



Universidad Nacional del Comahue

Facultad de Ingeniería

Departamento de Geología y Petróleo

Proyecto Integrador Profesional (PIP)

Título:

*“Análisis de densidades equivalentes
en condiciones de flujo cruzado
durante la etapa de perforación”*

Autores:

Portales, Luis Fernando

Weber, Juan Manuel

Tutor académico:

Gonzalez, Esteban Luis

Tutor externo:

Quirós, Roberto Hernán



Neuquén, Argentina 2024

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi familia que me apoyaron en todo momento a pesar de la distancia, brindarme todas las herramientas para llevar a cabo mis estudios y a disfrutar de esta etapa de la vida.

Agradecer a todos y cada uno de mis compañeros que estuvieron presentes en este proceso, lo cual son de vital importancia en mi desarrollo tanto académico como en lo personal.

Un especial agradecimiento a mi compañero Juan por su compromiso, paciencia y apoyo en esta última instancia de la carrera.

Darle las gracias a nuestro tutor interno Esteban por siempre tener un tiempo para guiarnos en la realización del proyecto integrador.

Por último, agradecer al tutor externo Hernán por el tiempo que dedico a orientarnos y resolver nuestras dudas, compartir su amplia experiencia y conocimiento fueron fundamentales en el desarrollo del trabajo.

L. F. Portales

Agradecimientos

A mis padres por enseñarme a no perder la constancia y seguir adelante en busca de un objetivo que a pesar de los desafíos que se presenten en la vida, todo tiene solución si se realiza con amor y respeto. Además del apoyo incondicional durante todo este trayecto llamado vida.

A mi abuela que con su bondad y cariño hacia todos sus nietos inspira su gran fuerza de voluntad.

A mi hermana por su comprensión, aprecio y ser siempre un cable a tierra con la que se puedo contar en las buenas y en las malas.

A mi familia y amigos presentes durante toda la carrera.

A los profesores de la facu, Maestros y profesores de la vida presentes que nos enseñan la devoción por la enseñanza y el aprendizaje.

A mi compañero Luis por la predisposición y el apoyo en estos últimos trayectos de la carrera.

A nuestro tutor Esteban por los consejos y la guía de este trabajo. A Hernán por el generoso tiempo invertido en la realización de este trabajo y transmitir la pasión por el aprendizaje y el oficio.

J. M. Weber

Resumen

El siguiente trabajo de investigación se centró en el análisis de la perforación en la cuenca Neuquina, con énfasis en las formaciones Quintuco y Vaca Muerta, donde se identificó la ocurrencia del fenómeno de flujo cruzado. El objetivo principal de este proyecto es proponer soluciones para mitigar los efectos del flujo cruzado mediante la aplicación de la técnica de Perforación con Presión Controlada (MPD). A lo largo del estudio, se examinaron los parámetros críticos que deben ser controlados durante la perforación, tales como presiones, densidades y caudales, destacando su relevancia para la reducción de riesgos operativos y la optimización de las operaciones de perforación. Se enfatizó la importancia de establecer una Densidad Equivalente de Circulación (ECD) adecuada para definir los límites de la ventana operativa. El caso de estudio se desarrolló mediante la recopilación y análisis de datos de perforación, lo que permitió identificar patrones y correlaciones que contribuyan a una mejor comprensión del flujo cruzado.

Palabras clave: perforación, densidad equivalente de circulación, flujo cruzado, cuenca Neuquina, presión controlada, ventana operativa.

Abstract

This research focused on the analysis of drilling operations in the Neuquén Basin, with an emphasis on the Quintuco and Vaca Muerta formations, where the occurrence of crossflow was identified. The primary objective of this project is to propose solutions to mitigate the effects of crossflow through the application of Managed Pressure Drilling (MPD) techniques. Throughout the study, critical drilling parameters such as pressure, density, and flow rate were examined, highlighting their relevance for reducing operational risks and optimizing drilling operations. The importance of establishing an appropriate Equivalent Circulating Density (ECD) was emphasized to define the limits of the operating window. A case study was developed through the collection and analysis of drilling data, allowing for the identification of patterns and correlations that contribute to a better understanding of crossflow.

Keywords: Drilling, equivalent circulating density, crossflow, Neuquén Basin, managed pressure drilling, operational window.

1. Índice general

2. INTRODUCCIÓN	1
2.1 Objetivo	1
2.2 Marco teórico	1
2.3 Consideraciones	2
3. LA CUENCA NEUQUINA	3
3.1 Historia geológica	3
3.2 Características generales	6
3.2.1 Límites	6
3.3 Formaciones productivas	8
3.3.1 Formación Quintuco	8
3.3.2 Formación Vaca Muerta	11
3.4 Referencias del texto	15
4. TÉCNICA MPD	15
4.1 Objetivos	15
4.2 Beneficios del MPD	16
4.3 Condiciones operativas	17
4.4 Parámetros de la operación	17
4.5 Equipamiento	17
4.5.1 Dispositivo de circulación rotativo	17
4.5.2 Conjunto de estranguladores	18
4.5.3 Medidor de flujo masico Coriolis	20
4.5.4 Separador vertical atmosférico	22
4.5.5 Sistema de ignición para quema de gas	23

4.6 Diagrama de conexión	24
4.6.1 Circuito cerrado de circulación a través del esquema MPD	24
4.7 Conceptos básicos de perforación	26
4.7.1 Ventana operativa	26
4.7.2 Desafíos de la perforación actual	27
4.7.3 Densidad equivalente de circulación y densidad del lodo equivalente	28
4.7.4 Análisis de la presión de fondo en perforación convencional	29
4.7.5 Perforación MPD	30
4.7.6 Ensayos de formación	32
4.7.7 Técnica MPC (<i>Managed Pressure Cementing</i>)	35
4.8 Referencias del texto	37
5. FLUJO CRUZADO	39
5.1 Introducción al flujo cruzado	39
5.1.1 Mecanismos de flujo cruzado	39
5.1.2 Influencia sobre la densidad equivalente	42
5.1.3 Metodos preventivos	44
5.2 Caso de estudio	45
5.2.1 Caracterización del pozo	45
5.1.1 Parámetros de diseño	52
5.2.3 Análisis FIT	53
5.2.4 Curvas equivalentes	55
5.2.5 Primera estrategia	55
5.1.1 Segunda estrategia	65
5.2.7 Análisis cualitativo	69
5.2.8 Conclusiones	70

5.3 Referencias del texto	72
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	A
Capítulo 3	A
Libros, artículos, revistas	A
Páginas Web	A
Capítulo 4	B
Libros, artículos, revistas	B
Páginas Web	B
Capítulo 5	C
Libros, artículos, revistas	C
Páginas Web	C

2. Introducción

En la construcción de un pozo petrolero, durante la etapa de perforación, es necesario poder controlar determinados parámetros como la presión, la densidad del fluido y los caudales. El control adecuado de estos parámetros es crucial para poder reducir los riesgos asociados a la operación y evitar problemas de entrapamiento de las herramientas utilizadas con el objetivo principal de llegar hasta la profundidad de interés.

Esto se logra mediante el monitoreo constante de las variables registradas, lo cual permite obtener una comprensión más precisa de las condiciones actuales en el subsuelo. De esta manera, es posible tomar decisiones y actuar rápidamente ante cualquier imprevisto, antes de que el problema se manifieste en la superficie, permitiendo un control en tiempo real y prematuro.

El desarrollo teórico y técnico de este trabajo, que tiene como finalidad identificar el flujo cruzado para proponer soluciones que minimizarán su impacto, se llevará a cabo mediante el análisis de un caso de estudio práctico monitoreando las variables antes citadas.

El flujo cruzado es un fenómeno que se genera por el movimiento de fluidos entre formaciones concurrentes debido a gradientes de presión entre el lodo de perforación y los fluidos contenidos en las formaciones. Este fenómeno genera una zona de pérdida de circulación y una zona de aporte de fluido de formación.

2.1 Objetivo

El objetivo de este Proyecto Integrador Profesional (PIP) es *plantear dos estrategias para el control de la perforación cuando se presentan condiciones de flujo cruzado* y decidir sobre el uso de una u otra estrategia, implementando la técnica MPD (*Managed Pressure Drilling*) para el control de presión.

Teniendo en cuenta cuáles son las formaciones en las que puede ocurrir este fenómeno, se puede anticipar cuál puede ser la estrategia a utilizar. Esto se logra en base al estudio previo de la zona a perforar que incluye información sobre la cuenca y las formaciones presentes en la zona.

2.2 Marco teórico

El desarrollo de este trabajo incluye 2 capítulos de desarrollo teórico que forman parte del marco teórico (capítulos 3 y 4). El caso de estudio práctico se desarrollará en el capítulo 5, donde se incluye una introducción teórica a la problemática planteada. En el capítulo final (capítulo 6) se detalla la bibliografía utilizada.

Se realiza una breve descripción de la cuenca Neuquina, en particular de las formaciones Quintuco y Vaca Muerta, donde ocurre con mayor frecuencia el flujo cruzado. También incluye el análisis detallado de las características geológicas de ambas formaciones, así como la historia geológica y las etapas de evolución de la cuenca. También se incluye el detalle de los principios fundamentales de la técnica MPD, así como los equipos utilizados, conexiones, rango de presiones de la perforación, parámetros que permiten controlar la presión de fondo de pozo y los principios físicos involucrados que permiten la descripción de la densidad equivalente de circulación o ECD (*Equivalent Circulating Density*). También se detallan los posibles problemas que se enfrentan durante la perforación y las diferencias con respecto a la perforación convencional.

Para el caso de estudio se describe una introducción a los conceptos básicos relacionados con el flujo cruzado y cómo éste afecta el control en superficie.

Por último, se describirán las referencias bibliográficas utilizadas en este proyecto.

2.3 Consideraciones

- ❖ Este trabajo no incluye temas específicos como la selección de herramientas, cañerías y cálculos relacionados con el diseño de la columna de perforación y el equipo perforador.
- ❖ La corrosión y otras condiciones relacionadas con los equipos presentes en las operaciones no son un tema central dentro de este trabajo.
- ❖ No se realizará un análisis sobre la selección u optimización de los fluidos de perforación utilizados, salvo que sea necesario para el control de la problemática.
- ❖ No incluirá el análisis económico sobre la implementación de MPD ya que excede el tema principal, centrándose únicamente en los aspectos técnicos y su control.

3. La cuenca Neuquina

El objetivo de esta sección es describir brevemente el origen y formación de la cuenca Neuquina con énfasis en las formaciones Quintuco y Vaca Muerta, las cuales forman parte del desarrollo del caso de estudio.

La superficie que cubre gran parte de la cuenca Neuquina cuenta con gran actividad de exploración y explotación separado en distintos yacimientos donde se realizan diversos proyectos de los cuales han surgido diversas situaciones consideradas como objeto de estudio y análisis. Para el desarrollo de este capítulo se hará foco en las formaciones que pueden estar afectadas por un fenómeno denominado flujo cruzado el cual se hará mención en los capítulos posteriores, describiendo brevemente las propiedades que caracterizan a estas formaciones.

3.1 Historia geológica

La génesis de la cuenca sedimentaria está asociada a la deriva continental y a la tectónica de placas en el margen occidental de Gondwana. Su formación se debe principalmente a la subducción de la placa del Pacífico por debajo de la placa continental sudamericana, debido a la diferencia de densidades entre ellas. Durante la evolución de la cuenca, se pueden distinguir 3 etapas principales¹.

1. *Trásico Tardío-Jurásico Temprano*: también conocida como cuenca de Rift, se caracterizaba por grandes sistemas de fallas transcurrentes. Esto condujo a una tectónica extensional dentro de la Cuenca Neuquina y a la evolución de una serie de depocentros estrechos y aislados en el basamento que provoca su ruptura y formación de fallas normales. Estas fallas generan espacios, formando los depocentros, que se llenan con sedimentos piroclásticos producto de la intensa actividad volcánica de la época, como se observa en la columna estratigráfica (Figura 3.1).

2. *Jurásico temprano-Cretácico temprano*: también llamada cuenca de retroarco debido al gran arco magmático de no más de 2000 metros de altura. Además del desarrollo de una zona de subducción activa de pronunciado buzamiento, generaron el hundimiento del arco posterior dentro de la cuenca Neuquina. Es una etapa posterior al Rift que experimenta varias transgresiones del océano pacífico, depositándose sedimentos marinos sobre los piroclásticos previos¹ (Figura 3.1).

3. *Cretácico tardío-Cenozoico*: también conocida como cuenca de *Foreland*, es la última etapa evolutiva de la cuenca donde predomina un ambiente sedimentario continental que transiciona a una zona de subducción de baja profundidad que resulta en compresión y hundimiento por flexión. Además, en esta última fase se produce una transgresión marina del océano Atlántico, dejando sedimentos marinos sobre los depósitos continentales existentes¹.

Existe una fase final de la evolución de la cuenca caracterizada por el levantamiento de afloramientos en el área occidental de la cuenca donde se destaca una sucesión mesozoica con una gran variedad de entornos deposicionales y discordancias regionales.

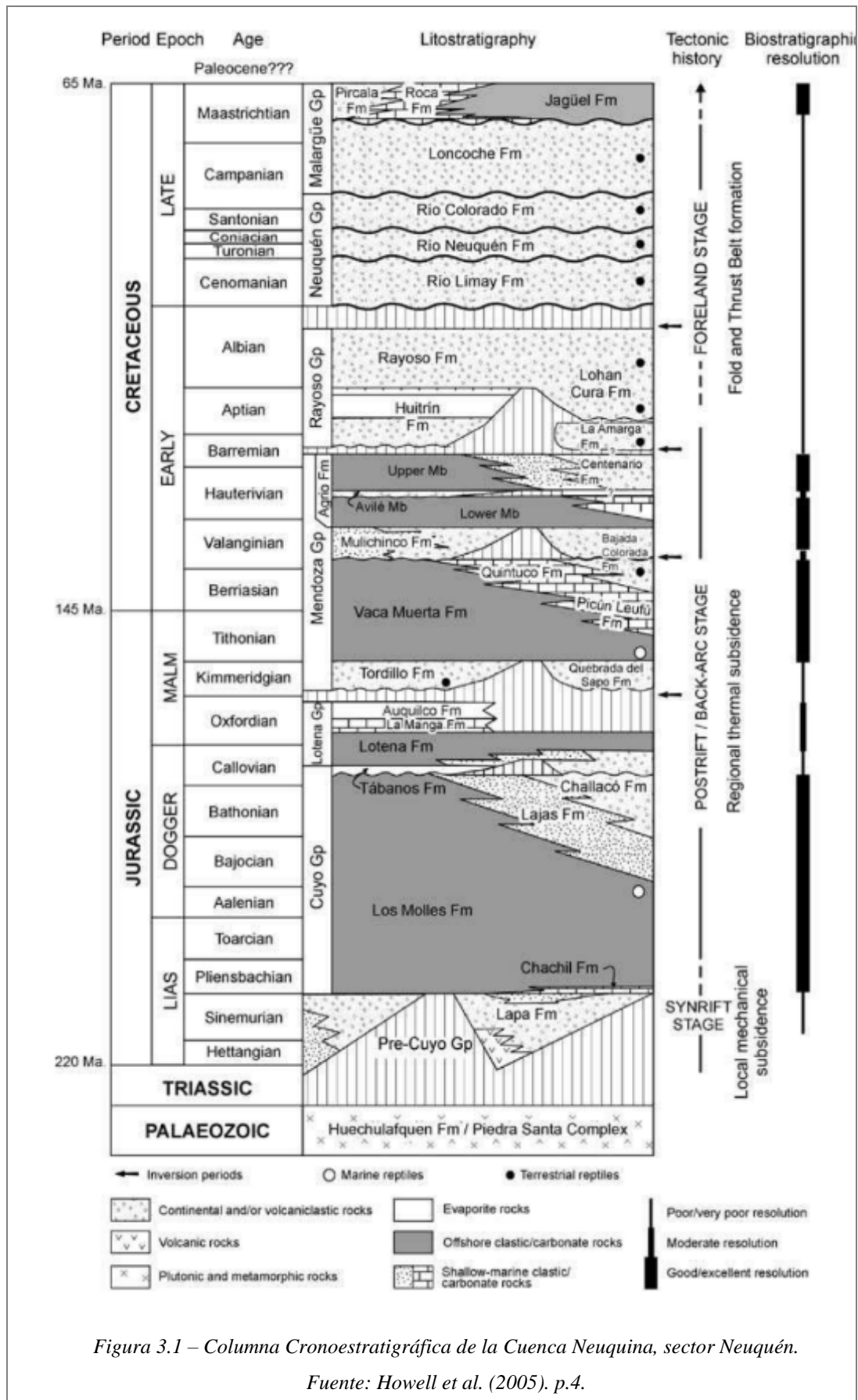
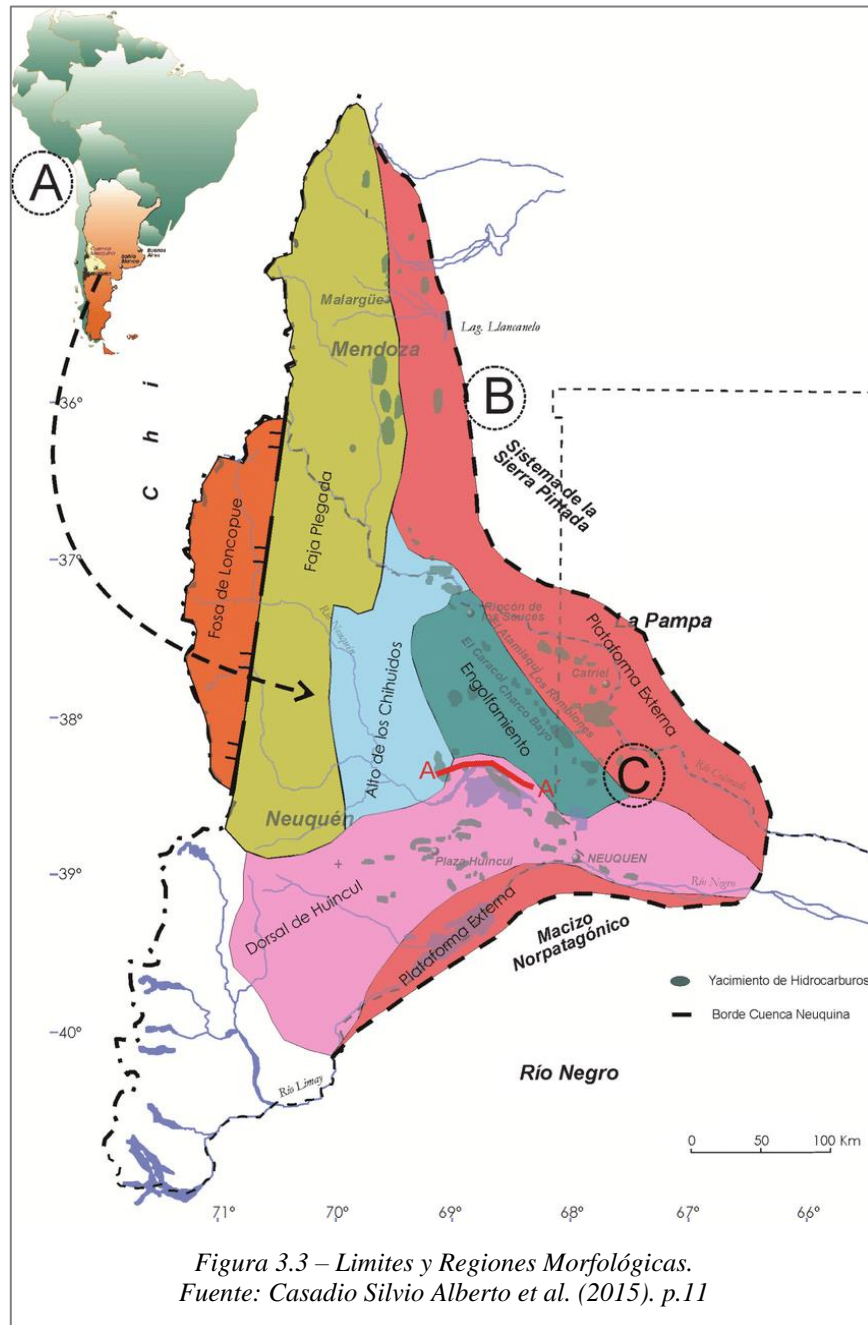


Figura 3.1 – Columna Cronoestratigráfica de la Cuenca Neuquina, sector Neuquén.

Fuente: Howell et al. (2005). p.4.



3.3 Formaciones productivas

La cuenca Neuquina presenta varias unidades litológicas con contenidos y calidad de materia orgánica variables, capaces de generar hidrocarburos tanto líquidos como gaseosos. La mayoría de estas unidades son de origen marino y datan del Jurásico y Cretácico.

La primera ingesión marina significativa, relacionada con rocas del Jurásico temprano, corresponde a la Fm. Los Molles (Grupo Cuyo Inferior). La segunda ingesión importante ocurrió en el Jurásico tardío, depositando rocas en ambientes anóxicos, específicamente margas bituminosas de la Fm. Vaca Muerta. Esta unidad, compuesta por lutitas calcáreas negras con alto contenido de carbono orgánico total (%COT), es la principal roca generadora de la cuenca debido a su calidad, espesor y extensión^{III}.

Finalmente, durante el Cretácico temprano, se produjo una nueva ingesión marina representada por la Fm. Agrio con una distribución más limitada.

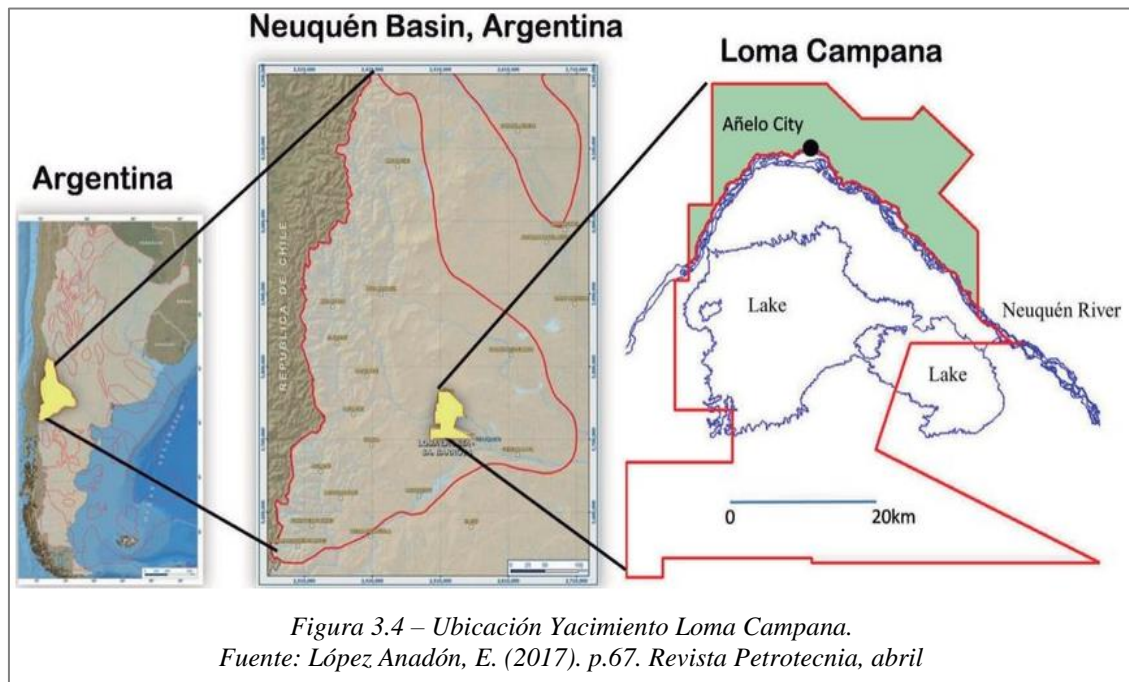
Como se mencionó al inicio del capítulo, el foco serán las formaciones Quintuco y Vaca Muerta que forman parte del análisis del caso de estudio.

3.3.1 Formación Quintuco

La Fm. Quintuco es uno de los reservorios más productivos de la cuenca Neuquina y se encuentra bajo la influencia de un ambiente marino restringido. Corresponde al grupo Mendoza Inferior, dentro de la zona de engolfamiento Neuquino.

