

Metodología para seleccionar el procedimiento más adecuado que permita controlar el filtrado y la invasión de lodo hacia la cara del pozo en función de las propiedades de la roca y las condiciones operacionales

Jose Alejandro Quitiaquez Melo

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Diego Armando Vargas Silva

Magister en Geofísica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2024

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios por brindarme fuerza, sabiduría y perseverancia durante todo este proceso de investigación.

A mis padres, José Benjamín y Lilibeth del Pilar, les debo todo. Su amor incondicional, su sacrificio constante y su guía inquebrantable han sido el faro que ha iluminado cada paso de mi camino. No existen palabras suficientes para expresar mi gratitud por todo lo que han hecho por mí. Su fe en mí, incluso cuando dudaba de mí mismo, ha sido mi mayor motivación. Cada logro que alcanzo es un reflejo de su amor, dedicación y apoyo. Este título no solo es mío, sino también de ustedes. Gracias por ser mis héroes y mis mayores modelos a seguir.

A mis queridos hermanos, Jesus Enrique, Juan David y Maria Alejandra, les agradezco por su ánimo y complicidad. Su presencia y afecto incondicional han enriquecido mi vida de innumerables maneras. Siempre han estado a mi lado, compartiendo tanto las alegrías como los desafíos. Este logro también es suyo, porque cada paso que doy lo hago con ustedes en mi corazón.

A mi amada esposa, Lilia Valentina, agradezco su paciencia, comprensión y aliento constante. Tu amor inquebrantable y tu respaldo desinteresado han sido mi roca en medio de las tormentas. Este logro también es tuyo, porque cada victoria mía es también tuya. Gracias por ser mi compañera de vida y mi mayor inspiración.

A Diego Armando Vargas, mi director de tesis, le agradezco por su orientación experta, su dedicación y su motivación. Su sabiduría y guía han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

A mi amigo Gean Franco Zuleta por su amistad, colaboración, compañerismo y dedicación durante todo el proceso, su ayuda y consejos enriquecieron enormemente este trabajo y ha hecho que el camino hacia la culminación de este proyecto sea más llevadero.

A mis amigos (Lina Martinez, Jesus Montes, Jorge Silva, Luisa Murillo, Camila Bautista y Alejandra Hernandez) quiero agradecerles por su ánimo, alegría y por estar a mi lado en los momentos difíciles. Su amistad ha sido un obsequio invaluable que atesoro profundamente.

Y finalmente, quiero dedicar este título a la memoria de mis queridas abuelitas, Mamita Carmelina y Magalis Pinto. Aunque ya no están físicamente con nosotros, su amor, sabiduría y respaldo siguen vivos en mi corazón. Este logro es un tributo a su ejemplo de fortaleza y bondad. Siempre estarán presentes en cada paso que dé en mi camino. Descansen en paz, queridas abuelitas.

Tabla de contenido

Introducción	13
1.0 Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivo Específico	15
2.0 Generalidades	16
2.1 Planteamiento del problema	16
2.2 Alcance.....	16
2.3 Justificación.....	17
3.0 Marco Teórico	17
3.1 Filtrado de lodo	19
3.2 Revoque.....	19
3.3 Tipos de filtrado.	20
3.3.1 Filtración estática	20
3.3.2 Filtración dinámica.....	21
3.4 Métodos de mitigación de pérdida de filtrado.....	21
3.4.1 Uso del almidón de yuca	22
3.4.2 Uso de biopolímeros.....	23
3.4.3 Uso de bentonita.....	23
3.4.4 Perforación underbalance	24

3.4.5	Uso de nanopartículas y arcillas.....	24
3.4.6	Lodo de perforación ecológico generado a partir de desechos	25
3.4.7	Método de mitigación con cáscara de arroz y aserrín para lodos a base agua.	25
3.4.8	Planificación de distribución del tamaño de las partículas de los materiales utilizados en el control de filtrado con carbonatos (RIPI – LQC)	26
3.5	Métodos de mitigación de pérdidas de lodo o circulación.	26
3.5.1	Uso de la caliza	26
3.5.2	Uso de nanotecnología	27
3.5.3	Fluido de perforación a base de agua de óxido de metal	27
4.0	Resultados	28
4.1	Identificación de los impactos y efectos que pueda generar un excesivo filtrado e invasión de lodo hacia la cara del pozo y sus consecuencias en el desarrollo de un proyecto de perforación.	28
4.1.1	Grosor del cake.....	29
4.1.2	Impacto del filtrado	30
4.2	Análisis de los métodos que se han implementado en las operaciones de perforación de pozos a nivel mundial para prevenir el filtrado y las pérdidas de lodo.	34
4.2.1	Resistencia a la propagación de la fractura:	38
4.2.2	Aislamiento de pozo.....	42
4.2.3.	Fenómeno físico stress cages	44
4.2.4	Cierre de fractura.....	46

4.3 Variables que influyen en la implementación de los mecanismos de mitigación de pérdidas de filtrado y de lodos.	52
4.3.1 Características del yacimiento.....	52
4.3.2 Tipo de fluido de perforación.....	52
4.3.3 Diseño de la perforación	52
4.3.4 Condiciones operativas	53
4.3.5 Factor económico	53
4.3.6 Experiencia y conocimiento del personal.....	53
4.4 Desarrollo de un flujo de trabajo para seleccionar la metodología del control de pérdidas que mejor se adapte a una zona.	60
4.5 Árbol de decisión para pérdidas durante perforación.....	76
4.5.1 Primer Paso	76
4.5.2 Segundo Paso	77
5.0 Conclusiones	81
6.0 Recomendaciones.....	84
7.0 Referencias	85

Lista de Tablas

Tabla 1. Costo por tonelada de materiales utilizados	18
Tabla 2 Consecuencias generadas por la filtración.....	33
Tabla 3 Clasificación de pérdidas en función de su tasa	35
Tabla 4 Teoría de puenteo en función de la garganta de poro.....	58

Lista de Figuras

Figura 1 Prueba de almidón de yuca.....	22
Figura 2 Esquema propagación de una fractura en la formación.....	41
Figura 3 Mecanismos de taponamiento y puenteo de la fractura.....	48
Figura 4 Mecanismo de llenado de la fractura.....	49
Figura 5 Métodos para prevenir el filtrado y las pérdidas de lodos en la perforación.....	51
Figura 6 Fracturas inducidas y esfuerzos horizontales.....	56
Figura 7 Esquema Se hará, Se puede y Se debería.....	61
Figura 8 Síntesis del flujo de trabajo.....	62
Figura 9 Plan de acción planteado en función de las condiciones.....	70
Figura 10 Árbol de decisión para pérdidas durante perforación.....	71
Figura 11 Árbol de decisión para pérdidas durante perforación pérdidas seepage ..	72
Figura 12 Árbol de decisión para pérdidas durante perforación pérdidas parciales	73
Figura 13 Árbol de decisión para pérdidas durante perforación pérdidas severas...	74
Figura 14 Árbol de decisión para pérdidas durante perforación pérdidas totales	75

Glosario

NPT (Non Productive Time): Hace referencia al tiempo que es empleado para realizar operaciones que no permita el avance del proyecto, este tiempo conlleva incremento del costo el cual debe ser asumido por la empresa operadora.

Cake o Revoque: Capa formada por el medio disperso depositado en la cara de pozo, debido a la filtración de fluido de perforación hacia la formación, que cumple un rol sellante el cual evita que se siga filtrando dicho fluido generando problemas operacionales como lo es el daño a la formación.

Filtrado: Se conoce como filtrado al transporte de fluido de perforación hacia la formación debido a una presión diferencial.

Suabeo: Problema operacional que se puede generar al sacar la sarta de perforación a una velocidad superior a la adecuado causando una reducción de presión en el fondo que puede ocasionar que los fluidos de la formación migren hacia el pozo.

Pistoneo: Problema operacional que se puede generar al meter la sarta de perforación a una velocidad superior a la adecuada generando un incremento de la presión en el fondo la cual puede fracturar la formación y que los fluidos de perforación migren hacia la formación.

Viaje: Operación en donde se baja o se extrae la sarta de perforación al pozo perforado, esto con el fin de realizar cambios de herramientas, acondicionar el pozo o instalación de revestimiento.

LCM: Por sus siglas en ingles Lost control material, es el material agregado al fluido para controlar las pérdidas de lodo y poder recuperar la circulación.

Big Bags: Es un tipo de contenedor flexible utilizado para transportar y almacenar materiales a granel, como polvos, granulados o productos sólidos.

Last Planner: Es una metodología de planificación y gestión. Este sistema se centra en mejorar la eficiencia, la colaboración y la fiabilidad en la planificación y ejecución de procesos.

Tandem: Hace referencia al bombeo de 2 píldoras consecutivamente.

Espotear: Hace referencia a ubicar una píldora o un fluido a una profundidad específica.

Well Commander: Válvula auxiliar utilizada en el área de perforación para restringir el paso de fluidos de un punto hacia debajo del ensamblaje de fondo, para su activación se requieren unas esferas de bronce enviadas por el operario desde superficie, las cuales son circuladas a través de la tubería de perforación.

Al Vuelo: Hace referencia a agregar o bombear material al fluido que ingresa al pozo.

Resumen

Descripción: La industria petrolera, especialmente en el área de perforación, enfrenta desafíos operacionales significativos, entre ellos, la pérdida de lodo de perforación y filtrado. Esta investigación se centró en identificar métodos efectivos para corregir estas pérdidas. Se desarrolló una metodología sistemática para seleccionar el procedimiento más idóneo con el fin de ejercer un control óptimo sobre este problema operativo.

El estudio involucró la identificación de varios métodos de control de pérdida de lodo y filtrado, y a partir de estos, se diseñó una metodología que permite la selección del enfoque más adecuado. El resultado principal fue la construcción de un árbol de decisiones, una herramienta efectiva que agiliza los tiempos de resolución a la hora de identificar, analizar y resolver los problemas eficazmente.

Con esta investigación se construyó un árbol de decisiones que permite utilizar múltiples metodologías de control de pérdidas, estas se clasifican en función de la tasa de pérdida de fluidos. Al tener soluciones planteadas permite optimizar tiempos de respuesta y mejora la eficiencia en la resolución de los problemas operacionales relacionados con la pérdida de fluido, mediante la elección rápida del método óptimo con el que puede solucionarse una pérdida de fluido, eso puede ir desde agregar mayor concentración de material puenteante hasta el aislamiento de las zonas de pérdidas mediante píldoras LCM y/o bombeo de tapones de cemento.

Palabras Clave: Pérdidas de fluido, Pérdidas de filtrado, perforación de pozos, fluidos de perforación, metodologías para remediar las pérdidas.

Abstract

Description: The oil industry, especially in drilling, faces significant operational challenges, including drilling mud and filtrate losses. This research focused on identifying effective methods to correct these losses. A systematic methodology was developed to select the most suitable procedure to exert optimal control over this operational problem.

The study involved the identification of several sludge and filtrate loss control methods, and from these, a methodology was designed to allow the selection of the most appropriate approach. The main result was the construction of a decision tree, an effective tool that speeds up resolution times when identifying, analyzing, and solving problems effectively.

With this research, a decision tree was built that allows the use of multiple loss control methodologies, which are classified according to the rate of fluid loss. Having proposed solutions allows optimizing response times and improves efficiency in solving operational problems related to fluid loss, by quickly choosing the optimal method with which a fluid loss can be solved, that can range from adding higher concentration of bridging material to isolation of loss areas by LCM pills and / or pumping cement plugs.

Keywords: Fluid losses, filtrate losses, well drilling, drilling fluids, methodologies to remediate losses.

Introducción

Las pérdidas de lodo y filtrado conllevan tiempos no productivos, que a su vez, causan grandes pérdidas económicas a las industrias estas representan alrededor de 20 billones de dólares anuales, un 18% de los costos totales (Emhanna, 2018) debido al costo de los fluidos de perforación; sin embargo, existen diversas formas de preparación de lodos, como el uso de nanomateriales, ayudando con la formación del cake, el cual es una capa que se forma por la filtración del lodo hacia la formación, dejando materiales sólidos en las paredes del pozo que impide el filtrado excesivo. La formulación de este tipo de lodos resulta ser muy costosa para la industria, por lo que su utilización no es factible en todas las ocasiones. Por este motivo, la presente investigación busca enfocarse en diseñar una metodología previniendo y controlando las pérdidas de lodo y filtrado, sin generar mayores costos en su aplicación.

En ese sentido, se identifican los impactos y efectos que pueda generar un excesivo filtrado e invasión de lodo hacia la cara del pozo y sus consecuencias en el desarrollo de un proyecto de perforación. Estos problemas pueden afectar tanto la productividad del pozo como la estabilidad de la formación, lo que a su vez puede aumentar los costos operativos y prolongar el tiempo de perforación.

Posteriormente se lleva a cabo el análisis de los métodos que se han implementado en las operaciones de perforación de pozos a nivel mundial para prevenir el filtrado y las pérdidas de lodo, así como la descripción de variables que influyen en la implementación de los mecanismos de mitigación de pérdidas de filtrado y de lodos, tomando en cuenta que esto es esencial para mejorar la eficiencia, la seguridad y cumplir con la normatividad. Además, fomenta la innovación y el avance tecnológico en la industria de perforación de pozos.

El presente estudio concluye que determinar los efectos de la filtración excesiva y la invasión de lodo en la cara del pozo es fundamental para comprender el impacto que puede tener en el desarrollo de un proyecto de perforación.

A continuación, se inicia con una descripción de los problemas generados por el filtrado y las pérdidas de lodo. Los impactos identificados pueden incluir reducción de la productividad del pozo, aumento de los costos operativos, riesgo de daños a la formación, problemas de estabilidad del pozo y retrasos en el cronograma del proyecto. Es importante tomar medidas adecuadas para controlar y mitigar estos efectos para garantizar un proyecto de perforación exitoso y rentable. Además, se realizó una revisión de las metodologías que se utilizan en la industria para prevenirlo o controlarlo, y por último un análisis de las variables influyentes que permitieron idear una metodología de selección para un tratamiento óptimo y eficaz a la hora de remediar las pérdidas de fluido.

1.0 Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar una metodología para seleccionar el mejor mecanismo de control de filtrado e invasión de lodo en cara de pozo en función de las propiedades de la roca y condiciones operacionales.

1.2 Objetivo Específico

- Identificar los impactos y efectos que pueda generar un excesivo filtrado e invasión de lodo hacia la cara del pozo y sus consecuencias en el desarrollo de un proyecto de perforación.
- Analizar los métodos que se han implementado en las operaciones de perforación de pozos a nivel mundial para prevenir el filtrado y las pérdidas de lodo.
- Estudiar las variables influyentes a la hora de la implementación de los mecanismos de mitigación de pérdidas de filtrado y de lodos.
- Desarrollar un flujo de trabajo para seleccionar la metodología del control de pérdidas que mejor se adapte a una zona.

2.0 Generalidades

2.1 Planteamiento del problema

El lodo de perforación debe estar diseñado para controlar la presión de formación y así evitar la invasión de fluidos externos al pozo, pero en caso de una excesiva filtración esto se refleja negativamente a la hora de realizar los registros eléctricos los cuales se dificultarán debido a la capa gruesa alojada en las paredes del pozo (steemit,2018). Entre otras dificultades se tiene el aumento del grosor del revoque causado por la alta filtración, generando una reducción del espacio anular que, a su vez, esta genera un aumento del suabeo, pistoneo y pegas diferenciales.

Uno de los problemas más graves que se pueden encontrar es, el daño a la formación, cambio de humectabilidad de las rocas, taponamientos, disminución de la permeabilidad, disminución de los tanques de lodo entre otros (Steemit,2018). Las zonas de alta permeabilidad o zonas fracturadas son áreas críticas para la perforación ya que en este tipo de formaciones ocurre una gran pérdida de lodo, acarreando aumento de los NPT y de los costos del proyecto.

Existen múltiples tratamientos y metodologías aplicados en laboratorios y en la industria los cuales están basados en condiciones de litologías, parámetros, tiempo y recursos, por lo que se debe diseñar un árbol de decisiones que permita el uso rápido y eficaz.

2.2 Alcance

En este trabajo de grado se definirá una metodología que pueda determinar cuál método de control de pérdidas utilizar, con base a una revisión teórica sobre aquellos que se aplican actualmente en la industria y los parámetros más influyentes a la hora de realizar estas operaciones, permitiendo recomendar las formulaciones y procedimientos más adecuados para llevar a cabo una operación exitosa.

2.3 Justificación

El inicio de las operaciones petroleras depende de una buena perforación del pozo, dicha operación requiere una exhaustiva planificación para que se puedan cumplir los objetivos planteados. Para realizarlo, uno de los parámetros a tener en cuenta es el lodo de perforación aplicado, este debe cumplir con ciertos criterios para que todo se lleve con normalidad. La existencia de zonas de alta permeabilidad puede generar pérdidas de lodo y de filtrado si el lodo no está preparado para prevenir el problema.

Así como esta zona, existen otras más donde se requiere que la torta de filtrado se forme de manera óptima, para que el fluido de perforación pueda cumplir sus funciones, ya sea preparado desde la planeación o reestructurado en el momento de la emergencia., En caso de presentarse problemas, se deben aplicar diversos métodos dependiendo de la formación y las necesidades requeridas para cumplir rápidamente su cometido; cabe resaltar que el costo de la preparación de este tipo de fluidos no es bajo y resulta un aumento en los gastos en toda la operación de perforación.

3.0 Marco Teórico

Las pérdidas de filtrado y de lodo son parámetros que afectan negativamente la economía de un proyecto, estos pueden contribuir a los “tiempos no productivos” (en inglés, Non-Productive Time, NPT), estos pueden ser causados diversos escenarios durante la perforación, uno de ellos es la variabilidad en las formaciones que se vuelven propensas a generar pérdida de lodo. El costo de cada uno de los mecanismos que pueden ser implementados aumenta cada vez más el precio del proyecto. Para realizar un análisis económico es necesario analizar las probabilidades, Valor

monetario (EMV) y análisis de árboles de decisión (DTA) para recomendar la viabilidad financiera de un mecanismo. (Alkinani et al., 2019)

Existe una tabla que permite saber el costo por tonelada de los materiales utilizados para crear el lodo estos son:

Tabla 1. Costo por tonelada de materiales utilizados

Nombre del material	Precio dólares por tonelada	Precio dólares por kilogramo
Bentonita	317	0,317
Mica fina	500	0,5
Mica Media	700	0,7
Nut Plug	960	0,96
CaCo3 Medio	313	0,313
CaCo3 Cuarzo	350	0,35
Material sellante	1200	1,2
LCM	900	0,9
Cemento	318	0,318
Diesel	500	0,5

Fuente: Al-hameedi et al. (2018)

Existe una serie de ecuaciones que nos permiten calcular cuánto sería el costo total de un tratamiento de lodo para corregir algún percance, las cuales son:

$$(1) \text{ Costo Total (\$)} = \text{Costo del tratamiento (\$)} + \text{NPT Total (\$)}$$

$$(2) \text{ Costo Promedio de Tratamiento (\$)} = \text{Costo de tratamiento} * \text{Volumen de Agua (m}^3\text{)}$$

$$(3) \text{ NPT Total (\$)} = \text{Tiempo de espesamiento (hr)} * \text{Costo de equipo de perforación}$$

(4) Costo final de éxito (\$) = Costo Total (\$) *Número de uso de tratamiento exitoso/Pozos

Exitosos

(5) Costo Final de Falla (\$) = Costo Total (\$) *Número de Tratamientos de Falla Uso/Pozos

Fallidos

El costo final puede verse afectado de diversas maneras, así que este tipo de ecuaciones pueden ser modificadas dependiendo del tipo de operación que se tenga.

