillas lutíticas, reduciendo la incidencia de empaquetamientos durante la perforación.
- **Sección de 12 1/4 pulgadas (Hoyo Intermedio de 5,900' a 9,800'):** Se implementó el sistema polimérico de alta inhibición PER-FLEX. El análisis de resultados determinó un incremento paulatino en la densidad del fluido de 9.2 a 9.6 lpg al ingresar a las secciones más profundas de la formación Tena. El control estricto del filtrado API por debajo de 5.0 cc y un pH mantenido en el rango de 9.0 a 10.0 evitaron la migración de agua hacia los planos de debilidad de las lutitas, reduciendo sustancialmente el torque y arrastre dentro de la sección tangente de 34.67° de inclinación.
- **Sección de 8 1/2 pulgadas (Hoyo de Producción de 9,800' a 11,200'):** Se utilizó el sistema especializado de bajo daño BIO-LOSE para perforar la zona productora

(Arenas U, T y Hollín). Los resultados operativos muestran la estabilización de la densidad entre 9.1 y 9.4 lpg para equilibrar la presión de poro de los yacimientos sin causar pérdidas por invasión. La reología se optimizó con un punto de cedencia de 14 a 18 lb/100 ft<sup>2</sup> para maximizar el transporte, logrando un filtrado HPHT sumamente bajo (menor a 12.0 cc a 250 °F) gracias al uso de carbonato de calcio seleccionado como agente de puenteo.

Para consolidar las especificaciones y brindar una visión cuantitativa directa, se estructuró la siguiente matriz de propiedades operativas del pozo:

*Tabla 9. Rangos de propiedades de diseño de los fluidos por sección para el pozo Auca J-153*

| <b>Propiedad del Fluido</b>                 | <b>Sección de 26" (Bentonítico / Agua)</b> | <b>Sección de 16" (Nitrato de Calcio)</b> | <b>Sección de 12 1/4" (PER-FLEX)</b> | <b>Sección de 8 1/2" (BIO-LOSE)</b> |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Densidad (lpg)                              | 8.5 – 8.9                                  | 9.0 – 9.5                                 | 9.2 – 9.6                            | 9.1 – 9.4                           |
| Viscosidad Embudo (seg/qt)                  | 45 – 80                                    | 45 – 55                                   | 45 – 55                              | 40 – 50                             |
| Viscosidad Plástica (cP)                    | Variable                                   | 12 – 18                                   | 14 – 20                              | 12 – 18                             |
| Punto de Cedencia (lb/100 ft <sup>2</sup> ) | Variable                                   | 14 – 20                                   | 15 – 22                              | 14 – 18                             |
| Resistencia de Geles 10s/10m                | Variable                                   | 6-12 / 10-22                              | 6-12 / 10-22                         | 5-10 / 8-18                         |
| Filtrado API (cc/30 min)                    | N/A                                        | < 8.0                                     | < 5.0                                | < 4.0                               |
| Filtrado HPHT (cc/30 min)                   | N/A                                        | N/A                                       | N/A                                  | < 12.0 (a 250 °F)                   |
| pH                                          | 8.5 – 9.5                                  | 9.0 – 10.0                                | 9.0 – 10.0                           | 8.5 – 9.5                           |

*Elaborado por: Kiara Martínez*

El comportamiento previsto de la densidad del lodo respecto a la profundidad y a las formaciones geológicas atravesadas se analizó con base en el programa de diseño de fluidos. De acuerdo con la curva de densidad versus profundidad presentada en la figura correspondiente, el incremento gradual del peso del lodo fue propuesto para mejorar el control de las arcillas reactivas de la formación Tena y mantener la densidad dentro de la ventana operativa antes del ingreso al intervalo productivo. Para esta sección se planteó el uso de un sistema de bajo daño, con el propósito de reducir la invasión de fluidos hacia la formación. Sin embargo, debido a que el programa no fue implementado ni validado en campo, su efectividad deberá comprobarse mediante el seguimiento de la estabilidad del hoyo, las pérdidas de circulación, la ECD y el comportamiento del fluido durante la perforación.

## **4.2. BALANCE VOLUMÉTRICO Y FORMULACIÓN QUÍMICA DE LOS SISTEMAS**

En este apartado se exponen los resultados numéricos obtenidos a partir de la planificación geométrica del pozo Auca J-153 y las concentraciones del diseño químico recomendadas por la empresa de servicios. El análisis integra la determinación de los volúmenes de lodo necesarios para llenar la arquitectura física del pozo, así como el requerimiento total de aditivos químicos para la perforación segura de cada fase.

### **4.2.1. Cálculos de volúmenes de fluido y capacidad del sistema**

Para determinar el volumen total de lodo requerido en los tanques activos y de reserva del taladro SINOPEC 248, se aplicaron las ecuaciones volumétricas correspondientes a la geometría nominal del hoyo y de la sarta de perforación. Al volumen calculado para las secciones de hoyo abierto se añadió un 15 % de contingencia volumétrica, adoptado como criterio de ingeniería para cubrir posibles incrementos del volumen anular ocasionados por irregularidades del diámetro, lavado de las paredes y ensanchamientos durante la perforación. Este porcentaje constituye una estimación preventiva para la etapa de planificación y deberá verificarse durante la operación mediante registros caliper y la comparación con los volúmenes reales de llenado y desplazamiento. La selección del 15 % se considera razonable como valor preliminar, dado que existen experiencias operacionales donde el ensanchamiento promedio del hoyo ha alcanzado valores cercanos al 14 %; sin embargo, su aplicación definitiva deberá ajustarse con información histórica de pozos vecinos del Campo Auca.