La misma, presenta una alta porosidad y baja permeabilidad con valores promedio del 6%, en un rango entre 3-7%, para la porosidad y de 0,01 a 10 miliDarcy (mD) para la permeabilidad según un estudio de testigos corona realizado en locaciones del yacimiento Loma La Lata, alcanzando espesores de la formación de 750 metros con profundidades entre los 1900 y 2600 metros^{IV}.

La Fm. Quintuco está genéticamente relacionada con la Fm. Vaca Muerta (Figura 3.1), ya que ambas son parte de un sistema deposicional común entre los períodos Tithoniano-Valanginiano. Esta formación desempeña un papel fundamental como reservorio debido a su composición carbonática y su capacidad de almacenar hidrocarburos.



Otro estudio de caracterización geológica desarrollado en el yacimiento Loma Campana^{III} (Figura 3.4) permite clasificar a la Fm. Quintuco en tres miembros principales:

- ❖ *Miembro Superior:* Compuesto principalmente por margas, lutitas y calizas, con una notable presencia de fangolitas calcáreas limosas que gradan a *grainstones* y *packstones oolíticos con estilolitas subhorizontales*, indicativas de un alto contenido de materia orgánica. Este miembro se depositó en un ambiente marino más profundo, con condiciones de anoxia persistente que favorecieron la acumulación y preservación de materia orgánica. Estas condiciones son similares a las que prevalecieron durante la deposición de la Fm. Vaca Muerta. Las estructuras sedimentarias incluyen laminaciones finas y onduladas, así como capas ricas en materia orgánica, reflejando una deposición en condiciones de baja energía y anoxia.
- ❖ *Miembro Medio:* se caracteriza por una gran heterogeneidad litológica, con intercalaciones de lutitas, margas y calizas bioclásticas. Predominan niveles de *grainstones* y *packstones oolíticos y oolítico-esqueletico* con fósiles marinos como amonoideos y bivalvos asociados a barras carbonáticas de alta energía. Este miembro refleja un ambiente de transición entre un entorno marino somero y uno más profundo. La variabilidad litológica se debe a variaciones en la energía del ambiente deposicional y en las condiciones de oxigenación. Las estructuras sedimentarias presentes incluyen

laminaciones paralelas, cruzadas y onduladas indicando variaciones en las corrientes marinas y en los procesos de deposición de sedimentos.

- ❖ *Miembro Inferior*: ubicado sobre el tope de la Fm. Vaca Muerta, se caracteriza por un alto contenido de carbonatos en su composición y litología, incluyendo calizas y dolomitas, acompañadas de margas y lutitas. Este miembro presenta una proporción mayor de materiales calcáreos en comparación con los otros miembros. La deposición de este miembro tuvo lugar en un ambiente marino somero, caracterizado por aguas tranquilas y una alta tasa de sedimentación de carbonatos. Las condiciones de anoxia ocasional permitieron la preservación de materia orgánica en algunas capas. Además, se observan estructuras sedimentarias como laminaciones horizontales y bioturbación, las cuales indican la actividad de organismos bentónicos y la interacción con el agua de mar. Alcanza un espesor promedio de 120 metros y su sistema productivo se da principalmente por fracturas naturales y se encuentra sobre presionado.

Además, este estudio permitió identificar el mecanismo de entrapamiento que se asocia a un sistema complejo de fracturas o fisuras naturales sobrepresionadas a través de los registros sísmicos obtenidos. Estas fracturas pueden ser tanto tectónicas como diagenéticas dándole a esta formación propiedades petrofísicas características que la diferencian de la Fm. Vaca Muerta como conductividad, porosidad y permeabilidad mencionadas anteriormente.

Las fracturas del tipo tectónicas se deben a esfuerzos compresivos que han afectado la cuenca Neuquina a lo largo de su historia geológica. Estas fracturas presentan una orientación predominantemente norte-sur y este-oeste, alineadas con los ejes de esfuerzo tectónico regional. La distribución de estas fracturas es heterogénea, variando en densidad y tamaño a lo largo de la formación. En algunas áreas, las fracturas son más densas y extensas, mientras que en otras son más esporádicas y localizadas.

Además, las fracturas por procesos durante la diagénesis ocurren durante la deposición de los sedimentos. En la Fm. Quintuco, estos procesos se debieron a la deshidratación de minerales arcillosos producto de la reducción de volumen que acompaña a este proceso y a la cristalización de minerales como calcita y cuarzo dentro de las fracturas donde estos pueden sellar parcialmente las fracturas, afectando su capacidad de transmitir fluidos.

Además, la conductividad de estas fracturas depende de su apertura y conectividad. Las fracturas bien conectadas y abiertas presentan una mayor conductividad, permitiendo un flujo más eficiente. La interacción entre las fracturas y la matriz de roca es crucial; la

conductividad es mayor en zonas donde las fracturas están bien conectadas con la matriz porosa de la roca. Durante la perforación de un pozo, se da la posibilidad de reactivar fracturas aisladas generando variaciones de presión que pueden generar inconvenientes cuando se atraviesan varias formaciones.

Las fracturas pueden contener minerales de relleno como calcita, cuarzo y pirita que pueden afectar la capacidad de las fracturas para transmitir fluidos al sellar parcialmente las mismas, reduciendo su conductividad y permeabilidad.

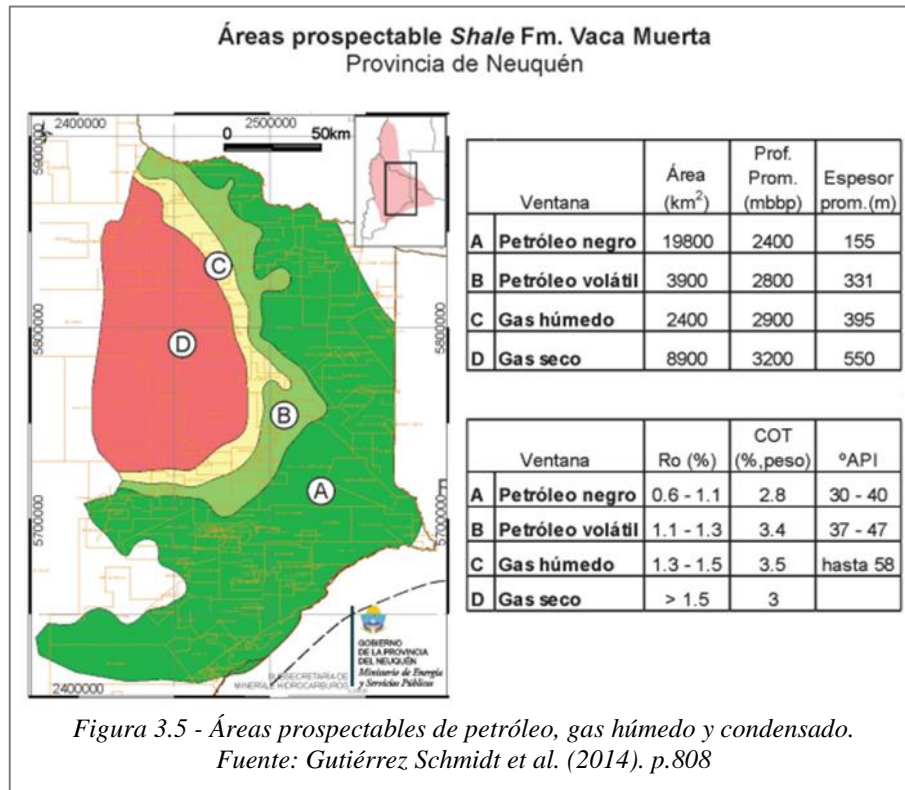
3.3.2 Formación Vaca Muerta

La Fm. Vaca Muerta, perteneciente al Grupo Mendoza Inferior, se encuentra ampliamente distribuida dentro de la cuenca Neuquina. Sus afloramientos se extienden desde la región del Carrín Curá al este, Chacaico al oeste, y continúan hacia el norte en la localidad tipo de la sierra de la Vaca Muerta, llegando hasta el sur de la provincia de Mendoza, en el área de Sierra de Reyes.

Los depósitos de esta formación consisten en pelitas negras con un alto contenido de materia orgánica, fangolitas, margas oscuras y calizas. En su sección inferior, se encuentran numerosos nódulos calcáreos que contienen amonoides y reptiles marinos. Además, entre las pelitas oscuras, se intercalan delgados niveles piroclásticos de caída.

Dentro de la provincia de Neuquén, el área que alcanza la ventana de generación de petróleo negro es de 19800 km² con un espesor promedio de 155 m y el área que alcanza la ventana de generación de petróleo volátil es de 3900 km² con un espesor promedio de 331 m (Figura 3.5).

Para el gas húmedo/condensado el área es de 2400 km² y 395 m de espesor promedio y para el gas seco el área es de 8900 km² y 550 m de espesor promedio^V.



Se encuentra en concordancia sobre la Fm. Tordillo y gradualmente transiciona hacia los carbonatos de las formaciones Quintuco y Picún Leufú en el centro-sur de Neuquén. Esta formación se destacó por su alto contenido orgánico o carbono orgánico total (COT). Los valores de COT de la unidad varían a lo largo de toda la cuenca, oscilando entre 1% y 10%, con una tendencia a aumentar hacia la base (Figura 3.6). En la Fm. Vaca Muerta predomina el querógeno de tipo I/II, que puede cambiar al tipo IIS al sur de la Dorsal de Huincul. La madurez térmica, medida en términos de reflectancia de la vitrinita, varía entre 0,33% y 2,97% (Figura 3.7)^V.

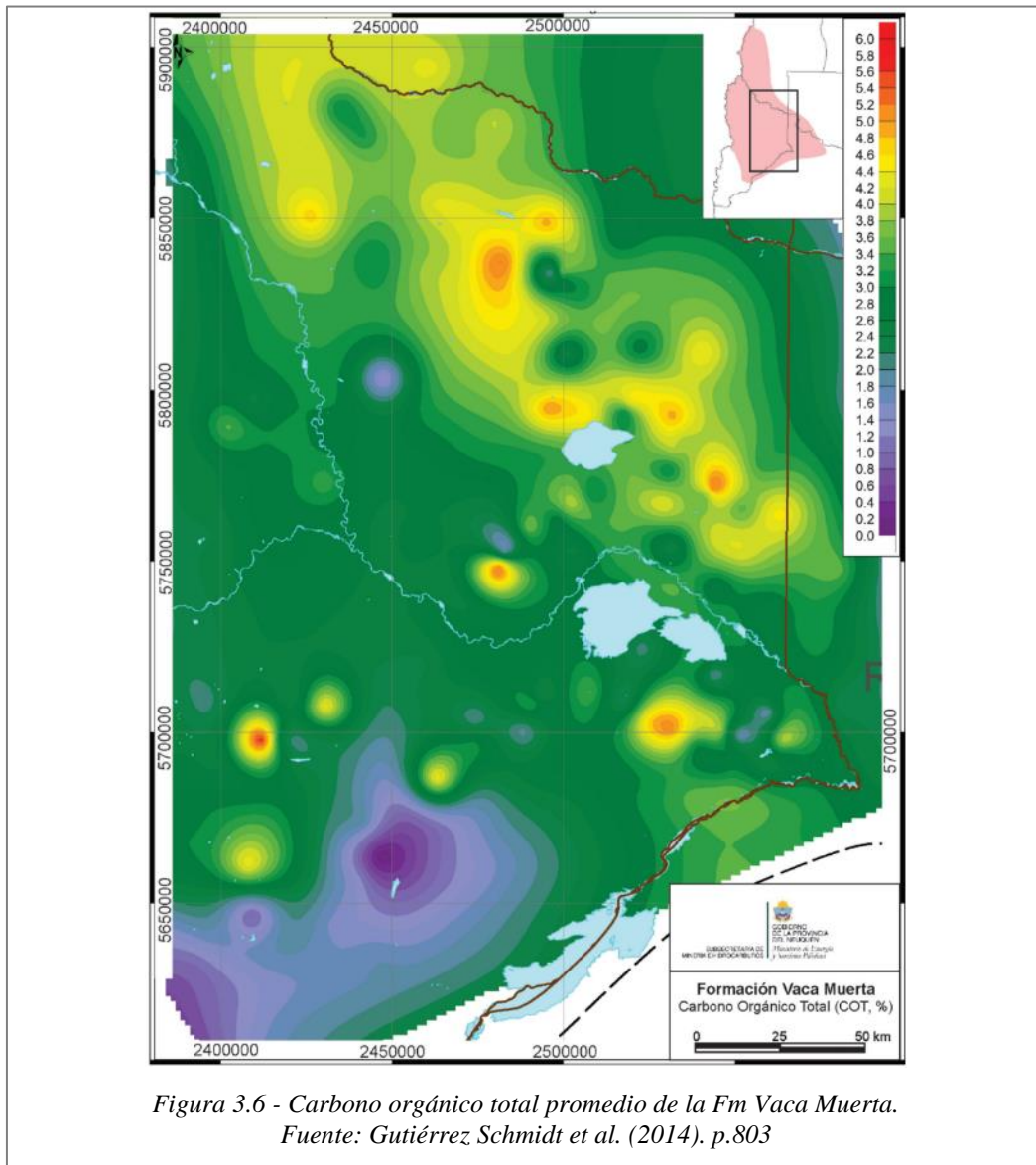


Figura 3.6 - Carbono orgánico total promedio de la Fm Vaca Muerta.
Fuente: Gutiérrez Schmidt et al. (2014). p.803

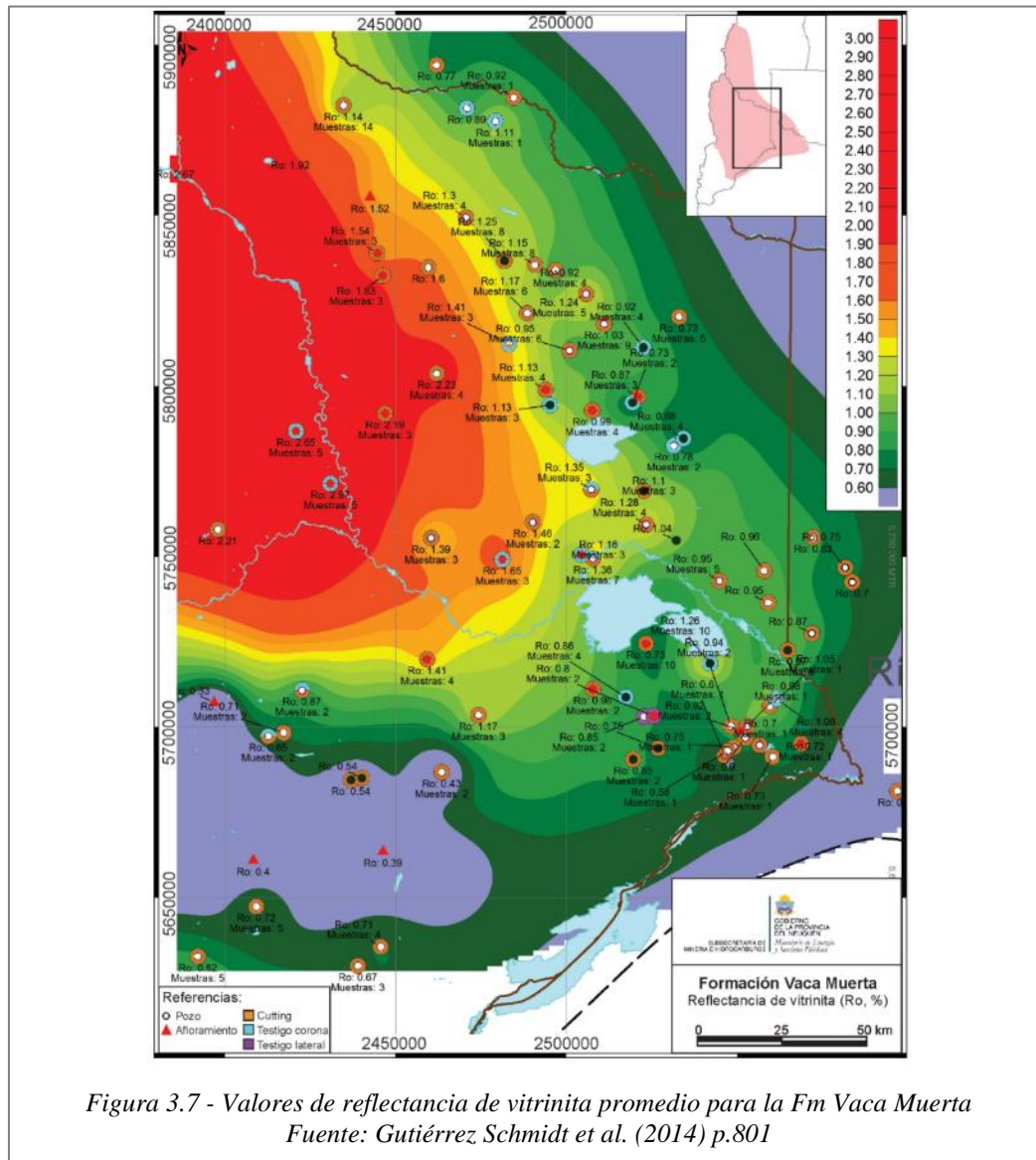


Figura 3.7 - Valores de reflectancia de vitrinita promedio para la Fm Vaca Muerta
Fuente: Gutiérrez Schmidt et al. (2014) p.801

En cuanto a las propiedades petrofísicas, en promedio la porosidad absoluta de la formación Vaca Muerta varía generalmente entre el 4% y el 15%, mientras que la porosidad efectiva, que es la fracción de porosidad que permite el flujo de fluidos, es menor debido a la presencia de poros cerrados. La porosidad en esta formación está dominada por micro y nano-porosidad, característica típica de los *shales*. La permeabilidad absoluta es muy baja, en el rango de nanoDarcy (nD) a microDarcy (μ D), algo habitual en formaciones de tipo *shale*. Sin embargo, la permeabilidad efectiva mejora significativamente en presencia de fracturas naturales y/o inducidas, ya que contribuyen de manera sustancial al flujo de hidrocarburos^V.

3.4 Referencias del texto

^I Howell et al. (2005).

^{II} Casadio Silvio Alberto et al. (2015)

^{III} López Anadón, E. (2017).

^{IV} Grosso et al. (2022).

^V Gutiérrez Schmidt et al. (2014).

4. Técnica MPD

Uno de los objetivos durante la perforación es mantener una presión de fondo constante y buscar la mejor forma de prevenir y controlar los influjos que pueden llegar a superficie, además de reducir los tiempos no productivos o NPT (*Non-Productive Time*). Para ello se implementan técnicas de perforación como es el caso de MPD, o *Managed Pressure Drilling* por sus siglas en inglés.

La Asociación Internacional de Contratistas de Perforación o IADC (*International Association of Drilling Contractors*) define la técnica MPD como un “Proceso de perforación adaptativo usado para controlar en forma precisa el perfil anular de presión a lo largo del pozo abierto mientras se perfora el pozo” (López Anadón et al. (2015). Revista Petrotecnia – La perforación, abril).

Además, esta técnica permite operar en diferentes rangos de presión de perforación que incluyen otras técnicas como *Under Balance Drilling* (UBD), *Near Balance Drilling* (NBD) y *Over Balance Drilling* (OBD).

La perforación bajo balance o UBD consiste en trabajar con una presión de lodo menor a la presión de poro permitiendo que los fluidos de formación ingresen al espacio anular generando posibles problemas de influjos.

En cambio, la perforación NBD busca trabajar lo más cercano posible a la presión de poro sin que ingrese fluido de la formación buscando el equilibrio entre ambas presiones.

Por último, la perforación sobre balance u OBD permite trabajar con presiones superiores a la presión de poro evitando el ingreso de fluidos de formación, teniendo en cuenta que, a mayores presiones, pueden producirse daños a las formaciones.

4.1 Objetivos

La técnica MPD tiene como objetivo¹:

- ❖ Mantener un perfil de presiones que asegure la estabilidad del pozo.
- ❖ Mantener la presión de fondo (BHP) controlada durante la perforación.
- ❖ Mitigar pérdidas de fluidos de perforación.
- ❖ Evitar o disminuir efecto de influjos de fluidos de la formación

- ❖ Controlar eficientemente los puntos de colapso de formación
- ❖ Asistir en ahogo de pozo.
- ❖ Colaborar en operación de corrida de casing con presión.

4.2 Beneficios del MPD

Los beneficios del MPD son:

- ❖ Permitir la perforación en ventanas operativas estrechas como ocurre en la cuenca neuquina, principalmente en el pase de la formación Quintuco y Vaca muerta.
- ❖ Reducir los daños a la formación, lo cual es un punto clave que asegura la producción futura del pozo y la viabilidad económica del proyecto.
- ❖ Mejorar la tasa de penetración (ROP), mejorando la eficiencia durante la perforación y reduciendo tiempos no productivos o NPT.
- ❖ Reducir las pérdidas de circulación producto del daño a las formaciones.
- ❖ Brindar asistencia en ahogo de pozo para reducir los *kicks* (influjo incontrolado de la formación) que lleven a un evento de control de pozo.
- ❖ Reducir los riesgos operativos aumentando la seguridad, estabilidad y el control del pozo.
- ❖ Minimizar los costos asociados a fluidos de perforación, los cuales utilizan aditivos costosos que alteran las propiedades del lodo.
- ❖ Permitir el control durante el viaje de herramientas y tuberías compensando los efectos de *surge* (aumento de presión en el fondo de pozo producto del descenso repentino de la tubería de perforación) y *swap* (succión dentro del pozo producto del ascenso de la tubería de perforación reduciendo la presión en el fondo de pozo) generando daño a la formación e inestabilidad del pozo respectivamente.
- ❖ Cuando se generan problemas de influjos, la técnica permite compensar la disminución de densidad con la contrapresión aplicada, ahorrando costos en procesos y aditivos que modifican la reología del lodo. Esto también permite ahorrar tiempos, ya que al trabajar con lodos livianos se mejora la velocidad de giro del trépano y disminuye el contenido de sólidos debido a que no se utilizan aditivos, produciendo menos desgaste de la herramienta.

4.3 Condiciones operativas

Para comenzar una operación de perforación, es necesario obtener información previa o descripciones de los yacimientos, que permita modelar la estructura en subsuelo y predecir las condiciones que se tendrán. El objetivo es analizar la mejor forma de enfrentar los problemas ajustándose a las condiciones actuales del pozo. Para esto es necesario definir los parámetros de la operación, las condiciones y reología que debe tener el fluido, entre otros.

4.4 Parámetros de la operación

Para realizar el estudio de la zona donde se realizará el proyecto de perforación, se debe contar con información para poder estimar las condiciones de perforación:

- ❖ Detalles de la sarta de perforación y programa direccional.
- ❖ Propiedades del lodo.
- ❖ Geología de la zona a perforar.
- ❖ Estructura del pozo y formaciones a perforar.
- ❖ Perfil de temperaturas.
- ❖ Gradientes de presión poral y de fractura.
- ❖ Profundidades de aporte según el estudio del yacimiento.