3.1 Filtrado de lodo

El filtrado es la acción donde una presión diferencial (diferencia de presión entre la formación y el fluido) impulsa la fase líquida del fluido de perforación dentro de una formación permeable, la cual circula a través de las paredes de esta. Por otro lado, los sólidos o aditivos se adhieren a la cara del pozo donde se forma el Revoque o cake (Martínez, 2011; Steemit, 2018).

En pocas palabras, Forero (2016), define la filtración como un proceso de separación mecánica de la fase líquida del fluido de perforación en un medio permeable, donde si el medio se encuentra interconectado (permeabilidad) permitirá el paso de la fase líquida y restringirá el paso de partículas sólidas, dichas partículas son sólidos de formación, arcillas y materiales densificantes, que pueden formar un revoque en la superficie del permeable.

3.2 Revoque

El Revoque o Cake es la Capa formada por el medio disperso debido a la filtración de fluido de perforación hacia la formación, que cumple un rol sellante el cual evita que se siga filtrando dicho fluido, generando problemas operacionales como lo es el daño a la formación. Idealmente, debe ser delgado e impermeable, Por otro lado, debe cumplir con ciertas funciones: ayudar a

controlar la pérdida de filtrado, minimizar los daños a la formación y mantener la estabilidad de las paredes del pozo (Steemit, 2018).

3.3 Tipos de filtrado.

Existen dos tipos de filtración, la dinámica y la estática. Las cuales están definidas del siguiente modo:

3.3.1 Filtración estática

Este tipo de filtración ocurre cuando la presión hidrostática ejercida por el fluido de perforación supera a la presión máxima permitida por la formación o en zonas de alta permeabilidad donde el cake no se formó de manera correcta. Al no estar circulando se ocasiona un filtrado lento y además genera un cake de mayor espesor. Este tipo de situaciones se puede observar en conexiones o viaje de tubería.

De acuerdo con Valcarcel (2021), en estas condiciones estáticas la tasa de filtración es explicada mediante la ley de Darcy, un modelo clásico de flujo de fluido que identifica los aspectos que están afectando la filtración, así mismo, es usado para estimar el volumen de filtrado y el espesor del revoque, cuya variable más importante es la permeabilidad del revoque.

$$(1) \quad Q = -A*k*\Delta h/L$$

Q es el caudal volumétrico del fluido a través del medio poroso (m^3/s).

A es el área transversal al flujo (m^2).

k es la permeabilidad del medio poroso (m^2).

Δh es el gradiente hidráulico, la diferencia de altura del nivel del fluido a lo largo de la longitud de flujo (m).

L es la longitud del medio poroso a lo largo del flujo (m).

Esta ecuación establece que el caudal del fluido es directamente proporcional al área transversal al flujo y al gradiente hidráulico, y es inversamente proporcional a la permeabilidad y a la longitud del medio poroso.

3.3.2 Filtración dinámica.

Este tipo de filtrado se da cuando el lodo está en movimiento (circulando), al perforar un pie nuevo parte del lodo se filtra hacia la formación generando el cake o revoque.

La diferencia entre la filtración dinámica y estática es perceptible, mayormente con tasas de filtración altas, es decir, en condiciones dinámicas, el sobrealance de la presión hidrostática causa el flujo inmediato del filtrado y a medida que continúe, los sólidos grandes del lodo sellan los poros de las formaciones y forman un revoque más delgado y más sólido, que se mantiene en equilibrio con la erosión hidráulica, hasta tal punto que la filtración dinámica es casi constante (Valcarcel, 2021). Así, en condiciones laminares, la tasa de filtración disminuye considerablemente mientras que en condiciones turbulentas y una vez, reanudada la circulación, comienza a desgastarse hasta lograr, nuevamente, un equilibrio en la tasa de filtración constante (Valcarcel, 2021). Sin embargo, en estas condiciones dinámicas durante el proceso de perforación, donde se deja circular el lodo por el pozo para que cumpla la función de recoger los ripios generados, la cantidad de filtrado es mucho mayor que en la estática, debido a la turbulencia que se genera mientras el taladro está activo; generando revoques más delgados por efecto de la erosión hidráulica causada por el movimiento del lodo en las paredes de la formación. (Steemit,2018).

3.4 Métodos de mitigación de pérdida de filtrado.

En la industria existen diversos métodos para la mitigación de pérdidas para esta investigación se tuvo en cuenta los siguientes métodos documentados:

3.4.1 Uso del almidón de yuca

Este tipo de metodologías es un diseño efectivo para prevenir la pérdida de los fluidos, en las pruebas realizadas con Filtro de prensa API de baja presión y temperatura “LPLT” (en inglés, Low Pressure Low Temperature), se obtuvo una reducción de 6,8 a 5,6 ml resultando en un espesor de la torta de 0,155 a 0,135 cm. (Novrianti et al., 2019).

Es utilizado por sus propiedades físico – químicas, resultando una alternativa sustentable, para este tipo de fluidos se obtuvo que a una concentración de 10 lb/bbl mantiene valores mínimos de reología los resultados se pueden observar en la Figura 1:

Figura 1 Prueba de almidón de yuca

Concentración	Almidón		Almidón fermentado	
	5 lb/1 bl H ₂ O	10 lb/1bl H ₂ O	5 lb/1 bl H ₂ O	10 lb/1bl H ₂ O
	14,27 (kg/m ³)	28,58 (kg/m ³)	14,27 (kg/m ³)	28,58 (kg/m ³)
Filtrado API (ml)@30 min	92	95	350	116
pH	8,18	8,25	7,24	7,20
600 RPM	3,0	4,0	2,0	3,0
300 RPM	2,0	3,0	2,0	2,0
200 RPM	2,0	2,0	1,0	2,0
100 RPM	1,0	2,0	1,0	1,0
6 RPM	1,0	1,0	1,0	1,0
3 RPM	1,0	1,0	1,0	1,0
V _p (cP)	1,0	1,0	0,0	1,0
Y _p (lb/100 ft ²)	1,0	2,0	2,0	1,0
V _a (cP)	1,5	2,0	1,0	1,5

Fuente: Ramos Aguirre, Fausto, Chadrina, Olga, Freire Carrera, Fausto, Guaquipana Paredes, Jonathan, & Romero Cortez, Henry. (2023).

Este tipo de controladores tienen problemas en situaciones de alta temperatura y de fácil descomposición así que requiere un control de CO₂ muy minucioso, además este tipo de fluidos en largos periodos de tiempo sufren un agotamiento muy rápido y debe ser repuesto al sistema con frecuencia. (J.C. Santivañez, W.E. Cano, D. Ordoñez y A. Bohórquez., 2019).

3.4.2 Uso de biopolímeros

Los biopolímeros y los almidones son agregados comúnmente para aumentar la viscosidad y reducir la pérdida del filtrado, la migración hacia los biopolímeros lo hace más sostenible con el ambiente. Se han encontrado en las pruebas que las tortas generadas a partir de este tipo de lodos son más delgadas, compactos y además reduce el daño a la formación debido a la menor penetración de partículas de lodo. (Ali et al., 2022).

Este tipo de materiales se puede utilizar para formaciones donde su permeabilidad esperada esté entre 1 y 10 miliDarcys, es decir en un nivel entre bajo y medio (J.C. Santivañez, W.E. Cano, D. Ordoñez y A. Bohórquez., 2019).

3.4.3 Uso de bentonita

La bentonita es un tipo de arcilla compuesta principalmente por minerales del grupo de las esmectitas, como la montmorillonita. Es conocida por su capacidad de hincharse en presencia de agua, formando una pasta gelatinosa con propiedades únicas. Se encuentra en depósitos naturales en diversas partes del mundo, y se utiliza en una amplia gama de aplicaciones industriales una de ellas es actuar de viscosificante en el lodo de perforación para la industria petrolera.

Se le asocia algunos aspectos críticos como lo es la formación del cake a la hora de la perforación, por lo que se ha estudiado el uso del lodo con diversas cantidades de bentonita obteniendo permeabilidades de 0,026 miliDarcys lo que representa una formación porosa. (Vipulanandan & Mohammed, 2020).

Este tipo de materiales busca utilizarse en zonas de alta permeabilidad (mayores de 10 mD) esto con el fin de buscar una reducción de la permeabilidad y evitar que se siga filtrando el fluido

hacia la formación, utilizado en formaciones arenosas y en algunos casos de caliza debido a que estas pueden tener una mala porosidad efectiva. (Vipulanandan & Mohammed, 2020).

3.4.4 Perforación underbalance

la presión hidrostática del fluido de perforación se mantiene en un valor menor que la presión de poro de la formación. El daño a la formación causado por OBD (OverBalance Drilling) convencional con invasión de lodo y filtrado de lodo puede reducirse o eliminarse teóricamente con UBD (Underbalance Drilling)- (Ding, Herzhaft & Renard, 2006).

Este tipo de perforaciones no puede ser aplicado en todos los casos debido a múltiples factores:

- En primeras fases no se cuenta con método de control de pozo (solo utilizando un Riser o diverter).
- Existe un riesgo latente de descontrol lo que puede incidir en accidentes.
- Existe una posibilidad de aumento de NPT debido al tiempo que puede requerir el control del pozo.

3.4.5 Uso de nanopartículas y arcillas

En este tipo de operaciones se evalúa el efecto de agregar nanoarcilla, bentonita y nano sílice para aumentar la resistencia a la degradación del lodo, así como la optimización a la concentración de estos. La torta generada durante la perforación con adición de nanopartículas de silicio ofrece unas propiedades reológicas excepcionales que perduran en el tiempo. Las nanopartículas de silicio son sustancias biodegradables, no tóxicas y fácilmente sintetizables que añade lubricidad y termo estabilidad al fluido de perforación. Además, están clasificadas como el

material que consigue un mayor porcentaje de recuperación de petróleo residual en entornos de laboratorio y simulación para mejorar la recuperación de petróleo. (Elkatatny et al., 2018).

3.4.6 Lodo de perforación ecológico generado a partir de desechos

se reconoce como una alternativa ambiental, que permite una mejora en la perforación y vuelve este tipo de elementos a la producción mientras se protege al medio ambiente, esta técnica consiste en la ocupación de desechos de otro tipo de producciones que mantengan niveles de sólidos básicos para ocuparse en la industria petrolera (Arévalo, 2018).

Este tipo de lodos se basan en la reutilización de aguas residuales que cumplan con ciertas especificaciones, como lo son el PH, Concentración de metales pesados, Concentración de aceites y grasas, Concentración de sólidos totales disueltos y suspendidos (Arévalo, 2018). En la industria este tipo de agua se puede encontrar en las estaciones de osmosis del sistema de tratamiento de sólidos.

3.4.7 Método de mitigación con cáscara de arroz y aserrín para lodos a base agua.

Este método de mitigación resulta bastante útil precisamente porque gracias a sus características fisicoquímicas, promete ser un absorbente de metales pesados, demostrando eficiencia y facilidad en su aplicación, perfilándose como una alternativa viable, económica y de fácil acceso para solucionar problemas de contaminación (Llanos, et al, 2016).

Este tipo de materiales se utiliza en zonas donde las pérdidas sean menores a 5 barriles/hr y se tenga formaciones con porosidad, donde el aserrín o cascara de arroz cumple la función de alojarse en dichos poros y cortar la interconexión de las zonas, tienen una alta utilidad ya que el aserrín aumenta su volumen al humedecerse debido a que estos contienen poros y espacios vacíos que son llenados por el agua.

3.4.8 Planificación de distribución del tamaño de las partículas de los materiales utilizados en el control de filtrado con carbonatos (RIPI – LQC)

Este tipo de técnica permite generar una barrera de partículas combinadas que en algunos casos permite la detención de fluido en zonas fracturadas de alta permeabilidad, a partir de partículas granulares y consistentes que forma un puente inicial efectivo, dónde las partículas más finas pueden ser deformables para sellar las gargantas (Rios, s.f.).

Esta metodología se basa en implementar diferentes tamaños de partículas del material que puedan generar un tapón artificial de la garganta poral de la zona, es una metodología prácticamente universal que se puede utilizar en todo tipo de litologías. Un ejemplo de uso es los carbonatos D 5, 25, 50, 100, 150, 200 (la categoría permite comprender la distribución de tamaños de partículas en el material en micrómetros [μm]) utilizados como material puenteante durante la perforación.

3.5 Métodos de mitigación de pérdidas de lodo o circulación.

El fluido de perforación es parte fundamental de la operación ya que permite lubricar la sarta, enfriar la broca, retirar los cortes y cavings generados además de controlar la presión de poro y colapso del pozo.

Es por esto que se requieren diversos métodos para mitigar las pérdidas de dicho fluido, en la industria se pueden encontrar los siguientes métodos:

3.5.1 Uso de la caliza

En los lodos donde hay presencias de partículas sólidas de caliza, aumenta su rendimiento y/o desempeño, Con este tipo de formulaciones se obtuvo una mejora en la tasa de retorno del 70 al 95% a lo largo de un evento de pérdidas después de la circulación del lodo, tendiendo a una tasa de filtración decreciente a medida que la presión hidrostática aumenta. (Shad et al., 2021).

3.5.2 Uso de nanotecnología

Hoy en día, se emplean materiales que no son nanopartículas como por ejemplo el carbonato de calcio como agente densificante esto basado en la petrofísica de la zona, pero este tipo de materiales tienen a ser muy deficientes por lo que se requiere mejorar las propiedades del cake aprovechándose de los nanomateriales como (Valencia Quintero, 2019), por ejemplo:

- **Nanopartículas de arcilla:** Las nanopartículas de arcilla, como la arcilla bentonítica modificada con nanoarcillas, se utilizan para mejorar las propiedades reológicas y de filtración de los fluidos de perforación. Estos nanomateriales ayudan a controlar la viscosidad y estabilizar la formación geológica.
- **Nanopartículas de sílice:** Se utilizan nanopartículas de sílice para mejorar las propiedades de lubricación y reducir la fricción en los fluidos de perforación. Esto puede conducir a una mejor eficiencia en la perforación y una menor presión de filtración.
- **Nanomateriales emulsionantes:** Algunos nanomateriales se utilizan como emulsionantes para estabilizar emulsiones y mejorar la eficiencia de la perforación en presencia de fluidos complejos.

Los nanomateriales son capaces de abordar los nano y micro poros que se encuentran en las fracturas que influyen en pérdidas de circulación (LCM).(Ferdous, 2013).

3.5.3 Fluido de perforación a base de agua de óxido de metal

Este tipo de fluidos limita el filtrado, disminuyendo el daño a la formación, permitiendo al mismo tiempo un fácil flujo de retorno, esto se da al mezclar fluidos viscosos con metales mezclados.

Estos fluidos incluyen óxido de mixto (MMO), óxido metálico hidróxido (MH) y mezclas de ambos (MMOH). Los fluidos de perforación basados en mezclas metálicas contienen un componente inorgánico denominado viscosificante de mezcla metálica que se basan en óxidos y/o hidruros de magnesio/aluminio. Las partículas de aleación metálica tienen naturaleza catiónica y reaccionan con las partículas de arcilla de forma electrostática, este tipo de fluidos permiten un cake más delgado y con menos permeabilidad que aísla la cara del pozo con el fluido de la formación.

La mezcla de una sustancia acuosa básica de al menos una parte de los metales mixtos con bentonita es la base de un fluido de perforación viscoso con metales mixtos. La alta viscosidad y reología de los fluidos de perforación tienen una capacidad limitada para penetrar en la formación; sin embargo, la protección de la formación primaria proviene de la formación del cake que sea fácilmente generable.

4.0 Resultados

4.1 Identificación de los impactos y efectos que pueda generar un excesivo filtrado e invasión de lodo hacia la cara del pozo y sus consecuencias en el desarrollo de un proyecto de perforación.

Entre las funciones principales del fluido de perforación se encuentra: controlar los fluidos de la formación, llevar a superficie los cortes generados durante la perforación, prevenir derrumbes, controlar el filtrado y pérdidas de lodo y mantener las paredes del pozo (Flores, s.f.).

Las pérdidas de lodo y filtrado tienen influencia sobre los costos operativos, ya que el fluido que se pierde debe reponerse en superficie, además este exceso de filtrado causa que se genere daño a la formación, un cake más grueso y que se pierda presión hidrostática debido a que el volumen del lodo disminuye.

4.1.1 Grosor del cake

En general, el cake debe ser delgado, porque de lo contrario evitará el correcto funcionamiento de las herramientas de registro, además generará problemas operativos como obstrucción, y pega de tuberías entre otros. (Bernal & Velásquez, 2017).

El cake realiza varias funciones, entre ellas incluyen:

- Reduce la pérdida de filtración, gracias a que se forma una capa impermeable en la pared del pozo, la pérdida de la fase acuosa del lodo hacia la formación genera en consecuencia, que se minimice el daño a la formación y preserve la integridad del pozo.
- Crea estabilidad de las paredes del pozo y evita el colapso durante el proceso de perforación.
- Crea un sello entre el hueco perforado y las fracturas que pueden ocurrir en la formación.
- Permite la correcta interpretación de registros eléctricos para identificar zonas potenciales que sean atractivas para la producción.

La filtración durante el proceso de perforación debe ser controlada, recordando que la tarea principal del lodo es manejar la presión de la formación y así evitar la entrada de líquidos externos en el pozo, que, si no se lleva a cabo a tiempo, puede convertirse en un problema operacional mayor. Se reconoce que se deben cumplir los siguientes factores para garantizar la eficiencia del proceso:

- Formar capas delgadas, de baja capacidad permeable y resistentes de cake en la pared del pozo.

- Preparación de un fluido de perforación con la densidad adecuada para lograr el ajuste correcto entre la presión hidrostática y la presión de la formación, se debe tener en cuenta que para mantener el equilibrio se tiene un margen de seguridad mayor a la presión hidrostática requerida en el punto este margen se elige en función de la necesidad del pozo.

Tener un alto grosor del cake puede generar los siguientes problemas operacionales:

- **Baja penetración:** puede dificultar la penetración de la broca en la formación objetivo. Esto puede aumentar el tiempo y el costo de perforación, así como el desgaste de los equipos de perforación.
- **Presión diferencial:** puede crear una presión diferencial significativa entre el pozo y la formación. Esto puede provocar problemas como la pérdida de circulación de lodo y la migración de fluidos no deseados desde la formación hacia el pozo.
- **Inestabilidad del pozo:** puede contribuir a la inestabilidad del pozo al sellar la formación de manera excesiva, lo que puede generar problemas como la fracturación de la formación, el colapso del pozo o la pega de tubería o revestimiento.