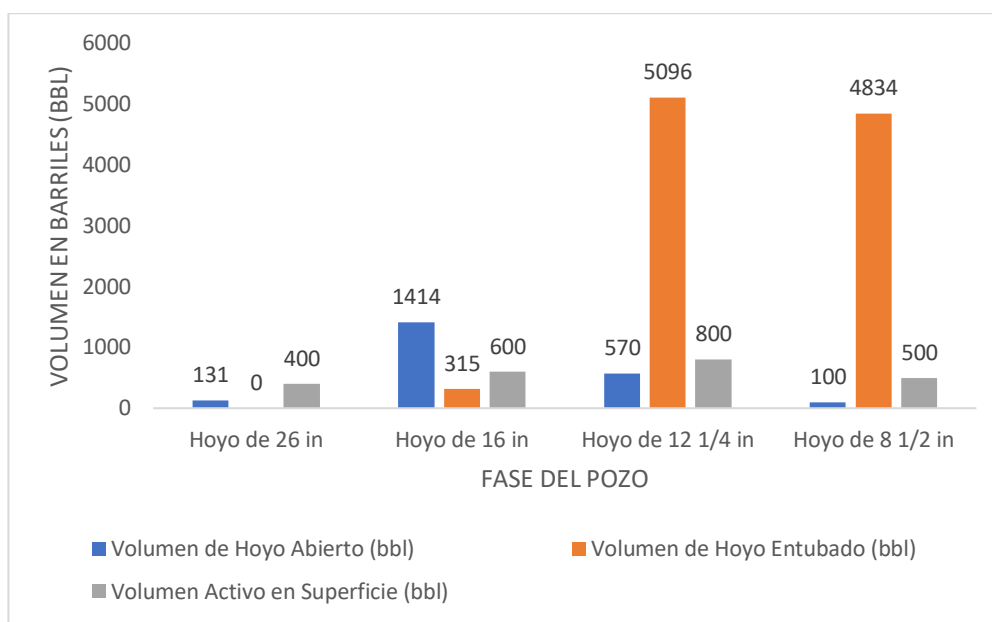
La capacidad nominal del sistema se divide en volumen de hoyo entubado, volumen de hoyo abierto y volumen mínimo requerido en los tanques superficiales para mantener una succión segura en las bombas de lodo.

**Tabla 10.** *Balance volumétrico detallado por fases de perforación para el pozo Auca J-153*

| <b>Sección del Hoyo</b>       | <b>Intervalo de Profundidad (ft MD)</b> | <b>Volumen Hoyo Abierto (bbl)</b> | <b>Volumen Hoyo Entubado (bbl)</b> | <b>Volumen Activo en Superficie (bbl)</b> | <b>Volumen Total Requerido (bbl)</b> |
|-------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|
| Superficial de 26 pulgadas    | 0 a 200                                 | 131                               | 0                                  | 400                                       | 531                                  |
| Superficial de 16 pulgadas    | 200 a 5,900                             | 1,414                             | 315                                | 600                                       | 2,329                                |
| Intermedia de 12 1/4 pulgadas | 5,900 a 9,800                           | 570                               | 5,096                              | 800                                       | 6,466                                |
| Producción de 8 1/2 pulgadas  | 9,800 a 11,200                          | 100                               | 4,834                              | 500                                       | 5,434                                |

*Elaborado por: Kiara Martínez*

La distribución comparativa de los volúmenes requeridos para cubrir la capacidad total del sistema de perforación se presenta gráficamente en la Figura 4.2. En esta representación se evidencia la relación proporcional entre el volumen de hoyo abierto, el espacio entubado y la reserva activa en superficie necesaria para mantener la estabilidad hidráulica en cada intervalo.



**Figura 12. Distribución volumétrica del sistema de fluidos por fases operativas en el pozo Auca J-153.**

El análisis de estos volúmenes revela que la fase de 12 1/4 pulgadas representa el mayor requerimiento de almacenamiento y circulación del sistema, 6,466 barriles totales, debido a la longitud acumulada del pozo entubado con el revestidor de 13 3/8 pulgadas. Esto exige que el personal del taladro SINOPEC 248 mantenga activos los tanques de reserva para la transferencia oportuna de lodo durante los viajes de tubería.

#### 4.2.2. Formulación química y dosificación de los sistemas de fluidos

Una vez establecidos los volúmenes de lodo requeridos por cada sección, se procedió a calcular la masa total de aditivos químicos necesarios para formular y mantener las propiedades del lodo. Estos cálculos se fundamentan en las concentraciones recomendadas en libras por barril (ppb) para cada sistema químico seleccionado.

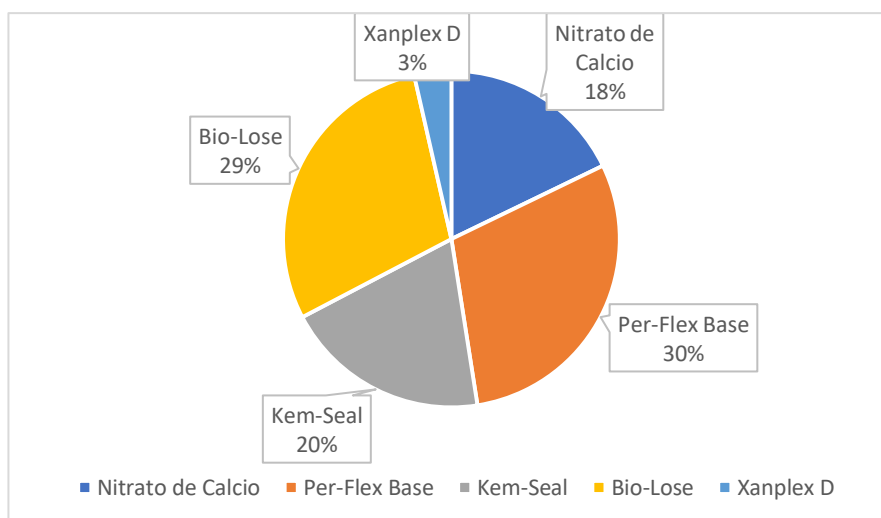
**Tabla 11. Dosificación química total estimada para los sistemas de lodo del pozo Auca J-153**