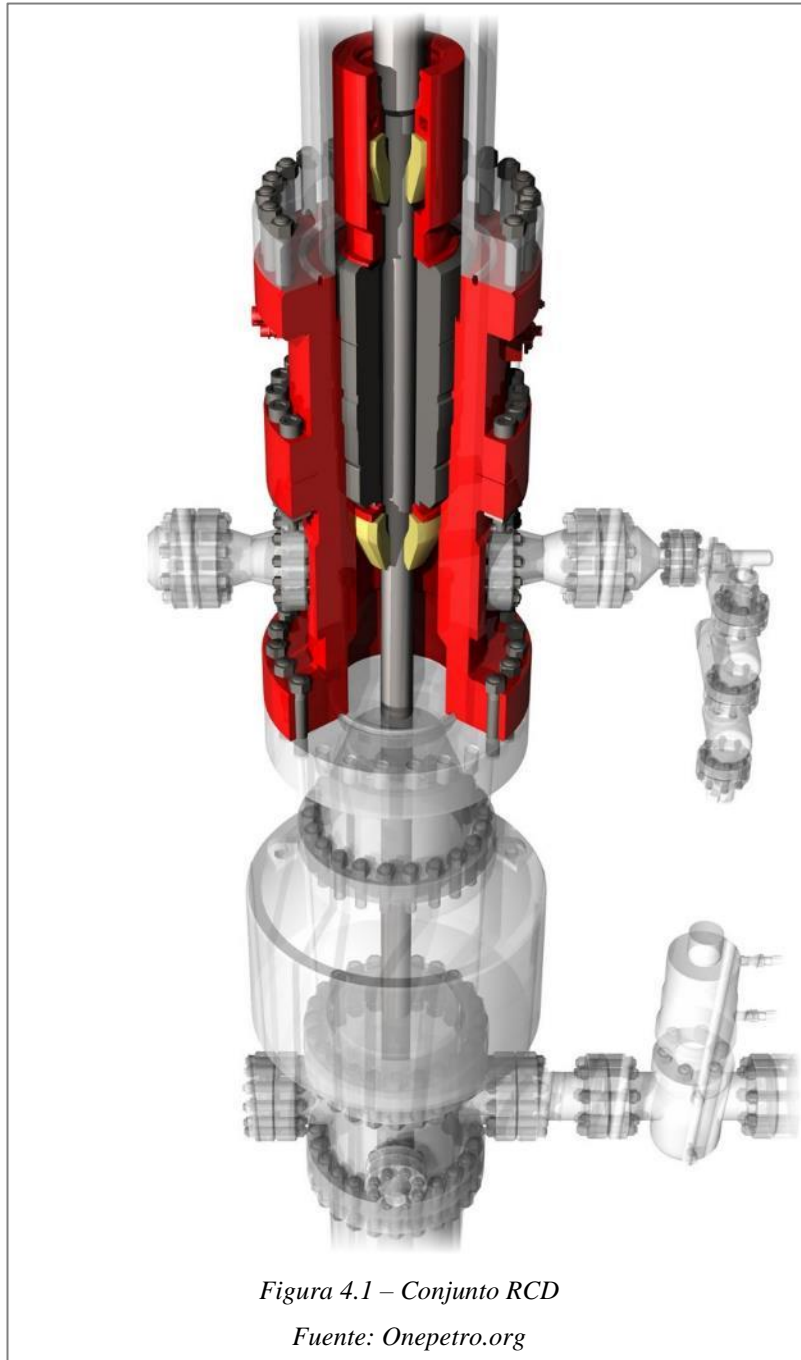
4.5 Equipamiento

El equipamiento de superficie para la técnica MPD se compone de 5 equipos principales¹, que permiten controlar y modificar las condiciones operativas.

4.5.1 Dispositivo de circulación rotativo

También denominado RCD por sus siglas en inglés (*Rotating Circulation Device*), permite desviar el fluido proveniente del pozo por la línea primaria hacia el *Choke Manifold*. Ejerce un sello efectivo entre el espacio anular y la atmosfera utilizando elastómeros, además de permitir la rotación de la sarta de perforación. Los elastómeros permiten el sello entre el interior de las paredes de la RCD y el diámetro externo de las tuberías¹.

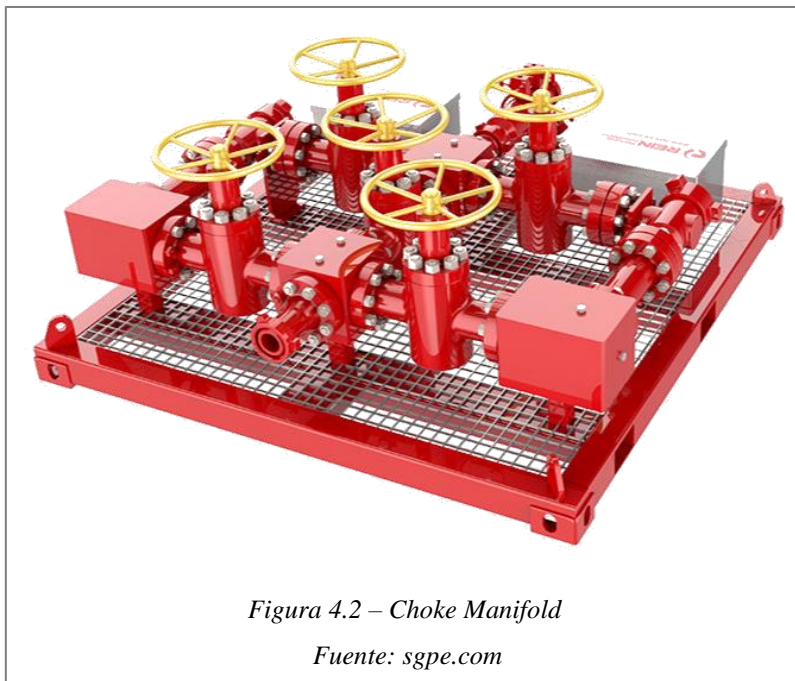
Este equipo no reemplaza el sistema de seguridad (BOP) del equipo perforador (Figura 4.1).



4.5.2 Conjunto de estranguladores

Comúnmente conocido como *Choke Manifold*, genera una restricción en el flujo mediante el conjunto de estranguladores que permite regular la presión en boca de pozo para mantener el perfil de presiones deseado tanto en condiciones dinámicas como estáticas¹.

Los estranguladores al producir una restricción al flujo permiten controlar el perfil de presiones dentro del pozo. existen manuales, automático o semi automático. Es un conjunto adicional al *Manifold* del equipo perforador (Figura 4.2).



Un *choke manifold* se compone de:

- ❖ Estranguladores o *chokes* que regulan la presión ajustando el paso del flujo.
- ❖ Válvulas que permiten el desvío por distintos circuitos o derivaciones.
- ❖ Manómetros para medir la presión en diferentes puntos de control y mantener un límite de seguridad.

Su funcionamiento se basa en ciertos principios físicos como, por ejemplo:

- ❖ Principio de Bernoulli: cada *choke* funciona de igual manera, teniendo en cuenta los parámetros del fluido como presión, energía y velocidad a la entrada y salida de cada uno. Se restringe el área de paso por el *choke*, provocando una caída de presión y un aumento en la velocidad del fluido.

$$\left(P + \frac{1}{2}\rho v^2\right)_{entrada} = \left(P + \frac{1}{2}\rho v^2\right)_{salida}$$

Para evitar la turbulencia del fluido del pozo se disminuye la presión aguas abajo del *choke manifold*, permitiendo el control de la presión en el pozo.

- ❖ Ley de continuidad: define que el caudal de fluido es constante en un sistema cerrado. Cuando se reduce el área efectiva por donde fluye el fluido en el choke, aumenta su velocidad y, como resultado, se reduce la presión:

$$Q = (A \cdot v)_{entrada} = (A \cdot v)_{salida} = cte$$

Donde: - A: área de las secciones de flujo antes y después del choke

- v: velocidad del fluido.

- ❖ Conservación de la energía: La energía total del sistema se conserva, pero existe una conversión de energía de la presión del fluido a energía cinética que luego se disipa en forma de calor por la fricción dentro de los estranguladores.

4.5.3 Medidor de flujo másico Coriolis

Este equipo permite obtener lecturas de flujo másico, temperatura y densidad e indirectamente caudal volumétrico¹.

Para describir el principio de funcionamiento del este equipo, es necesario definir algunos conceptos previos relacionados con el mismo:

Flujo másico: se define como la cantidad de masa que atraviesa una determinada sección de una tubería o superficie en un determinado tiempo:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v ; \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Donde: - ρ : densidad del fluido.

- A: área de la sección transversal.

- v: velocidad.

Por otro lado, el caudal volumétrico se define como el volumen de un fluido que atraviesa una determinada sección en un cierto tiempo.

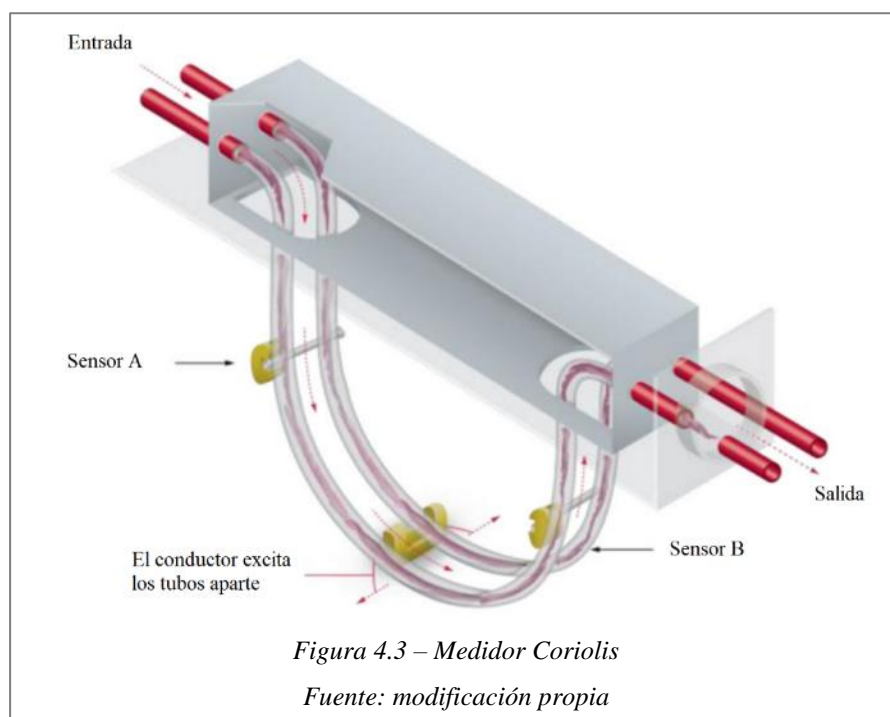
$$Q = A \cdot v ; \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

(Nota: si bien para el desarrollo del caso de estudio no se utilizan estas fórmulas y se asumen valores hipotéticos de caudal, en la realidad se utilizan las ecuaciones mencionadas para el cálculo del caudal volumétrico).

El medidor funciona en base al efecto Coriolis, donde un objeto en movimiento lineal en un sistema de referencia no inercial (como la Tierra), parecerá desviarse de su trayectoria original debido a que está afectado por la rotación de la tierra.

Este desvío es hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur. Este efecto causa una distorsión en la vibración de los tubos curvos del medidor.

El fluido pasa a través de dos tubos paralelos que oscilan generando retrasos de tiempo que se registran aguas arriba y aguas abajo de los tubos, interpretándose como caudal másico. Además, la frecuencia resonante es inversamente proporcional a la densidad del fluido del medio que fluye, es por este que se coloca un sistema de accionamiento electromagnético que hace vibrar los tubos a su frecuencia resonante acercándose y alejándose unos a otros, provocado por la rigidez del tubo y su masa. Los sensores detectan estas posiciones aguas arriba y aguas abajo de los tubos, producto de las vibraciones, por un fenómeno llamado efecto Hall (Figura 4.3).



Las lecturas permiten definir el caudal volumétrico que circula. Cuando no fluye fluido, los tubos solamente se acercan y se alejan en paralelo donde las salidas de los sensores aguas arriba y abajo se encuentran en fase. Pero a medida que el fluido empieza a circular, los tubos comienzan a moverse afectados por el efecto Coriolis donde se crea una ligera torsión en el tubo de flujo, esto provoca un cambio de fase entre los sensores aguas arriba y aguas abajo.

Estas lecturas de fase se traducen en tiempo de retardo convirtiéndolas en lecturas de caudal másico.

$$\dot{m} \propto \Delta t$$

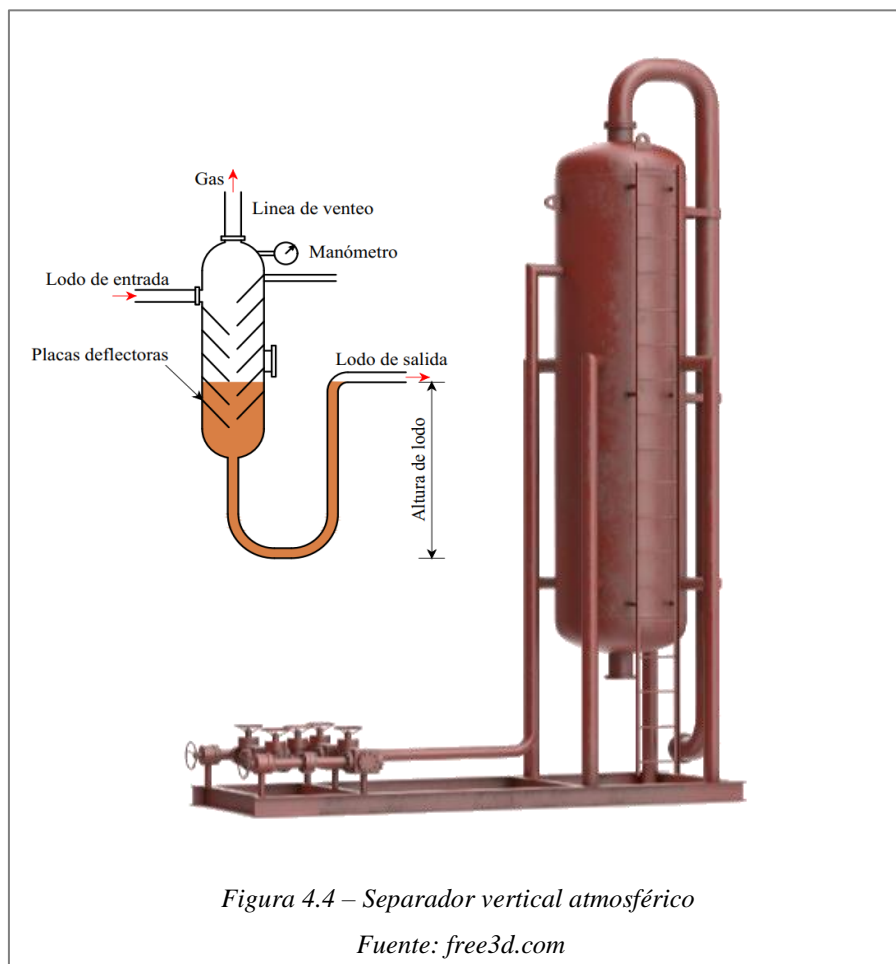
$$\rho \propto \frac{1}{f^2}$$

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

(Nota: si bien para el desarrollo del caso de estudio se asumen valores hipotéticos de caudal, en la realidad se utilizan las relaciones mencionadas anteriormente para el cálculo del caudal volumétrico).

4.5.4 Separador vertical atmosférico

Este equipo debe ser capaz de separar las fases del fluido provenientes del pozo. La mezcla de fluido puede contener sólidos, líquidos y gases, donde el gas se ventea a una línea de quema y el fluido vuelve al sistema activo de lodo de forma controlada con el mínimo de fase gaseosa, incorporándose al circuito de control de sólidos. Se complementa al separador del equipo perforador (Figura 4.4)¹.



Estos dispositivos operan aprovechando la diferencia de densidades entre las fases presentes. La mezcla ingresa y se encuentra con una serie de deflectores cuya función es la de crear una fuerza centrífuga que acelera la separación. El gas, al ser más liviano, asciende y es extraído por la parte superior mientras que la fase líquida es más densa, se acumula y se extrae por la parte inferior del separador.

Dentro del separador se colocan dispositivos de control como sensores de nivel hidráulico en la parte superior e inferior del mismo. Estos sensores registran las variaciones de presión y ante cualquier aumento la misma, se abre una válvula de alivio para mantener presión de diseño que mantiene los niveles de fluido lo más estable posible.

4.5.5 Sistema de ignición para quema de gas

Se instala una torre a la salida de la línea de venteo de gas, luego de los separadores. Funciona con un interruptor o chispero conectado a una fuente eléctrica por donde circula una pequeña cantidad de gas propano. El interruptor eléctrico genera una chispa que enciende una flama que deja activo el piloto, ubicado a la salida del extremo de venteo. El gas proveniente del pozo pasa por la línea de quema hacia el piloto, quemándose por completo en la torre de quema a la salida de la línea, ubicada a una distancia segura para toda la operación (Figura 4.5).



Figura 4.5 – Torre de quema

Fuente: stock.adobe.com

4.6 Diagrama de conexión

Los equipos se vinculan a través de tuberías de alta y de baja presión mencionadas anteriormente. Todos estos equipos tienen una secuencia de conexión (Figura 4.7)^{II}.

4.6.1 Circuito cerrado de circulación a través del esquema MPD

El lodo, una vez succionado por las bombas es desplazado hacia el cuello de cisne vinculado al top drive haciendo el ingreso al interior de la tubería de perforación.

El lodo sale a través de las boquillas del trepano y comienza a ascender por el espacio anular acarreando los recortes y partículas en suspensión hasta llegar a la RCD, de allí a la línea de alta presión hasta el *choke manifold* donde se genera una pérdida de carga que permite construir el perfil de presiones dentro del espacio anular.

El flujo continúa su recorrido por la línea de baja hacia el Coriolis y el separador atmosférico. El primero detecta densidad, flujo másico y temperatura y el segundo separa el lodo en dos fases (líquida y gaseosa). La fase líquida es derivada hacia el sistema de control de sólidos donde luego del tratamiento ingresa al sistema activo de piletas, la fase gaseosa es expulsada por la parte superior del separador donde se produce en su descarga la ignición del gas gracias al sistema de ignición de gas (Figura 4.7).

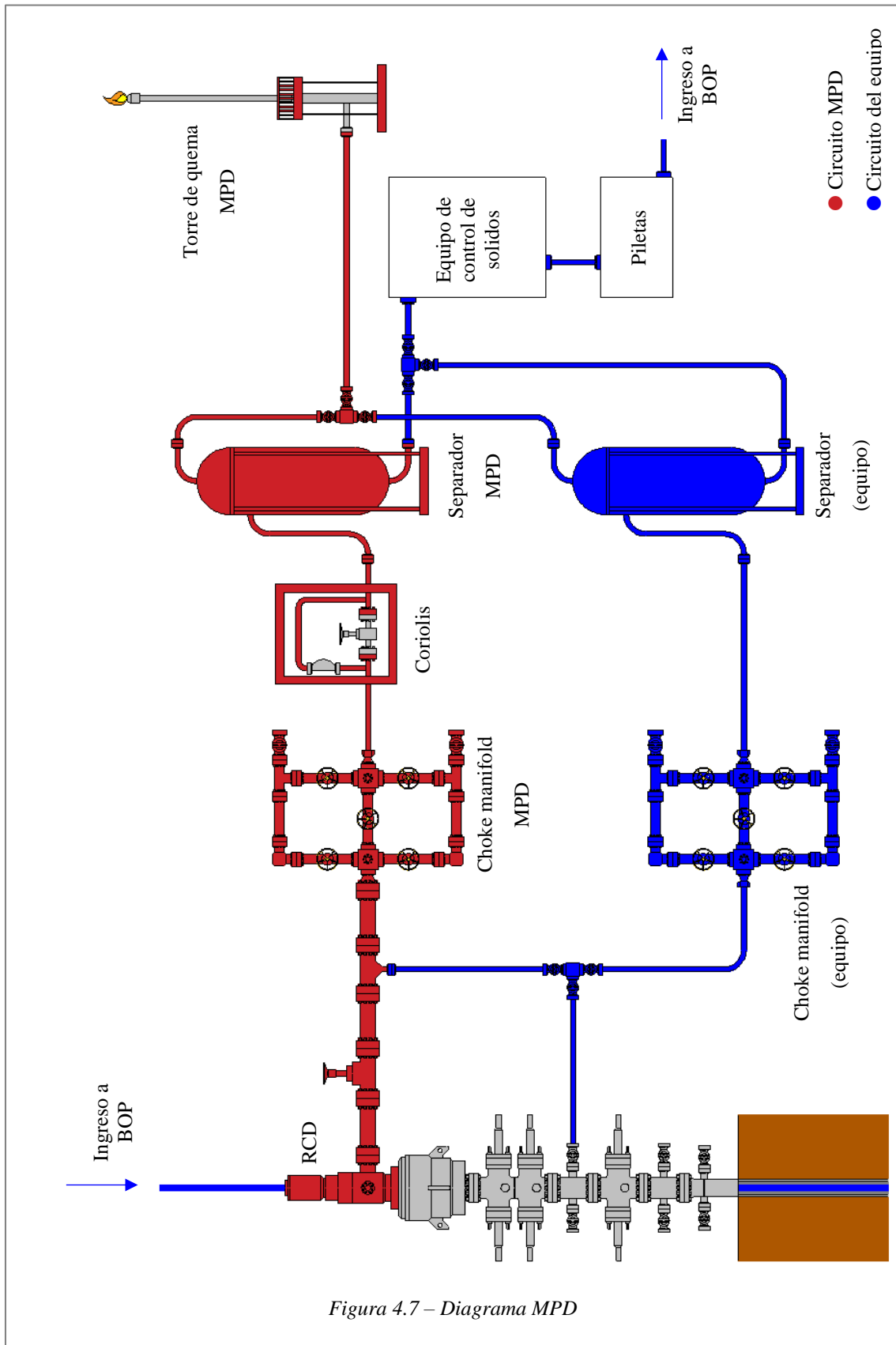
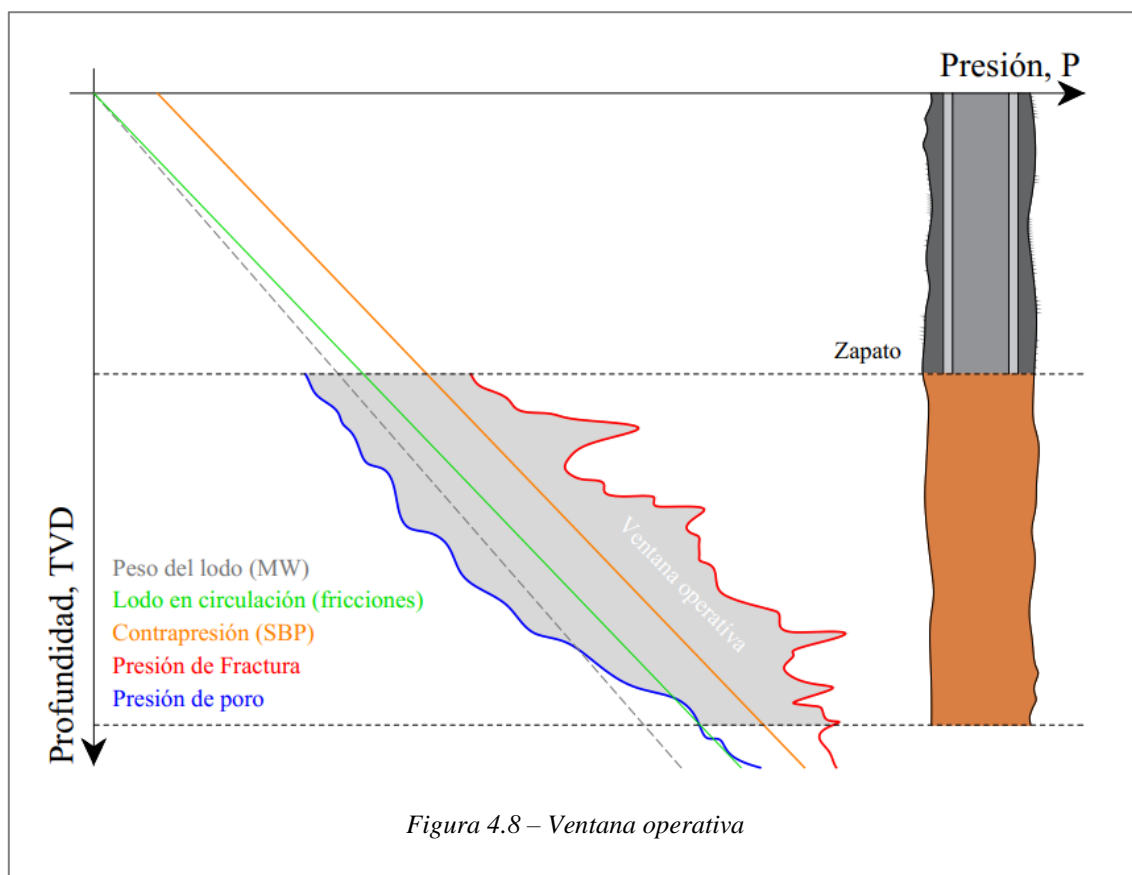


Figura 4.7 – Diagrama MPD

4.7 Conceptos básicos de perforación

4.7.1 Ventana operativa

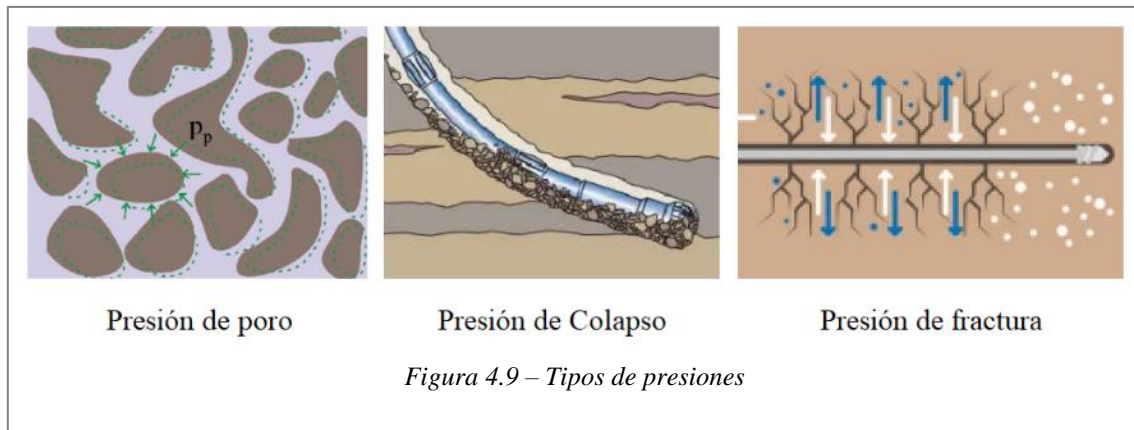
Se define como un perfil de presiones en función de la profundidad estableciendo los límites entre la presión poral, de colapso y de fractura que establecen los márgenes de la estrategia a implementar (Figura 4.8)¹.