4.1.2 Impacto del filtrado

El filtrado del lodo desplaza la totalidad o parte de los fluidos móviles presentes en la formación, dejando una zona invadida. El proceso de invasión es complejo. En general, se considera que comienza con una pérdida inicial de fluido por golpe de presión cuando la broca penetra la roca. Durante este período, la invasión depende de la permeabilidad de la formación, entre otros factores. Pronto se forma un revoque de filtración, después del cual el proceso de invasión se describe como dinámico, cuando se circula lodo, o bien como estático, en ausencia de

circulación de lodo. En los últimos 20 años se ha invertido una gran cantidad de recursos económicos y energéticos en determinar metodologías que eviten las pérdidas de lodo debido a su impacto principal que es el daño a la formación. Existen varias razones por las cuales se busca determinar y disminuir el volumen de filtrado de lodo:

- El filtrado afecta la permeabilidad en arenas, ya que los sólidos taponan la garganta poral en este caso la productividad del pozo se verá afectada dependiendo de la distancia a la que el filtrado penetre en la arena. Por lo tanto, reducir la cantidad de filtrado puede aumentar la productividad del pozo. La cantidad de reducción de la permeabilidad de la zona dependerá de varios factores como lo son el tamaño de las partículas de los sólidos, tiempo de exposición, características del cake y el tipo de la formación.
- La invasión del filtrado de lodo puede alterar las curvas de resistividad de los registros eléctricos, y este cambio influye la distancia que logra alcanzar dicho registro. Es necesario conocer dicha distancia para interpretar con precisión los registros de resistividad. Para solucionar este problema operativo existen varias estrategias como lo es la remoción del cake, ya sea mecánica o química aplicando agentes desfloculantes.
- La filtración que se introduce en secciones arcillosas puede provocar que estas se hinchen y se desplacen hacia el pozo, esto puede obstruir el espacio anular generando una pega de empaquetamiento.

En efecto, los factores que controlan las propiedades filtrantes del fluido de perforación son:

- Las propiedades físicas y químicas del fluido.

- El sobre balance de presión aplicado.
- La velocidad anular.
- La tasa de penetración.
- El diámetro del pozo.
- El tiempo de circulación y el del fluido que permanece estático.
- Las propiedades de la roca: incluyendo porosidad, permeabilidad y las fracturas naturales.

El filtrado puede causar varios efectos en la formación como lo son:

- **Daño a la formación:** la invasión excesiva del filtrado puede cambiar las características de la formación en un espacio el cual es limitado por la presión diferencial que tenga la formación por lo que el radio de acción no se puede determinar, haciendo que el área abarcada sea muy amplia y, por lo tanto, es difícil evaluar la información de perfiles eléctricos. Esto podría causar cambios en la humectabilidad de la roca, obstrucción de los poros de la roca con partículas finas e hinchamiento de arcillas presente en la formación.
- **Colapso de las paredes del pozo:** En este caso, si la filtración penetra en formaciones consolidadas a través de microfracturas, puede hacer que los pozos colapsen, lo que lleva a una reducción en la tasa de penetración y, en el peor de los casos, ocasione una pega mecánica o por empaquetamiento.
- **Problemas operacionales en el completamiento de los pozos:** el problema consiste principalmente en la formación de cake grueso debido a la filtración

excesiva, que en realidad interfiere con los procesos para bajar el revestimiento antes del proceso de cementación, es decir, una de las condiciones que necesita el pozo para su puesta en producción está determinada por el revestimiento, el cual con un cake grueso, choca causando dificultad para bajar, además no permite una buena adición del cemento entre la formación y el revestimiento (Jean & Lee, 1999).

Es relevante que los fluidos de perforación tengan un mínimo filtrado posible, para minimizar la invasión a la formación. Debe comprenderse que la filtración depende en gran medida de la capacidad del fluido de formar un cake consistente e impermeable contra la cara del medio poroso, no obstante, un revoque formado de forma exclusivamente por sólidos particulados será muy susceptible a erosionarse y permeable, mientras que si contiene polímeros o partículas fibrosas, será menos erosionable, más delgado e impermeable (Yang, Nakhla y Bassi, 2005).

Tabla 2 Consecuencias generadas por la filtración

Ocurrencia	Consecuencias
Cambio en la saturación de fluidos en el medio poroso	<ul style="list-style-type: none"> • Alteración en las propiedades capilares e hidráulicas de la roca • Cambios en la permeabilidad relativa • Bloqueo por agua • Debilitamiento de la matriz de la roca
Invasión de surfactantes	<ul style="list-style-type: none"> • Alteración de la mojabilidad • Incremento en la movilidad de las partículas finas • Cambios en la tensión interfacial • Formación de emulsiones
Cambios en el ambiente iónico (salinidad, contraste de salinidad, cationes, y pH)	<ul style="list-style-type: none"> • Hinchamiento de arcillas • Migración de partículas finas y arcillas • Precipitación mineral por intercambio iónico • Precipitación inorgánica • Precipitación orgánica

Fuente: Yang, L., Nakhla, G. y Bassi, A. (2005). Deshidratación electrocinética de lodos aceitosos.

Se debe tener presente que la fase líquida de los fluidos de perforación contiene sustancias químicas que se han diseñado para cumplir los propósitos adecuados en el fluido, de manera general, el fluido debe contener sustancias alcalinas para el control del pH, dispersantes con la intención de evitar la floculación de las partículas sólidas, una cantidad específica de hidrocarburos, lubricantes y en el caso de los fluidos emulsionados, surfactantes para mantener la estabilidad de la emulsión y para obligar a los sólidos a ser mojados por la fase de aceite. Del mismo modo habrá una cantidad de sales disueltas (Yang, Nakhla y Bassi, 2005).

Los productos en cuestión son necesarios para el mantenimiento de las propiedades del fluido de perforación, cumpliendo sus funciones una vez que filtran al medio poroso. Existen factores que pueden influenciar en el comportamiento del fluido de perforación como lo es la temperatura en fondo si se da un incremento de la temperatura, la viscosidad y la densidad del fluido cambiarán, aumentando y disminuyendo respectivamente.

4.2 Análisis de los métodos que se han implementado en las operaciones de perforación de pozos a nivel mundial para prevenir el filtrado y las pérdidas de lodo.

En los últimos años la industria del petróleo y el gas ha logrado diferentes avances en el desarrollo de tecnologías y técnicas de perforación que convierten la construcción de pozos como una ciencia que puede permitir rentabilidad y seguridad a la hora de perforar, sin embargo a medida que se descubren fuentes de hidrocarburos en yacimientos alejados y en superficies complejas, la industria continúa desarrollando tecnologías para la superación de desafíos que se encuentren asociados a la integridad del pozo, que genera problemas tanto en la seguridad, como en el entorno económico y la viabilidad en general a un largo plazo del pozo.

En general la industria ha desarrollado diferentes tecnologías y servicios con la intención de mitigar o prevenir los incidentes de pérdidas de circulación, que tienen implícita la prevención

del filtrado y evitar la pérdida del lodo. Esta selección inicia con la clasificación de la pérdida del flujo y la velocidad de pérdida del fluido o su magnitud, eventualmente dentro de esta existen tres categorías: la filtración, las pérdidas parciales y pérdidas severas (Chang, Bolsa & Lee, 2001).

Tabla 3 Clasificación de pérdidas en función de su tasa

Tipo de pérdidas	Barriles por hora perdidos
Seepage o filtración	• <10 bph
Parciales	• 10 - 30 bph
Severas	• >30 bph

Fuente: Alkinani, H. H., Al-hameedi, A. T. T., Dunn-norman, S., & Flori, R. E. (2019).

Teniendo en cuenta lo que menciona (Van, et al, 2011) que la filtración es la pérdida menos severa, en la cual se adopta la forma de pérdida de lodo con una velocidad inferior a 10 barriles por hora, generando entonces un flujo de fluido hacia los poros de la formación y no hacia las fracturas. Estas pérdidas se asocian generalmente con la pérdida del lodo en el sistema de redes de poros en el que aún no se ha formado revoque de filtración. La velocidad de la filtración debe estar en función del sobre balance (hace referencia a que el peso del lodo genera una presión hidrostática mayor a la presión de formación con el fin de llevar un margen de seguridad para la operación) y la permeabilidad de la roca. Para la localización de estas se debe tener en cuenta los cambios de volumen producidos en el lodo de perforación, cambios que incluyen la remoción de recortes, fragmentos de roca desalojados por perforación a medida que se corta la roca para construir el pozo y la evaporación del agua del lodo de perforación.

En efecto, la evaporación de la fase acuosa del agua se reconocía como el principal problema anteriormente, cuando se utilizaban piscinas de lodo descubiertas. Mientras que, el bienestar del medio ambiente influyó a la industria a reemplazar las piscinas por tanques de acero cerrados que contienen entre 1000 y 2000 barriles de lodo de perforación (Cook, et al, 2012).

En este caso la pérdida se reconoce cuando se levanta la broca del fondo del pozo, desactivando la totalidad de los equipos de mezcla y remoción de sólidos no esenciales, y verificando luego de ello los volúmenes de lodo con y sin la circulación, una vez se ha establecido la pérdida de un volumen de lodo de perforación debido al fenómeno de filtración, el operador debe decidir si soluciona las filtraciones o continúa con la perforación, decisión que depende a menudo de los costos del fluido de perforación, el tiempo de equipo de perforación, el tiempo margen de perforación y la probabilidad de que se registre NPT como resultado de la ocurrencia de incidentes tales como daño de la formación o el mismo atascamiento de la tubería (Morita, Black & Gun, 1990).

Una de las formas más sencillas para la prevenir la pérdida de fluidos se encuentra específicamente orientada al fortalecimiento del pozo, que tienen como intención estrategias que alteran los esfuerzos presentes alrededor del pozo y minimizan en la misma medida las pérdidas de fluidos. Para lograr lo anterior las empresas realizan las siguientes actividades:

- Adición de materiales que ayuden con la resistencia a la propagación de fracturas la cual aísla la punta de las fracturas existentes (se refiere al taponamiento de las fracturas donde se aísla la punta para generar un cierre parcial) e incrementa mecánicamente la presión de reapertura de las fracturas.
- Implementan técnicas que mejoran los esfuerzos la cual busca evitar la expansión de las fracturas, que a su vez aíslan y cierran la fractura original e incrementa la resistencia a los esfuerzos en la zona aledaña.
- Correr revestimiento en zonas problemáticas aísla la formación de sufrir problemas debido al cambio de la presión hidrostática.

En general, aunque no existe una técnica universal que pueda intervenir, si hay coincidencia en cuanto a que, el fortalecimiento del pozo es un fenómeno real, los efectos generales de estos mecanismos consisten en elevar la presión a la que se producen las pérdidas incontroladas, y de esta manera ampliar el margen de perforación. Después de lo cual el pozo logra tolerar presiones más altas y cómo se indican los datos derivados de las mediciones, parece más resistente, aunque no se haya producido un cambio real en la resistencia de la roca, debido a esta razón algunas fuentes teóricas lo nombran este fenómeno como estabilización del pozo (Dupriest, 2005).

Por otro lado, estos mecanismos tienen una característica en común y es la implementación de la distribución de las partículas, la cual se encuentra diseñada de manera que el fluido de perforación la transporten, este tipo de partículas se alojan en las fracturas sellándolas, impidiendo que se pierda más fluido por dicha fractura. Este tipo de materiales se puede definir como material para pérdidas de circulación incluyendo entonces los gránulos blandos, sales insolubles, escamas o fibras.

En la mayoría de las ocasiones este tipo de materiales son útiles para mitigar o reparar la pérdida del lodo. En específico estos materiales resultaron ser suficientes para el fortalecimiento del pozo, una categoría de estos resultó ser efectivos no solo para la mitigación de las pérdidas sino también para la prevención (Dupriest, 2005).

En la literatura se encuentran cuatro tipos de métodos que permiten el fortalecimiento de la cara del pozo: la resistencia a la propagación de la fractura, el aislamiento del pozo, el esfuerzo de cierre de fractura y el fenómeno físico Stress Cage.

4.2.1 Resistencia a la propagación de la fractura:

El método de resistencia a la propagación de fractura es una técnica ampliamente implementada en las operaciones de perforación de pozos a nivel mundial para prevenir el filtrado y las pérdidas de lodo. Este método requiere un análisis detallado de las características de la formación rocosa y de las propiedades del lodo de perforación. Es importante seleccionar los materiales para el control de pérdidas adecuados en función de las condiciones específicas del pozo, como la temperatura, la presión y la composición del fluido de perforación. Además, se deben considerar factores como la viscosidad del lodo, la velocidad de circulación y la presión de bombeo para garantizar una distribución efectiva de los materiales de obstrucción en las fracturas.

Al sellar y aislar las fracturas, se evita la migración del fluido de perforación hacia la formación rocosa, lo que garantiza una operación más segura y eficiente. Además, este método contribuye a la estabilidad del pozo y reduce los costos asociados con la reposición de lodo y la reparación de daños en la formación.

En la teoría de la prevención de las pérdidas de circulación se sostiene que el material de obstrucción se hace penetrar en una fractura incipiente o existente para obturar, sellar y aislar. La detención de esta propagación también detiene el incidente de pérdida de circulación.

La diferencia se explicó desde un fenómeno conocido como control de crecimiento longitudinal de la fractura, que se define como arenamiento inducido, que implica que cuando se inicia con el crecimiento de la fractura, el pozo pierde instantáneamente un volumen de fluido de perforación en el nuevo espacio intersticial de la fractura. Si el fluido contiene LCM, la introducción de fluido en la fractura produce una acumulación de material de obstrucción que aísla, o protege, la punta de la fractura. Los medios por los que se produce esta acumulación de material

de obturación varían con el tipo de fluido utilizado. (Al-hameedi, A. T. T., Alkinani, H. H., Dunn-norman, S., Flori, R. E., Hilgedick, S. A., Alkhamis, M. M., & Alsaba, M. T. 2018).

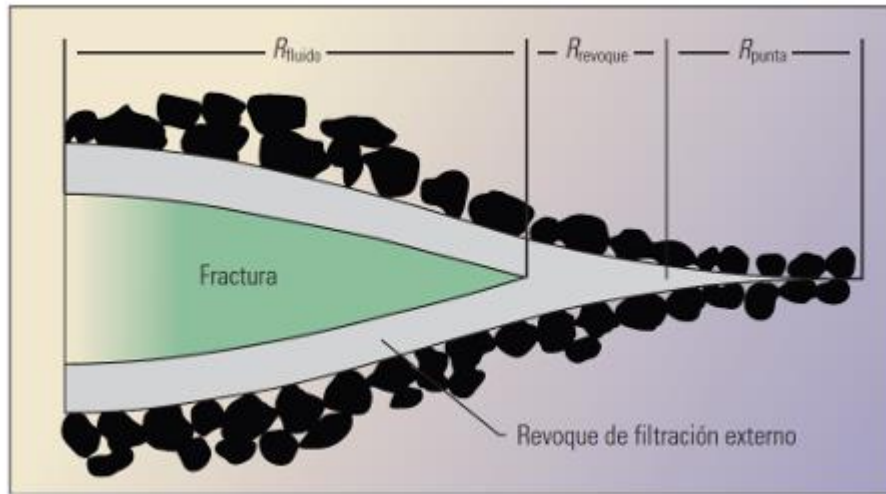
Si se ocupa lodo con base de agua, el crecimiento de la fractura produce un revoque deshidratado y desmejora su crecimiento posterior. El uso de material de obstrucción en un lodo que es acuoso generalmente genera presiones elevadas de propagación de la fractura, debido a lo cual esta continúa creciendo solo si la presión es bastante alta como para que permita la perforación de la barrera del material y llega de nuevo a la punta de la fractura, disminuyendo el crecimiento posterior. Sin embargo, una vez que se produce esta situación y la propagación de la fractura inicia otra vez, se inicia con la acumulación del material adicional a la punta hasta que se encuentre nuevamente sellada.

Borja, R., & Banks, C. J. (1994) revela un estudio el cual dio como resultado que el lodo base agua arroja un gradiente de fractura más alto que el lodo base aceite, donde se detectaron diferencias significativas en el comportamiento de la propagación de la fractura, esta es modificada por el tipo de fluido y su composición. Por su parte, los fluidos base aceite y los lodos a base de productos sintéticos utilizan el fluido acuoso emulsionado con la intención de penetrar la roca permeable y formar un revoque que tenga como característica ser bastante compacto y muy delgado en el interior de la pared de la fractura. En el momento de propagación de una fractura, los fluidos no acuosos tienden a presentarse, y en ese caso la emulsión inversa genera de forma instantánea un sello en las caras de la fractura, que no permiten la pérdida del fluido hacia la formación. Consecuentemente es muy poco el material sólido que se deposita en la fractura y no se forma una barrera de material de obstrucción o de revoque de filtración.

En los fluidos con base en aceite, se genera una presión cerca a la punta de la fractura que se aproxima a la presión del pozo, mientras que, en los fluidos con base de agua, la presión cerca de la punta de la fractura se reduce de forma significativa.

La propagación de la fractura se genera con menos facilidad con los fluidos base agua, de manera que el gradiente de fractura efectiva (Se refiere a la diferencia entre la presión de fracturamiento hidráulico y la presión de poro en una formación rocosa) para los lodos base agua es mayor que para los lodos base aceite. Esto influye en un menor margen de la curva de densidad del lodo para un fluido base aceite, lo que puede plantear diferentes desafíos significativos a la hora de construir pozos con márgenes de perforación relativamente bajos.

Como se puede observar en la figura 2, cuando se utiliza lodo base agua el crecimiento de la fractura produce un revoque deshidratado, o tapón, de LCM que aísla la punta de la fractura e impide su crecimiento posterior. El uso de LCM en lodos base agua produce de manera generalizada presiones elevadas de propagación de la fractura; la fractura continúa creciendo solo si la presión de lodo es suficientemente alta para penetrar la barrera de LCM y llegar nuevamente a la punta de la fractura. No obstante, luego de que se produce esta situación y la propagación de la fractura inicia otra vez, se empieza a acumular LCM adicional en la punta hasta que ésta se sella nuevamente.

Figura 2 Esquema propagación de una fractura en la formación

Fuente: Cook, J., Growcock, F., Guo, Q., Hodder, M., & van Oort, E. (2012).