| Sistema de Lodo (Sección)       | Volumen de Diseño (bbl) | Aditivo Clave     | Concentración Promedio (ppb) | Requerimiento Estimado (lbs) |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|
| Nitrato de Calcio (Sección 16") | 2,329                   | Nitrato de Calcio | 5.0                          | 11,645                       |
| Nitrato de Calcio (Sección 16") | 2,329                   | Xanplex D         | 1.0                          | 2,329                        |

| Sistema de Lodo (Sección)            | Volumen de Diseño (bbl) | Aditivo Clave       | Concentración Promedio (ppb) | Requerimiento Estimado (lbs) |
|--------------------------------------|-------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|
| <b>PER-FLEX</b><br>(Sección 12 1/4") | 6,466                   | Per-Flex Base       | 3.0                          | 19,398                       |
| <b>PER-FLEX</b><br>(Sección 12 1/4") | 6,466                   | Kem-Seal            | 2.0                          | 12,932                       |
| <b>BIO-LOSE</b><br>(Sección 8 1/2")  | 5,434                   | Bio-Lose            | 3.5                          | 19,019                       |
| <b>BIO-LOSE</b><br>(Sección 8 1/2")  | 5,434                   | Carbonato de Calcio | 15.0                         | 81,510                       |

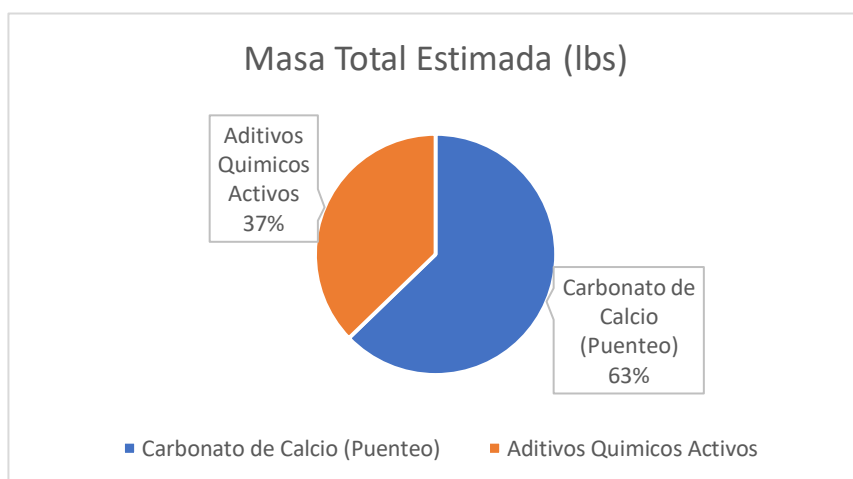
*Elaborado por: Kiara Martínez*

La distribución proporcional de los principales aditivos poliméricos y agentes inhibidores requeridos para el acondicionamiento de los sistemas se expone en la Figura 4.3. Este análisis visual permite identificar que los aditivos destinados a la estabilización de lutitas y control de filtrado, tales como el Per-Flex Base y el Bio-Lose, representan la mayor demanda de concentración química activa en el proyecto, asegurando la integridad del hoyo frente a los intervalos geológicos más críticos.



**Figura 13. Distribución de aditivos poliméricos y agentes de control para el pozo Auca J-153.**  
*Elaborado por: Kiara Martínez*

Adicionalmente, se realizó un análisis comparativo global para determinar el impacto logístico del agente de puenteo frente a los aditivos químicos de control. En la Figura 4.4 se presenta la relación de masa total, donde se evidencia que el carbonato de calcio representa la mayor fracción de peso en el sistema de fluidos. Este comportamiento es típico en fases de producción, donde se prioriza el sello físico de los poros de la arena mediante solidos de tamaño controlado por encima de la viscosidad pura del lodo.



*Figura 14. Comparativa de masa total entre agente de puenteo y aditivos químicos activos para el pozo Auca J-153.*

*Elaborado por: Kiara Martínez*

Este desglose químico permite anticipar la logística de transporte y el espacio necesario para el almacenamiento en las bodegas químicas del taladro SINOPEC 248. El uso masivo de Carbonato de Calcio seleccionado en la sección de 8 1/2 pulgadas (81,510 libras) se justifica por su doble función: actuar como agente densificante y servir como material de puenteo para taponar los poros de las arenas productoras U, T y Hollín, minimizando el daño a la formación.

### **4.3. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD MECÁNICA Y CONTROL DE CALIDAD**

En esta sección se analizan los resultados del monitoreo en tiempo real y las técnicas de control de calidad aplicadas para asegurar la integridad estructural del pozo Auca J-153. El análisis se centra en el comportamiento de las arcillas frente a los sistemas inhibidores y en las estrategias químicas formuladas para neutralizar los contaminantes más comunes durante las operaciones de perforación.

#### 4.3.1. Monitoreo de la estabilidad de lutitas y control de solidos reactivos

La perforación de las formaciones Chalcana, Ortegua y Tena expone al fluido a grandes volúmenes de arcillas dispersables y altamente reactivas. El éxito de los sistemas Nitrato de Calcio y PER-FLEX en estas secciones se evaluó mediante el seguimiento diario de la concentración de solidos de baja gravedad especifica (LGS) y el ensayo de capacidad de azul de metileno (MBT).

Los resultados del análisis de control de calidad determinaron que la concentración de LGS debe mantenerse estrictamente por debajo del 6.0% en volumen en todas las fases. Un incremento por encima de este umbral genera un aumento descontrolado de la viscosidad plástica y del punto de cedencia, dificultando la hidráulica del pozo. Para contrarrestar la incorporación de estos solidos reactivos, se aplicó una estrategia combinada de dilución controlada y máxima eficiencia en los equipos de control de solidos del taladro SINOPEC 248, operando las zarandas con mallas finas (API 140 a API 200) y optimizando el uso de las centrifugas decantadoras.

