

Aplicativo Móvil para Estimar la Ventana Segura de Lodo Durante la Perforación de un Pozo
Incluyendo Aspectos Geomecánicos

Carlos Fernando Bejarano Bobadilla Y Olfer Eduardo Orduz
Rodríguez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero de Petróleos

Director

M. Sc. Diego Armando Vargas Silva

Codirector

PhD. Zuly Himelda Calderón Carrillo

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería de Petróleos
Bucaramanga

2021

Agradecimientos

A Dios por la vida, por la familia, por las amistades, por guiar mis pasos a donde quiera que vaya y por darme la oportunidad de estudiar.

A mi familia por siempre brindar ese apoyo incondicional en especial a mis padres Fermín Orduz y Clema Rodríguez por sus enseñanzas, por el ejemplo y por el sacrificio tan grande que realizaron para que yo pudiese culminar este gran logro.

A mis hermanos Oscar y Ferly por estar ahí en los momentos difíciles, les dedico este logro para que siempre lo recuerden como sinónimo de que no hay que renunciar a los sueños.

Al personal docente que en el transcurso de mi formación profesional lograron impartirme sus conocimientos de manera acertada.

A mis compañeros de estudio que siempre estuvieron a mi lado durante mi carrera profesional.

A las personas que nos ayudaron a realizar este proyecto de grado, en especial al ingeniero Diego Vargas por compartir sus conocimientos y guiarnos durante el desarrollo del proyecto.

Olfer Orduz.

Agradecimientos

A Dios, por darme la vida y llenarme de tan grandiosas oportunidades, así como por brindarme la sabiduría y el entendimiento de escoger y haber culminado esta hermosa carrera.

A mis padres por la crianza y la excelente educación brindada, por ser ellos el principal motor y motivación para llevar esta carrera adelante.

A mis hermanos, pues sin ellos nada de esto hubiese sido posible, por su apoyo incondicional en todos los momentos de mi vida.

A mi segundo y amado hogar “La familia Ávila Bobadilla” por abrirme las puertas de su hogar y acogerme de la forma en que lo hicieron. Sin ustedes nada de esto hubiese sido posible.

A mis amigos y compañeros que se cruzaron a lo largo de mi vida universitaria, pues cada uno de ellos aportó algo muy importante para mi vida.

A la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Ingeniería de Petróleos y todos los docentes que hicieron parte de esta formación académica, personal y profesional.

A todos los que hicieron que este proyecto fuese posible, en especial a mi compañero de tesis Oifer y nuestro director M. Sc. Diego Vargas por su apoyo incondicional.

Y finalmente, a mis demás amigos y familiares que hicieron que esto fuese posible, infinitas gracias, nunca tendré como pagarles por todo.

Carlos Bejarano

Tabla de Contenido

Introducción	14
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo General	16
1.2 Objetivos Específicos	16
2. Conceptos Generales	17
2.1 Geomecánica	17
2.2 Registros de Pozo	17
2.2.1 Registro Gamma Ray	18
2.2.2 Registro Sonico	19
2.2.3 Registro de Densidad	20
2.3 Esfuerzos In Situ	21
2.4 Propiedades Mecánicas de la Roca	22
2.4.1 Modulo de Young	23
2.4.2 Relación de Poisson.	24
2.4.3 Angulo de fricción	25
2.4.4 Fuerza de cohesión	25
2.4.5 Circulo de Mohr	26
2.5 Mecanismos de Falla	27
2.5.1 Falla por tensión	28
2.5.2 Fallas por cizalladura.	28
2.6 Estabilidad e Inestabilidad de Pozo	28
3. Modelo Geomecánico 1D	29
3.1 Presión de poro	31
3.1.1 Método de Hottman y Johnson “1965”	33
3.1.2 Método exponente “d” “1966”	35
3.1.3 Método de Eaton “1975”	37
3.1.4 Método de Bowers “1995”	38