En un proyecto realizado por la DEA (Drilling Engineering Association) llamado DEA - 13 reveló que la composición y la distribución del tamaño de partícula en el líquido son clave para el éxito del método de resistencia a la propagación de la fractura. Las actividades de investigación de laboratorio desarrolladas fuera del proyecto DEA-13 condujeron al desarrollo de un elemento especial de material de refuerzo de pozos llamado material para la pérdida de circulación que inhibió el crecimiento de fracturas longitudinales. Estas actividades de investigación han demostrado que el material para pérdidas de circulación debe estar presente en todo momento en el lodo durante la perforación, ya que el método es un tratamiento preventivo que debe estar realizándose continuamente. Los resultados mostraron que el material para pérdidas de circulación debe estar presente con una distribución de tamaño de partícula que oscila entre 250 y 600 micras, aunque en futuras pruebas por parte de Shell una empresa que aboga por el método de resistencia de propagación de fractura, indica que la distribución del tamaño de partícula debe ser en función de la formación la cual se está perforando. (Musaab I. Magzoub, et al. 2020).

Es importante destacar que la implementación exitosa de este método requiere un monitoreo constante y una adaptación a las condiciones cambiantes del pozo. Las propiedades del lodo y los materiales de obstrucción deben ajustarse según sea necesario para garantizar una prevención efectiva de filtraciones y pérdidas de lodo.

4.2.2 Aislamiento de pozo

Es Aislamiento de un pozo se refiere a la práctica de sellar de manera efectiva las diferentes zonas en un pozo para prevenir la migración no deseada de fluidos, ya sea agua, gas o petróleo, entre las formaciones geológicas. Esto se realiza mediante el uso de dispositivos y materiales que garantizan la integridad del pozo y la protección del medio ambiente. Se ha podido establecer que la implementación exitosa del método de aislamiento de pozo requiere un análisis detallado de las condiciones del pozo, incluyendo la presión, la temperatura y las características de la formación rocosa. Además, se deben considerar factores como la selección adecuada de los materiales de aislamiento, la calidad del elemento utilizado y la correcta ejecución de los procedimientos de instalación.

En la industria se han implementado diversos métodos para aislar un pozo durante la perforación, En algunos casos, los mecanismos utilizados para aislar o limitar la zona pérdida de fluido que tiene el potencial de fracturar la roca. La idea consiste en rellenar la roca con una sustancia que tenga una resistencia a la tracción igual o superior para reducir la permeabilidad de la roca hasta aproximarla a un valor próximo a cero.

Para conseguir este efecto, se han utilizado diversos materiales de baja pérdida de fluido, lo que implica esencialmente la formación de un revestimiento de tipo cemento en la pared del

pozo, esta barrera protege la formación de la invasión de los fluidos. Gracias a los avances en el campo de la química de la tierra, se han desarrollado materiales a micro y nano escala que pueden reducir la permeabilidad a niveles insignificantes, aunque la reducción de la presión de poro sigue siendo un objetivo difícil de alcanzar.

El efecto generado por el aislamiento de pozo se asemeja al efecto generado por la cementación, ya que se sabe que el casing se adhiere a las paredes del pozo, formando una barrera densa a la infiltración de fluidos. Los tipos de materiales de fortalecimiento del pozo considerados más efectivos para el sellado sistemático de una fractura y la minimización de las pérdidas de fluido a través de la punta de la fractura son: el grafito sintético, las cáscaras de nuez molidas y las partículas de celulosa dispersables en aceite. Las mezclas de estos materiales en diversas proporciones demostraron las ventajas del desempeño. tanto en pruebas de laboratorio como en pruebas de campo. Estos materiales deben estar presentes en el lodo en concentraciones comprendidas entre 43 y 57 kg/m³ [15 y 20 lbm/bbl], y se reciclan y reintroducen continuamente en el pozo para asegurar la protección permanente a medida que se perforan nuevas secciones.

Los experimentos de campo mostraron la importancia de mantener tanto la concentración como la distribución del tamaño de partícula de los materiales de refuerzo de pozos en el lodo. Esta necesidad llevó al desarrollo de equipos internos de reciclaje de materiales para un buen fortalecimiento, como la tecnología del sistema de gestión del tamaño de partícula utilizado en equipos de separación como las shakers o zarandas. Este sistema elimina los sólidos de baja densidad que pueden afectar negativamente la reología del lodo y la densidad de circulación correspondiente, al tiempo que recupera el material agregado al lodo para aumentar la resistencia a la propagación de fracturas.

Esto contrasta con los sistemas alternativos, que incluyen tamices vibratorios (shussle) con tres niveles, que se configuran en la serie, modificado desde el nivel superior (provisto para eliminar partículas grandes), los finos se eliminan en el nivel inferior y la mayoría de los materiales para curar las fracturas se capturan en el nivel intermedio y disminuyen el sistema activo.

Shell aplicó una metodología para evitar las fracturas con la tecnología MPDS (siglas en inglés de "Managed Pressure Drilling System") en 2006 en pozos off shore en el Golfo de México. La proporción de pérdida de circulación en la perforación de estos pozos disminuyó significativamente durante un período de cuatro años.

En conclusión, el método de aislamiento de pozo es una estrategia efectiva para prevenir el filtrado y las pérdidas de lodo en las operaciones de perforación de pozos. La combinación de barreras físicas, como el revestimiento y los tapones mecánicos, junto con el uso de aditivos químicos en el lodo de perforación, ayuda a garantizar la integridad del pozo y la protección de la formación. Sin embargo, es fundamental realizar un análisis exhaustivo y seguir las mejores prácticas de la industria para lograr un aislamiento de pozo exitoso y seguro.

4.2.3. Fenómeno físico stress cages

En esta metodología, las tensiones que existen en la pared del pozo, al agregar un material sellante de fractura, funciona comprimiendo el fluido hacia el pozo. El lodo lleno de material de control de pérdidas LCM entra en estas fracturas superficiales, y las siguientes partículas de materiales de refuerzo comienzan a acumularse y bloquear el área cerca de la pared del pozo. Una mayor acumulación de materiales bien reforzados forma un sello hidráulico cerca de la entrada de cada fractura; Como resultado, se sella la fractura, y el líquido que se alojó en la fractura se pierde en la formación.

Esta pérdida reduce la presión hidráulica en la fractura, por lo que dicha fractura comienza a cerrarse. Sin embargo, la presencia del puente de materiales para reforzar el pozo en la entrada de la fractura impide el cierre total y mantiene un gran esfuerzo. La presencia de una o más de estas fracturas en forma puntiaguda aumenta la tensión tangencial, por lo que se necesita una mayor presión del pozo para extender o producir fracturas adicionales.

Las actividades de investigación industrial indican que, para que este mecanismo avance, se necesitan grandes concentraciones de aditivos de sellado; estos deben ser lo suficientemente duros como para mantener los esfuerzos de cierre y tener el tamaño adecuado para cerrar el espacio cerca de la entrada de la fractura, en lugar de hacerlo más profundo en la formación. Además, deben formar un puente impermeable para minimizar la pérdida a través de la interconexión entre los poros para reducir la presión en caso de fractura. Los materiales, como mezclas de tamaños de partículas, nueces y coque molido funcionan bien, al igual que el método de resistencia a la propagación de la fractura para tener una apertura de 1 mm [1000 μm] se ha sugerido la distribución del tamaño de la partícula oscilante entre la arcilla coloidal y valores de aproximadamente 1000 μm .

Históricamente, los materiales de refuerzo de pozos se han utilizado como fases de inyección en forma de píldora; es decir se bombeaba un pequeño volumen de (32 m³ [200 bbl]) al pozo. Sin embargo, si la tecnología y la logística lo han permitido, el material se ha aplicado todo el tiempo al lodo. El tratamiento de stress cages generalmente requiere 25 kg / m³ [9 lbm / bbl] de material para reforzar los pozos en los lodos anti pérdida Chang, I. S., & Lee, C. H. (1998).

Una de las ventajas clave del método de stress cages es su capacidad para adaptarse a las condiciones cambiantes del pozo. A medida que la presión y la temperatura varían durante la perforación, el material agregado puede expandirse o contraerse para mantener una barrera

efectiva. Esto ayuda a prevenir el filtrado y las pérdidas de lodo, lo que a su vez mejora la eficiencia de la operación y reduce los costos asociados.

En conclusión, el método de stress cages es una técnica prometedora para prevenir el filtrado y las pérdidas de lodo en las operaciones de perforación de pozos. Al proporcionar una barrera física flexible y adaptable, el stress cages ofrece una solución innovadora para mejorar la eficiencia y la seguridad de la perforación. Este método puede utilizarse en todo tipo de formaciones siempre y cuando la tasa de pérdidas permita alojar este tipo de píldoras, los costos varían en función de la concentración y cantidad de fluido bombeado en forma de píldora y el lodo perdido hacia la formación.

4.2.4 Cierre de fractura

El modelo de cierre de fractura fue desarrollado a mediados de la década de 1990 y todavía es utilizado en la industria, este método tiene algunas similitudes con el concepto de stress cages, sobre todo para aumentar el esfuerzo tangencial cerca del pozo y combinar e impulsar fracturas abiertas para evitar que las fracturas se propaguen.

Sin embargo, a diferencia de la etapa de formación del esfuerzo, cuando comienzan a romperse y empiecen a crecer las fracturas, se tratan de la misma manera que para una alta pérdida de fluido. Según los investigadores, esto se debe a que es posible alojar las partículas en la fractura, durante la fase de inyección forzada por lo que crea una capa protectora que separa el inicio con el final de la fractura. Esta corriente se descompone rápidamente, cortando entre la grieta y el fondo del pozo, evitando la transferencia de presión a la punta y evitando la ruptura. Esto aumenta la presión del pozo y aumenta el ancho de la grieta. Como resultado, es posible que las partículas se descompongan o se vuelvan más pequeñas cuando se utilizan tratamientos de inyección forzada.

El material ideal de refuerzo de pozo está compuesto de partículas del mismo tamaño y rugosidad prominente que no están bien empaquetadas como bentonita y barita. En muchos casos, se requiere más de un tratamiento de Stress cage (Benaissa, Bachelot & Ong, 2006).

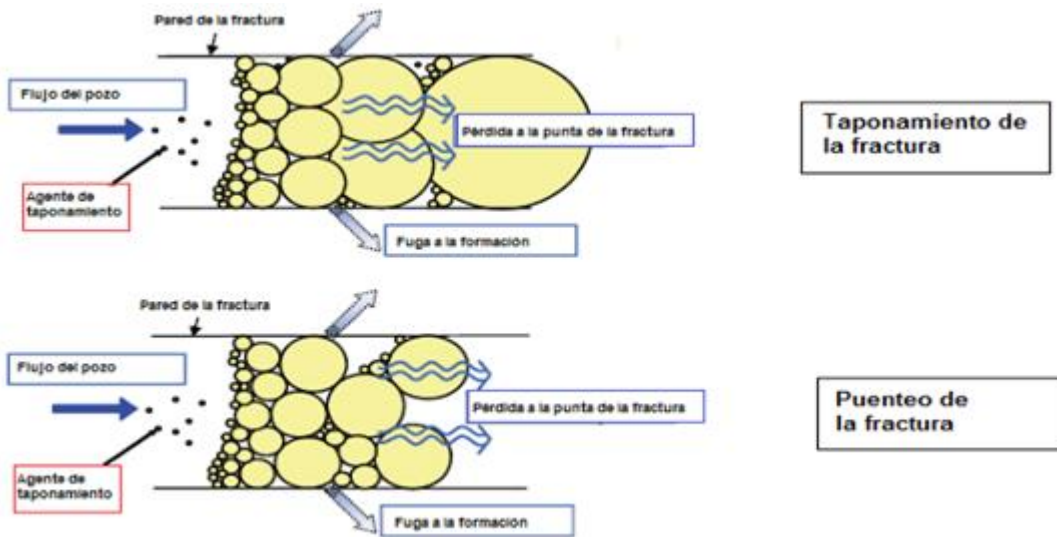
Si bien con anterioridad se ha venido haciendo un análisis de los diferentes tipos de acciones que se pueden hacer para evitar la pérdida de fluido, haciendo una descripción específica ya sea para una instancia preventiva o remediable, es necesario considerar dos categorías específicas: las acciones que se realizan cuando existe una baja pérdida de fluido, dónde la fractura o formación es taponada rápidamente y sellada y la alta pérdida de fluido dónde el fluido se pierde rápidamente el material de prevención de pérdidas LCM es alojado en la fractura o en la formación el cual se reconoce como un tapón actuando como la base para el sello de la fractura.

De esta manera los mecanismos de control de pérdidas de fluidos son afectados por la distribución del tamaño de las partículas, la apertura relativa de las fracturas y la pérdida de fluido a la punta de la fractura.

El taponamiento de la fractura es la base en la cual se diseñan el material LCM para los tratamientos de baja pérdida de fluido. En este caso las píldoras para la alta pérdida de fluido se diseñan alrededor del mecanismo de llenado de la fractura. En efecto, de acuerdo con la experiencia se reconoce que, en los tratamientos para baja pérdida de fluido, el producto final debe incluir partículas gruesas que taponen las fracturas más grandes en la formación, ya sean estos poros o fracturas. Si en efecto, las aberturas de la formación son taponadas o puenteadas, se requieren partículas más finas, necesarias para un sellado total, efectuando de esta manera un sello para el control de la pérdida del fluido.

La diferencia entre taponamiento y puenteo no es muy grande. Las definiciones en la mayoría de los casos indica que el taponamiento ocurre cuando el D90 el cual representa que el tamaño de la partícula específico del LCM es menor que la mitad del tamaño de la abertura. Muchas experiencias de campo muestran que estos tratamientos pueden ser utilizados en formaciones con una alta y baja permeabilidad, como se muestra a continuación:

Figura 3 Mecanismos de taponamiento y puenteo de la fractura

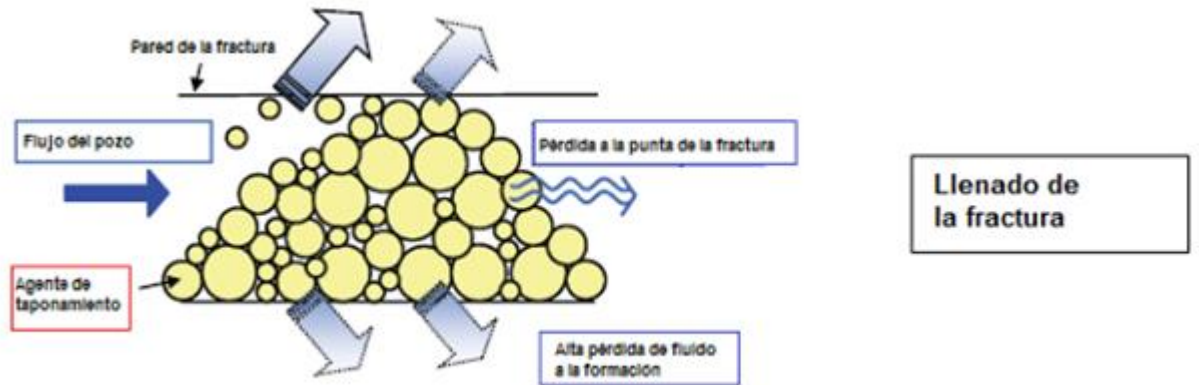


Fuente: (Kaageson-Loe, y otros, 2009)

De otro lado, cuando existe una alta pérdida de fluido, el tamaño de las partículas de LCM debe ser más pequeño de la abertura de la fractura, siendo esto necesario para el aseguramiento de que el material al interior de la formación. En este caso las pruebas de laboratorio sugieren que los tratamientos compuestos por tamaños mediano y pequeño de las partículas del material pueden no ser efectivos en el sello de las fracturas muy anchas mayores a 2mm, las tasas excesivas de flujo en estas fracturas pueden prevenir que el material depositado puentee o taponé la extensión de la fractura. Bajo esta condición las experiencias de campo sugieren que este tipo de tratamiento puede ser utilizado para las bajas tasas de pérdidas, lo suficiente para el lograr la formación de un tapón.

Los tratamientos de alta pérdida de fluido solo pueden ser utilizados en formaciones altamente permeables o formaciones fracturadas.

Figura 4 Mecanismo de llenado de la fractura



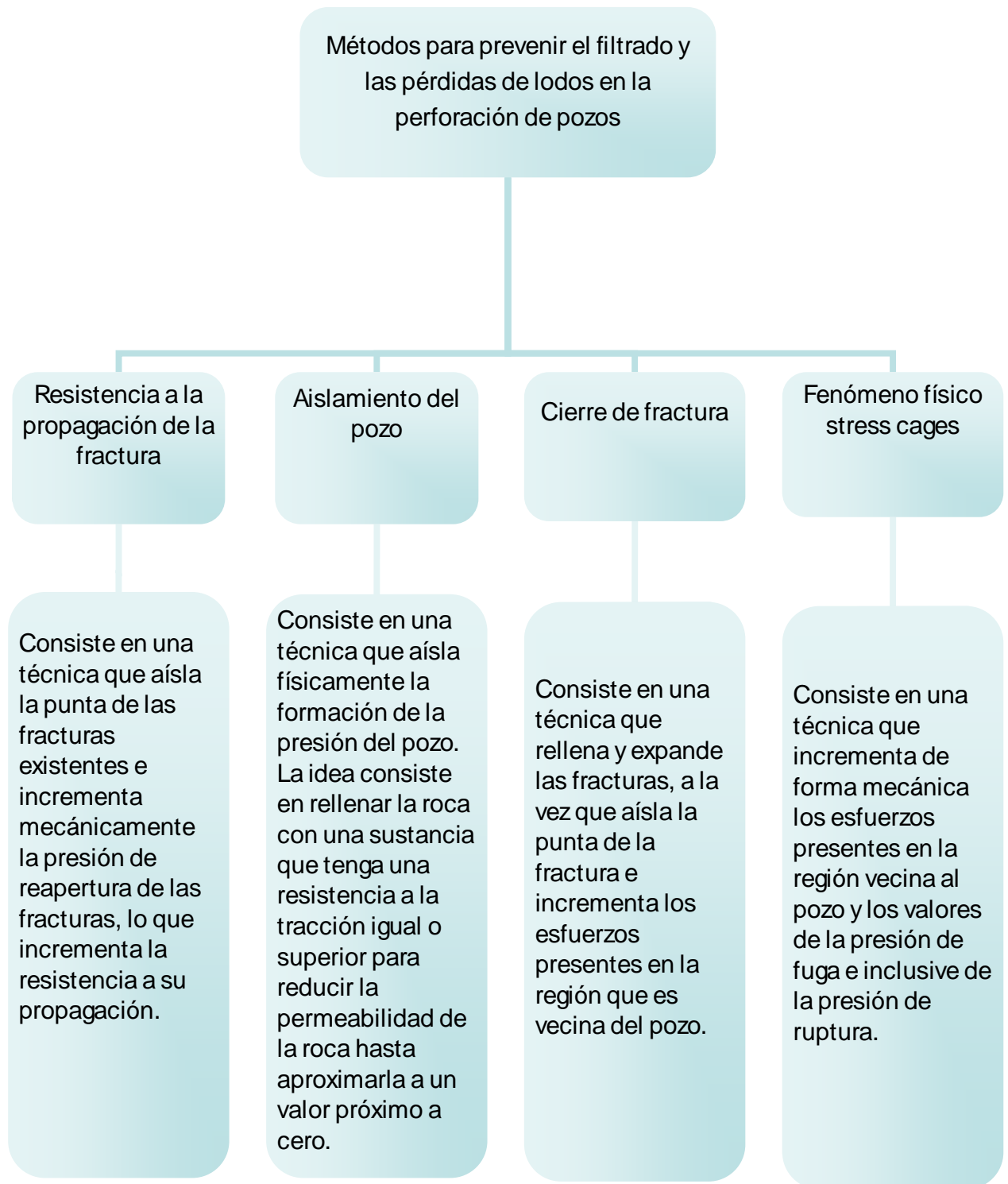
Fuente: (Kaageson-Loe, y otros, 2009)

En resumen el cierre de fractura se lleva a cabo mediante la inyección de materiales de obstrucción en las fracturas, con el objetivo de sellarlas y evitar la migración del lodo de perforación hacia la formación rocosa. Estos materiales de obstrucción pueden ser aditivos químicos, como polímeros o partículas sólidas, que se mezclan con el lodo de perforación y se inyectan en las fracturas.