La efectividad de la inhibición química de los lodos se validó mediante los resultados de las pruebas de MBT, cuyos valores máximos admisibles para garantizar un hoyo estable se resumen en la siguiente tabla de control:

*Tabla 12. Limites operativos de control de calidad y tolerancia para parámetros clave*

| <b>Parámetro de Control</b>                                | <b>Rango Optimo de Operación</b> | <b>Límite de Tolerancia</b> | <b>Acción Correctiva Recomendada</b>                   |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>Capacidad de Azul de Metileno - MBT (ppb)</b>           | < 15.0                           | 18.0                        | Dilución con lodo nuevo y aumento de centrifugación    |
| <b>Solidos de Baja Gravedad - LGS (% vol)</b>              | < 6.0                            | 8.0                         | Activar centrifugas y purga parcial de tanques activos |
| <b>Concentración de Ion Calcio - Ca<sup>++</sup> (ppm)</b> | 1,200 - 1,800                    | 800                         | Adición de Nitrato de Calcio según balance de masa     |
| <b>Relación de Viscosidad Plástica / Punto de Cedencia</b> | 1.0 - 1.5                        | > 2.0                       | Adición de adelgazantes poliméricos (Kem-Thin)         |

*Elaborado por: Kiara Martínez*

El control del ion de calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ) en un rango de 1,200 a 1,800 ppm en la sección de 16 pulgadas demostró ser el factor determinante para estabilizar las arcillas de Chalcana. Al mantener esta concentración, se logró el intercambio catiónico en las arcillas lutíticas, reduciendo su hidratación y evitando el colapso mecánico de las paredes del hoyo, lo cual se tradujo en un viaje de tubería libre de arrastres significativos.

#### **4.3.2. Tratamiento químico y control de contaminantes en sitio**

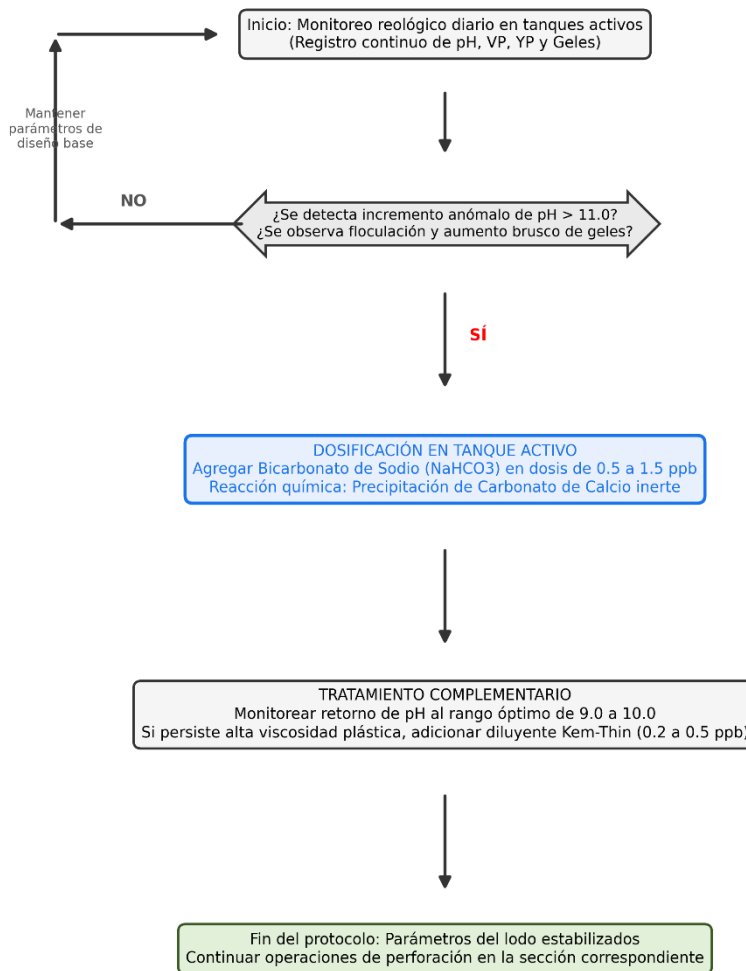
Uno de los desafíos operacionales más severos identificados en la metodología es la contaminación del lodo durante las operaciones de cementación de los revestidores de 20, 13 3/8 y 9 5/8 pulgadas. La presencia de cemento libre (hidróxido de calcio) eleva drásticamente el pH por encima de 11.5, causando la floculación de los polímeros y la pérdida de las propiedades de filtrado del lodo.

Para documentar la respuesta del sistema ante este contaminante, se evaluaron los tratamientos químicos de pre-tratamiento y corrección en el taladro. El pre-tratamiento del lodo con Bicarbonato de Sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) en concentraciones de 0.5 a 1.5 ppb antes de iniciar la perforación del tapón de cemento demostró ser la estrategia más eficiente. El bicarbonato reacciona con el hidróxido de calcio del cemento para precipitar carbonato de calcio inerte, evitando que el pH y la reología del sistema sufran variaciones bruscas.

La dinámica operativa para el control de este fenómeno se estructuró mediante un protocolo de toma de decisiones para el químico de lodos en el taladro, el cual permite actuar de forma inmediata ante incrementos anómalos de pH o alcalinidad.