Las presiones involucradas son:

- ❖ Presión de poro: se define como la presión de los fluidos que se encuentran contenidos en los espacios porales de las formaciones. Cuando se interviene una formación con la perforación, el fluido contenido en los poros puede ingresar al pozo si la presión del lodo se encuentra por debajo de la presión poral. Este valor define el límite inferior de la ventana operativa, siempre y cuando la presión de colapso sea mayor (Figura 4.9).
- ❖ Presión de colapso: define la presión mínima debajo de la cual se producen desmoronamientos de la formación hacia el pozo abierto por falta de presión hidrostática (Figura 4.9).

- ❖ **Presión de fractura:** se define como la presión límite que puede soportar la formación sin sufrir una deformación permanente, si se supera este valor, se supera el límite elástico de la roca provocando fisuras o fracturas que llevan a una pérdida de circulación (parcial o total). Este valor define el límite superior de la ventana operativa (Figura 4.9).



4.7.2 Desafíos de la perforación actual

- ❖ **Pérdidas de circulación:** este concepto se mencionó durante el desarrollo de los objetivos y beneficios de la técnica MPD (Sección 5.1 y 5.2). Se genera cuando la presión hidrostática o dinámica del lodo es superior a la máxima presión de formación admisible. Esto puede suceder en zonas de alta permeabilidad y porosidad con fracturas naturales o cavernas, donde se observa una disminución o nulidad del caudal de retorno.
- ❖ **Influjos de la formación:** se define como un evento generado por el ingreso de fluidos de la formación hacia el espacio anular a causa de una deficiencia de presión hidrostática o hidrodinámica.
- ❖ **Aprisionamientos de herramientas:** se genera cuando la sarta de perforación queda atrapada debido a:
 - ◆ Diferencias entre la presión poral y la presión generada por el lodo en el espacio anular.
 - ◆ Una limpieza deficiente del espacio anular.
- ❖ **Lodos inadecuados** que generan problemas de lubricación y aumentan la fricción entre la herramienta y la pared del pozo.

- ◆ Un diseño inadecuado de la herramienta que puede quedar atascada debido a su geometría o a la presencia de rebordes.
 - ◆ Falta de ajuste de las conexiones entre los equipos de la sarta de perforación.
 - ◆ Altas caídas de presión provocando el colapso de las paredes del pozo o la formación de puentes de material, atrapando la herramienta.
 - ◆ Presencia de gas donde se generan burbujas que obstruyen el flujo del lodo y dificultan la extracción de la herramienta.
- ❖ Efecto *balloning*: También conocido como fenómeno de respiración del pozo, se genera por la apertura y cierre de fracturas en contacto con el pozo. Suele producirse en condiciones de alta ECD donde la presión se encuentra por debajo del límite elástico de la formación, generando en algunos casos pérdidas de circulación donde luego el fluido perdido intenta volver hacia el pozo como si fuera un influjo. Este efecto no es un influjo como tal, debido a que la presión se mantiene por encima de la presión de poro, pero como se manifiesta de manera similar se suele confundir.
 - ❖ *Inestabilidad del pozo*: se produce la desestabilización de las paredes de pozo generado por cambio de presión o aspectos geológicas de las formaciones.
 - ❖ *Flujo cruzado*: este fenómeno, tema central que forma parte del análisis de este proyecto, ocurre cuando existen diferencias de presión significativas entre dos formaciones concurrentes, una formación depletada seguida de una formación sobrepresionada o viceversa. Durante la perforación, esto genera una zona de aporte de la formación sobrepresionada y una zona de pérdida en la formación concurrente que genera desbalance de la columna hidrostática.

4.7.3 Densidad equivalente de circulación y densidad de lodo equivalente

El lodo es la primera barrera de control de pozo. Se define^{III}:

- ❖ Densidad de lodo: magnitud escalar que relaciona la masa contenida en un determinado volumen de una sustancia.
- ❖ Densidad equivalente de circulación o ECD (*Equivalent Circulating Density*): es la densidad equivalente generada por la presión hidrostática, las fricciones en el espacio anular, fricción en superficie y la contrapresión como consecuencia del estrangulamiento del flujo en el choke.

- ❖ Peso del lodo equivalente o EMW (*Equivalent Mud Weight*) se define bajo condiciones estáticas donde el término de fricciones se vuelve nulo. El desarrollo matemático se definirá más adelante.

Tanto la ECD como la EMW se obtienen a partir del análisis del registro de presiones en tiempo real. Este registro se obtiene con una herramienta llamada PWD (*Pressure While Drilling*). Esto permite calcular la presión de fondo sin circulación o BHP (*Bottom Hole Pressure*) y la presión de fondo con circulación o BHCP (*Bottom Hole Circulating Pressure*), dependiendo del caso.

La selección del tipo de lodo se debe tener en cuenta, ya que el peso del mismo modifica la presión de fondo, pero la ventaja del uso de la técnica MPD es que permite sustituir esta deficiencia con contrapresión.

4.7.4 Análisis de la presión de fondo en perforación convencional

En este caso, la presión de fondo (BHP) se define según la condición del pozo, donde contempla tanto el peso del lodo como las pérdidas por fricción:

En condiciones estáticas, donde no hay circulación de lodo, la presión de fondo es igual a la presión generada por la columna hidrostática del lodo en función de la trayectoria medida o MD (*Measured Depth*).

$$BHP_{(psi)} = \rho \cdot h = (1.422) \cdot \rho_{(g/l)} \cdot MD_{(m)}$$

- ❖ En términos de densidad equivalente (EMW):

$$EMW_{(g/l)} = \frac{BHP_{(psi)}}{(1.422) \cdot MD_{(m)}} = \rho_{(g/l)}$$

- ❖ En condiciones dinámicas se contemplan las pérdidas por fricción en el anular:

$$BHCP_{(psi)} = (1.422) \cdot \rho_{(g/l)} \cdot MD_{(m)} + \Delta P_{fricc. anular}$$

- ❖ La ECD en este caso queda definida como:

$$ECD_{(g/l)} = \frac{BHCP_{(psi)}}{(1.422) \cdot MD_{(m)}}$$

(Nota: el término 1.422 es un factor de conversión para poder trabajar con las unidades definidas en las ecuaciones)

Ante cualquier inconveniente que se presente en la perforación donde sea necesario modificar la presión de fondo, se realiza variando la densidad del lodo o aumentando el caudal de bombeo, este último influye únicamente en la presión en condiciones dinámicas.

Usualmente se busca la perforación OBD, es decir, con una presión que nos permita superar la presión de poro para trabajar dentro de la ventana operativa y así impedir cualquier aporte no deseado de la formación.

Cuando el influjo se presenta en el pozo, se genera una disminución de la densidad del lodo debido al aporte de gas o hidrocarburos de menor densidad, aumentando la probabilidad de desbalance en la columna de lodo en el espacio anular. Esto incrementa los costos de la perforación por los aditivos y el proceso de circulación que conlleva. También genera un problema adicional cuando la ventana operativa se modifica y se vuelve más estrecha, donde el aumento de densidad puede dañar la formación generando pérdidas de circulación.

4.7.5 Perforación MPD

A diferencia del método convencional, esta técnica permite aplicar una contrapresión (SBP) en superficie en tiempo real, permitiendo generar el perfil de presiones en el espacio anular para permitir el control del pozo.

En condiciones estáticas, la presión generada en este caso contempla además del peso del lodo, la contrapresión (SBP) es decir:

$$BHP_{(psi)} = (1.422) \cdot \rho_{(g/l)} \cdot MD_{(m)} + SBP_{(psi)}$$

En condiciones dinámicas se incluye las pérdidas por fricción en el espacio anular y superficie:

$$BHCP_{(psi)} = (1.422) \cdot \rho_{(g/l)} \cdot MD_{(m)} + \Delta P_{fricc.anular} + \Delta P_{fricc.sup} + SBP_{(psi)}$$

En términos de equivalente, se puede expresar la densidad equivalente de circulación (ECD) como se definió anteriormente:

$$ECD_{(g/l)} = \frac{BHCP_{(psi)}}{(1.422) \cdot MD_{(m)}}$$

A partir de la ecuación, se pueden observar las variables que permiten modificar la ECD para poder navegar dentro de la ventana operativa. El principal beneficio es la respuesta rápida que nos permite controlar la contrapresión para modificar el perfil de presión y, como última medida, aumentar el peso del lodo.

Se observa que la ECD está inversamente relacionada con la trayectoria medida MD, es decir, a mayor recorrido del fluido a través del espacio anular, menor es la ECD generada, al igual que la relación entre la EMW y la MD mencionada en la sección 4.7.4. Una vez alcanzado el *landing point*, este valor permanece constante. El *landing point* se define como el punto alcanzado en la formación de interés donde la trayectoria de la perforación se vuelve horizontal y continua por dentro de la misma formación.

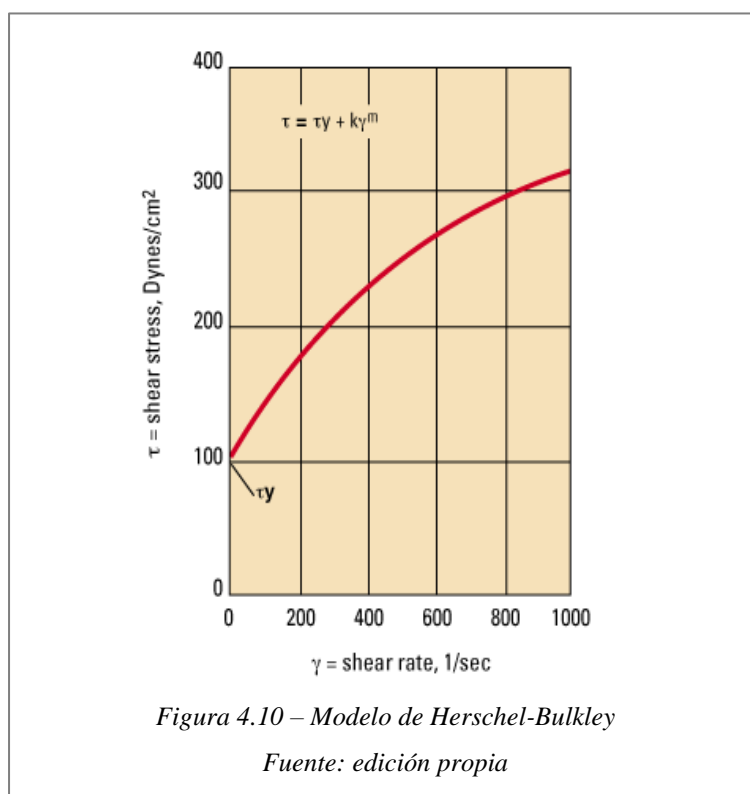
Los valores de ECD y EMW dependen de la reología del fluido y del gradiente térmico de la formación, estas variables se definen a continuación.

Reología de lodos

Los lodos son fluidos no newtonianos donde el modelo de Herschel-Bulkley es el más exacto para describir este comportamiento que relaciona los esfuerzos cortantes y la velocidad de corte con la viscosidad (Figura 4.10)^{III}.

Un aumento en el límite de cedencia implica un incremento en la energía requerida para iniciar el flujo, lo cual se traduce en mayores pérdidas por fricción.

Un valor elevado del índice de consistencia indica una mayor viscosidad aparente del fluido lo que provoca un incremento en las pérdidas por fricción.



Gradiente térmico de formación

La transferencia de calor desde las formaciones hacia el pozo produce variaciones de temperatura que alteran las propiedades del lodo. El calor se transfiere por dos mecanismos: por convección entre el contacto directo de la formación y el lodo fluyente en el espacio anular, además por conducción cuando el lodo permanece estático.

La temperatura aumenta con la profundidad de avance de la perforación, producto del gradiente térmico natural de la formación y de las fricciones generadas por los sólidos, lo que incide en la viscosidad del lodo. En un aumento de temperatura la viscosidad disminuye, reduciendo las pérdidas por fricción y disminuyendo la caída de presión anular.

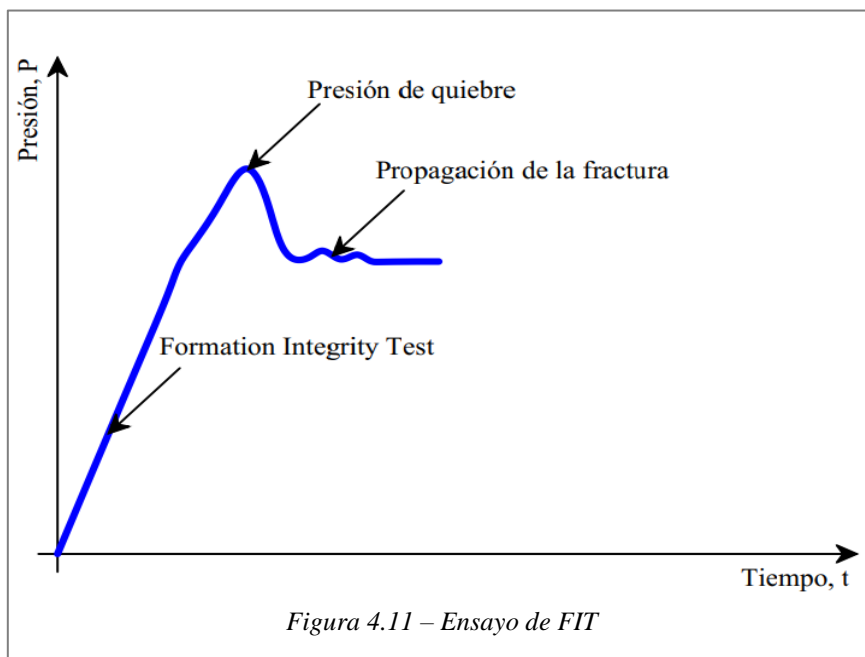
En cambio, cuando la viscosidad del lodo es alta genera mayores pérdidas por fricción debido a que aumenta la resistencia al flujo, generando alta ECD provocando pérdidas de circulación en formaciones de alta permeabilidad.

Tanto la viscosidad como la densidad del lodo se controlan utilizando aditivos que alteran y modifican sus propiedades para evitar los problemas mencionados anteriormente.

4.7.6 Ensayos de formación

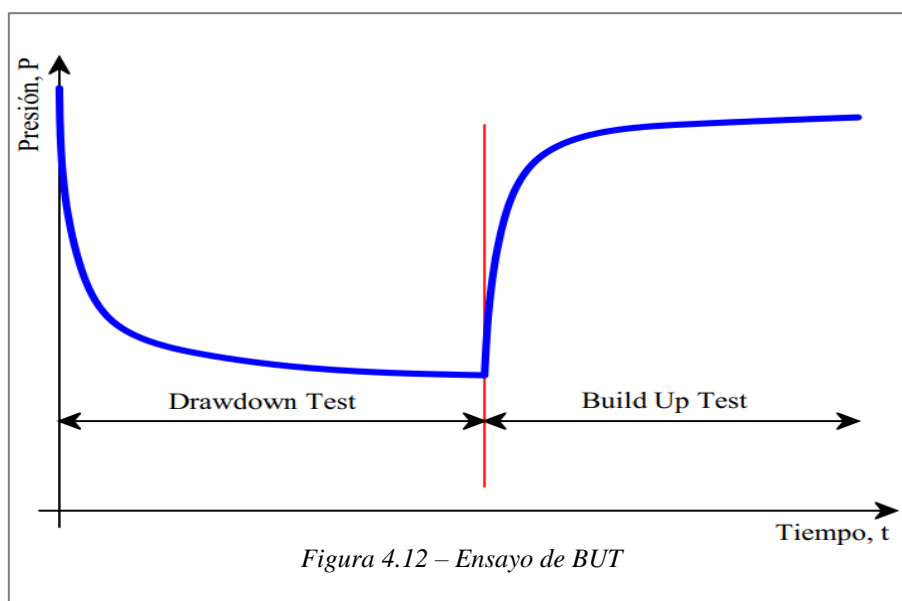
Se realizan para obtener las presiones que definen los límites de la ventana operativa. Los ensayos comúnmente utilizados son^{IV}:

- ❖ Ensayo FIT (*Formation Integrity Test*): cuando comienza una nueva etapa de perforación, se debe conocer en función de los antecedentes de pozo, cuanta presión puede soportar la zona más débil del pozo, ubicada en el zapato. Si el zapato no soporta una mínima ECD/EMW como consecuencia de una contrapresión aplicada, se generará una zona de pérdida, eventualidad que no podrá ser subsanada ante un evento de control dinámico de flujo.
- ❖ El valor de contrapresión a aplicar estará definido en base a la lectura de presión en las bombas, al ingreso del *stand pipe*. Conocida la densidad de lodo y la profundidad del ensayo se determina la EMW en pozo cerrado. De no alcanzarse la mínima densidad equivalente necesaria para desalojar un influjo de las dimensiones del yacimiento, se obtiene una prueba FIT negativa (Figura 4.11).



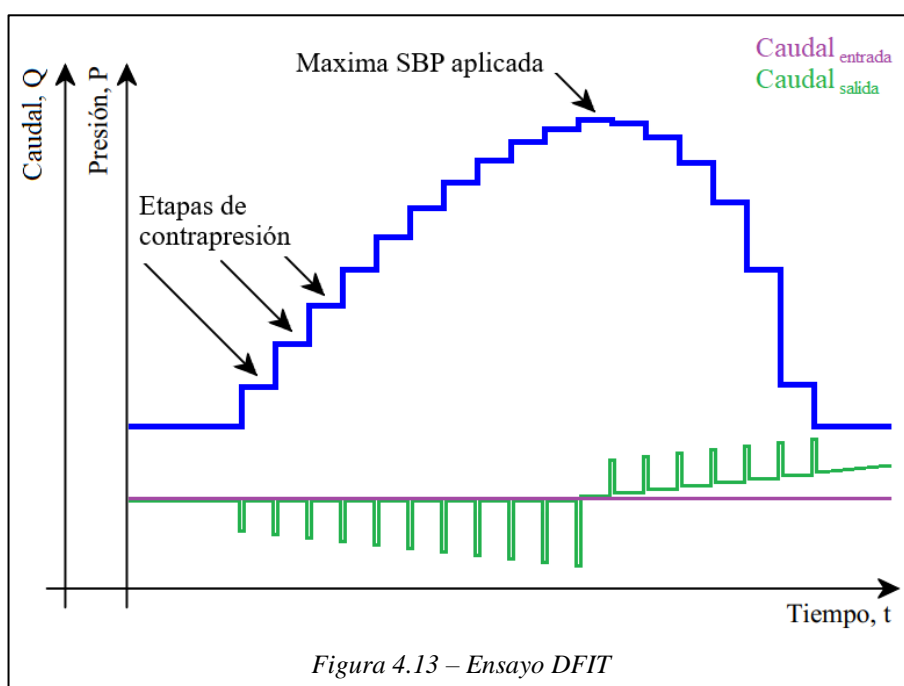
- ❖ Ensayo BUT (*Build Up Test*): este ensayo consiste en cerrar el pozo con el *choke manifold*, registrando la tendencia de presiones hasta lograr la ecualización y poder calcular la presión de poro que se ve afectada por la profundidad, la densidad y la contrapresión en superficie en condiciones de ahogo de pozo.

Para la medición se debe dejar el lodo en condiciones ideales, lo más homogéneo posible, sin gas, sin recortes de formación. Para esto se realiza un procedimiento de limpieza de pozo, circulando hasta que la densidad de entrada sea igual a la de salida, tomando muestras previo al ingreso al pozo y comparándolas con la densidad de salida (Figura 4.12).



- ❖ Ensayo de DFIT (*Dynamic Formation Integrity Test*): Permite determinar la presión de fractura de la formación definida como el límite superior de la ventana operativa sin detener la operación.

El ensayo se realiza manteniendo la circulación de lodo a bajas ROP generando una contrapresión en superficie, esto incrementa la presión en boca de pozo para lograr una pérdida de circulación en la formación, producto del ingreso del lodo a la misma. Este valor de presión es registrado como el máximo admisible por sobre el cual se produce una deformación permanente de la roca (Figura 4.13).



4.7.7 Técnica MPC (*Managed Pressure Cementing*)

Esta técnica permite el control de la presión durante la etapa de cementación donde se adicionan equipos para la inyección del cemento al equipamiento de MPD^V.

Luego de la etapa de perforación se ahoga el pozo con un lodo más denso para generar una presión mayor a la presión poral que impida algún aporte producto de la disminución de volumen y que permita extraer la sarta de perforación. Dependiendo de la operación, este lodo puede inyectarse por directa (por tubería hacia el espacio anular) o realizar un *bulkheading* inyectando por el espacio anular.

A continuación, se limpia el pozo para eliminar cualquier resto de lodo y recortes del pozo que puedan haber quedado para mejorar la adherencia del cemento a las paredes del pozo. Para esto se realizan dos tipos de remociones, una remoción mecánica haciendo circular lodo de perforación para extraer los recortes de *cutting* y luego una remoción química agregando un fluido colchón denominado espaciador el cual invierte la polaridad del lodo generando menor afinidad al pozo, permitiendo una mayor separación de este con las formaciones y que no se contamine el cemento con el lodo.

Luego de esta etapa, se bombea un volumen determinado de lechada de cemento por el interior de la sarta en régimen turbulento para mejor el sello y que no se produzcan filtraciones.

La contrapresión en MPC se aplica de igual manera que en MPD, con los estranguladores del *choke manifold*, para controlar el ascenso del cemento y todos los fluidos involucrados por el espacio anular. También se busca mantener una densidad equivalente constante dentro de la ventana operativa al igual que la perforación con la técnica MPD, con la diferencia que la equivalente estará afectada no solo por la densidad del lodo, sino que se adicionan otros parámetros como la densidad del lodo de ahogue, del espaciador y del cemento. Todos estos fluidos afectaran en distinta medida a las pérdidas de carga por fricción ya que tanto el espaciador, como la lechada se diseñan con una densidad y viscosidad mayor.

En este caso, la presión de fondo en condiciones dinámicas se define como:

$$BHCP_{(psi)} = (1.422) \cdot \sum_i (\rho_i \cdot h_i) + \Delta P_{fricc.anular} + \Delta P_{fricc.sup} + SBP_{(psi)}$$

La ECD queda definida de la siguiente manera:

$$ECD_{(g/l)} = \frac{\sum_i(\rho_i \cdot h_i)}{MD_{(m)}}$$

$$ECD_{total} = \frac{\sum_i(\rho_i \cdot h_i)}{MD_{(m)}} = \frac{BHCP_{(psi)} - (\Delta P_{fricc.anular} + \Delta P_{fricc.sup} + SBP_{(psi)})}{(1.422) \cdot MD_{(m)}}$$

Por un lado, la ECD puede calcularse en función de los fluidos presentes:

$$ECD_{total} = \rho_a \left(\frac{h_a}{MD} \right) + \rho_l \left(\frac{h_l}{MD} \right) + \rho_e \left(\frac{h_e}{MD} \right) + \rho_c \left(\frac{h_c}{MD} \right)$$

Donde - c: cemento.