La efectividad del método de cierre de fractura depende de varios factores, como la selección adecuada de los materiales de obstrucción, la viscosidad y la concentración del lodo de perforación, la presión de inyección y la distribución de los materiales en las fracturas. Es importante realizar un análisis detallado de las condiciones del pozo y la formación rocosa para determinar la estrategia de cierre de fractura más adecuada.

Una de las ventajas del método de cierre de fractura es su capacidad para adaptarse a diferentes tipos de formaciones rocosas y condiciones de perforación. Además, este método puede

ayudar a mejorar la estabilidad del pozo y prevenir problemas como la pérdida de circulación y la migración de fluidos no deseados. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el cierre de fractura puede presentar desafíos técnicos y operativos. La identificación precisa de las fracturas y la distribución efectiva de los materiales de obstrucción requieren un monitoreo constante y una planificación cuidadosa. Además, la selección inadecuada de los materiales de obstrucción o una mala ejecución del proceso de inyección pueden tener un impacto negativo en la efectividad del método.

Figura 5 Métodos para prevenir el filtrado y las pérdidas de lodos en la perforación

4.3 Variables que influyen en la implementación de los mecanismos de mitigación de pérdidas de filtrado y de lodos.

Se ha establecido la existencia de diferentes variables que influyen en la implementación de mecanismos de mitigación de filtrado y de lodos en las operaciones de perforación de pozos a nivel mundial para prevenir el filtrado y las pérdidas de lodo. Algunas de las variables más comunes incluyen:

4.3.1 Características del yacimiento

Las propiedades del yacimiento, como la permeabilidad, litología, mineralogía, porosidad y la presión del yacimiento pueden afectar la eficacia de los mecanismos de mitigación de pérdidas. Un yacimiento con alta permeabilidad puede requerir diferentes enfoques de mitigación en comparación con uno con baja permeabilidad. Martínez, J. (2011).

4.3.2 Tipo de fluido de perforación

El tipo de fluido de perforación utilizado también puede influir en la implementación de los mecanismos de mitigación. Los fluidos de perforación a base de agua, aceite o polímeros pueden requerir diferentes enfoques para controlar las pérdidas de filtrado y los problemas de lodos.

4.3.3 Diseño de la perforación

El diseño de la perforación, incluyendo la selección de la densidad del fluido de perforación, la velocidad de circulación y la presión de fondo de pozo, puede afectar la eficacia de los mecanismos de mitigación. Un diseño adecuado puede ayudar a minimizar las pérdidas de filtrado y los problemas de lodos.

4.3.4 Condiciones operativas

Las condiciones operativas, como la temperatura y la presión del pozo, la velocidad de circulación y la duración de la perforación, también pueden influir en la implementación de los mecanismos de mitigación. Estas condiciones pueden variar de un pozo a otro y requerir enfoques específicos para controlar las pérdidas de filtrado y los problemas de lodos.

Las condiciones operativas pueden verse representadas a su vez en problemas operacionales como lo es la presión de circulación, directamente relacionada con el caudal de trabajo y al diámetro del hueco donde a menor diámetro se experimentará mayor presión lo que ocasiona un mayor ECD generando una posible pérdida de fluido. Shad, S., Salmanpour, S., Zamani, H., & Zivar, D. (2021).

4.3.5 Factor económico

El presupuesto de un proyecto se basa en las operaciones a realizar, implementar medidas de contingencia es necesario debido a los posibles problemas que se puedan generar, a la hora de prevenir las pérdidas se deben evaluar los costos de las metodologías ya que estas pueden afectar directamente los precios.

Implementar lodos con nanopartículas incrementa el valor del \$/barril, por lo que se debe realizar un estudio costo/beneficio en función de las necesidades.

4.3.6 Experiencia y conocimiento del personal

La experiencia y el conocimiento del personal involucrado en la implementación de los mecanismos de mitigación también puede influir. Un personal capacitado y experimentado puede seleccionar y aplicar los mecanismos de manera más efectiva, minimizando las pérdidas de filtrado y los problemas de lodos.

Estas son solo algunas de las variables que pueden influir en la implementación de los mecanismos de mitigación de pérdidas de filtrado y de lodos. Es importante considerar todas estas variables y adaptar los enfoques de mitigación según las condiciones específicas de cada pozo. Tomando en cuenta los métodos planteados como la resistencia a la propagación de las fracturas, Aislamiento del pozo, cierre de fractura y Stress Cages se ubican principalmente las siguientes variables: el diámetro de la perforación, el ancho de las fracturas inducidas y la distribución de tamaños de partículas a ser utilizados como materiales de puenteo de la fractura.

Un factor comúnmente descuidado para reducir el riesgo de inestabilidades del pozo es la influencia del diámetro del pozo. A partir de experimentos de laboratorio se sabe que la inestabilidad aumenta en cuanto mayor sea el diámetro del pozo. Por lo tanto, es más probable que se produzcan inestabilidades en los pozos de mayor diámetro. Varios autores analizaron este efecto de escala en diferentes areniscas utilizando experimentos de carga hidrostática de cilindros huecos de paredes gruesas. En las proximidades del pozo central las tensiones se concentran, formando un campo de tensiones de compresión.

Para tensiones tangenciales que exceden la resistencia de la roca, se desarrollan rupturas de pozo en condiciones in situ. Para las areniscas probadas en condiciones de laboratorio, las rupturas ocurren en pozos pequeños (≤ 10 mm de diámetro) a presiones significativamente mayores en comparación con los pozos grandes, donde la tensión crítica para la formación de ruptura parece ser independiente del tamaño.

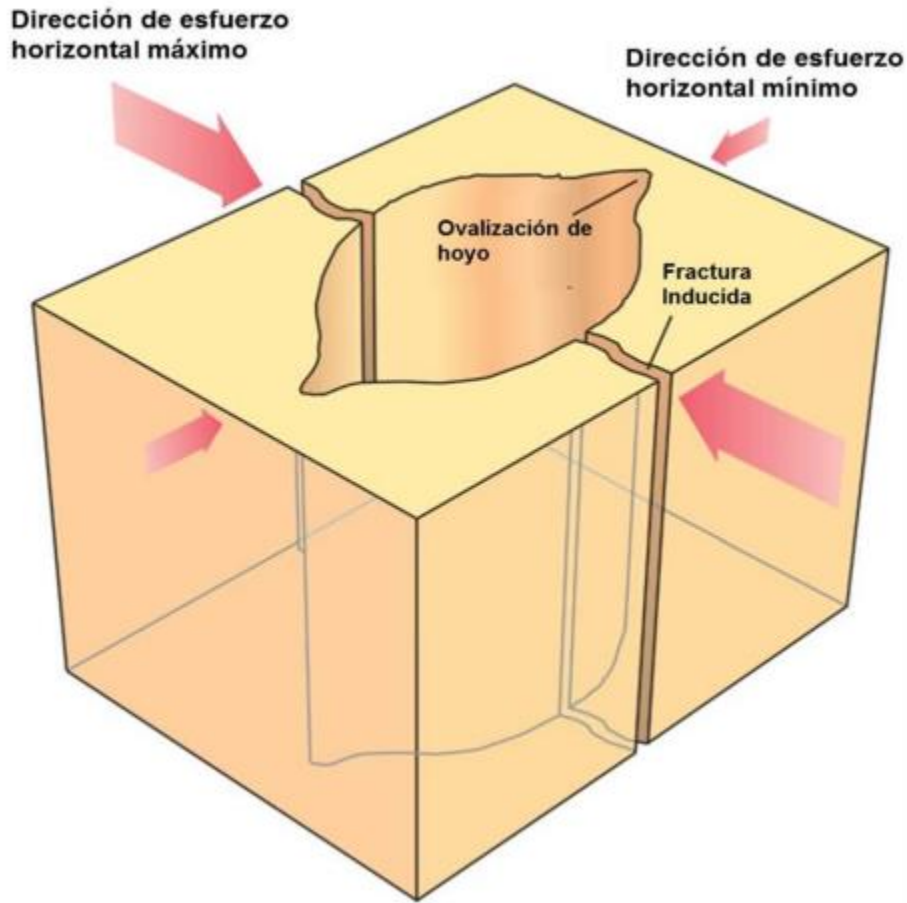
- **Diseño y selección de equipos:** El diámetro de la perforación del pozo es un factor clave en el diseño y selección de los equipos utilizados en la operación. El tamaño de los revestimientos, las tuberías de producción, las herramientas de perforación y los sistemas de control de presión se eligen en función del diámetro del pozo.

- **Estimación de costos:** El diámetro de la perforación también influye en los costos asociados con la construcción y operación del pozo. Un pozo con un diámetro más grande requerirá más materiales, como revestimientos y tuberías, lo que puede aumentar los costos de perforación y completamiento. Además, el diámetro del pozo también afecta la cantidad de fluidos de perforación y cemento necesarios, lo que puede tener un impacto en los costos operativos.

- **Evaluación de la producción:** El diámetro de la perforación puede influir en la productividad del pozo. Un diámetro adecuado permite una mayor área de contacto entre la formación y el pozo, lo que puede mejorar la eficiencia de la producción de hidrocarburos. Además, el diámetro también puede afectar la capacidad de flujo del pozo y la eficiencia de la extracción de los fluidos de la formación. (Alkinani, H. H., Al-hameedi, A. T. T., Dunn-norman, S., & Flori, R. E. (2019)).

Las fracturas generadas durante la perforación del pozo proporcionan información valiosa sobre los esfuerzos locales. Identificar estas fracturas es crucial para abordar problemas relacionados con la producción del yacimiento, la migración de hidrocarburos y la estabilidad del pozo. Los registros de imágenes son utilizados para detectar y caracterizar tanto las fracturas inducidas como las fracturas naturales en los pozos de un yacimiento.

Cuando un pozo vertical es sometido a esfuerzos extremos debido al peso de la columna de lodo de perforación, se forma una fractura hidráulica en la dirección del esfuerzo horizontal máximo. Esto se ilustra en la siguiente figura:

Figura 6 Fracturas inducidas y esfuerzos horizontales

Fuente: (Barton y Zoback, 2002).

La presencia de fracturas inducidas permite inferir la dirección de los esfuerzos horizontales mínimos, ya que el pozo tiende a deformarse de manera elipsoidal u ovalada. La orientación de esta ovalización es paralela a la dirección del esfuerzo horizontal mínimo. Además, si los esfuerzos horizontales de la formación superan el esfuerzo ejercido por la columna de lodo, se pueden observar fracturas perpendiculares a las fracturas inducidas.

El ancho de las fracturas inducidas en perforaciones de un pozo es un factor crítico en la industria petrolera y de gas, y su importancia radica en los siguientes aspectos:

- **Estimación de la productividad del pozo:** El ancho de las fracturas inducidas está directamente relacionado con la capacidad de flujo de los hidrocarburos hacia el pozo. Un ancho adecuado de las fracturas puede aumentar significativamente la permeabilidad efectiva de la formación, permitiendo un flujo más eficiente de los fluidos hacia el pozo. Esto puede resultar en una mayor productividad del pozo y una mayor recuperación de los hidrocarburos.

- **Optimización de la estimulación de la formación:** La estimulación de la formación, como la fracturación hidráulica, se utiliza para mejorar la productividad de los pozos. El ancho de las fracturas inducidas es un parámetro clave en el diseño de la estimulación, ya que determina la cantidad de área de contacto entre la formación y el pozo. Un ancho adecuado de las fracturas permite una mayor exposición de la formación a los fluidos de estimulación, lo que puede mejorar la eficacia de la fracturación y maximizar la producción de hidrocarburos.

Teniendo en cuenta lo anterior decimos que el ancho de las fracturas inducidas en la perforación de un pozo es un factor crítico que influye en la productividad del pozo, la optimización de la estimulación de la formación, el control de la presión y la integridad del pozo, así como en los costos de producción. Es esencial encontrar un equilibrio adecuado para maximizar la eficiencia y la rentabilidad de la operación del pozo.

Otra variable que se considera importante es el tamaño de partículas a ser utilizados como materiales de puenteo de la fractura, es preciso mencionar que una porción significativa del flujo de producción del yacimiento provendrá de la garganta de los poros más grandes, por lo que no se deben ignorar estas áreas de mayor permeabilidad/porosidad. Básicamente, si las partículas se seleccionan para poros grandes, medianos y algunos más pequeños, el resultado final es una distribución del tamaño de partículas que es lo suficientemente efectiva como para sellar todos los

poros del yacimiento, incluida la mayor parte de la cavidad. Otra forma de visualizar los diferentes tamaños de partículas necesarios para iniciar el empacamiento ideal, así:

Tabla 4 Teoría de puenteo en función de la garganta de poro

Distribución de partículas para garganta de poro de menos de 5 µm				
Teoría de puenteo	Vickers	IPT- 1*	IPT-2*	Abrams
Pérdida de arranque, cm3	4.4	8	5.6	6
Filtrado a los 30 min., cm3	21	22	26	30
presión de lift - off , psi	1.2	2.8	2.4	2.6
permeabilidad de retorno, %	93.8	49.5	78.6	61.5
Distribución de partículas para garganta de poro de menos de 20 µm				
Teoría de puenteo	Vickers	IPT- 1*	IPT-2*	Abrams
Pérdida de arranque, cm3	2.6	19.2	14	3.6
Filtrado a los 30 min., cm3	20	42	33	23
presión de lift - off , psi	0.9	4.4	2	5
permeabilidad de retorno, %	85.7	69.5	74.2	8.9
Distribución de partículas para garganta de poro de menos de 60 µm				
Teoría de puenteo	Vickers	IPT- 1*	IPT-2*	Abrams
Pérdida de arranque, cm3	4.4	15	3.6	2.4
Filtrado a los 30 min., cm3	20.8	31	20	19
presión de lift - off , psi	0.6	2.6	1.8	1.4
permeabilidad de retorno, %	86.2	78.1	91.5	93.5
Valores promedio sobre el rango completo de garganta de poro				
presión de lift - off , psi	0.9	3.3	2.1	3.0
permeabilidad de retorno, %	88.5	65.6	81.4	78.6

Fuente: Valencia Quintero, L. M. (2019).

La **Tabla 4** explica los resultados obtenidos por cuatro metodologías de puenteo utilizadas en laboratorio donde se evaluó la el lift – off (presión mínima necesaria para levantar los cortes de perforación desde el fondo del pozo hasta superficie) y la permeabilidad de retorno en distintos tamaños de garganta de poro, siendo el más eficiente la metodología Vickers.

Crear un efecto de interferencia (empaquetamiento cerrado) requiere una gran cantidad de partículas pequeñas o de formas diferentes para llenar los espacios entre las partículas. Si los huecos no se llenan, el resultado será la entrada de filtrado, polímero y partículas pequeñas. Idealmente, la distribución del tamaño de partículas (PSD “particle size distribution” por sus siglas en inglés) debería seleccionarse de manera que el acoplamiento sea más eficiente y rápido en las fracciones de tamaño de poro grande, mediano y pequeño. La PSD óptima debe seleccionarse en función de la distribución de la garganta de poros del yacimiento D90, D50 y D10.

Es importante tomar en cuenta el tamaño de partículas a utilizar como materiales de puenteo de la fractura en la estimulación de pozos por varias razones:

- **Control de la apertura de la fractura:** El tamaño de las partículas de puenteo tiene un impacto directo en la apertura de la fractura. Las partículas más grandes tienden a crear puentes más estables y duraderos, lo que ayuda a mantener la apertura de la fractura y evitar su cierre prematuro.
- **Prevención de la migración de partículas:** El tamaño de las partículas también es importante para prevenir la migración de partículas hacia el pozo o hacia la formación. Si las partículas de puenteo son demasiado pequeñas, pueden ser arrastradas por los fluidos de estimulación y terminar obstruyendo el pozo o la formación, lo que puede afectar negativamente la productividad del pozo. Utilizar partículas de tamaño adecuado ayuda a minimizar este riesgo y garantizar una estimulación efectiva.
- **Optimización de la permeabilidad de la fractura:** El tamaño de las partículas de puenteo también puede influir en la permeabilidad de la fractura. Las partículas más grandes pueden crear puentes más espaciados, lo que permite un flujo más eficiente de los fluidos hacia el

pozo. Por otro lado, las partículas más pequeñas pueden llenar los espacios entre las partículas más grandes y reducir la permeabilidad de la fractura. Es importante encontrar un equilibrio adecuado para maximizar la permeabilidad de la fractura y la productividad del pozo Valencia Quintero, L. M. (2019).

En resumen, conocer las variables que influyen en la implementación de los mecanismos de mitigación de pérdidas de filtrado y de lodos es esencial para garantizar la eficiencia, adaptabilidad, seguridad y optimización de costos en la operación de pozos. Al comprender estas variables, se pueden tomar decisiones más informadas y efectivas para abordar estos problemas y maximizar la productividad y rentabilidad de los pozos.

4.4 Desarrollo de un flujo de trabajo para seleccionar la metodología del control de pérdidas que mejor se adapte a una zona.