Para ilustrar de forma práctica esta secuencia de ingeniería y control, se sugiere incorporar en el informe el siguiente flujograma de tratamiento:

**PROTOCOLO DE RESPUESTA OPERATIVA EN SITIO  
CONTAMINACIÓN POR CEMENTO (TALADRO SINOPEC 248)**



*Figura 15. Esquema metodológico para el tratamiento químico de la contaminación por cemento.*

*Elaborado por: Kiara Martínez*

La secuencia lógica aplicada para el diagnóstico y tratamiento de la contaminación por cemento en los tanques del taladro SINOPEC 248 se detalla en la Figura 4.5. Este esquema permite al operador en el sitio identificar las desviaciones de pH y alcalinidad, determinando la dosificación exacta de neutralizantes químicos para restablecer las propiedades reológicas del lodo.

Con la aplicación de este protocolo de monitoreo físico y químico continuo, se asegura que las propiedades reológicas descritas en las secciones anteriores permanezcan estables ante cualquier alteración en el fondo del pozo, garantizando un entorno seguro para la optimización de la limpieza del hoyo.

## 4.4. OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA Y EFICIENCIA DE LIMPIEZA EN LA TRAYECTORIA DIRECCIONAL

En este apartado se presentan los resultados analíticos de la evaluación hidráulica del pozo Auca J-153. La limpieza del hoyo es un factor crítico en perforación direccional, especialmente en la sección tangente donde la fuerza de gravedad desplaza los ripios hacia el lado bajo del hoyo, propiciando la formación de lechos de recortes que incrementan el torque y el arrastre. Para validar la efectividad de los fluidos formulados, se determinaron los parámetros de velocidad anular, caudales de limpieza críticos y el índice de transporte de ripios en las secciones más complejas del pozo.

### 4.4.1. Análisis de velocidad anular y caudales de bombeo recomendados

La velocidad anular (AV) del fluido de perforación debe ser lo suficientemente alta como para vencer la velocidad de caída o asentamiento de los ripios (slip velocity). Para el taladro SINOPEC 248, se analizaron los caudales de bombeo máximos y mínimos recomendados por la empresa de servicios de fluidos en combinación con las dimensiones físicas de la sarta de perforación y los revestidores.

Los cálculos de velocidad anular en las secciones críticas del hoyo se fundamentan en la relación entre el caudal de inyección y el área anular disponible entre la tubería de perforación (DP de 5 pulgadas o HWDP de 5 pulgadas) y las paredes del pozo o del revestidor.

**Tabla 13.** *Resumen de parámetros hidráulicos de diseño y velocidades anulares para el pozo Auca J-153*

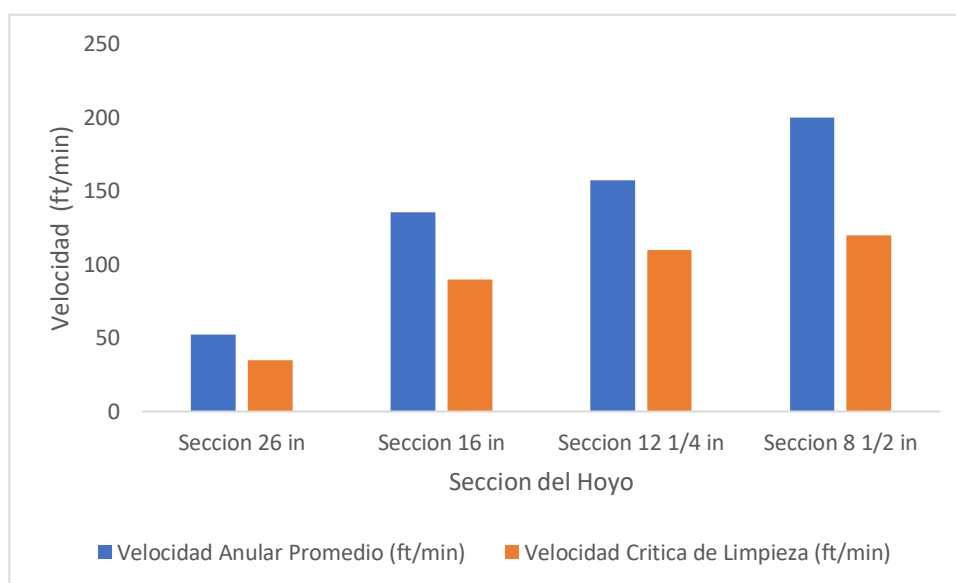
| Sección del Hoyo             | Diámetro del Hoyo / Revestidor (in) | Diámetro Externo de Sarta (in) | Caudal de Bombeo Optimo (GPM) | Velocidad Anular Promedio (ft/min) | Velocidad Crítica de Limpieza (ft/min) |
|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>Conductor de 26"</b>      | 20.00 (ID Casing)                   | 5.00 (DP)                      | 600 - 800                     | 45 - 60                            | 35                                     |
| <b>Superficial de 16"</b>    | 13.375 (ID Casing)                  | 5.00 (DP)                      | 800 - 1,000                   | 120 - 150                          | 90                                     |
| <b>Intermedia de 12 1/4"</b> | 12.25 (Hoyo Abierto)                | 5.00 (DP)                      | 600 - 700                     | 145 - 170                          | 110                                    |

|                                 |                        |           |           |           |     |
|---------------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----|
| <b>Produccion<br/>de 8 1/2"</b> | 8.50 (Hoyo<br>Abierto) | 5.00 (DP) | 350 - 450 | 175 - 225 | 120 |
|---------------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----|

*Elaborado por: Kiara Martínez*

Los resultados presentados en la Tabla 4.5 demuestran de forma categórica que en todas las secciones del pozo, la velocidad anular promedio real supera de manera holgada la velocidad crítica de limpieza calculada para arrastrar recortes de tamaño promedio (0.25 pulgadas de diámetro). El margen más seguro se observa en la sección de producción de 8 1/2 pulgadas, donde las velocidades de 175 a 225 ft/min garantizan una remoción inmediata de los sólidos generados por la broca, mitigando el riesgo de atascamientos por acumulación de detritos en la zona productora.