- e: espaciador.

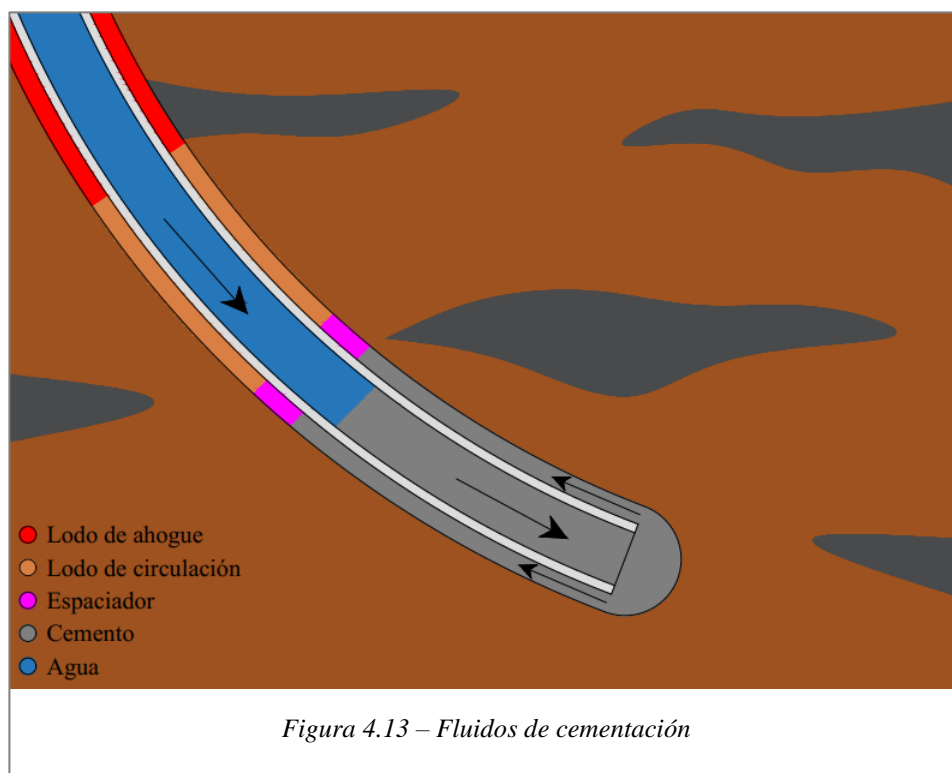
- l: lodo.

- a: ahogue.

Y por otro lado, en función de las presiones involucradas:

$$ECD_{total} = \frac{BHCP_{(psi)} - (\Delta P_{fricc.anular} + \Delta P_{fricc.sup} + SBP_{(psi)})}{(1.422) \cdot MD_{(m)}}$$

Finalmente se inyecta agua, a continuación del cemento, para generar la presión hidrostática necesaria que favorezca al fragüe del cemento.



4.8 Referencias del texto

^I López Anadón, E. (2015).

^{II} López Anadón, E. (2011).

^{III} Apuntes de la catedra “Mecánica de los fluidos”.

^{IV} Apuntes de la catedra “Ensayo de pozos”.

^V Siddiqi et al. (2016).

5. Flujo cruzado

En este capítulo se hará una introducción a los conceptos básicos sobre el flujo cruzado para comenzar con el desarrollo del caso de estudio de nuestro trabajo.

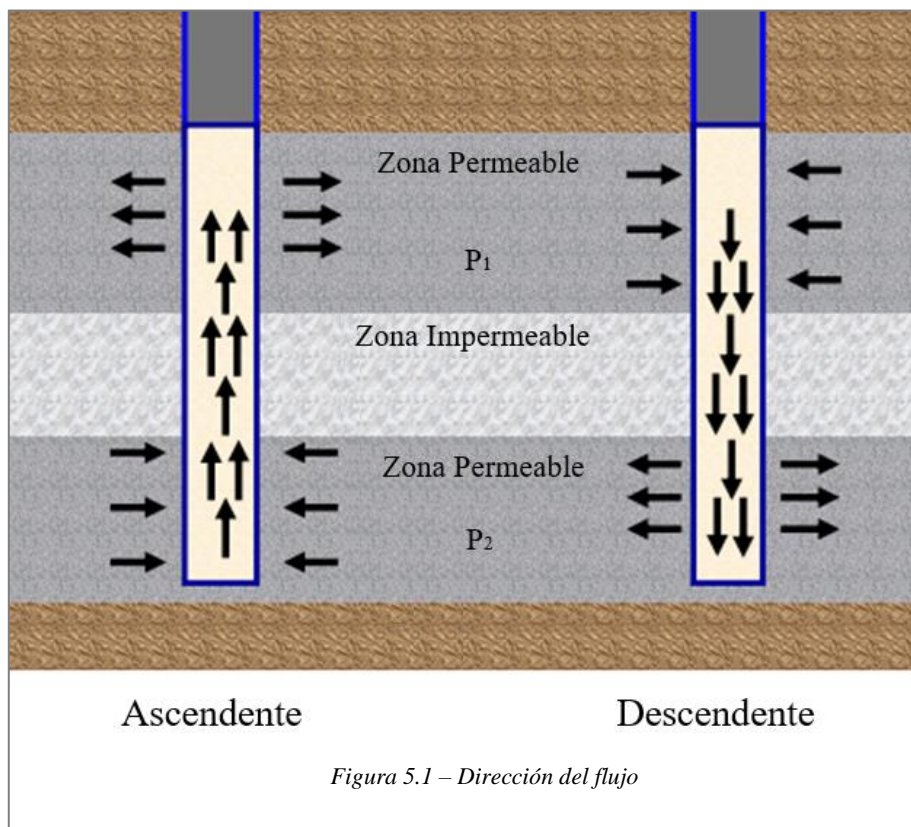
5.1 Introducción al flujo cruzado

Dentro de la cuenca Neuquina, ocurren distintos problemas asociados al flujo durante la perforación, como se mencionó en el capítulo anterior. Uno de ellos es el flujo cruzado que se produce en las formaciones Quintuco y Vaca Muerta, las cuales contienen una geología y estructura compleja con características que las diferencian, como se describió en el capítulo 3 de “La Cuenca Neuquina”.

El flujo cruzado se origina cuando se perforan dos formaciones aledañas con distinto nivel de presión. Por un lado, el lodo vence la barrera de presión que produce la formación, generando una zona de pérdida de fluido. Pero a la vez, la formación aledaña, si se encuentra sobrepresionada, genera una zona de aporte, ingresando fluidos al pozo debido a que vence la barrera hidrostática del lodo, generando un gradiente hidráulico a favor del fluido de formación que ingresa al pozo, produciendo cambios en la dirección de flujo.

5.1.1 Mecanismos de flujo cruzado

Se pueden dar dos situaciones de flujo cruzado: descendente y ascendente¹. El caso descendente se genera cuando la formación superior se encuentra sobre presionada en relación con la formación inferior, produciéndose un flujo en dirección hacia abajo. En cambio, el caso ascendente se produce cuando la formación inferior se encuentra a mayor presión que la formación superior, como es el caso de Quintuco y Vaca Muerta. Esta es la situación más común, ya que las formaciones productoras suelen estar sobre presionadas, generándose un flujo hacia arriba (Figura 5.1).



Para determinar si el flujo es ascendente o descendente, se puede determinar a partir de un balance de energía entre las formaciones permeables utilizando la ecuación de la energía que contempla la energía cinética, potencial y de flujo del fluido, además de las pérdidas de presión por fricción considerando un fluido viscoso. La ecuación resultante sería la siguiente:

$$\left(\rho \cdot \frac{V^2}{2g} + SG \cdot h + P \right)_{fm.Quintuco} = \left(\rho \cdot \frac{V^2}{2g} + SG \cdot h + P + H_f \right)_{fm.Vaca Muerta}$$

Donde:

- ❖ SG : densidad del fluido en gravedad específica
- ❖ H_f : pérdidas de presión por fricción
- ❖ V : velocidad del fluido
- ❖ h : altura desde un punto de referencia de la formación
- ❖ P : Presión de formación

Considerando la hipótesis de que las velocidades del fluido en un punto próximo al pozo son similares y se desprecian, es decir, $V_{fm.Quintuco} = V_{fm.Vaca Muerta}$. Además de una densidad uniforme, se puede simplificar la ecuación de la siguiente forma:

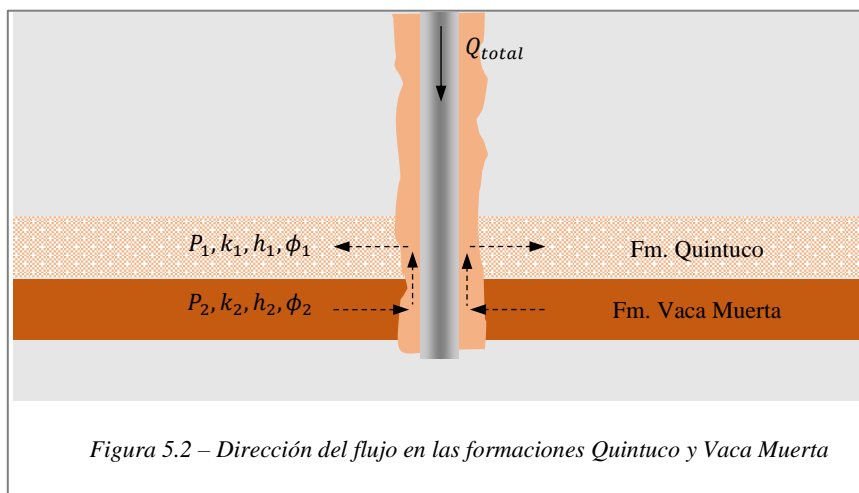
$$P_{fm.Quintuco} + \rho \cdot g \cdot \Delta h = P_{fm.Vaca Muerta} + H_f$$

Con esta idea, se puede determinar la dirección de flujo en tres casos particulares:

$P_{fm.Quintuco} + \rho \cdot g \cdot \Delta h = P_{fm.Vaca Muerta} + H_f$	La energía en este caso se encuentra equilibrada en ambas formaciones y no existe dirección de flujo.
$P_{fm.Quintuco} + \rho \cdot g \cdot \Delta h > P_{fm.Vaca Muerta} + H_f$	Flujo es descendente, ya que la presión total en la formación Quintuco es mayor a la presión en la formación Vaca Muerta.
$P_{fm.Quintuco} + \rho \cdot g \cdot \Delta h < P_{fm.Vaca Muerta} + H_f$	El flujo es ascendente, caso contrario al anterior, la presión total en la formación Quintuco es menor a la presión en la formación Vaca Muerta.

En las formaciones Quintuco y Vaca Muerta se genera un flujo ascendente. Esto ocurre producto de las características de ambas formaciones, la Fm. Vaca Muerta se encuentra más consolidada producto de su baja porosidad efectiva, característica de una formación del tipo *shale*, donde se genera una zona sobrepresionada y el gradiente de presión se produce a favor del fluido de formación. A diferencia de la Fm. Quintuco que cuenta con secuencias de fracturas naturales intercomunicadas que soportan menos presión cuando se perfora (Figura 5.2).

Esto genera que parte de los hidrocarburos de Fm. Vaca Muerta se direccionen hacia las fracturas de la Fm. Quintuco.



5.1.2 Influencia sobre la densidad equivalente

El flujo cruzado genera una ventana operativa estrecha, nula o cruzada producto de una igualación de la presión de poro con la presión de fractura, o en el caso extremo, la presión poral es mayor a la presión de fractura.

En el pase entre las formaciones Quintuco y Vaca Muerta, se genera con un flujo ascendente donde la ventana operativa se vuelve estrecha generando problemas de pérdidas o aportes, dependiendo del caso, si no se controla.

Como la técnica MPD busca mantener un perfil de presiones, es posible trabajar dentro de una ventana operativa estrecha, evitando ECDs que superen la presión de fractura o que estén por debajo de la presión poral, manteniendo una ECD en una profundidad determinada.



Figura 5.3 – Comportamiento de la ECD y EMW

En la figura 5.3 se observa, a modo ilustrativo, una ventana operativa estrecha, además del comportamiento de la ECD y EMW cuando se realizan cambios de densidad y contrapresión SBP. Todas las curvas representadas se describen en g/l y los cambios de densidad y contrapresión se contemplan en las ecuaciones desarrolladas en la sección 5.7 de conceptos

básicos de perforación. Las curvas de presión poral y de fractura son a modo ilustrativo y no representan presiones sino densidades de formación en g/l.

En condiciones estáticas, la EMW se modifica a la hora de densificar el lodo, aumentando o disminuyendo su efecto según el caso. También se ve afectada por la contrapresión aplicada a la hora de navegar dentro de la ventana operativa.

Si la EMW se encuentra próxima a la presión de fractura, la pérdida en la formación superior será inevitable. Esto se traduce en una disminución de la presión en superficie.

El comportamiento de la ECD es contrario al de la EMW con la diferencia que se contemplan las pérdidas por fricción en el espacio anular y en los equipos en superficie.

A la hora de buscar la mejor estrategia para navegar dentro de la ventana operativa, el perfil de densidades y la contrapresión tienen relevancia al utilizar la técnica MPD, donde la contrapresión a aplicar dependerá de límites máximos definidos en la operación, tanto en condiciones estáticas como dinámicas.

Los límites de contrapresión mencionados se definen en base a un estudio que se realiza a la perforación denominado “*kick intensity*” que determina cuanto volumen de gas puede ingresar al pozo de tal manera de poder controlar el influjo con los equipos utilizados en superficie sin que dañe o afecte la zona más débil de la perforación, que se encuentra a la profundidad del zapato, tanto para condiciones dinámicas como estáticas. Para el estudio de este proyecto, los límites de contrapresión se definirán previamente.

De superarse los límites preestablecidos, la utilización de un perfil de densidades permite compensar esta limitante. En la realidad, los cambios de densidad no son instantáneos, sino que se deben a una variación gradual en el tiempo producto de cambios en la concentración del lodo debido a la adición de químicos, baritina o mezcla de lodos en el circuito activo hasta llegar al equilibrio, generado por un balance de masa.

Por otro lado, la información sobre perforaciones de pozos aledaños, también denominado pozo *offset*, permite identificar a determinadas profundidades, puntos de aporte de fluido de formación y puntos de pérdida de lodo que deben tenerse en cuenta al construir las curvas equivalentes tanto para la rama vertical y curva, como en la horizontal. Las equivalentes deben superar los puntos de aporte para prevenir influjos de gas, pero no deben superar los puntos de pérdida.

5.1.3 Métodos preventivos

Cuando el problema se presenta, existen distintas alternativas para controlar los efectos de flujo cruzado. Uno de los métodos consiste en aislar la zona de pérdida con un tapón de cemento como se realizó en la segunda estrategia, es un método sencillo para recuperar rápidamente la circulación de lodo.

Otro método es mediante el uso de un *packer*. Este dispositivo permite crear un sello y aislar zonas específicas, impidiendo el paso del fluido entre una zona de mayor presión hacia otra de menor presión. Existen distintos tipos de *packers*, algunos recuperables y otros permanentes que quedan fijos luego de cementar el pozo.

En los casos donde se tiene una gran pérdida de circulación, se utiliza el método *Mudcap Drilling* que consiste en utilizar un lodo de mayor densidad para generar una presión hidrostática que redirecciona los fluidos de perforación y de formación hacia la zona donde se produce la pérdida de circulación y la perforación continúa bombeando un lodo más liviano por la sarta similar a la presión de formación. Para este método se necesitan de presiones elevadas en las bombas y tuberías para generar la fuerza suficiente que me permita equilibrar la presión de formación y así provocar y mantener la inyección de fluido en la zona débil^{II}.

Otra alternativa, cuando se prevé una pérdida total de circulación, consiste en inyectar al lodo un material obturante. primero se levanta la herramienta para evitar aprisionamientos que se genera entre las altas presiones y la zona de baja presión en la formación y luego se inyecta el lodo con material obturante para poder bajar nuevamente hasta el fondo de pozo. Una buena práctica consiste en realizar un DFIT luego de realizar este tratamiento, para conocer las condiciones de la ventana operativa.

Un estudio de diseño de fluidos de perforación permite identificar algunos tipos de densificantes especiales que mejoran y reducen esta condición de pérdida para pozos esbeltos o *Slim* como las salmueras viscosificadas poliacrilamida parcialmente hidrolizada (PHPA). Las salmueras con goma de xantano aumentan las APL, pero mejoran la capacidad de transporte debido a las altas viscosidades, teniendo en cuenta que las altas temperaturas pueden afectar esta propiedad por la disminución de la misma. Además, los fluidos de base de arcilla tienen pérdidas de presión bajas si no se agrega sal, esto se debe tener en cuenta a la hora de perforar porque las formaciones pueden llegar a tener grandes concentraciones de sal^{III}.

Además, el perfil sísmico a continuación, permite destacar la presencia de las fracturas naturales que caracterizan a la Fm. Quintuco con ciertas trazas en la Fm. Vaca Muerta:

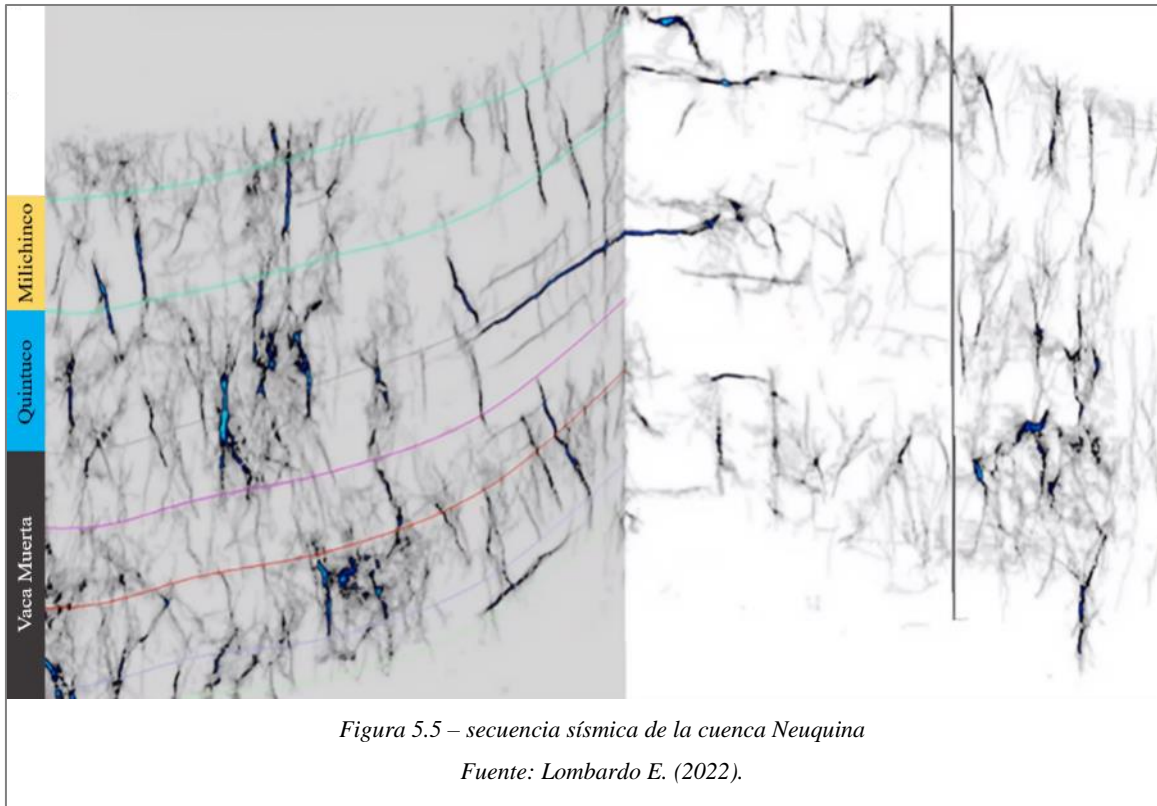


Figura 5.5 – secuencia sísmica de la cuenca Neuquina

Fuente: Lombardo E. (2022).

A continuación, se describe la interpretación de los siguientes perfiles. Para el caso de la Fm. Quintuco:

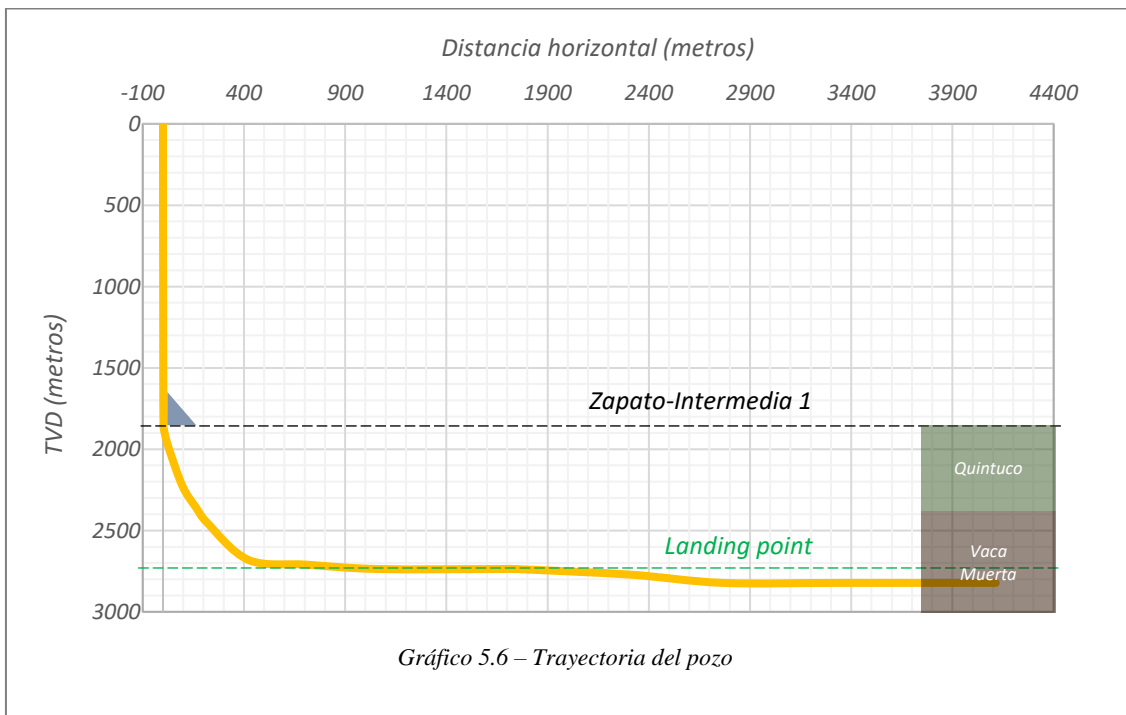
- ❖ Gamma Ray (GR): se observan bajos valores de Gamma Ray, lo que estaría indicando un bajo contenido de arcillas en la roca, característico de una formación donde predominan las rocas carbonáticas con un contenido bajo de clastos de arcillas.
- ❖ Resistividad (Res): se observan bajos valores relativamente constantes ya que en ese intervalo puede ser de litología relativamente homogénea, esto sugiere que la roca tiene alta porosidad y permeabilidad lo que lo convierte en una potencial roca reservorio.
- ❖ Acústico (DT): Al igual que el registro de resistividad se puede observar valores bajos del tiempo del tránsito y constantes lo que nos sugiere que la litología es homogénea y a su vez alta porosidad ya que estos espacios vacíos provocan que la onda acústica viaje más lentamente a través de la formación.

- ❖ TOC: se observan valores bajos en la Fm. Quintuco, lo que refleja un bajo contenido de materia orgánica en comparación con la Fm. Vaca muerta. Esto es un gran indicativo del potencial de la Fm. Vaca Muerta como reserva.