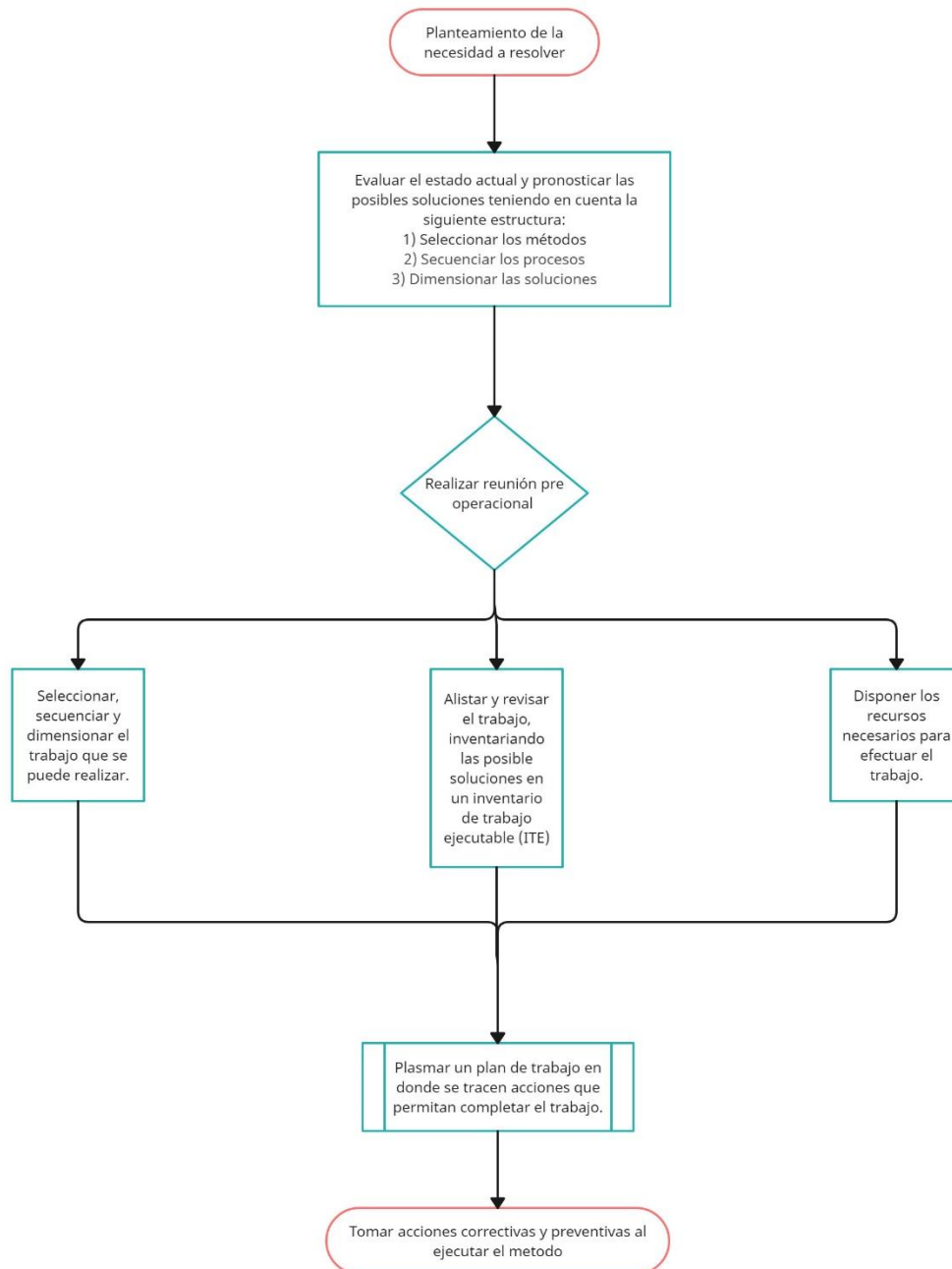
Para el desarrollo de este capítulo, se plantea un flujo de trabajo tomando bajo el sistema Last Planner, que se basa en aumentar el cumplimiento de actividades por medio de la disminución de la incertidumbre asociada con la planificación. Al aplicar este concepto, se estará incrementando la confianza de la planificación, debido a que las actividades que finalmente se decida ejecutar debieron ser previamente evaluadas para que puedan realizarse; por lo tanto, incrementa el índice de acierto a aquellos procesos a ejecutar. Esto se explica de mejor manera en el siguiente gráfico:

Figura 7 Esquema Se hará, Se puede y Se debería.

Fuente: (Alarcón y otros, 2011)

Tomando en cuenta este sistema se presenta a continuación se sintetiza el flujo de trabajo de la siguiente manera:

Figura 8 Síntesis del flujo de trabajo



La **Figura 8** expone un flujo de trabajo que busca establecer un cronograma maestro en donde se trazan las metas generales del proyecto mediante logros u objetivos, en donde el cumplimiento de las actividades importantes del proyecto puede representar aciertos de la planificación. En este sentido, se puede decir que el cronograma maestro es una de las herramientas para identificar los resultados de control del proyecto.

Para continuar con el siguiente paso se debe desarrollar una recopilación de información relevante sobre la zona en la que se va a implementar el control de pérdidas. Esto puede incluir información sobre las características del yacimiento, como la permeabilidad, la porosidad y la presión del yacimiento, así como datos sobre el tipo de fluido de perforación utilizado, las condiciones operativas y cualquier historial de pérdidas de filtrado o problemas de lodos en la zona. Además, se debe desarrollar una evaluación de las variables recopiladas para evaluar su impacto en las pérdidas. Se debe considerar cómo cada variable puede influir en la eficacia de diferentes metodologías de control de pérdidas. Por ejemplo, si el yacimiento tiene una permeabilidad alta, es posible que se requiera una metodología de control de pérdidas diferente en comparación con un yacimiento de baja permeabilidad.

Una vez estudiadas las variables se pueden ejecutar las siguientes acciones, en búsqueda de eliminar la pérdida de fluido:

- Establecer la cantidad de eventos de pérdidas de fluido y los eventos que los generaron, además de la tipificación de horas que se han gastado en este inconveniente, de esta manera es necesario considerar elementos como:

- o Pega
- o Problema de hueco

- o Herramienta de subsuelo
- o Problemas del taladro
- o Herramienta en superficie
- o Error humano
- o Fluidos
- o Cementación

Lo anterior permitiría el cálculo de horas no planeadas que se han estado perdiendo debido a estos problemas, y también calcular los costos en horas hombre como una medida estándar. Para mayor comprensión estos datos deben ser graficados y presentados para la toma de decisiones. Dentro de este problema es necesario realizar una clasificación por tipo, subtipo de problema y tiempos gastados teniendo en cuenta las particularidades de cada pozo. Todo este proceso se construye desde los registros de perforación que deben consignarse en reportes, debido a que esto permite la estudiar trazabilidad del plan a ejecutar.

- Realizar la descripción de las generalidades geológicas de los pozos, para la realización de esta actividad es necesario que se realice un proceso de consulta de documentos de la agencia nacional de hidrocarburos, y se identifiquen los registros de perforación. Es necesario tener en cuenta elementos como:

- Temperatura.
- Salinidad.
- Resistividad de entrada y salida del lodo.

- Indicios de hidrocarburos registrados.
- Descripción geológica de las formaciones cortadas.
- Presencia de gases venenosos.
- Descripción de testigos convencionales.
- Trayectoria del registro.

Y por último, el diagnóstico de Causa raíz de las pérdidas de circulación se reconoce como fundamenta. La importancia de esta metodología radica en la capacidad de localizar el origen de las causas que generan el evento no deseado, ya sea una falla o un incidente, permitiendo el reconocimiento de patrones y evitando en este sentido la repetición de las mismas, adicionalmente es importante que se incremente la confiabilidad, disponibilidad y seguridad de los equipos mejorando las condiciones de seguridad industrial, reduciendo los costos asociados a los eventos, además de la disminución de los tiempos no productivos (Alfaro, 2014).

Los problemas de pérdidas de circulación pueden tener diferentes causas, no obstante no siempre es posible la identificación con exactitud de estos factores así como el evento que puede provocarlo, debido a lo cual las estrategias deben estar encaminadas hacia la minimización de los impactos causados por las pérdidas de circulación y no hacia las causas fundamentales del problema, de esta manera el análisis de causa raíz es una metodología que propone la identificación de los factores que dieron origen a estos eventos, la magnitud y el momento exacto de los resultados nocivos. A partir de esta información se plantean las estrategias para eliminar las causas del problema o para disminuir la recurrencia de este (Menon, et al, 2016).

Aunque existen varios métodos que se pueden llevar a cabo para la realización de análisis de causa raíz existe una serie de pasos generalizados expuestos en la guía NPSA(National Patient

Safety Agency por sus siglas en inglés) del Reino Unido los cuales tienen en cuenta la siguiente secuencia.

1. **Identificación del incidente:** en este se demuestra el o los eventos adversos que han tenido lugar durante la operación que requieren de tratamiento.

2. **Recopilación de la información:** una vez ha seleccionado el evento adverso, el paso siguiente es la recolección de información relacionado, teniendo como requisito un completo entendimiento del problema. Este método puede comprender el uso de información externa

3. **Elaboración del mapa de eventos:** en este sentido es recomendable realizar un cuadro o plantilla cronológica describiendo cada una de las acciones que han sido llevadas a cabo durante la operación, en este se incluyen acciones o medidas tomadas para mitigar o controlar eventos adversos.

4. **Análisis de la información:** en este caso se deben identificar efectos del evento adverso con la intención de elegir las estrategias preventivas y de acción enfocadas sobre la causa que las ocasionan teniendo de esta forma un control y mitigación de este.

A continuación, se definen algunas de los métodos que son funcionales para la aplicación de la metodología del análisis de causa raíz:

- Análisis de teorías de las restricciones
- Análisis de árbol de fallas
- Diagrama de Ishikawa.
- Diagrama de interrelación

Posteriormente se desarrolla un árbol de decisiones, el cual es una planificación intermedia, que tiene como objetivo principal el controlar el flujo de trabajo. En este sentido, se le puede entender como un intervalo de tiempo en el futuro que permite tener una idea inicial de las actividades que serán ejecutadas. Es importante considerar, que, en este proceso, se debe coordinar y levantar todas las restricciones que puedan impedir la realización de dichas actividades. Es decir, una vez se ha realizado un análisis de las barreras es necesario que se genere un plan de acción y prevención dónde se incluya la implementación de estrategias y reducción de ocurrencia del incidente que se debe planear, comunicar, implementar y evaluar de acuerdo con las acciones.

El plan de acción presenta como objetivo la descripción de las estrategias y establecer el tiempo para la evaluación efectiva del mismo, dentro de los pasos es necesario considerar:

- La comunicación, dónde se especifiquen elementos como:
 - Especificar los cambios en los procesos.
 - Evitar generar culpabilidades evitando reacciones negativas en el personal involucrado.
 - Identificar y comunicar las acciones de mejora.
 - Tener en cuenta los comentarios y sugerencias de las personas incluidas dentro del proceso.
 - Generar el compromiso de todos los participantes dentro del plan de acción.
 - Establecer el tiempo y responsabilidades del plan de acción.

Seguidamente se tiene el desarrollo de las actividades que pertenecen al inventario de trabajo ejecutable, que han sido previamente establecidas y que, por lo tanto, tienen una alta

probabilidad de que se cumplan. Aquí se enmarca la revisión de opciones de control de pérdidas, que se realiza mediante la investigación de las diferentes metodologías disponibles. Esto puede incluir métodos como el uso de aditivos químicos, el diseño de fluidos de perforación específicos, la aplicación de técnicas de cementación o el uso de sistemas de control de filtrado. Examina las ventajas, desventajas y limitaciones de cada opción en relación con las variables identificadas en el paso anterior.

Se debe tomar en cuenta el desarrollo de un análisis de factibilidad para cada opción de control de pérdidas. Considera aspectos como la disponibilidad de los materiales o equipos necesarios, los costos asociados, la viabilidad técnica y la experiencia requerida para implementar cada metodología. Evalúa cómo cada opción se adapta a las condiciones específicas de la zona y si es factible implementarla con los recursos disponibles.

Para continuar con la selección de la metodología, basándote en el análisis de factibilidad y considerando las variables identificadas, selecciona la metodología de control de pérdidas que mejor se adapte a la zona. Se debe tener cuenta la eficacia esperada, la viabilidad técnica, los costos asociados y la experiencia requerida. Es posible que también desees considerar la opinión de expertos en la materia o consultar con profesionales de la industria para obtener una perspectiva adicional. Las etapas posteriores tienen que ver con la implementación y seguimiento, una vez seleccionada la metodología de control de pérdidas, procede a implementarla en la zona.

El último paso, relacionado con las acciones correctivas y preventivas, se relaciona con la generación de soluciones y planes de acción, destinados a crear barreras dentro del proceso y corregir o fortalecer las que no funcionaron adecuadamente. De acuerdo con las bases teóricas, llevaría un sistema de gestión de calidad efectivo para garantizar procesos de manera exitosa (Menon, et al, 2016). Debido a lo cual se debe definir y especificar a qué corresponden las acciones

correctivas y acciones preventivas, las cuales evitan o minimizan el impacto o efectos de un incidente:

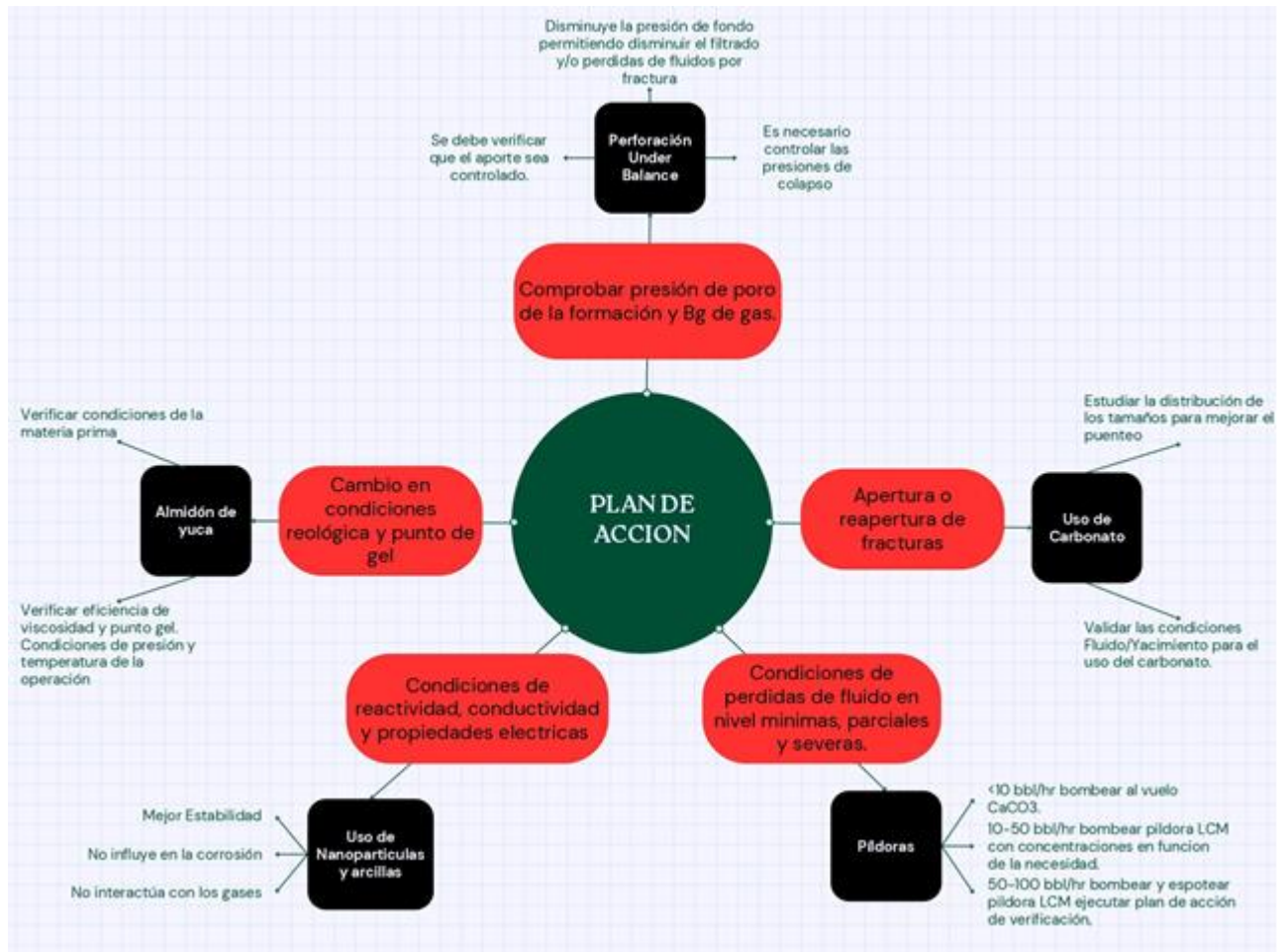
- **Acciones correctivas:** se reconocen como todas aquellas que se toman una vez que la situación ha tenido lugar para generar el arreglo del problema temporalmente, es de esta manera que se hace enfoque sobre la situación inmediata, sin tener en cuenta la causa raíz.

- **Acción preventiva:** se reconoce que dentro del proceso de la generación de acciones preventivas se involucra la determinación de causa raíz y del incidente para la generación de un plan de acción sobre la razón del problema y no sobre los efectos que se han generado por el mismo, para lo cual se siguen los siguientes pasos:

- o Definir y revisar el incidente o problema.
- o Determinar la causa del incidente o problema (real).
- o evaluar el problema de manera tal que se genere un plan de acción preventivo para evitar su ocurrencia.
- o Llevar el plan a la acción.
- o Revisar la efectividad de la prevención del problema y acciones tomadas.

Teniendo en cuenta los métodos estudiados los planes de acción se subdividen en los siguientes:

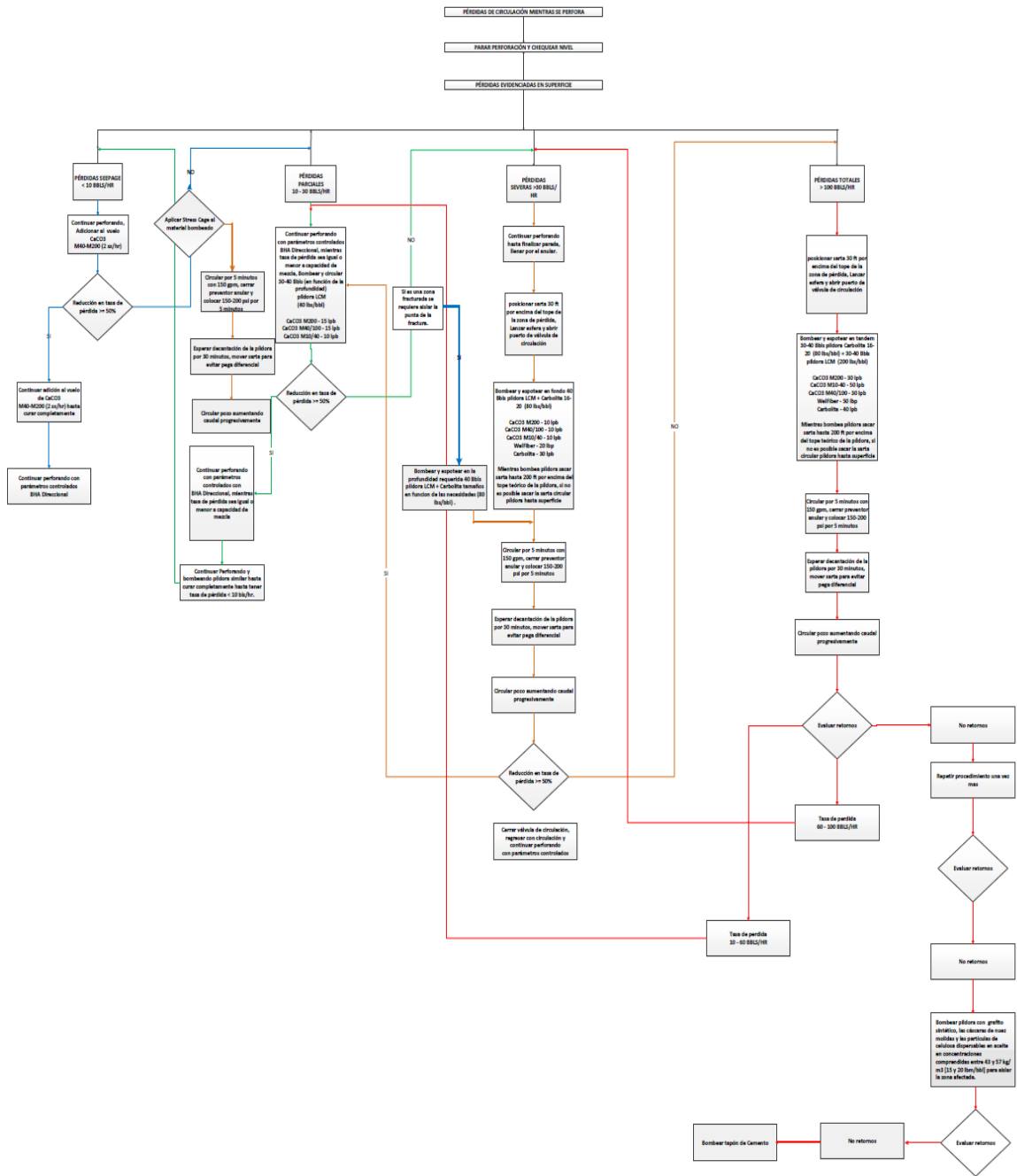
Figura 9 Plan de acción planteado en función de las condiciones.