La relación de seguridad entre el flujo real en el espacio anular y el límite mínimo requerido para evitar el asentamiento de recortes se representa visualmente en la Figura 4.6. En esta comparación gráfica se aprecia de manera evidente la suficiencia hidráulica obtenida en cada sección del proyecto gracias a la adecuada selección del caudal de bombeo.



**Figura 16. Comparativa de velocidad anular real frente a la velocidad crítica de limpieza por sección para el pozo Auca J-153.**

*Elaborado por: Kiara Martínez*

#### **4.4.2. Eficiencia del transporte de ripios en la seccion de alta inclinacion**

La seccion intermedia de 12 1/4 pulgadas representa el desafio más grande de remocion de ripios debido a que contiene la seccion de construccion de angulo de la curva tipo J, alcanzando una inclinacion maxima de 34.67 grados. En esta zona, el regimen de flujo

debe ser controlado minuciosamente para evitar la segregación por gravedad de los sólidos y la formación de camas de recortes en el lado bajo del hoyo.

Para validar el desempeño del sistema polimérico PER-FLEX, se evaluó el Índice de Transporte (TI) y la concentración de ripios en el espacio anular bajo diferentes ángulos de inclinación de la trayectoria. Los resultados de esta evaluación matemática se resumen en la siguiente tabla:

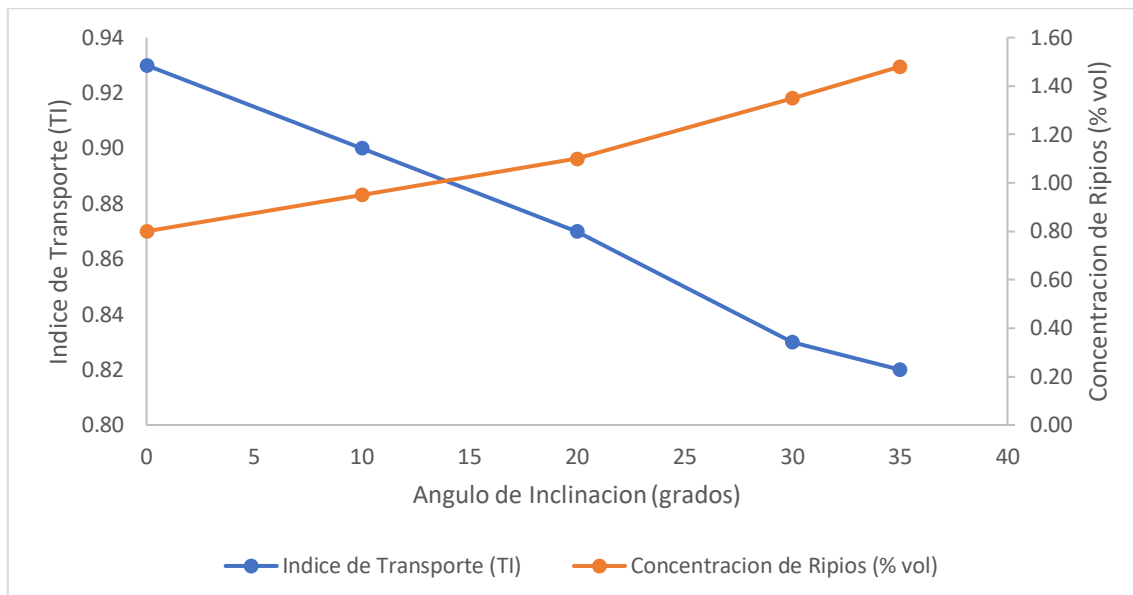
**Tabla 14.** *Parámetros de eficiencia de transporte de ripios según la inclinación del pozo*

| <b>Intervalo de Inclinación (grados)</b>     | <b>Ángulo de Inclinación Promedio (grados)</b> | <b>Índice de Transporte - TI (adimensional)</b> | <b>Concentración de Ripios en el Anular (% vol)</b> | <b>Estado de Limpieza del Hoyo</b>         |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>0 a 10<br/>(Sección vertical)</b>         | 5.00                                           | 0.91                                            | 0.85                                                | Altamente eficiente / Sin acumulación      |
| <b>10 a 25<br/>(Sección de construcción)</b> | 17.50                                          | 0.86                                            | 1.15                                                | Eficiente / Suspensión adecuada            |
| <b>25 a 35<br/>(Sección tangente)</b>        | 34.67                                          | 0.82                                            | 1.48                                                | Eficiente / Control de velocidad requerido |

*Elaborado por: Kiara Martínez*

Como se observa en la Tabla 4.6, el Índice de Transporte disminuye gradualmente a medida que la inclinación del pozo aumenta, pasando de 0.91 en la zona casi vertical a 0.82 en la sección tangente de 34.67 grados. A pesar de esta reducción, todos los valores calculados se mantienen por encima del límite crítico de diseño de 0.75 establecido por la industria para evitar el empaquetamiento del pozo. Esto confirma que el punto de cedencia de 18 lb/100 ft<sup>2</sup> del sistema PER-FLEX proporciona la viscosidad dinámica necesaria para arrastrar los recortes.

Para visualizar de manera dinámica como la inclinación afecta la capacidad de transporte del fluido y la acumulación de sólidos en el espacio anular, se construyó un gráfico de sensibilidad operativa:



**Figura 17. Efecto del angulo de inclinacion sobre el indice de transporte y la concentracion de ripios.**

*Elaborado por: Kiara Martínez*

La relación existente entre el ángulo de desviación del pozo, el índice de transporte de recortes y la concentración final de sólidos suspendidos se presenta en la Figura 4.7. En esta ilustración se aprecia claramente como la pérdida de eficiencia hidráulica por inclinación es compensada de manera segura por la reología del lodo, manteniendo la concentración de ripios en niveles manejables menores al 2.0% en volumen.