3.1.5 Modelo de Terzaghi	39
3.1.6 Método de Doyen “2004”	40
3.1.7 Método de Dutta “2002”	40
3.1.8 Mecanismos de predicción de la presión de poro durante la exploración	41
3.2 Esfuerzos.....	41
3.2.1 Esfuerzo de sobrecarga (σ_v).	44
3.2.2 Esfuerzos horizontales.....	45
3.3 Presión de fractura.....	50
3.4 Presión de colapso.....	51
4. Metodología para el desarrollo del modelo geomecánico 1d.....	52
4.1 Auditoria de datos	53
4.2 Esfuerzo vertical	54
4.3 Estimación de la presión de poro.....	54
4.3.1 Estimación de la presión de poro a partir del método de Eaton (1975).....	54
4.3.2 Estimación de la presión de poro a partir de la porosidad.....	55
4.3.3 Estimación de la presión de poro a partir de un registro sísmico sintético.	56
4.4 Propiedades mecánicas de la roca	57
4.4.1. Relación de Poisson	57
4.4.2 Cohesión	57
4.4.3. Ángulo de Fricción Interna.....	58
4.4.4. Construcción del círculo de Mohr.	58
4.5 Estimación del esfuerzo horizontal mínimo	60
4.6 Estimación del esfuerzo horizontal máximo.....	61
4.7 Estimación de la presión de fractura.....	61
4.8 Estimación de la presión de colapso.....	62
4.9 Ventana operacional de lodo	63
5. Validación de la metodología.....	64

5.1 Auditoria de datos	64
5.2 Esfuerzo vertical	64
5.3 Presión de poro.....	65
5.3.1 Estimación de la presión de poro a partir del método de Eaton (1975).....	65
5.3.2 Estimación de la presión de poro a partir de la porosidad.....	66
5.3.3 Estimación de la presión de poro a partir de un registro sísmico sintético.	68
5.4 Propiedades mecánicas de la roca	70
5.4.1 Relación de Poisson	71
5.4.2 Ángulo de Fricción Interna.....	71
5.4.3 Cohesión	71
5.5 Estimación de esfuerzo horizontal mínimo (modelo Excel).	71
5.6 Estimación de esfuerzo horizontal máximo (modelo Excel).....	72
5.7 Estimación de la presión de fractura (modelo Excel).	74
5.8 Estimación de la presión de colapso (modelo Excel).....	77
5.9 Ventana operacional de lodo (modelo Excel).....	79
6. Validación de la metodología mediante datos y modelos establecidos en la literatura.	80
7. Definición de variables de entrada y salida del aplicativo móvil.....	84
8. Metodología para el desarrollo de la aplicación	85
8.1 Análisis.	86
8.2 Diseño	86
8.2.1. Definir el escenario.	86
8.2.2 Estructurar el software	87
8.3 Desarrollo.....	89
9. Funcionalidad, usabilidad y accesibilidad de la aplicación.....	92
9.1 Ingreso de datos	92
9.2 Pruebas y manual de funcionamiento	94

9.2.1 Comparación de resultados entre modelo Excel y aplicativo móvil. (Método Eaton).....	104
9.2.2 Comparación de resultados entre modelo Excel y aplicativo móvil. (Método Porosidad)	105
9.2.3 Comparación de resultados entre modelo Excel y aplicativo móvil. (Método Sonico sintético)	106
10. Conclusiones.....	107
11. Recomendaciones.....	108
Referencias Bibliográficas	109

Lista de Tablas

<i>Tabla 1. Valores de Poisson</i>	24
<i>Tabla 2. Densidad de los materiales y fluidos más comunes</i>	45
<i>Tabla 3. Mecanismos de cálculo para σ_H y σ_h</i>	46

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Esquema de una celda triaxial para ensayos geomecánicos</i>	23
Figura 2. <i>Relación de Poisson</i>	24
Figura 3. <i>Criterio de Mohr Coulomb</i>	27
Figura 4. <i>Esquema de gradientes de ovalización por ruptura y fracturamiento</i>	31
Figura 5. <i>Acción de los esfuerzos principales.</i>	43
Figura 6. <i>Breakouts y fracturas en el pozo.</i>	45
Figura 7. <i>Esfuerzo radial</i>	49
Figura 8. <i>Esfuerzo tangencial</i>	50
Figura 9. <i>Esfuerzo Axial.</i>	50
Figura 10. <i>Diagrama de flujo general para el desarrollo de un modelo geomecánico 1D.</i>	53
Figura 11. <i>Esfuerzos principales sobre un cuerpo</i>	59
Figura 12. <i>Círculo de Mohr.</i>	60
Figura 13. <i>Esquema de una ventana de lodo.</i>	63
Figura 14. <i>Curva esfuerzo vertical, modelo Excel.</i>	65
Figura 15. <i>Curva de presión de poro a partir del método Eaton, modelo Excel.</i>	66
Figura 16. <i>línea de tendencia de porosidad de compactación normal. modelo Excel.</i>	67
Figura 17. <i>Curva de presión de poro a partir del método de porosidad, modelo Excel.</i> ...68	
Figura 18. <i>Curva de presión de poro a partir de un registro sísmico sintético, modelo Excel.</i>	69