La **Figura 9** explica los planes de acción en función del problema evidenciado planteando una metodología a emplear, en este caso se tuvo en cuenta los factores principales de cada metodología además de exponer la ventaja del uso del método.

Una vez teniendo en cuenta el plan de acción se procedió a estructurar un árbol de decisiones basándose en lo hallado en la literatura, dicho plan tiene como fin solventar una situación donde se esté perdiendo fluidos durante una perforación.

Figura 10 Árbol de decisión para pérdidas durante perforación



De la Figura 10 se decidió seccionar 4 partes para su correcta comprensión:

Figura 11 Árbol de decisión para pérdidas durante perforación pérdidas seepage

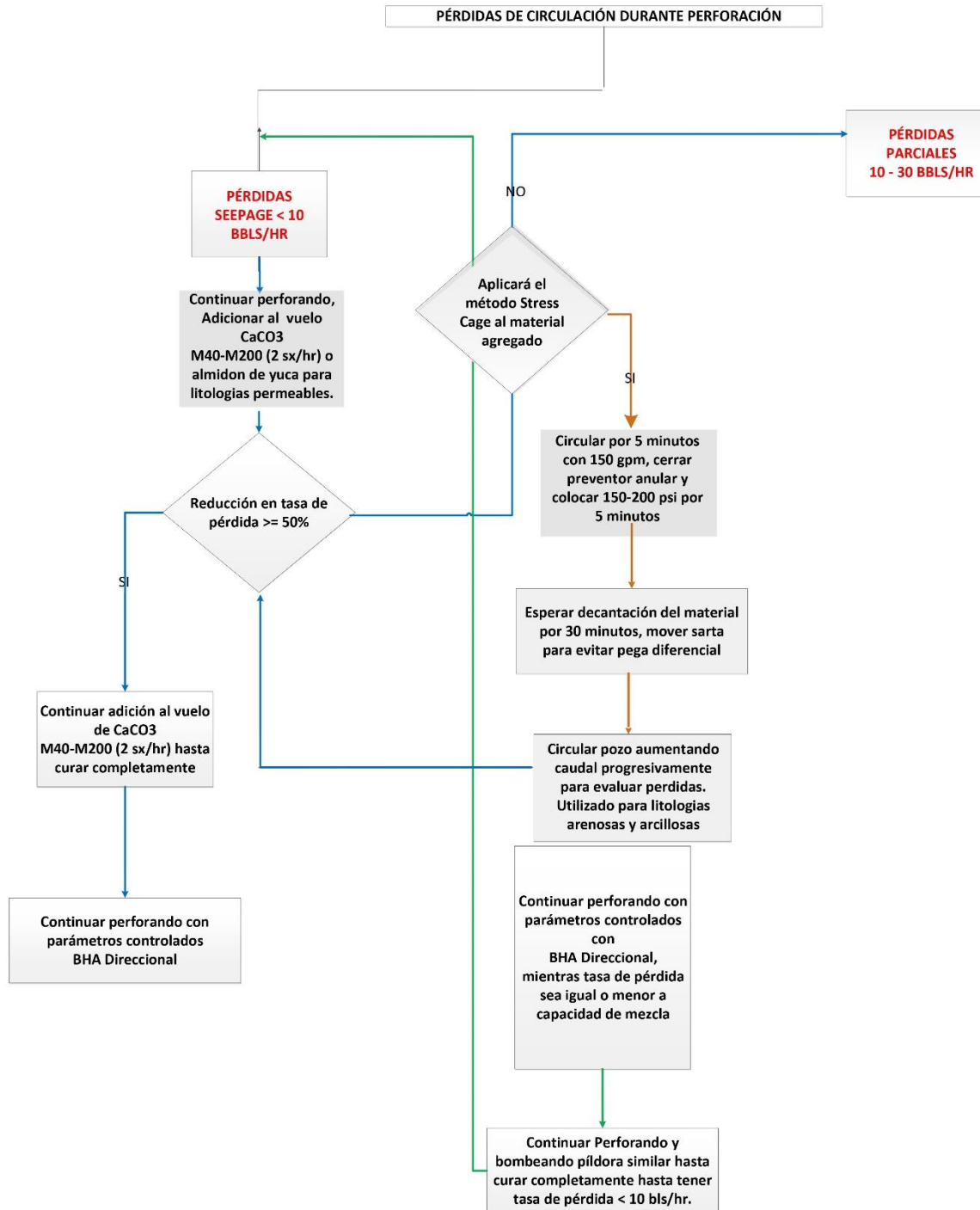


Figura 12 Árbol de decisión para pérdidas durante perforación pérdidas parciales

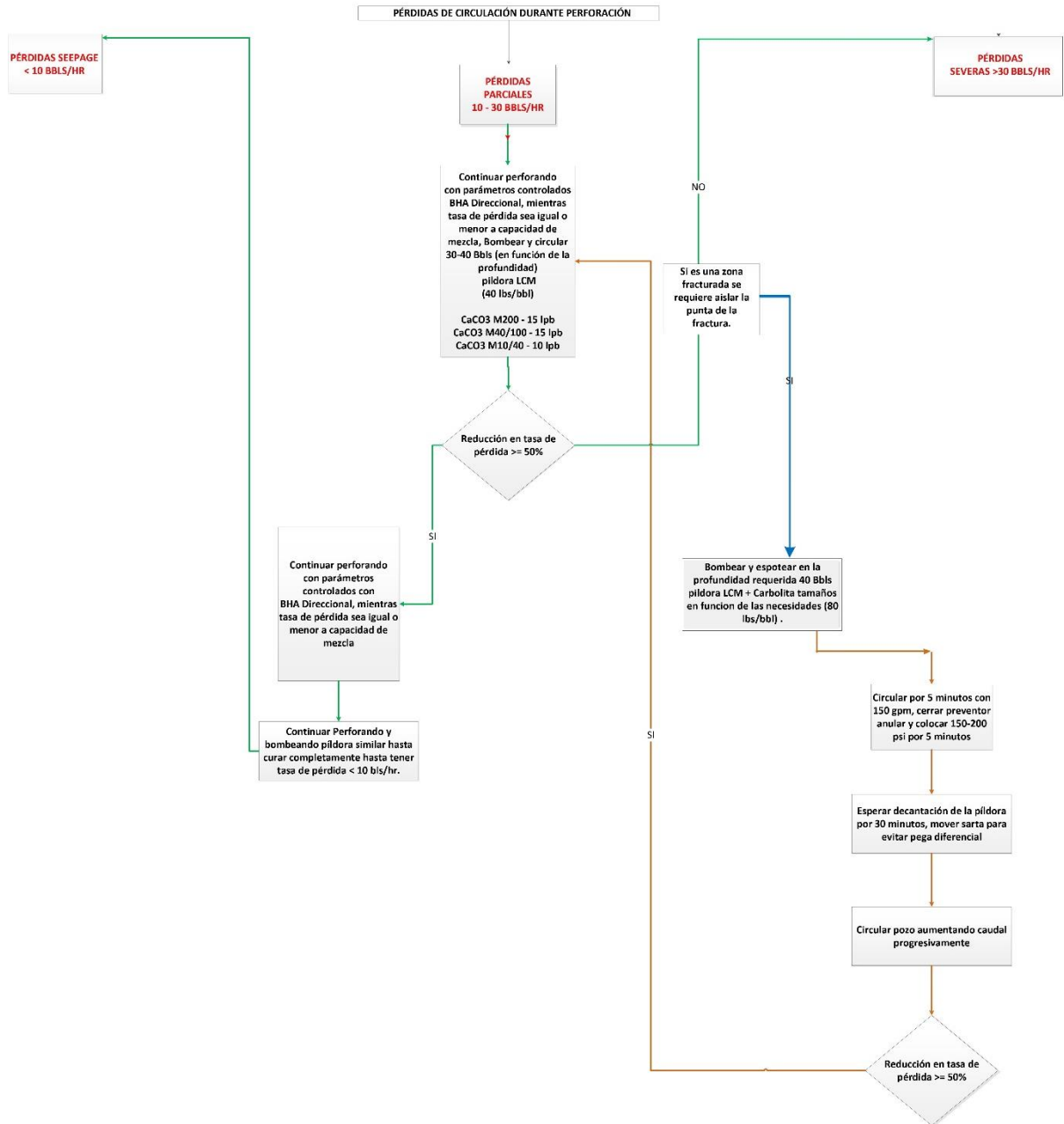


Figura 13 Árbol de decisión para pérdidas durante perforación pérdidas severas

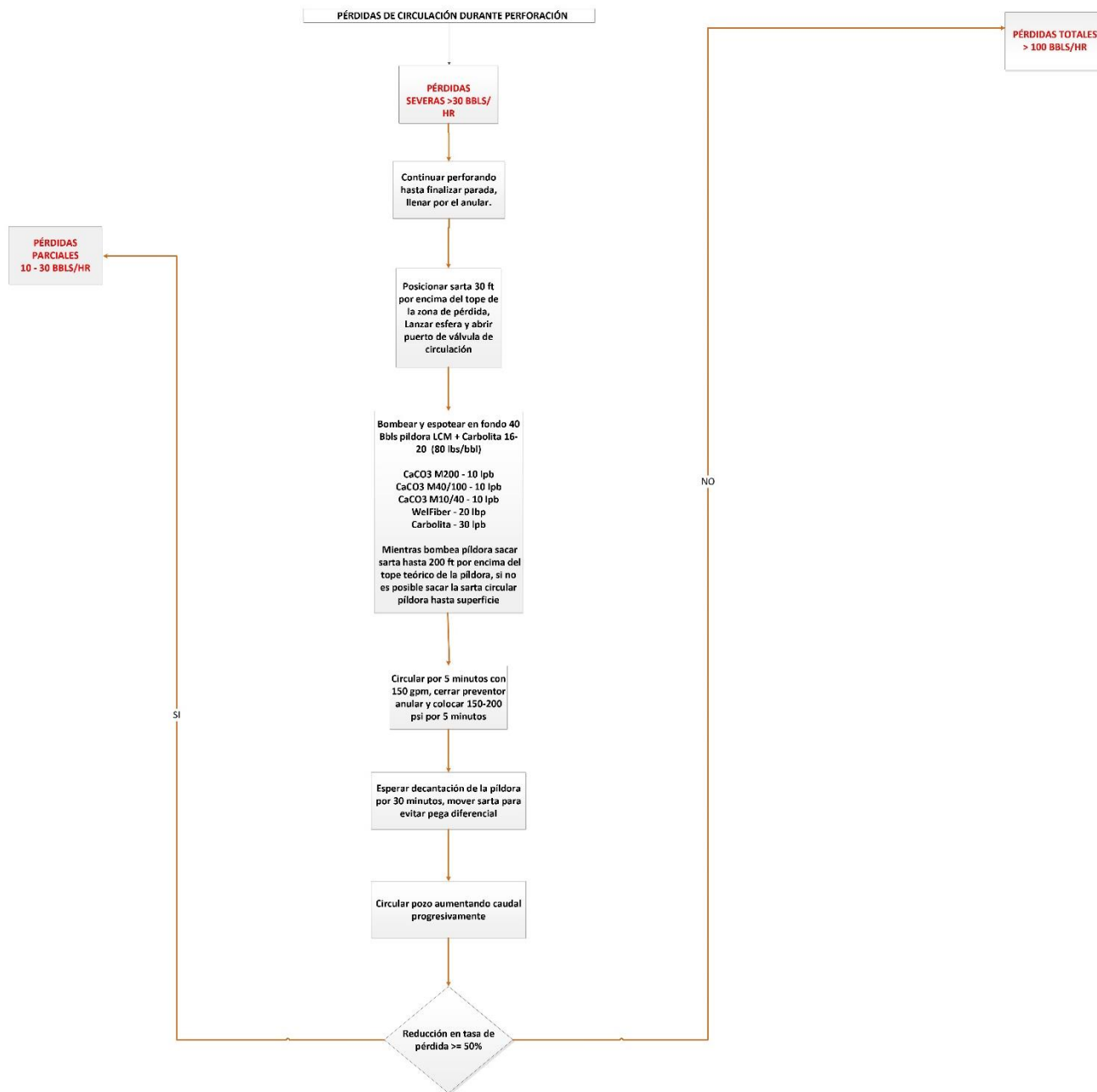
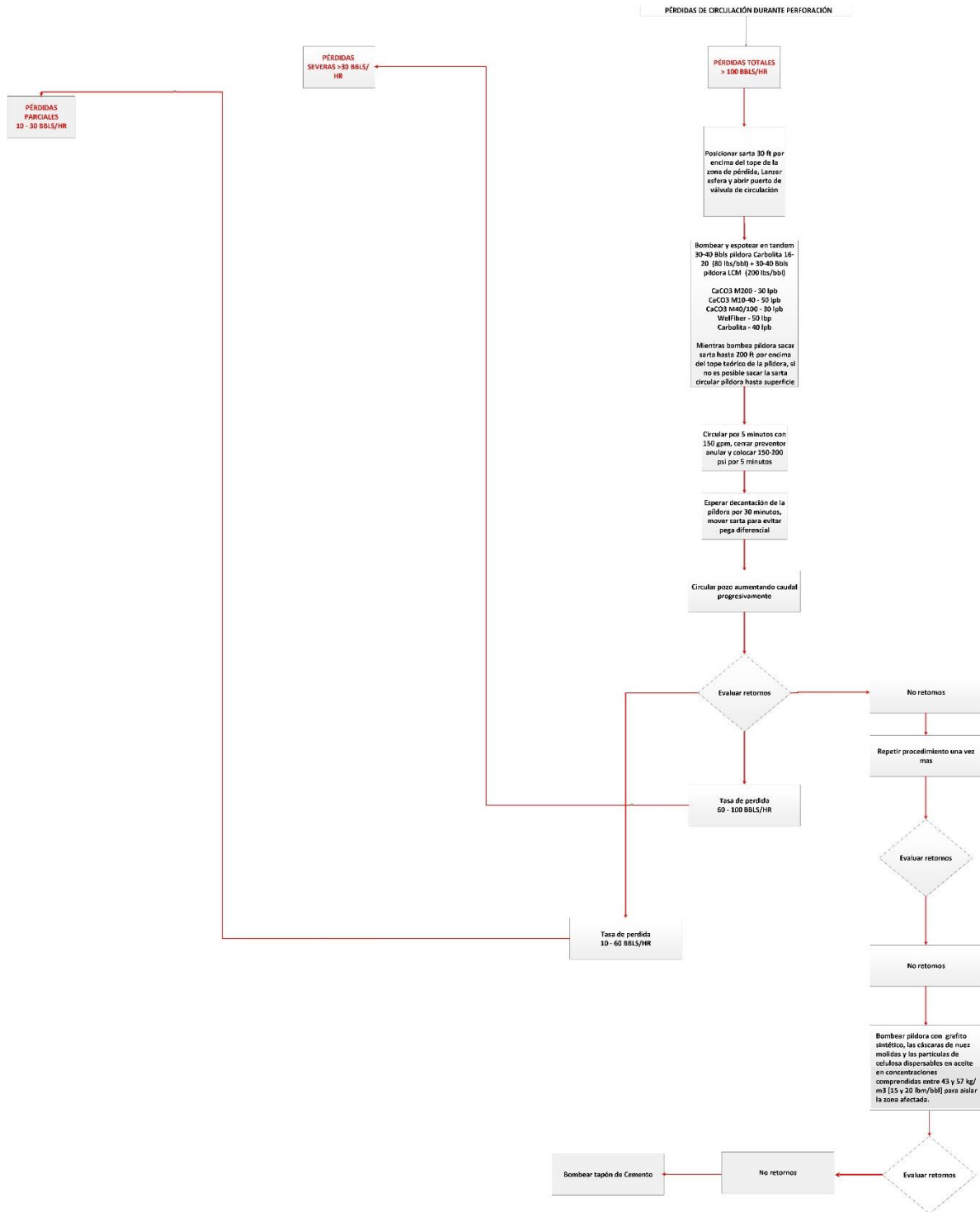


Figura 14 Árbol de decisión para pérdidas durante perforación pérdidas totales



4.5 Árbol de decisión para pérdidas durante perforación.

El árbol de decisiones planteado se basó en la investigación realizada, en él se tuvo en cuenta la mayor cantidad de metodologías que predominan actualmente en la industria, adicional a esto se diseñó con un BHA (bottom hole assembly en español ensamblaje de fondo) que lleve válvulas auxiliares de bombeo llamadas well commander, las cuales cumplen la función de proteger las herramientas direccionales que tienen un punto máximo de concentración de material de pérdidas para su taponamiento y a su vez optimo funcionamiento, para la activación de este sistema el operador debe enviar unas esferas que mediante presión ejercida sobre el equipo este se abre y permite el paso del flujo desde un punto hacia arriba, estas esferas generalmente son de bronce y son recuperadas al sacar la herramienta a superficie.