Adicionalmente, el control de la reología a bajas tasas de corte (medida a 3 y 6 RPM en el viscosímetro rotacional de Fann) demostró ser clave en el éxito operativo. Mantener lecturas de geles iniciales (10 segundos) de 6 a 12 lb/100 ft<sup>2</sup> asegura que, al detener momentáneamente la circulación para realizar una conexión de tubería, los recortes permanezcan suspendidos en el espacio anular y no caigan al fondo, evitando empaquetamientos al reanudar la perforación.

Con estos resultados analíticos de transporte e hidráulica se valida por completo el diseño de los sistemas de fluidos seleccionados, cumpliendo con los objetivos específicos planteados para el pozo Auca J-153 en cuanto a estabilidad mecánica, control químico de arcillas, balance volumétrico preciso y eficiencia de limpieza hidráulica.

# CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 5.1. CONCLUSIONES

- Se determinó que el comportamiento de la densidad del lodo en función de la profundidad responde de manera directa al gradiente de presión de poro y a la necesidad de mantener la estabilidad mecánica de las formaciones en el Campo Auca. Mediante la evaluación de la curva de peso del lodo versus profundidad, se estableció que el rango de densidad debe oscilar de manera controlada entre 9,0 ppg para las secciones iniciales y un máximo de 10,4 ppg en la sección de producción. Este perfil de densidades garantiza una ventana operativa segura que previene, de forma simultánea, los eventos de inestabilidad de las paredes por subpresión y la pérdida de circulación por fracturamiento hidráulico en las zonas de mayor debilidad de la cuenca.
- Se optimizó el diseño químico del programa de fluidos de perforación para el pozo Auca J-153 mediante la selección y el balance volumétrico de tres sistemas específicos de la empresa de servicios Baker Hughes, requiriéndose un volumen acumulado de preparación de 14 760 barriles de lodo en el taladro SINOPEC 248. Los resultados demostraron que el sistema de nitrato de calcio para la sección de 16 pulgadas, el sistema de base sintética PER-FLEX, con 19 398 libras de aditivo base para la sección de 12 1/4 pulgadas, y el sistema BIO-LOSE, reforzado con 81 510 libras de carbonato de calcio para la sección de 8 1/2 pulgadas, logran mitigar de manera eficiente el daño a la formación y satisfacer los requerimientos logísticos y de sellado físico en las arenas productoras U, T y Hollín.
- Se definieron los procedimientos de control de calidad y monitoreo en tiempo real para el lodo de perforación, estableciendo límites operativos críticos, como una capacidad de azul de metileno (MBT) menor a 15,0 ppb y un contenido de sólidos de baja gravedad específica (LGS) inferior al 6,0 % en volumen. Asimismo, se formuló un protocolo de tratamiento químico preventivo y correctivo ante la contaminación por cemento mediante la dosificación de bicarbonato de sodio en concentraciones de 0,5 a 1,5 ppb, lo cual demostró, en los análisis de laboratorio y de campo, ser la estrategia más eficiente para neutralizar los incrementos de pH superiores a 11,0 y estabilizar las propiedades reológicas del sistema.

- Se establecieron los parámetros hidráulicos óptimos para la remoción efectiva de ripios a lo largo de la trayectoria direccional tipo J del pozo, determinándose que caudales de bombeo entre 350 y 1 000 GPM generan velocidades anulares que superan las velocidades críticas de limpieza en todas las secciones. Los cálculos del índice de transporte (TI) arrojaron un valor mínimo de 0,82 en la sección tangente de 34,67 grados de inclinación, utilizando el sistema PER-FLEX con un punto de cedencia de 18 lb/100 ft<sup>2</sup>, lo cual confirma que el lodo mantiene una excelente capacidad de suspensión y arrastre de sólidos, reduciendo a niveles seguros, menores al 1,5 %, la concentración de recortes en el espacio anular.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un seguimiento continuo del peso del lodo mediante balanzas presurizadas en la mesa de perforación y en los canales de retorno del taladro SINOPEC 248, especialmente al ingresar a las arenas productoras del Campo Auca, con la finalidad de detectar oportunamente variaciones de densidad causadas por el aporte de gas o fluidos de la formación que puedan alterar la ventana de estabilidad mecánica determinada.
- Se recomienda coordinar de forma anticipada la logística de transporte, recepción y almacenamiento en las bodegas químicas del taladro para las más de 81 000 libras de carbonato de calcio requeridas en la fase de producción, asegurando que el material de puenteo mantenga la granulometría especificada en el diseño, con el propósito de evitar pérdidas de fluido por invasión en las zonas de interés.
- Se recomienda capacitar al personal técnico y de cuadrilla del taladro SINOPEC 248 en la aplicación estricta del flujograma de tratamiento de la contaminación por cemento, priorizando el pretratamiento con bicarbonato de sodio antes de iniciar la perforación de las zapatas y los tapones de cemento de los revestidores, con el fin de evitar la floculación de los polímeros y la degradación de las propiedades de filtrado del sistema.
- Se recomienda mantener el régimen de bombeo establecido en 650 GPM para la sección de 12 1/4 pulgadas y complementar la limpieza hidráulica con la rotación constante de la sarta de perforación, dentro de un rango de 80 a 100 RPM, en los intervalos de alta inclinación. Esto permitirá favorecer la remoción mecánica de