Por otra parte, la Fm. Vaca Muerta presenta otro tipo de respuesta en los registros de pozo, pero de manera similar en ciertas secciones, los cuales se detallan a continuación:

- ❖ Gamma Ray (GR): se pueden observar altos valores de rayos gamma en secciones inferiores a mayor profundidad de la formación, esto estaría indicando un alto contenido de arcilla y material orgánico lo que implica mayor potencial de generación de hidrocarburos.
- ❖ Resistividad (RES): no presenta grandes diferencias con respecto a la Fm. Quintuco
- ❖ Acústico (DT): en este perfil se puede observar un incremento de los valores del tiempo de tránsito con respecto a la profundidad, este aumento se asocia a alta porosidad correspondiente a la Fm. Vaca Muerta.
- ❖ TOC: se observan valores altos de este registro lo que nos indica un alto contenido de materia orgánica en la formación y es la característica principal de Fm. Vaca Muerta por lo que es una excelente roca generadora de hidrocarburos.

La trayectoria total alcanzada en este pozo será de 6500 metros con una profundidad máxima que no supera los 2822 metros con la siguiente trayectoria recorrida.



Se puede observar que el *Landing point* se encuentra por encima del punto final de trayectoria. Debido a esto, el pozo se denomina *Down deep*. Si fuera el caso opuesto, donde el *Landing point* queda por debajo del punto final del pozo, se lo denominaría pozo *Up deep*. El punto donde la trayectoria comienza a rama horizontal (*Landing point*) se encuentra a una profundidad de:

TVD (<i>Landing point</i>)	2709.93 metros
------------------------------	----------------

La secuencia geológica descrita anteriormente, cuenta con información de las profundidades de cada formación (TVD) y además datos de la trayectoria total que tendrá la perforación (MD) tanto vertical como horizontalmente:

Formaciones	Trayectoria, MD (metros)	Profundidad, TVD (metros)
Grupo Neuquén	0.00	0.00
Fm. Candeleros	78.28	78.28
Fm. Rayoso	241.02	241.02
Zapato-Guía	619.03	619.03
Fm. Centenario	629.33	629.33
Fm. Mulichinco	1703.62	1703.62
Fm. Quintuco	1827.23	1827.22
Zapato-Intermedia 1	1868.43	1868.42
	1979.66	1977.60
Fm. Quintuco	2240.25	2228.00
	2389.60	2361.00
Fm. Vaca Muerta	2492.60	2450.00
	2802.00	2681.00
<i>Landing Point</i>	3090.00	2709.93
	3444.00	2736.71
	4066.00	2736.71
	4120.00	2736.71
Fm. Vaca Muerta	4688.00	2771.00
	5150.00	2822.00
	5734.00	2822.00
	6500.00	2822.00

Para el esquema del pozo se consideran: casing guía e intermedia 1, ubicándose este último a la profundidad de 1868.4 metros, donde las secciones serán de 13 5/8 para el casing-guía y 9 5/8 para la intermedia 1.

TVD (Casing-guía)	619.03 metros
TVD (Casing-Intermedia 1)	1868.43 metros

En este proyecto solo se entuba la primera sección de la Fm. Quintuco.

Información de pozos “Offset”:

Puntos de pérdida

Pozo (Nombre)	Trayectoria, MD (metros)	Profundidad, TVD (metros)	Densidad eq. (g/l)
PWQ.2023	1979.66	1977.60	1942.50
PWQ.2022	2240.25	2228.00	1954.05
PWQ.2021	2389.60	2361.00	1998.15

Puntos de aporte

Pozo (Nombre)	Trayectoria, MD (metros)	Profundidad, TVD (metros)	Densidad eq. (g/l)
PWQ.2023	2492.60	2450.00	1883.70
PWQ.2022	2802.00	2681.00	1984.50
PWQ.2021	3090.00	2709.93	1879.50
PWQ.2023	3444.00	2736.71	1900.00
PWQ.2022	4066.00	2736.71	1930.00
PWQ.2021	4688.00	2771.00	1912.00

Los primeros 3 puntos de aporte corresponden a la rama vertical y curva de la trayectoria hasta el *landing point*, los puntos restantes corresponden a la rama horizontal.

La secuencia geológica, cuenta con información de presión de poro y presión de fractura para las distintas formaciones, lo cual permite la construcción de la ventana operativa característica del pozo en estudio:

Formaciones	Trayectoria, MD (metros)	Profundidad, TVD (metros)	Presión de poro (g/l)	Presión de fractura (g/l)
Grupo Neuquén	0.00	0.00	1000.00	2120.00
Candeleros	78.28	78.28	1000.00	2120.00
Rayoso	241.02	241.02	1000.00	2120.00
Zapato-Guía	619.03	619.03	1000.00	2120.00
Centenario	629.33	629.33	1000.00	2120.00
Mulichinco	1703.62	1703.62	1000.00	2120.00
Quintuco	1827.23	1827.22	1050.00	2120.00
Zapato-Intermedia 1	1868.43	1868.42	1050.00	2120.00
Quintuco	1979.66	1977.60	1645.00	2120.00
	2240.25	2228.00	1685.00	2120.00
	2389.60	2361.00	1840.00	2120.00
Vaca Muerta	2492.60	2450.00	1856.00	2110.00
	2802.00	2681.00	1870.00	2110.00
<i>Landing Point</i>	3090.00	2709.93	1910.00	2110.00
Vaca Muerta	3444.00	2736.71	1888.00	2090.00
	4066.00	2736.71	1888.00	2080.00
	4120.00	2736.71	1888.00	2070.00
	4688.00	2771.00	1888.00	2060.00
	5150.00	2822.00	1888.00	2050.00
	5734.00	2822.00	1888.00	2020.00
	6500.00	2822.00	1888.00	2000.00

En conjunto con los puntos de aporte y pérdida, la ventana operativa descrita en unidades equivalentes y trayectoria MD, será:

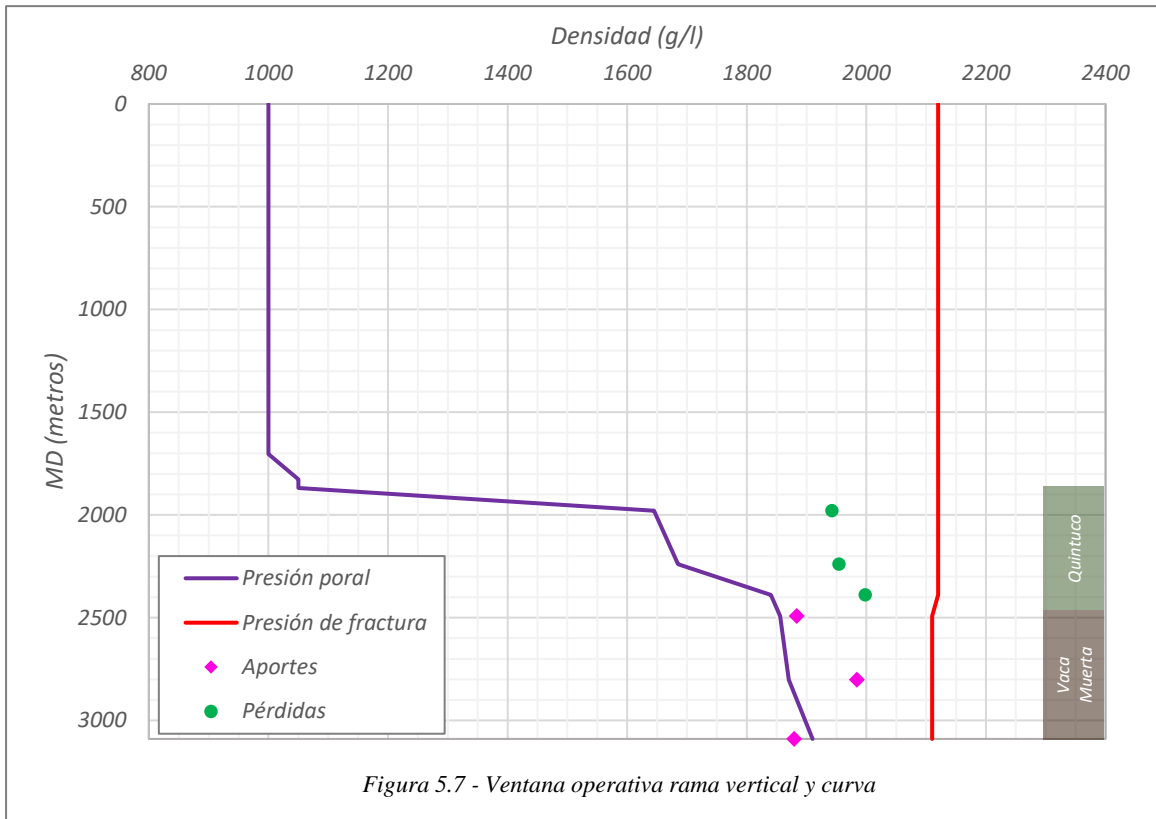


Figura 5.7 - Ventana operativa rama vertical y curva

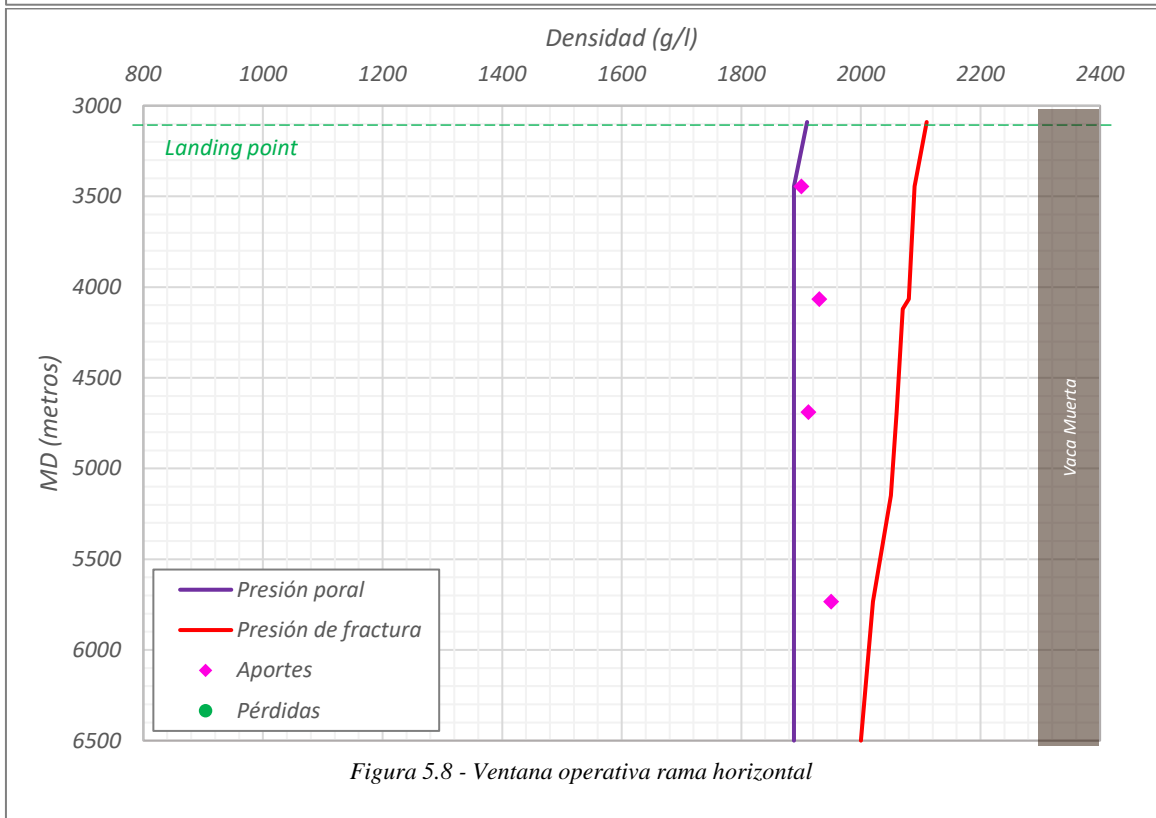


Figura 5.8 - Ventana operativa rama horizontal

5.2.2 Parámetros de diseño

Para este proyecto se definirán los parámetros hipotéticos necesarios para el desarrollo de los cálculos, que permitirán el uso de un perfil de densidades con contrapresión en superficie.

Estos valores surgen de diversas condiciones como cambios de temperaturas, reologías de lodo, dimensiones, volúmenes del pozo, entre otras que no serán analizados en detalle en este caso.

Para el análisis del caso, se plantean dos condiciones hipotéticas del pozo con diferentes condiciones de caudal. Los caudales asumidos, son valores mínimos que se necesitan para asegurar la limpieza del pozo en base a los diámetros definidos en las estrategias planteadas más adelante. Para cada caudal, se asumen las siguientes condiciones para poder plantear los cálculos realizados en las estrategias:

Para un caudal de 260 gpm:

Pérdidas en superficie	$\Delta P_{fricc.sup}$	51 psi
Pérdidas en el espacio anular	$\Delta P_{fricc.anular}$	480 psi
Contrapresión dinámica inicial	SBP ₁	70 psi
Contrapresión estática inicial	SBP ₁	650 psi

Para un caudal de 280 gpm:

Pérdidas en superficie	$\Delta P_{fricc.sup}$	70 psi
Pérdidas en el espacio anular	$\Delta P_{fricc.anular}$	510 psi
Contrapresión dinámica inicial	SBP ₁	70 psi
Contrapresión estática inicial	SBP ₁	600 psi

Estos valores permiten el cálculo de las densidades equivalentes con las ecuaciones descriptas en el capítulo 4 de “La técnica MPD”. Los cálculos realizados se describirán a continuación en las secciones 6.2.5 y 6.2.6.

5.2.3 Análisis FIT

Para comenzar la estrategia y navegar dentro de la ventana operativa mediante el uso de un perfil de densidades con contrapresión en superficie, se debe establecer un cierto valor de densidad de lodo de ahogue que permita construir la curva sin que dañe la zona más débil del pozo, esto es, a la profundidad del zapato. El análisis FIT permite comparar la presión del zapato en condiciones dinámicas con la presión obtenida del análisis en condiciones estáticas.

Se necesitan ciertos parámetros para realizar el cálculo como la presión en superficie, que en este caso, es en el stand pipe (“*Stand Pipe Pressure*” o SPP) ya que, al realizar la prueba los equipos MPD no están conectados al equipo de la torre.

La presión en el zapato se obtiene de igual manera que en el cálculo de las equivalentes descrito en el capítulo 4 de “La técnica MPD”, para calcular la presión de fondo o BHP a la profundidad del zapato.

En condiciones estáticas, BHP será:

$$BHP_{(psi)} = (1.422) \cdot \rho_{(g/l)} \cdot TVD_{(metros)} + SPP_{(psi)}$$

La relación con la densidad equivalente es:

$$EMW = \frac{BHP_{(psi)}}{(1.422) \cdot TVD_{(metros)}}$$

Al relacionar ambas ecuaciones:

$$EMW = \frac{(1.422) \cdot \rho_{(g/l)} \cdot TVD_{(metros)} + SPP_{(psi)}}{(1.422) \cdot TVD_{(metros)}}$$

$$EMW = \rho_{(g/l)} + \frac{SPP_{(psi)}}{(1.422) \cdot TVD_{(metros)}}$$

Al despejar la presión en el *stand pipe*:

$$SPP_{(psi)} = (1.422) \cdot TVD_{(metros)} \cdot [EMW - \rho_{(g/l)}]$$

El valor preestablecido de densidad equivalente para el cálculo de la SPP se define considerando la máxima ECD que se podría generar en condiciones de ahogue de pozo en el caso más desfavorable, es decir, cuando estamos en presencia de un influjo. Asumiendo las condiciones de máximo caudal con 280 gpm, es decir:

Pérdidas en superficie	$\Delta P_{fricc.sup}$	70 psi
Pérdidas en el espacio anular	$\Delta P_{fricc.anular}$	510 psi
Lodo de ahogue, <i>Kill Mud</i>	ρ_{KM}	2000 g/l

Además, se asume un valor de aporte máximo de 1930 g/l donde el pozo se ahogará con un *kill mud* de 2000 g/l. Con estas condiciones, la ECD máxima con la densidad de aporte y a la profundidad del zapato (1868 metros), será:

$$ECD_{m\acute{a}x} = \frac{(1.422) \cdot (1930) \cdot (1868) + (510) + (70)}{(1.422) \cdot (1868)} = 2148 \text{ g/l}$$

El valor equivalente de FIT debe ser mayor a este valor para asegurar el ahogue del posible aporte. Para las condiciones de ahogue, la presión de fondo en el zapato necesaria para circular el pozo será:

$$BHCP_{(psi)} = (1.422) \cdot \rho_{KM} \cdot TVD_{(metros)} + \Delta P_{fricc.anular} + \Delta P_{fricc.sup}$$

$$BHCP_{(psi)} = (1.422) \cdot (2000) \cdot (1868) + (510) + (70)$$

$$BHCP = 5892.60 \text{ psi}$$

La presión en el stand pipe deberá soportar esta presión en condiciones iniciales, por lo que:

$$BHP_{(psi)} = (1.422) \cdot \rho_{(g/l)} \cdot TVD_{(metros)} + SPP_{(psi)} = 5892.60 \text{ psi}$$

Considerando un lodo de 1680 g/l para iniciar la perforación, la SPP será:

$$SPP = 5892.60 - (1.422) \cdot (1680) \cdot (1868) = 1430.02 \text{ psi}$$

Las presiones obtenidas para el ahogue, generan una ECD en el zapato de:

$$ECD_{ahogue} = \frac{(5892.6)}{(1.422) \cdot (1868)} = 2218 \text{ g/l}$$

Se observa que la ECD en condiciones de ahogue es mayor a la ECD máxima en condiciones de máximo aporte. Esto nos asegura que, en caso de un posible aporte, se podrá contener el mismo sin dañar la formación a la profundidad del zapato, con el lodo de ahogue supuesto.

5.2.4 Curvas equivalentes

Con la caracterización del pozo y los parámetros de diseño, las curvas de densidad equivalente en condiciones dinámicas y estáticas se describen mediante las ecuaciones desarrolladas en el capítulo anterior de “La técnica MPD”.

$$EMW_{(g/l)} = \frac{BHP_{(psi)}}{(1.422) \cdot MD_{(metros)}}$$

$$ECD_{(g/l)} = \frac{BHCP_{(psi)}}{(1.422) \cdot MD_{(metros)}}$$

La variación de ambas ecuaciones, para poder navegar dentro de la ventana operativa, se debe principalmente a los cambios de densidad y contrapresión que se apliquen y que afectan a la presión de fondo.

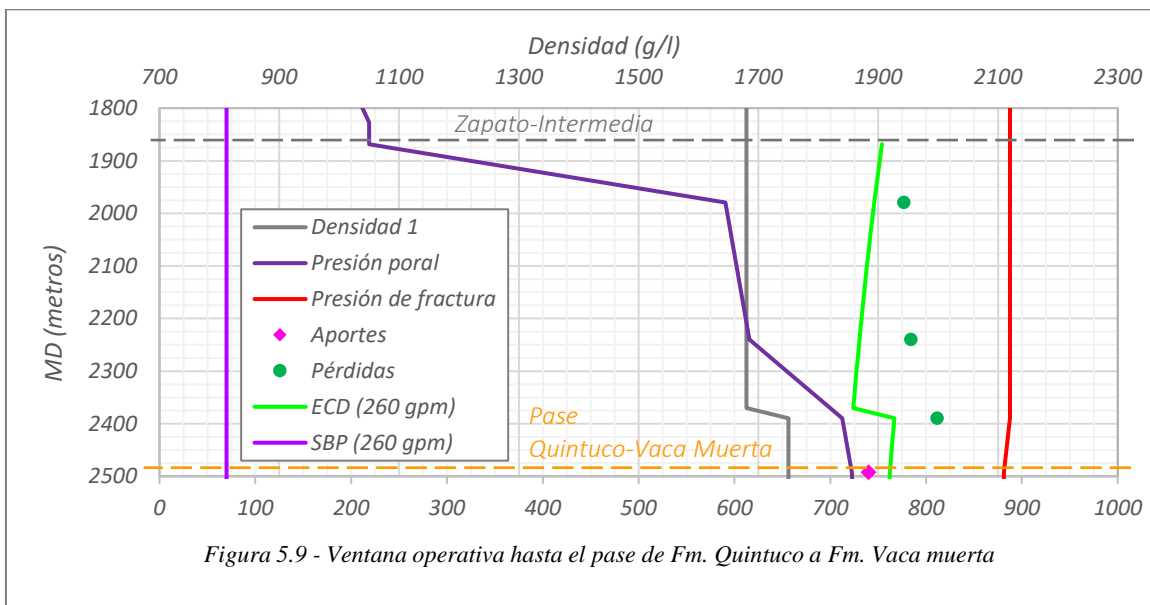
$$BHP_{(psi)} = (1.422) \cdot \rho_{(g/l)} \cdot MD_{(metros)} + SBP_{(psi)}$$

$$BHCP_{(psi)} = (1.422) \cdot \rho_{(g/l)} \cdot MD_{(metros)} + \Delta P_{fricc.anular} + \Delta P_{fricc.sup} + SBP_{(psi)}$$

5.2.5 Primera estrategia

Consiste en perforar el pozo con una sección de 6 ¾ utilizando un perfil de densidades con contrapresión en superficie con una densidad de 1680 g/l y una contrapresión de 70 psi inicialmente, para dos caudales distintos.

Desde la profundidad del zapato hasta los 2390 metros, se observa una proximidad de la curva de ECD con la curva de presión poral.



En ese momento se decide realizar un cambio de densidad que permita aumentar la ECD considerando no superar el tercer punto de pérdida a 2389 metros pero que permita sobrepasar el primer punto de aporte a 2492 metros.

Al aumentar la densidad a 1750 g/l se obtienen los siguientes resultados:

$MD_{(metros)}$	$TVD_{(metros)}$	$\rho_{(g/l)}$	$\rho_{ap. (g/l)}$	$\rho_{perd. (g/l)}$	$BHCP_{(g/l)}$	$ECD_{(g/l)}$
2389	2361	1750	-	1998	6547	1926
2492	2450	1750	1883	-	6803	1919

Se observa que la ECD se encuentra por debajo de la densidad de pérdida y supera la densidad del aporte.

Continuando hasta el *landing point* (3090 metros), se observa el segundo punto de aporte a 2802 metros donde se decide aumentar la densidad a 1780 g/l y aumentar la contrapresión para superar este aporte.