De la **Figura 10 a 13** se observa el flujo de trabajo que se diseñó para elegir metodologías eficientes a la hora de una pérdida de fluidos o filtrado. Este árbol se divide en 2 pasos los cuales se ejecutan de la siguiente manera:

4.5.1 Primer Paso

El primer paso es crucial para determinar cuál es el método más óptimo para resolver el problema, este se puede realizar de dos maneras, la primera opción es mientras se perfora se evalúa la tasa de pérdidas mediante el control de niveles de los tanques representado en las ganancias o pérdidas del sistema y en la segunda opción se debe detener la perforación y chequear los niveles tanto físicos como en el sistema, al evidenciar pérdidas en superficie se debe calcular la tasa las cuales se dividen en:

- Pérdidas leves o Seepage <10 bbls/hr.
- Pérdidas parciales 10 – 30 bbls/hr.
- Pérdidas severas 30 - 100 bbls/hr.

- Pérdidas totales >100 bbls/hr.

Cabe resaltar que los valores varían en función de la capacidad anular del pozo, ya que entre más profundo mayor será el volumen.

4.5.2 Segundo Paso

Una vez calculada la tasa de pérdida se procede a ejecutar las validaciones:

- **Pérdidas Seepage:** Al analizar la tasa de pérdidas y que esta se encuentre en el rango menor a 10 bbls/hr se define como pérdida seepage o filtración. En este caso se puede seguir perforando y el método más apropiado para corregir las pérdidas es adicionar al vuelo (adicionar al vuelo hace referencia a agregar el material directamente al lodo que va ingresando durante la circulación) CaCO₃ malla 40 – 100 μ m y malla 200 μ m 2 sk/hr (saco/hora). Se procede a validar si la tasa de pérdidas disminuyó mayor igual al 50%, si la respuesta es afirmativa se mantiene la adición del material hasta curar completamente. Si la respuesta es negativa se procede a aplicar Stress cage donde se debe cerrar el preventor anular y colocar 150-200 psi por 5 minutos, se debe mover la sarta para evitar pega diferencial y por último circular el pozo aumentando caudal progresivamente. Luego de ejecutado todos los pasos se debe volver a evaluar las condiciones.

Si no se logró curar las pérdidas, es necesario tratarse como pérdidas parciales.

- **Pérdidas parciales:** Al analizar la tasa de pérdidas y que esta se encuentre en el rango entre 10 y 30 bbls/hr se define como pérdida parcial. Para este caso se debe continuar perforando con parámetros controlados, mientras que la tasa de pérdidas sea igual o menor a la capacidad de mezcla, se debe bombear 30-40 barriles de píldora LCM, con una concentración de 15 lpb de CaCO₃ m200, 15 lpb de CaCO₃

m40/100 y 10 lpb de CaCO₃ m10/40, luego se debe volver a evaluar la tasa de pérdidas donde vendrían las siguientes condiciones, si se reduce la tasa de pérdida mayor o igual que 50% se debe seguir perforando con parámetros controlados aplicando la metodología para curar pérdidas Seepage. Si no se reduce del 50% se debe tener en cuenta si es una zona fracturada donde se debe aislar la punta de la fractura por lo cual se bombea y espotea (espotear hace referencia a ubicar en una zona deseada una píldora o un fluido) en la profundidad requerida 40 barriles de píldora LCM + Carbolita los tamaños van en función de las necesidades con una concentración de 80 lpb, luego de espoteada se circula por 5 minutos con 150 gpm, se cierra el preventor anular y colocar 150-200 psi por 5 minutos, se circula el pozo aumentando caudal progresivamente para luego evaluar la tasa de pérdidas. Una vez evaluada la tasa de pérdidas si se reduce la tasa se debe continuar perforando con parámetros controlados teniendo en cuenta de si existe presencia de pérdidas se debe seguir bombeando píldoras similares hasta tener una tasa de pérdida menor a 10 bbls/hr o detener las pérdidas. Si no se va a realizar el aislamiento de la punta de la fractura es necesario tratar la pérdida con la metodología de las pérdidas severas.

- **Pérdidas severas:** Al analizar la tasa de pérdidas y que esta se encuentre en el rango entre 30 y 100 bbls/hr se define como pérdidas severas. Para tratar este tipo de pérdidas se debe tener planeado con antelación el uso de válvulas de circulación como la Well Commander con el fin de proteger las herramientas direccionales debido a la concentración de las píldoras. Para esta metodología es necesario continuar perforando hasta finalizar la parada para luego llenar por el anular. Se posiciona la sarta 30 pies por encima del tope teórico de la zona de pérdidas, se desconecta la tubería y se procede a lanzar la esfera para abrir la válvula de

circulación debido a que la concentración de las píldoras afecta las herramientas direccionales del ensamblaje de fondo. Procede a bombear y espotear en fondo 40 barriles de píldora LCM + 80 lpb de carbolita 16-20, CaCO₃ M200 10 lpb, CaCO₃ M40/100 10 lpb, CaCO₃ M10/40 10 lpb, WelFiber 20 lpb, Carbolita 30 lpb. Mientras se bombea la píldora sacar sarta hasta 200 ft por encima del tope teórico de la píldora, si no es posible sacar la sarta circular píldora hasta superficie, para inducir la píldora se debe cerrar el preventor anular y colocar una presión de 150 – 200 psi por 5 minutos y luego se debe esperar la decantación de la píldora mientras que se mueve la sarta para evitar pega diferencial. Si la tasa se reduce en más del 50% se debe cerrar la válvula de circulación y tratar como una pérdida parcial, si las pérdidas se mantienen se debe tratar como pérdidas totales.

- **Pérdidas totales:** Al analizar la tasa de pérdidas y que esta sea mayor a 100 bbls/hr se define como pérdidas totales. para esta opción se debe posicionar la sarta 30 pies por encima del tope de la zona de pérdida, lanzar esfera y abrir la válvula de circulación, se debe bombear en tándem (tándem hace referencia a que las píldoras deben ser bombeadas una detrás de la otra) y espotear 40 barriles de píldora carbolita 16-20 (80 lpb) + 40 píldora LCM (200 lpb) CaCO₃ M200 30 lpb, CaCO₃ M10-40 50 lpb, CaCO₃ M40/100 30 lpb, WelFiber 50 lpb, Carbolita 40 lpb. Mientras se bombea píldora sacar sarta hasta 200 pies por encima del tope teórico de la píldora, si no es posible sacar la sarta circular píldora hasta superficie. Se debe inducir la píldora cerrando el preventor anular y colocar una presión de 150 – 200 psi por 5 minutos y luego se debe esperar la decantación de la píldora mientras que se mueve la sarta para evitar pega diferencial. Se debe circular el pozo aumentando el caudal progresivamente para evaluar retornos, si la tasa reduce se debe tratar en función de

la tasa de pérdidas, si no se debe repetir el proceso nuevamente, si no se tiene éxito se debe bombear píldora con grafito sintético, cáscaras de nuez molida y partículas de celulosa dispersables en aceite, en concentraciones comprendidas entre 15 y 20 lbp para aislar la zona afectada. Se evalúan los retornos y si no se tiene se deben bombear tapones de cemento.

5.0 Conclusiones

Una vez se ha logrado llegar hasta este punto dentro de la tesis que tuvo como objeto de estudio “metodología para seleccionar el procedimiento más adecuado que permita controlar el filtrado y la invasión de lodo hacia la cara del pozo en función de las propiedades de la roca y las condiciones operacionales” expondré simplificando en 6 puntos específicos, donde se lograra dar claridad sobre el objeto, alcance y finalidad del proyecto trabajado, consiguiendo, así como resultado las siguientes:

- El excesivo filtrado genera daño a la formación, esta afectación repercute en la etapa productiva del yacimiento ocasionando pérdidas monetarias. Además, el filtrado puede generar cambios en la saturación de fluidos en el medio poroso, alterando las propiedades capilares e hidráulicas de la roca, así como la permeabilidad relativa. Los cambios en el ambiente iónico (salinidad, contraste de salinidad, y PH) el cual se ve reflejado en el hinchamiento de las arcillas, así como la migración de partículas finas, que al producir se pueden precipitar y generar taponamiento en el tubing de producción. Este también genera que el grosor del cake sea mayor, esto puede influir en la toma de registros eléctricos donde se obtendría data errónea, además disminución del espacio anular, disminución en la ROP aumentando el tiempo y los costos de la perforación. Lo anterior se puede corroborar con lo investigado de la página número 27 a la 32, adicional a ello la tabla número 2 expone las consecuencias generadas por la filtración.

- La investigación realizada arrojó que el método de stress cage es uno de los métodos más utilizados en la industria debido a la facilidad y la eficacia de este, donde se aseguran de que la formación tome la píldora que fue bombeada. Para que este mecanismo avance, se necesitan grandes concentraciones de aditivos de sellado; estos deben ser lo suficientemente duros como para

mantener los esfuerzos de cierre y tener el tamaño adecuado para cerrar el espacio cerca de la entrada de la fractura, en lugar de hacerlo más profundo en la formación. Además, deben formar un puente impermeable para minimizar la pérdida a través de la interconexión entre los poros para reducir la presión en caso de fractura. La comparativa se realizó teniendo en cuenta lo alojado en el titular 4.2 en el cual se exponen las diferentes metodologías utilizadas en la industria, cabe resaltar que se priorizó la facilidad y eficacia del método a utilizar.

- Perforar underbalance es uno de los métodos más baratos para reducir la pérdida del filtrado, pero este método no puede ser implementado en todas las formaciones debido a los riesgos que esta conlleva al ser susceptibles a arremetidas de pozo.

- El mecanismo principal para el cierre de las fracturas es la óptima elección de la distribución del tamaño de las partículas, esta estará directamente relacionada a la litología y permeabilidad de la zona perforada. Cuando existe una alta pérdida de fluido, el tamaño de las partículas de LCM debe ser más pequeño de la abertura de la fractura, siendo esto necesario para el aseguramiento del material al interior de la formación.

- Las propiedades más importantes a la hora de implementar los mecanismos son la litología, permeabilidad, porosidad y la presión del yacimiento, ya que esto afecta directamente el tipo de material, el tamaño de la partícula y las concentraciones a utilizar. Las condiciones operativas influyen en el resultado del método de mitigación de pérdida, factores como la temperatura, velocidad de circulación y presión de circulación lo que puede hacer que una píldora se induzca o se pueda circular a través de todo el anular esto en función a las necesidades de la operación.

- Los árboles de decisión para la pérdida de fluidos en la perforación de pozos están influidos por diversos factores, entre ellos el cliente y los asesores en fluidos. Estos consideran el tipo de pérdida (parcial, moderada, severa o total), evaluada mediante la tasa de pérdidas, para determinar la estrategia a seguir. En casos de pérdidas parciales, es posible continuar la perforación y aplicar material para crear un puente que detenga la pérdida. En pérdidas moderadas, se requiere ajustar parámetros y añadir material adicional. Cuando las pérdidas son severas, la acción a tomar depende de la operadora y las condiciones específicas. Para pérdidas totales, se emplean píldoras con material, si bien su uso está limitado por el BHA (Bottom Hole Assembly) debido a restricciones, como un máximo de 40 libras por barril de material para herramientas direccionales, para evitar obstrucciones.

6.0 Recomendaciones

Investigar acerca de un sistema de evaluación que permita comparar y clasificar los métodos en función de su efectividad, viabilidad técnica y económica. Utilizar criterios objetivos y ponderar las variables clave identificadas anteriormente.

Reestructurar el árbol de decisiones cambiando los nombres de los materiales a utilizar por versiones generales para que las metodologías puedan realizarse sin limitarse a los químicos de una empresa en especial. Adicional es necesario reevaluar las tasas de pérdidas teniendo en cuenta el tamaño del diámetro y del volumen anular, una de las ideas es clasificar la tasa de pérdida por el porcentaje de disminución del volumen anular.

Evaluar con pruebas de laboratorio y pruebas piloto en campo sobre métodos poco utilizados en la industria los cuales puedan implementarse en los nuevos árboles de decisión.

7.0 Referencias

Aldana, JC, Acero, JL y Álvarez, PM (2021). Tecnologías de filtración por membranas, fangos activados y fotocatalítica solar para el tratamiento eficaz de aguas residuales del procesado de aceitunas de mesa. *Revista de ingeniería química ambiental*, 9 (4), 105743.

Al-hameedi, A. T. T., Alkinani, H. H., Dunn-norman, S., Flori, R. E., Hilgedick, S. A., Alkhamis, M. M., & Alsaba, M. T. (2018). SPE-192181-MS Data Analysis of Lost Circulation Events in the Hartha Formation, Rumaila.

Ali, I., Ahmad, M., & Ganat, T. (2022). Biopolymeric formulations for filtrate control applications in water-based drilling muds: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 210(September 2021), 110021. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.110021>

Alkinani, H. H., Al-hameedi, A. T. T., Dunn-norman, S., & Flori, R. E. (2019). IPTC-19290-MS Economic Analysis of Lost Circulation Events to Optimize the Drilling Process in Basra Oil Fields, Iraq.

Benaissa, S., Bachelot, A., & Ong, S. (2006, November). Preventing mud losses and differential sticking by altering effective stress of depleted sands. In *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*. OnePetro.

Bernal Serrano, L. N., & Velásquez Duarte, B. L. (2017). Desarrollo tecnológico para la automatización del sistema de filtrado API para el laboratorio de lodos y cementos de la Fundación Universidad de América (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).

Borja, R., & Banks, C. J. (1994). Treatment of palm oil mill effluent by upflow anaerobic filtration. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental AND Clean Technology*, 61(2), 103-109.

Chang, I. S., & Lee, C. H. (1998). Membrane filtration characteristics in membrane-coupled activated sludge system—the effect of physiological states of activated sludge on membrane fouling. *Desalination*, 120(3), 221-233.

Chang, IS, Bolsa, SO y Lee, CH (2001). Efectos del ensuciamiento de la membrana sobre el rechazo de solutos durante la filtración por membrana de lodos activados. *Bioquímica de procesos*, 36 (8-9), 855-860.

Cook, J., Growcock, F., Guo, Q., Hodder, M., & van Oort, E. (2012). Estabilización del pozo para prevenir pérdidas de circulación. *Oilfield review*, 23(4), 1-10.

Ding, Y., Herzhaft, B. & G. Renard. (2006). Near-Wellbore Formation Damage Effects on Well Performance: A Comparison Between Underbalanced and Overbalanced Drilling. *SPE Prod & Oper*, 21(01), 51–57.

Dupriest, F. E. (2005, February). Fracture closure stress (FCS) and lost returns practices. In SPE/IADC drilling conference. OnePetro.

Emhanna, Saleh. (2018). Analysis of Non-Productive Time (NPT) in Drilling Operations- A Case Study of the Ghadames Basin.

Estudio del Proceso de filtración del lodo de perforación y formación de revoque durante el proceso de perforación en un pozo de petróleo — Steemit. Steemit.com. From <https://steemit.com/spanish/@ennyta/estudio-el-proceso-de-filtracion-del-lodo-perforacion-y-formacion-de-revoque-durante-el-proceso-de-perforacion-en-un-pozo-de>.

Elkatatny, S., Kamal, M. S., Alakbari, F., & Mahmoud, M. (2018). Optimizing the rheological properties of water-based drilling fluid using clays and nanoparticles for drilling horizontal and multi-lateral wells. *Applied Rheology*, 28(4), 1–8. <https://doi.org/10.3933/ApplRheol-28-43606>

Ferdous, M. (2013). Nanoparticle-based Drilling Fluids with Improved Characteristics. <https://doi.org/10.11575/PRISM/27055>

Forero, A. (2016). Evaluación de diferentes sistemas de lodos de perforación para disminuir el daño de formación en un Campo de crudo pesado. Escuela de Procesos y Energía.

Flores Bolaños, A. W. Mejoramiento del lodo de perforación base agua con la adición de nanopartículas para optimizar las propiedades de la retorta y minimizar el daño de formación. Ingeniería de Petróleos.

Galvis Duitama, E. M., & Guachetá Buendía, A. (2021). Evaluación del desempeño a nivel de laboratorio de un lodo de perforación polimérico base agua mediante la adición de dos nano-aditivos para el control de filtrado y daño de formación en la zona productora de la formación mugrosa en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).

Hernández García, J. A. (2014). Evaluación de efectividad de inhibidores base amina-PHPA en el lodo utilizado en campo Opón.

J.C. Santivañez, W.E. Cano, D. Ordoñez y A. Bohórquez, "Evaluación del uso de almidón de papa como aditivo para lodos de perforación", Fuentes, *El Reventón Energético*, vol. 17, no. 1, pp. 19-28, 2019, doi:10.18273/revfue.v17n1-2019002.

Jean, D. S., & Lee, D. J. (1999). Expression deliquoring of oily sludge from a petroleum refinery plant. *Waste management*, 19(5), 349-354.

Martínez, J. (2011). Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua [Tesis de grado]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Menon, N., & Shabaraya, A. R. (2016). Conducting root cause analysis and its implementation: A perspective. *Manipal Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2(2), 5.

Mouratib, R., Achiou, B., El Krati, M., Younssi, SA y Tahiri, S. (2020). Membrana cerámica de bajo costo fabricada a partir de lodos de tratamiento de agua ricos en alúmina y sílice y su aplicación en la filtración de aguas residuales. *Revista de la Sociedad Europea de Cerámica*, 40 (15), 5942-5950.

Morita, N., Black, A. D., & Guh, G. F. (1990, September). Theory of lost circulation pressure. In SPE annual technical conference and exhibition. OnePetro.

Musaab I. Magzoub, Saeed Salehi, Ibnelwaleed A. Hussein, Mustafa S. Nasser, Loss circulation in drilling and well construction: The significance of applications of crosslinked polymers in wellbore strengthening: A review, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 185, 2020, 106653, ISSN 0920-4105,

Novrianti, Khalid, I., Yulastini, & Novriansyah, A. (2019). Experimental analysis of cassava starch as a fluid loss control agent on drilling mud. *Materials Today: Proceedings*, 39, 1094–1098. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.189>

Shad, S., Salmanpour, S., Zamani, H., & Zivar, D. (2021). Dynamic analysis of mud loss during overbalanced drilling operation: An experimental study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196(September 2020), 107984. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107984>

Van Oort, E., Friedheim, J., Pierce, T., & Lee, J. (2011). Avoiding losses in depleted and weak zones by constantly strengthening wellbores. *SPE Drilling & Completion*, 26(04), 519-530.

Valencia Quintero, L. M. (2019). Efecto de la distribución del tamaño de partículas a escala nanométrica en los fluidos de perforación base agua: Reducción del filtrado y espesor del revoque. 88.

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/76524/32299561.2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Valcarcel, D. (20 de enero de 2021). Fluidos de perforación. Course Hero. Recuperado el 16 de marzo de 2023. <https://www.coursehero.com/file/91951215/Laboratorio-3-Filtracionpdf/>

Vipulanandan, C., & Mohammed, A. (2020). Effect of drilling mud bentonite contents on the fluid loss and filter cake formation on a field clay soil formation compared to the API fluid loss method and characterized using Vipulanandan models. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 189(February), 107029. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107029>

Yang, L., Nakhla, G. y Bassi, A. (2005). Deshidratación electrocinética de lodos aceitosos. *Diario de materiales peligrosos*, 125 (1-3), 130-140.