los lechos de recortes que tienden a asentarse en el lado bajo de la trayectoria y contribuirá a realizar los viajes de tubería con menores condiciones de arrastre.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- API. (2024). *API Publications Catalog*.
- Carrillo, J. (2018). *Evaluación de arcilla organofílica gastada como aditivo reológico de lodo base aceite*.
- Clavijo Martínez, J. (2022). *Evaluación De Los Parámetros De Limpieza Del Pozo Y Su Impacto En La Velocidad De Perforación*. Bucaramanga.
- Cuchicgo, K. (2022). *Estudio del comportamiento del fluido de perforación a base diesel expuesto a diferentes concentraciones de contaminantes*. Quito.
- Fajardo Vélez, A., & Rojas Quimbaya, O. (2016). *EVALUACIÓN TÉCNICO FINANCIERA DEL EFECTO EN LAS PROPIEDADES FISIOQUÍMICAS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION BASE ACEITE Y BASE AGUA POR EL USO DE TRES TIPOS DE ADITIVOS LUBRICANTES A NIVEL DE LABORATORIO*.
- Ghosn, R. (2017). *Pickering Stabilized Drilling Fluids for deep and ultra-deep*.
- Guzman , A. (2021). *Estudio para la reutilización de los fluidos de perforación en las secciones de 12 ¼ y 8 ½ para los pozos direccionales perforados del campo Tiputini*.
- Houston. (1991). *Drilling fluid engineering manual*. Dresser Industries Inc.
- Hughes, B. (2022). *AQUA-DRILL fluid systems*.
- Martínez Pérez, R. (2012). *Análisis de un fluido de perforación base amina PHPA y Glicol para determinar la efectividad de la trietanol como controlador de PH*. Quito.
- Morales Hernández, R. (2014). *Seguimiento operativo del fluido de perforacion en la intervencion del pozo Mizton 01*. Chiapas.

- Morán Félix, A. (2017). *Obtención de una píldora de encapsulamiento para ripios de fluido de perforación base agua a partir de la sábila*. Quito.
- Saffari, H., Soltani, R., Alaei, M., & Soleymani, M. (2018). *Propiedades tribológicas de fluidos de perforación a base de agua con nanopartículas de borato como aditivos lubricantes*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.07.049>
- Salazar Molina, & Vásconez Santander. (2024). *Diseño de un plan de mejora para el área de preanálisis de un laboratorio privado Lac2 en Quito, en base a la norma ISO 15189:2012*.
- Sanchez Mejía, E., & Villavicencio González, C. (2014). *Estudio para optimizar las operaciones de perforación de pozos de largo alcance utilizando un sistema de fluido de perforación de alto rendimiento*. Quito.
- Schlumberger. (2007). *Reservoir Engineering Manual*. Schlumberger Oilfield Glossary.
- Schlumberger. (2022). *Energy Glossary*.
- Sun, Y., Zhou, M., Cui, Y., & Xu, Z. (2026). Cuttings transport characteristics and bed development velocity prediction in extended-reach well based on experimental and CFD-DEM method. doi:<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2026.122725>
- Vera Beteta, C. (2013). *Mejoramiento del sistema de control de sólidos del equipo de perforación de pozos de petróleo y gas GMP-10*. Lima.
- Wahrung, A. (2020). *Field Testing Water-based Drilling Fluids*.
- Wallace, J. (2004). *Drilling - Advances in API/ISO Oil Mud Chemical Analysis Field Procedures*. Houston. Obtenido de <https://www.spegcs.org/events/402/>
- Zurita Dávila, T. (2017). *Obtención de una píldora de encapsulamiento para ripios de fluido de perforación base agua a partir del melloco*. Quito.

## ANEXOS

| AUCA-J153<br>Estado Mecánico |           |                  |                   |                                                      |
|------------------------------|-----------|------------------|-------------------|------------------------------------------------------|
| Estrati.                     | Litología | Topes<br>(ft MD) | Topes<br>(ft TVD) | Revestimientos                                       |
|                              |           |                  |                   | 20"<br>200 ft MD<br>200 ft TVD                       |
| Ortega                       |           | 5902             | 5746              | 13 3/8"<br>5952 ft MD<br>5791 ft TVD<br>72# C-95 BTC |
| Tiyuyacu                     |           | 6904             | 6637              |                                                      |
| Tope Congl. Superior         |           | 7119             | 6829              |                                                      |
| Base Congl.                  |           | 7215             | 6914              |                                                      |
| Tiyuyacu                     |           |                  |                   |                                                      |
| Congl. Tiyuyacu Inf.         |           | 8429             | 7994              |                                                      |
|                              |           | 8625             | 8168              |                                                      |
|                              |           | 8834             | 8354              |                                                      |
| Tena                         |           |                  |                   |                                                      |
| Tope Basal Tena              |           | 9575             | 9013              |                                                      |
| Napo                         |           | 9595             | 9031              |                                                      |
| Caliza M-1                   |           | 9811             | 9224              |                                                      |
|                              |           | 9858             | 9266              |                                                      |
| Caliza M-2                   |           | 10029            | 9422              |                                                      |
|                              |           | 10087            | 9475              |                                                      |
| Caliza A                     |           | 10148            | 9532              |                                                      |
|                              |           | 10237            | 9614              |                                                      |
| Tope Arenisca U. Sup.        |           | 10317            | 9689              |                                                      |
| Tope Arenisca U. Inf.        |           | 10384            | 9752              |                                                      |
| Base Arenisca U. Inf.        |           | 10429            | 9795              |                                                      |
| Tope Caliza B                |           | 10547            | 9907              |                                                      |
| Tope Arenisca T. Sup.        |           | 10575            | 9933              |                                                      |
| Tope Arenisca T. Inf.        |           | 10670            | 10024             |                                                      |
| Base Arenisca T. Inf.        |           | 10724            | 10076             |                                                      |
| Lower Napo Shale             |           |                  |                   |                                                      |
| Caliza C                     |           | 10818            | 10167             |                                                      |
| Hollin Superior              |           | 10829            | 10177             |                                                      |
| Hollin Inferior O P          |           | 10890            | 10236             |                                                      |
| PT                           |           | 11043            | 10385             | PT 11043 ft MD<br>10385 ft TVD                       |
|                              |           |                  |                   | 9 5/8"<br>10049 ft MD<br>9441 ft TVD<br>47# C-95 BTC |
|                              |           |                  |                   | 7"<br>11043 ft MD<br>10385 ft TVD<br>26# C-95 BTC    |