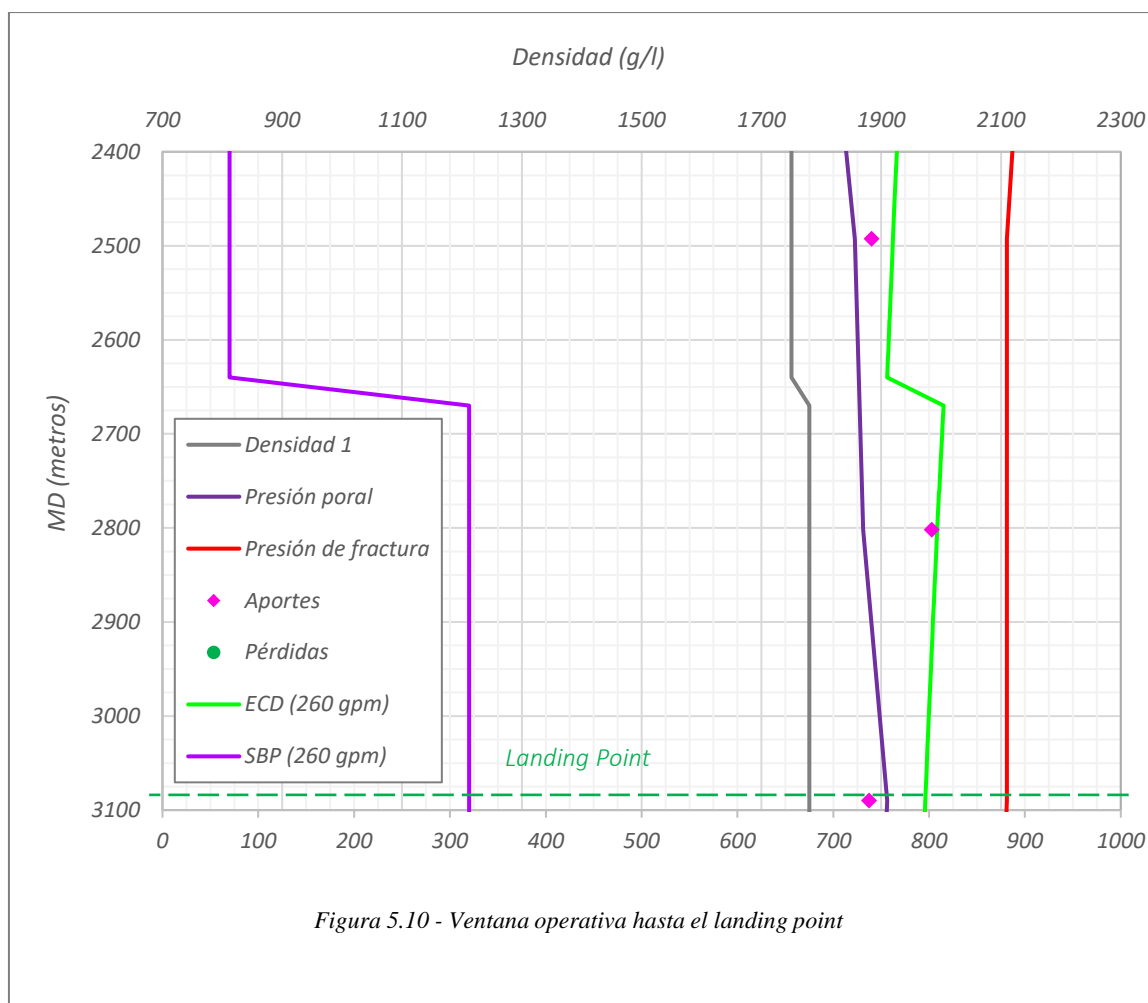


Figura 5.10 - Ventana operativa hasta el landing point

A la profundidad del aporte:

$MD_{(metros)}$	$TVD_{(metros)}$	$\rho_{(g/l)}$	$\rho_{ap.}(g/l)$	$SBP_{(metros)}$	$BHCP_{(g/l)}$	$ECD_{(g/l)}$
2802	2681	1780	1984	320	7943	1993

La contrapresión aplicada permite superar el aporte a 2802 metros y continuar por la rama horizontal, luego del *landing point* donde la presión poral y presión de fractura se mantienen constantes.

A 4066 metros se observa el quinto punto de aporte y además por efecto de la profundidad, la ECD tiende a acercarse a la presión poral nuevamente. El aumento de la contrapresión a 500 psi permite superar el aporte, manteniendo la misma densidad. Además permite superar el sexto punto de aporte ubicado a 4688 metros que permite llegar al objetivo de 6500 metros sin aportes.

$MD_{(metros)}$	$TVD_{(metros)}$	$\rho_{(g/l)}$	$\rho_{ap.}(g/l)$	$SBP_{(metros)}$	$BHCP_{(g/l)}$	$ECD_{(g/l)}$
4066	2736	1780	1930	500	11322	1958
4688	2771	1780	1912	500	12897	1934
6500	2822	1780	-	500	17483	1891

Finalmente, la curva de ECD obtenida será:

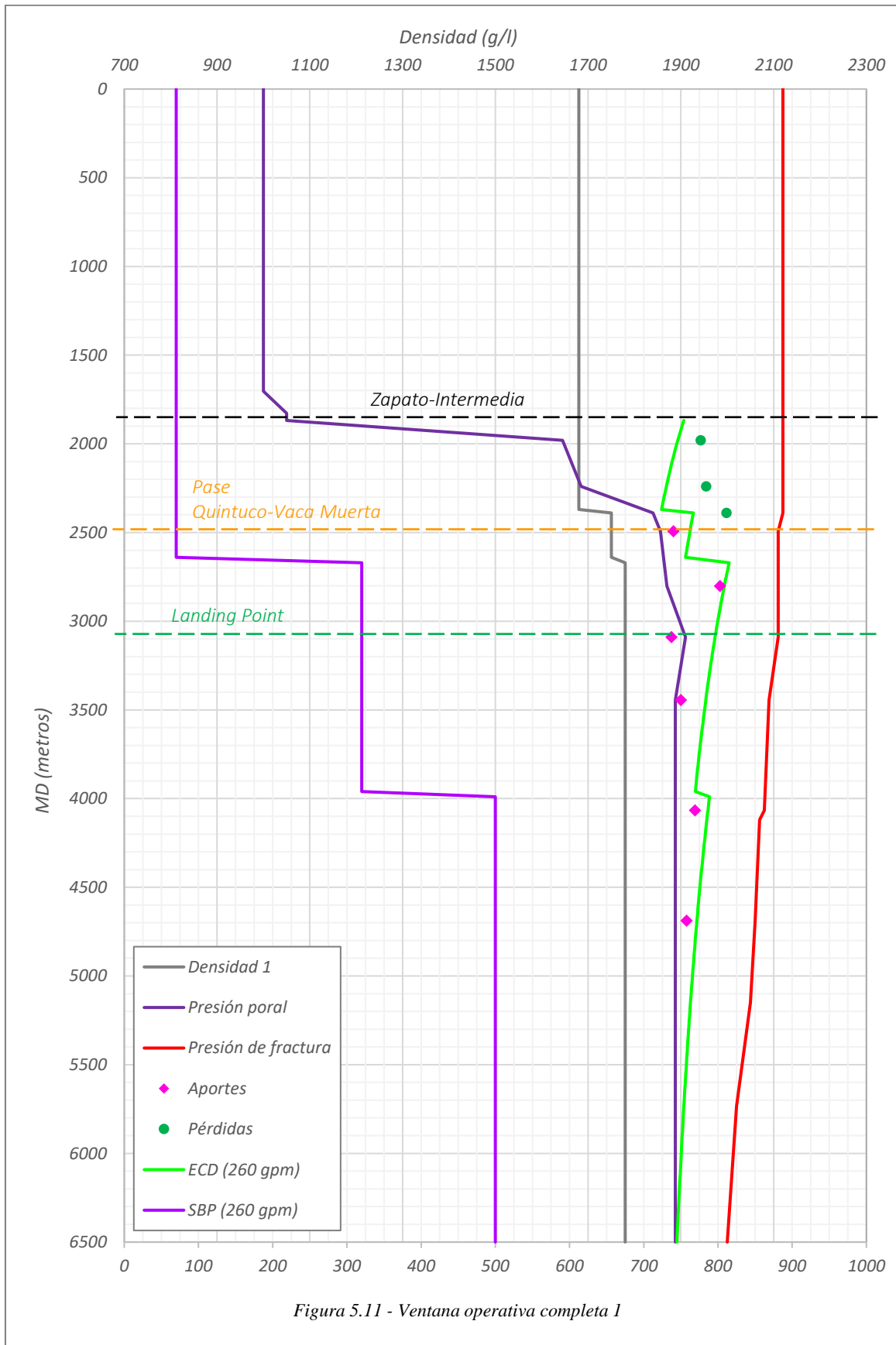
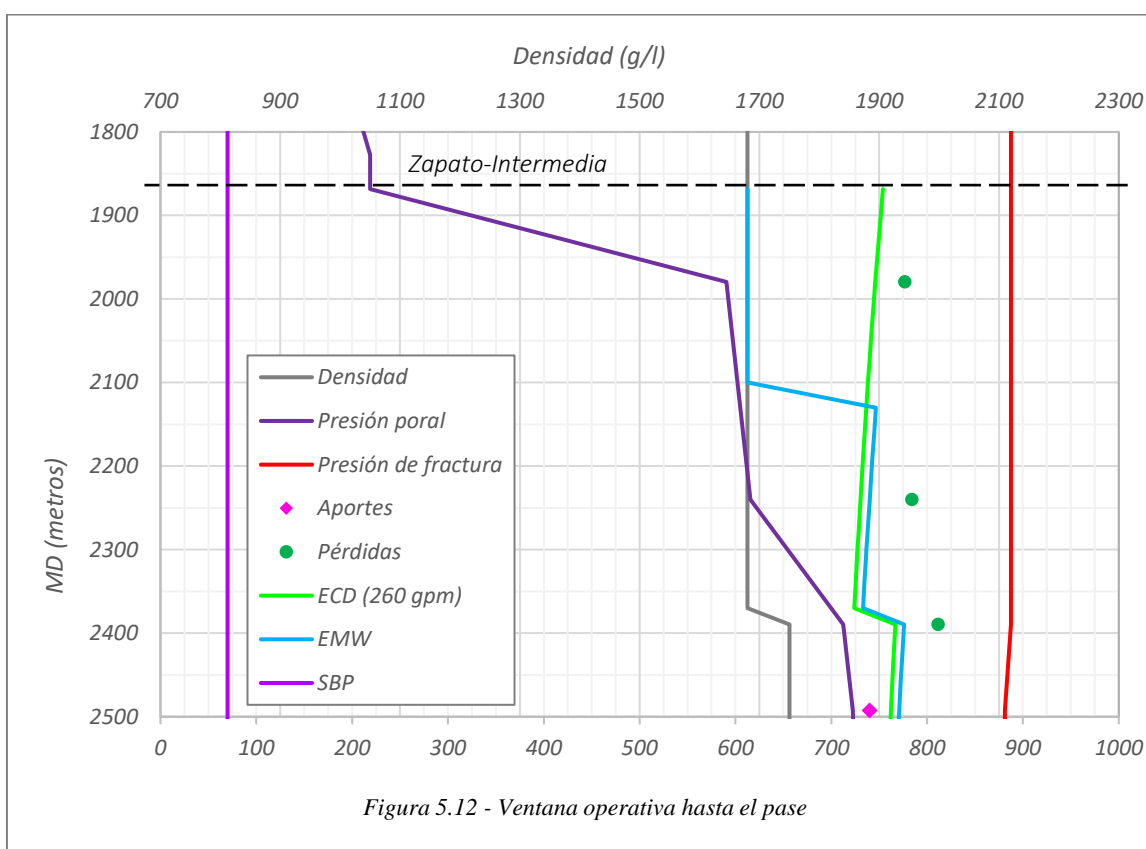


Figura 5.11 - Ventana operativa completa 1

Para la construcción de la EMW se tienen en cuenta los mismos parámetros iniciales, con la diferencia que, al no haber circulación, las pérdidas por fricción en superficie y en el espacio anular son nulas.

Inicialmente solo se tiene el peso del lodo al no aplicar una contrapresión desde el zapato, por lo que la curva avanza a la par con la curva de densidad del lodo hasta acercarse al límite con la presión poral de la ventana.

En ese momento, a 2130 metros de MD, se decide aplicar una contrapresión de 650 psi sin que la curva se vea afectada por los primeros puntos de pérdida, teniendo en cuenta que a 2493 metros de profundidad se encuentra el primer punto de aporte.



Para continuar con la construcción de la curva, se decide implementar la misma estrategia utilizada para la construcción de la ECD, es decir, utilizar las mismas profundidades donde se aplica las contrapresiones y los cambios de densidad, con la diferencia que los valores a aplicar serán distintos considerando las diferencias en las ecuaciones que describen las curvas.

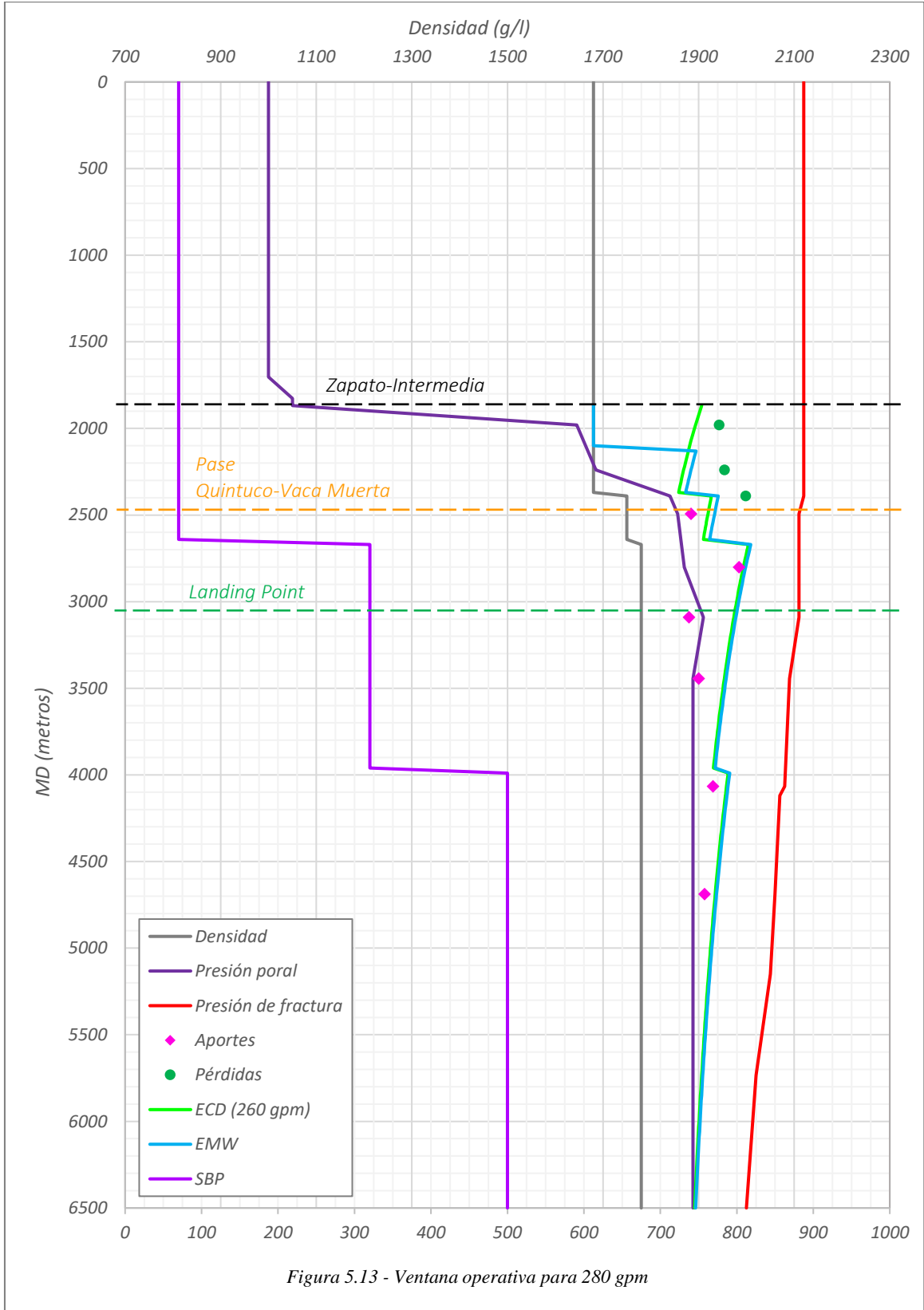
Se obtienen los siguientes resultados de BHP y EMW donde se realizaron cambios de densidad y contrapresión:

$MD_{(metros)}$	$TVD_{(metros)}$	$\rho_{(g/l)}$	$SBP_{(metros)}$	$BHP_{(g/l)}$	$EMW_{(g/l)}$
0.00	0.00	1680	-	-	-
1868	1868	1680	-	4463	1680
2130	2129	1680	650	5738	1894
2389	2361	1750	650	6596	1941
2670	2629	1780	870	7628	2009
3090	2709	1780	870	8691	1978
3990	2735	1780	1050	11149	1965
6500	2822	1780	1050	17502	1893

Además, se tiene en cuenta que no se supera el límite máximo de contrapresión a aplicar de 1650 psi. Estos cambios permiten obtener los siguientes valores para los puntos de aporte y puntos de pérdida:

$MD_{(metros)}$	$TVD_{(metros)}$	$\rho_{perd.}(g/l)$	$\rho_{ap.}(g/l)$	$BHP_{(g/l)}$	$EMW_{(g/l)}$
1868	1868	-	-	4463	1680
1979	1977	1942	-	4729	1680
2240	2228	1954	-	6001	1884
2389	2361	1998	-	6596	1941
2492	2450	-	1883	6852	1933
2802	2681	-	1984	7962	1998
3090	2709	-	1879	8691	1978
3444	2736	-	1900	9587	1957
4066	2736	-	1930	11341	1961
4688	2771	-	1912	12916	1937
6500	2822	-	-	17502	1893

Al igual que en la ECD, los valores de EMW obtenidos no superan los puntos de pérdida, pero se encuentran por sobre los puntos de aporte. En comparación, tanto la curva de ECD como la curva de EMW presentan comportamientos similares.



Al aumentar el caudal a 280 gpm, las condiciones del fluido en el pozo varían levemente, tal como se describe en los “Parámetros de diseño”. A continuación, se obtienen los siguientes resultados de ECD y BHCP, donde se observan los cambios de contrapresión y densidad aplicados para superar los puntos de aporte y la proximidad a la curva de presión poral:

$MD_{(metros)}$	$TVD_{(metros)}$	$\rho_{(g/l)}$	$SBP_{(metros)}$	$BHCP_{(g/l)}$	$ECD_{(g/l)}$
0.00	0.00	1680	-	-	-
1868	1868	1680	70	5113	1924
2389	2361	1680	150	6438	1894
2670	2629	1750	410	7634	2010
3090	2709	1750	410	8679	1975
3990	2735	1780	300	10979	1935
5640	2822	1780	440	15295	1907
6500	2822	1780	440	17472	1890

De igual manera, a la profundidad de los puntos de aporte y pérdida:

$MD_{(metros)}$	$TVD_{(metros)}$	$\rho_{perd.}(g/l)$	$\rho_{ap.}(g/l)$	$BHCP_{(g/l)}$	$ECD_{(g/l)}$
1868	1868	-	-	5113	1924
1979	1977	1942	-	5379	1910
2240	2228	1954	-	6001	1884
2389	2361	1998	-	6438	1894
2492	2450	-	1883	6684	1885
2802	2681	-	1984	7962	1998
3090	2709	-	1879	8679	1975
3444	2736	-	1900	9560	1952
4066	2736	-	1930	11171	1932
4688	2771	-	1912	12746	1912
6500	2822	-	-	17472	1890

De igual manera que en el caso anterior, ahora con un caudal de 280 gpm, la ECD supera los aportes con los cambios de SBP y densidad aplicados.

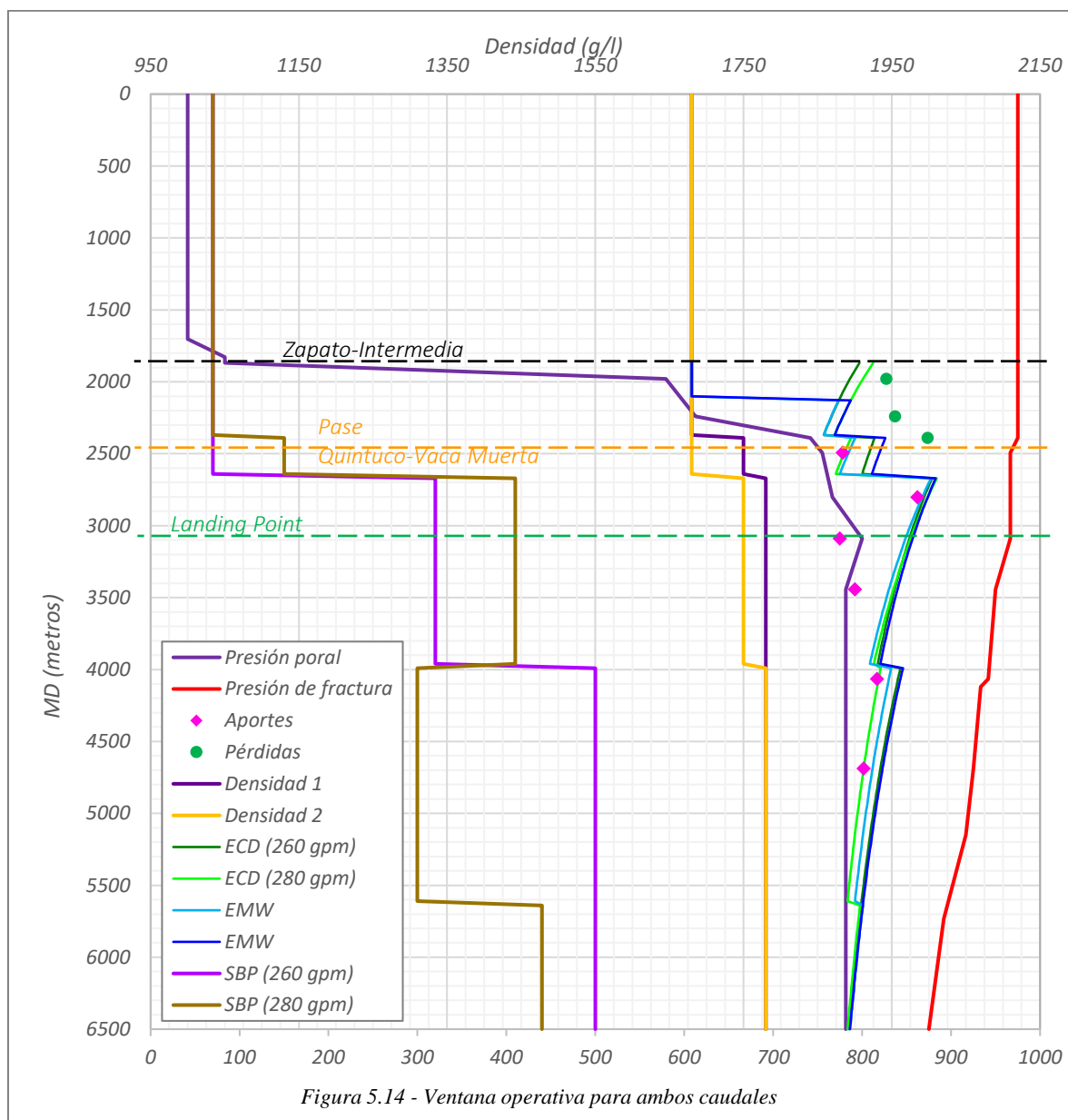
Para la construcción de la EMW, se mantienen las mismas profundidades donde se aplican las variaciones de densidades, realizando modificaciones en los cambios de contrapresión.

$MD_{(metros)}$	$TVD_{(metros)}$	$\rho_{(g/l)}$	$SBP_{(metros)}$	$BHP_{(g/l)}$	$EMW_{(g/l)}$
0.00	0.00	1680	-	-	-
1868	1868	1680	0.00	4463	1680
2130	2129	1680	600	5688	1878
2389	2361	1680	750	6458	1900
2670	2629	1750	960	7604	2002
3090	2709	1750	960	8649	1968
3990	2735	1780	960	11059	1949
5640	2822	1780	440	15325	1910
6500	2822	1780	440	17502	1893

En los puntos de aporte y pérdida:

$MD_{(metros)}$	$TVD_{(metros)}$	$\rho_{perd.}(g/l)$	$\rho_{ap.}(g/l)$	$BHP_{(g/l)}$	$EMW_{(g/l)}$
1868	1868	-	-	4463	1680
1979	1977	1942	-	4729	1680
2240	2228	1954	-	5951	1868
2389	2361	1998	-	6458	1900
2492	2450	-	1883	6704	1891
2802	2681	-	1984	7932	1990
3090	2709	-	1879	8649	1968
3444	2736	-	1900	9530	1946
4066	2736	-	1930	11251	1946
4688	2771	-	1912	12826	1924
6500	2822	-	-	17502	1893

Al comparar ambas condiciones, se obtienen las siguientes curvas comparativas:



Se observa que, al comparar ambos casos, la contrapresión es menor al aumentar el caudal, además, las densidades que se utilizan en el perfil de densidades son las mismas en ambos casos, con la diferencia que los cambios se aplican a diferentes profundidades. Esto se debe a las fricciones que se generan en la trayectoria del pozo.

El uso de un mayor o menor caudal se encuentra en las condiciones de la zona de interés y de la herramienta direccional que se utilice. Como la formación Quintuco esta fracturado naturalmente, es preferible utilizar mayor caudal debido a que se induce menos la pérdida en esta zona por el uso de una menor contrapresión, pero este caudal puede afectar el uso y la dirección de la herramienta direccional, generando desvíos en la trayectoria del pozo.

5.2.6 Segunda estrategia

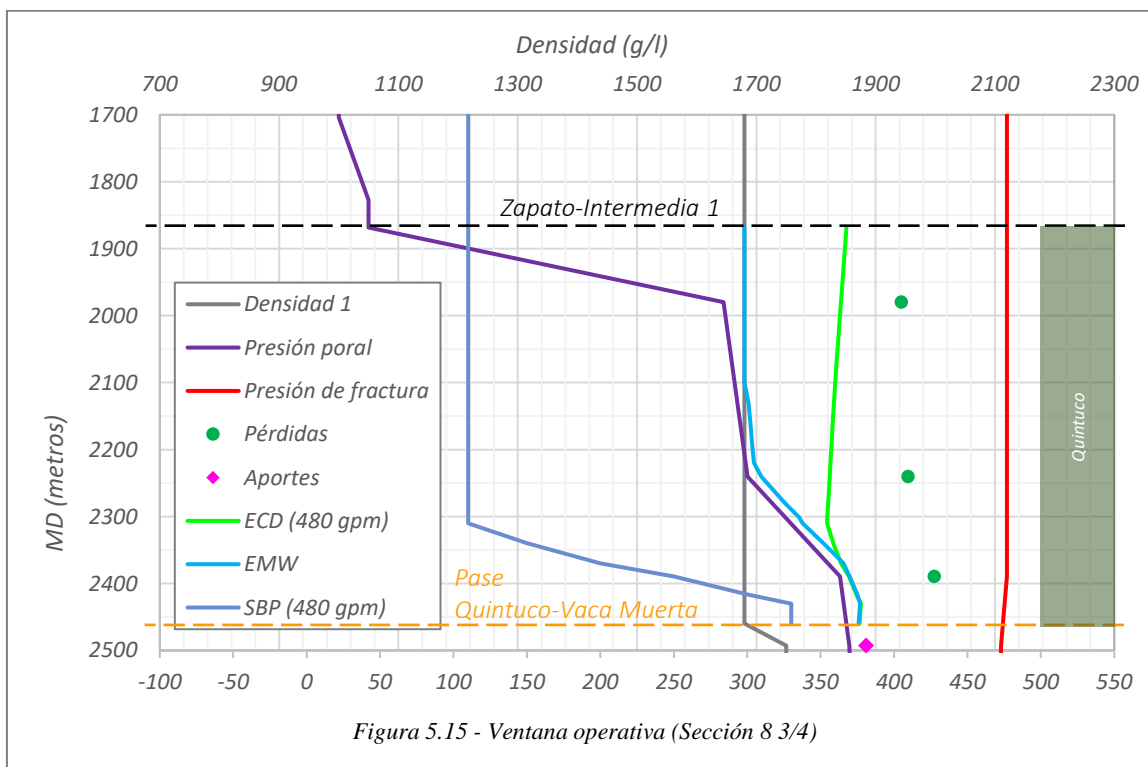
Esta estrategia consiste en perforar en dos etapas con dos tipos de secciones para construir un pozo robusto.

La primera etapa se perfora con sección 8 ¾ para poder colocar una segunda intermedia, cementar y aislar toda la zona de pérdida desde el zapato de la intermedia 1 hasta el pase entre la Fm. Quintuco y Vaca Muerta, sin entrar a la zona de influjos con las siguientes condiciones:

Para un caudal de 480 gpm:

Pérdidas en superficie	$\Delta P_{fricc.sup}$	75 psi
Pérdidas en el espacio anular	$\Delta P_{fricc.anular}$	270 psi
Contrapresión dinámica inicial	SBP ₁	110 psi
Contrapresión estática inicial	SBP ₁	0 psi

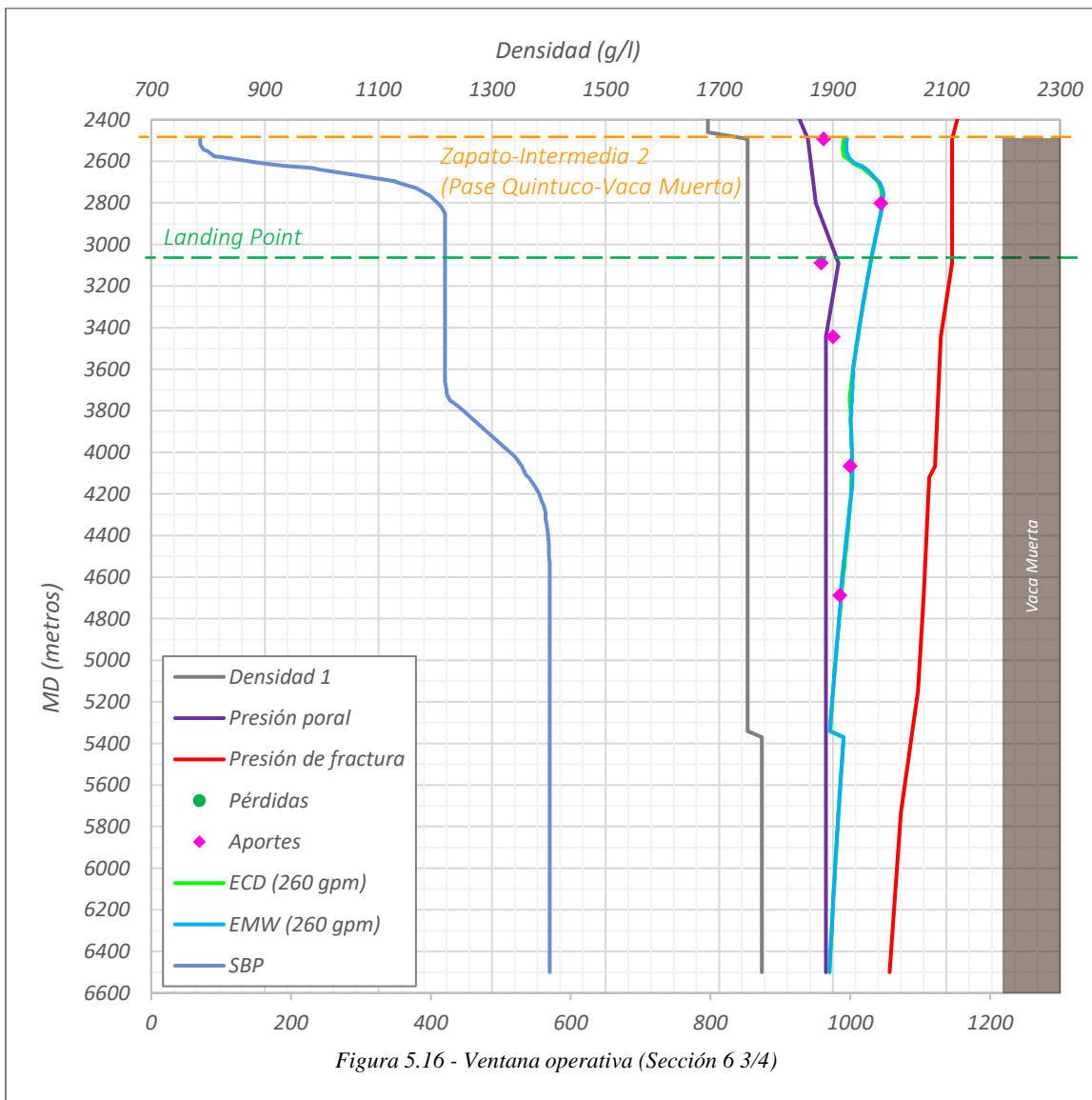
Para ilustrar en mejor medida las equivalentes como una perforación *Near Balance* característica de la técnica MPD, se decide ajustar las contrapresiones en la sección a perforar de tal manera que se alejen lo más posible de la zona de pérdida, manteniendo una densidad constante.



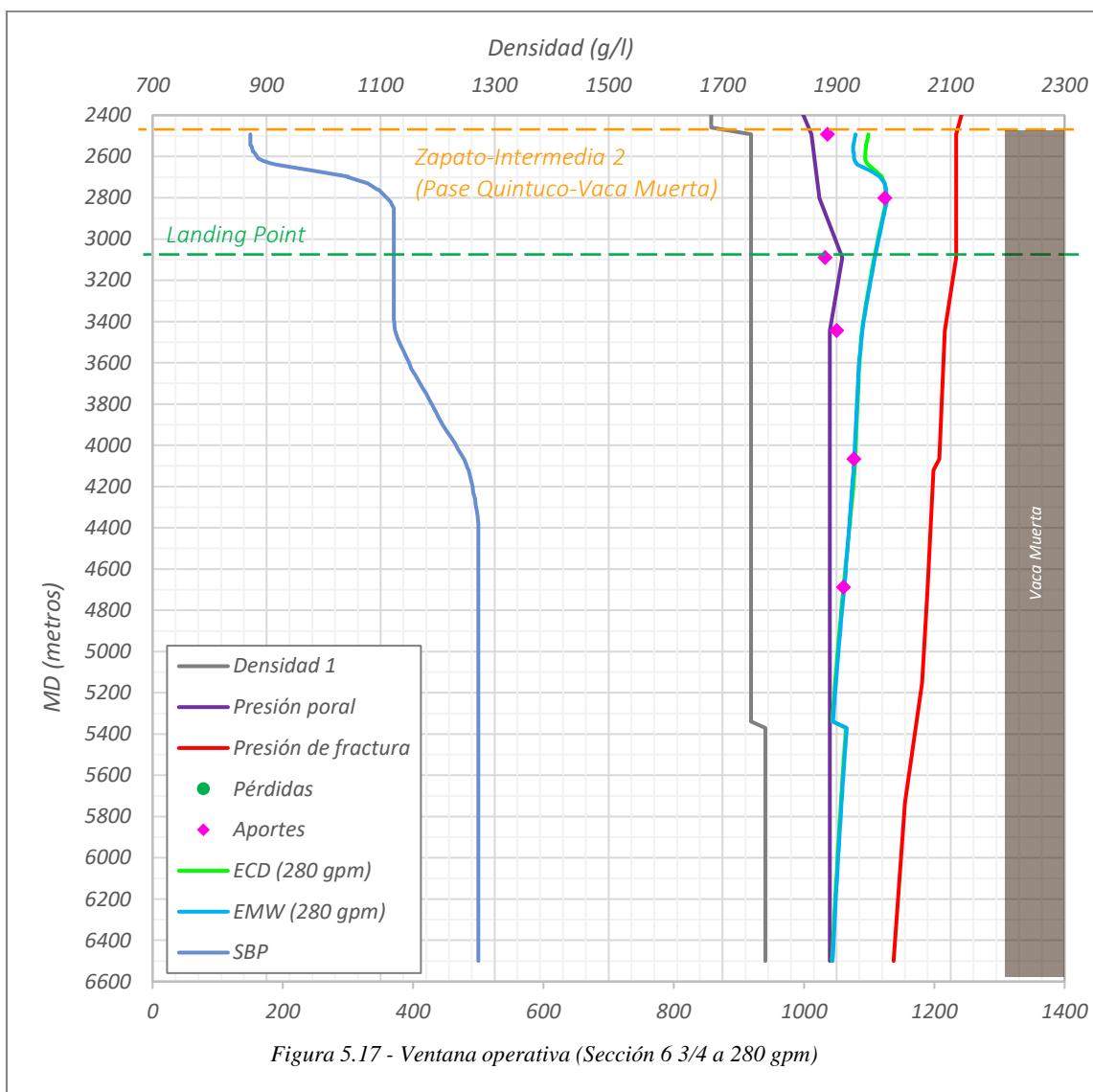
(Nota: En la primera estrategia, no se realizaron muchos cambios de contrapresión para ajustar las curvas equivalentes debido a que se buscó representar la tendencia de las curvas según las variables que afectan a las ecuaciones de las equivalentes).

Para la segunda etapa, se continúa perforando con sección 6 3/4, con las mismas condiciones que en la primera estrategia, a 260 y 280 gpm. Con la diferencia que ahora se aplica la técnica MPD a partir del zapato de la intermedia 2. En ambos casos, las equivalentes tienen comportamientos similares, con distintos perfiles de contrapresión, pero manteniendo el mismo perfil de densidad.

Para un caudal de 260 gpm:



Para un caudal de 280 gpm:

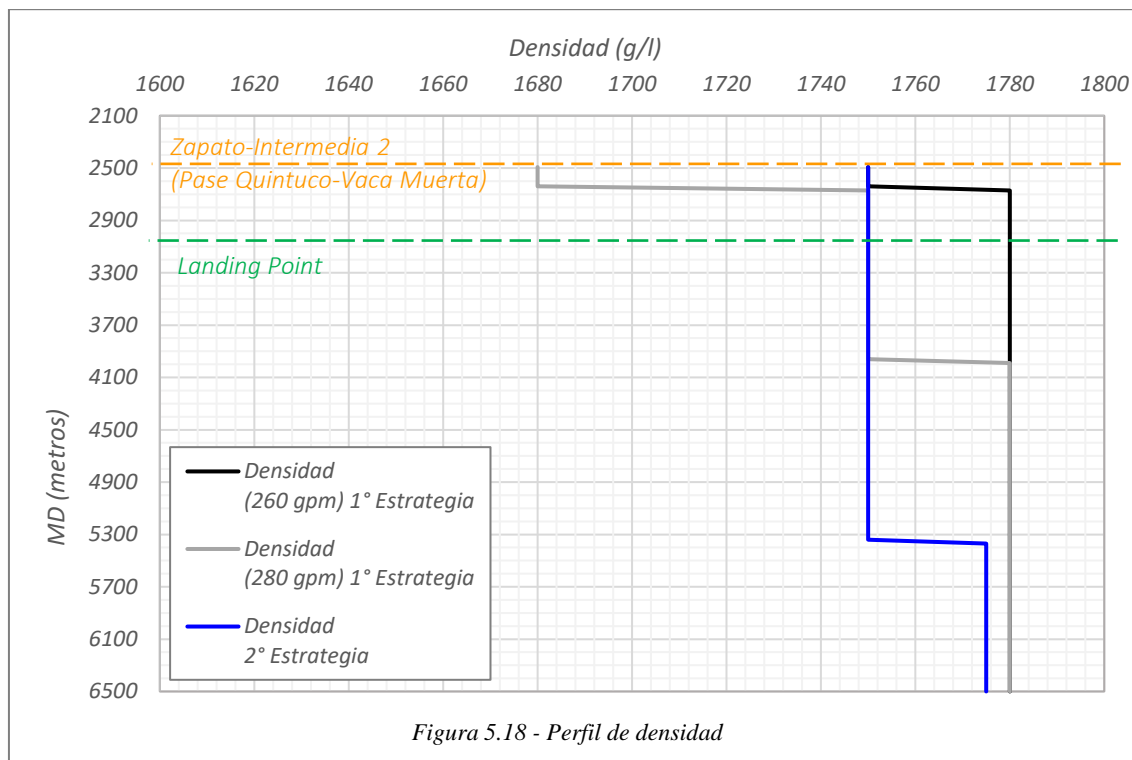


Tanto en condiciones estáticas como dinámicas, las curvas equivalentes ECD y EMW serán similares al punto de superponerse. Esto se debe al hecho de que, en ambos casos, se busca evitar los puntos de aporte y superar el límite de presión de poro. La diferencia se encuentra en los valores de contrapresión que se aplican. En condiciones dinámicas, la presencia de pérdidas por fricción altera las contrapresiones que se necesitan para compensar este efecto.

Al comparar los perfiles de contrapresión de la primera y segunda estrategia la tendencia se mantiene, es decir, a mayor caudal menores serán las contrapresiones necesarias que se aplicarán producto del aumento en las pérdidas de carga. Esto solo refuerza el hecho de que el efecto que genera un mayor caudal es independiente de la estrategia a implementar.

Además, se requieren menores contrapresiones al realizar la perforación en etapas como en la segunda estrategia.

Al comparar los perfiles de densidades:



Se observa que, al implementar una perforación en etapas, los requerimientos de densificar son menores, evitando los puntos de aportes únicamente con contrapresión y densificando a mayores profundidades de ser necesario.

Además, en condiciones de menor caudal, los cambios de densidad se realizan a profundidades más someras producto de la reducción en las fricciones. El aumento del caudal aumenta las pérdidas de carga que mejora las condiciones operativas al poder utilizar densidades y contrapresiones menores tal como se observa en los gráficos correspondientes.

5.2.7 Análisis cualitativo

Este trabajo aporta una comprensión sobre el control de densidades en presencia del fenómeno de flujo cruzado en formaciones geológicas como Quintuco y Vaca Muerta que se relaciona con la planificación y ejecución de perforaciones más eficientes.

También resalta la necesidad de calcular y analizar las densidades equivalentes involucradas para asegurar la estabilidad del pozo, un punto importante para evitar problemas de ahogamiento y aportes de fluidos relacionados con la optimización de las cantidades de lodo.

En base al desarrollo de este trabajo, las dos estrategias permiten el control de las presiones involucradas en el pozo para llegar a la profundidad objetivo. La diferencia se encuentra en la configuración inicial de cada una.

La primera estrategia se ajusta a límites preestablecidos de contrapresión y permite navegar dentro de los límites de la ventana operativa con una densidad más baja inicialmente; esto se relaciona con mayores velocidades de perforación. Pero esto solo beneficia a la primera sección del pozo, hasta el pase de Quintuco y Vaca Muerta, donde es necesario densificar para ajustar la densidad equivalente.

La ventaja de la utilización de dos secciones intermedias para aislar la zona problemática es que permite mejorar la estabilidad del pozo, debido a que se requieren menores cambios de densidades, relacionado con menores tiempos operativos debido a la recirculación del lodo. Además, el análisis de la reducción de contrapresiones asociadas a un aumento en el caudal del lodo optimiza la construcción del pozo y mejora las condiciones operativas en superficie.

La implementación de alguna de estas estrategias está relacionada con la viabilidad económica de la perforación y dependerá de un análisis económico según las necesidades que se tengan de optimizar la perforación y del manejo de condiciones de flujo cruzado. El uso de una técnica como MPD para mejorar la eficiencia puede tener un impacto significativo en los costos operativos y la rentabilidad del proyecto. Sin embargo, en ausencia de información financiera específica sobre los costos de operación, equipos y personal, este trabajo en particular se centra solo en aspectos técnicos y operativos.

5.2.8 Conclusiones

Al comparar ambas estrategias para las condiciones planteadas se concluye que:

Los aumentos de densidad se generan con la adición de materiales o productos químicos que elevan los costos de la operación, a diferencia del uso del equipo MPD donde las variaciones de las equivalentes se generan con cambios de contrapresión. Esto permite reducir los costos operativos y evitar tiempos por cambios de circulación de los cambios de lodo.

El uso de un perfil de densidades en el primer trayecto del pozo permite desviar el margen de contrapresión para utilizarlo en profundidades mayores. De no ser así, se llegaría a límite de contrapresión rápidamente en profundidades someras, teniendo que controlar el pozo con cambios de densidad. Esto limita el control de pozo, ya que las variaciones de densidad requieren mayores tiempos de circulación. La contrapresión permite un control de forma más rápida con el choke MPD.

Es conveniente utilizar un perfil de contrapresiones de manera gradual y no realizar cambios bruscos de presión ya que las formaciones se verán afectadas por este efecto, especialmente aquellas con características particulares como la Fm. Quintuco y su sistema de fracturas naturales que son altamente susceptibles a daños por este tipo de variaciones.

El uso de lodos más livianos permite aumentar la tasa de penetración producto de la reducción de las fricciones, además de mejorar la remoción de los recortes y el enfriamiento de la herramienta debido a la menor viscosidad que poseen, lo que aumenta la vida útil del BHA.

La perforación en etapas permite disminuir en mayor medida los cambios de densidad y reducir las contrapresiones necesarias para evitar los puntos de aporte, aislando zonas de pérdida someras.

Además, esto permite aislar zonas problemáticas para poder navegar dentro de la ventana con una técnica *Near Balance* lo más próximo a la presión de poro evitando los aportes, pero la estrategia a implementar dependerá de las condiciones particulares del pozo.

Otra alternativa en vez de utilizar una segunda intermedia, es utilizar un liner para aislar la primera etapa, en la zona de pérdida en la Fm. Quintuco. Este tipo de tubería, a diferencia de un casing, posee paredes más delgadas debido a que tiene un mayor diámetro interno, manteniendo el mismo diámetro externo. Esto permite reducir las fricciones internas por

directa facilitando su instalación y reduciendo el uso de reductores de fricción. Sus paredes delgadas le otorgan una menor resistencia a los esfuerzos, pero según el caso puede ser de utilidad cuando las condiciones del pozo lo permitan^{IV}.

5.3 Referencias del texto

^I Ham Macosay et al. (2022).

^{II} Roldan V. (2020).

^{III} Enilari et al. (2009).

^{IV} Matthijs Ruoff et al. (2019).

6. Referencias bibliográficas

6.1 Capítulo 3

6.1.1 Libros, artículos, revistas

- ❖ Casadio Silvio Alberto et al. (2015). Geología de la Cuenca Neuquina.
- ❖ Fantín et al. (2014). Caracterización de Fracturas Naturales.
- ❖ Grosso et al. (2022). Influjos de hidrocarburo en los pozos de la formación Quintuco del yacimiento Loma la Lata, cuenca Neuquina.
- ❖ Gutiérrez Schmidt et al. (2014). El Shale de la formación Vaca Muerta.
- ❖ Howell et al. (2005). The Neuquén Basin: an overview.
- ❖ López Anadón, E. (2017). Caracterización geológica y puesta en valor de la Fm. Quintuco. Revista Petrotecnia, abril.

6.1.2 Páginas Web

- ❖ Fundación YPF: Mapa de cuencas sedimentarias

https://energiasdemipais.educ.ar/edmp_recurso/mapa-de-cuencas-sedimentarias/

6.2 Capítulo 4

6.2.1 Libros, revistas, artículos

- ❖ Alvarado et al. (2024). Managed Pressure Cementing in Deepwater Environment, Evolving from Saving the Well with Perfectly Executed Challenging Primary Cementing Operations to Bring Back Wells to Productive Life with State-Of-The-Art Remedial Cementing Jobs on Controlled Pressure Manner. SPE/IADC
- ❖ Benedetti et al. (2013). The Application of UBD and MPD Techniques to Solve Challenges and Optimize Drilling in the Quintuco and Vaca Muerta Formations in the Neuquén Basin. SPE/IADC.
- ❖ López Anadón, E. (2011). Sistema MPD o como mantener el pozo bajo control sin fracturar las formaciones durante la perforación. Revista Petrotecnia, Octubre.
- ❖ López Anadón, E. (2015). La perforación. Revista Petrotecnia, diciembre.
- ❖ Siddiqi et al. (2016). Successful Managed Pressure Cementing With Hydraulic Simulations Verification in a Narrow Pore-Frac Pressure Window Using Managed Pressure Drilling in Saudi Arabia. SPE.

6.2.2 Páginas Web

- ❖ <https://beyondmpd.com/mpd-101/>
- ❖ <https://smartmeasurement.com/es/medidores-de-flujo-coriolis/>
- ❖ Imagen de RCD:
<https://onepetro.org/>
- ❖ Imagen de torre de quema:
<https://stock.adobe.com/ar>
- ❖ Imágenes de válvulas:
<https://www.dombor.com/es/valvulas-en-la-industria-del-petroleo-y-el-gas-la-guia-definitiva/>
- ❖ Manual de válvulas
<http://pilsa.mx>

6.3 Capítulo 5

6.3.1 Libros, revistas, artículos

- ❖ Enilari et al. (2009). Development and Evaluation of Various Drilling Fluids for Slim Hole Wells. *Journal of Canadian Petroleum Technology*.
- ❖ Ham Macosay et al. (2022). Identificación y cuantificación de flujo cruzado mediante análisis de caídas de presión (Análisis nodal®) y balance de materia.
- ❖ Hua Zhang et al. (2023). Successful Managed Pressure Drilling Application in a Challenging Well with Crossflow in Unconventional Field. *SPE*.
- ❖ Lombardo E. (2022). Caracterización de fracturas naturales mediante atributos sísmicos. 11° Congreso de exploración y desarrollo de Hidrocarburos.
- ❖ Matthijs Ruoff et al. (2019). Combination of Drilling with Liner, Managed Pressure Drilling and Continuous Circulation Methods to Mitigate a High Pressure Interval in the Zechtein Group in the North Sea. *SPE & IADC*.
- ❖ Rodríguez, M. (2011). Presencia de flujo cruzado en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC.
- ❖ Roldan V. (2020). Métodos Para Controlar Pozos. Capítulo 7.