Figura 19. <i>Presión de poro a partir de los métodos seleccionados, modelo Excel.</i>	70
Figura 20. <i>Propiedades mecánicas de la roca, modelo Excel.</i>	72
Figura 21. <i>Curvas de esfuerzo horizontal mínimo, modelo Excel.</i>	73
Figura 22. <i>Curvas de esfuerzo horizontal máximo. Modelo Excel</i>	74
Figura 23. <i>Curvas de presión de fractura modelo Excel.</i>	75
Figura 24. <i>Presión de fractura a partir de los métodos seleccionados, modelo Excel.</i>	76
Figura 25. <i>Curvas de presión de colapso, modelo Excel.</i>	77
Figura 26. <i>Presión de colapso a partir de los métodos seleccionados, modelo Excel.</i>	78
Figura 27. <i>Ventana de lodo obtenida para cada método, modelo Excel.</i>	79
Figura 28. <i>Validación de la metodología con datos establecidos en la literatura (Método sónico)</i>	81
Figura 29. <i>Validación de la metodología con datos establecidos en la literatura (Método sónico sintético)</i>	82
Figura 30. <i>Validación de la metodología con datos establecidos en la literatura (Método Porosidad)</i>	83
Figura 31. <i>Variables de entrada y salida definidas por los autores.</i>	84
Figura 33 <i>Formato lenguaje B4A (L. Basic).</i>	88
Figura 34. <i>Ventana de código individual.</i>	89
Figura 35. <i>Ventana de código colectivo.</i>	90
Figura 36. <i>Ventana de diseño</i>	91
Figura 37. <i>Ingreso de datos para el método Sónico (Eaton.).</i>	93
Figura 38. <i>Ingreso de datos para el método porosidad.</i>	93
Figura 39. <i>Ingreso de datos para el método sónico sintético.</i>	94

Figura 40. <i>Interfaz de inicio de la aplicación.</i>	95
Figura 41. <i>Interfaz de inicio de la aplicación</i>	96
Figura 42. <i>Menú para la selección del método de cálculo.</i>	97
Figura 43. <i>Importación de datos.</i>	98
Figura 44. <i>Ajuste de línea de tendencia por parte del usuario.</i>	99
Figura 45. <i>interfaz de contextualización de parámetros.</i>	100
Figura 46. <i>interfaz de contextualización de parámetros.</i>	101
Figura 47. <i>Ventana operacional del lodo obtenida por el aplicativo VSL.</i>	102
Figura 48. <i>Datos finales obtenidos por el aplicativo VSL.</i>	103
Figura 49. <i>Ventana segura de lodo, modelo Excel vs aplicativo móvil. (Método Eaton).</i>	104
Figura 50. <i>Ventana segura de lodo modelo Excel vs aplicativo móvil. (Método Porosidad).</i>	105
Figura 51. <i>Ventana segura de lodo modelo Excel vs aplicativo móvil. (Método Sonico Sintético).</i>	106

Resumen

Título: Aplicativo móvil para estimar la ventana segura de lodo durante la perforación de un pozo incluyendo aspectos geomecánicos*

Autor: Carlos Fernando Bejarano Bobadilla, Olfer Eduardo Orduz rodríguez **

Palabras Clave: Aplicativo Móvil, Modelo Geomecánico, Ventana Operacional, Presión de Poro

Descripción: Como es bien sabido durante la perforación de pozos se pueden presentar diversos inconvenientes, que conllevan a la inestabilidad de este; debido a diferentes problemas como lo es un peso inadecuado del lodo que puede llegar a generar fracturas, que se podrían ver reflejadas en pérdidas de circulación o, por el contrario, que el lodo de perforación no pueda mantener la columna o permita influjos provenientes de la formación. De ahí la importancia de actuar con rapidez y eficiencia para diseñar y actualizar correctamente la ventana segura del lodo definida por las curvas de presión de fractura, presión de colapso y presión de poro, la cual brindara un balance entre los esfuerzos y la resistencia de la roca durante toda la perforación y de esta manera garantizar la integridad mecánica del pozo.

Debido a la falta de practicidad a la hora de enfrentarse a dichos problemas se tiene como alternativa el desarrollo de una aplicación móvil de fácil acceso y manipulación que brinde de manera rápida, eficaz y muy práctica el diseño y actualización de la ventana operacional del lodo de perforación para los diferentes escenarios que se puedan presentar durante la perforación de acuerdo con las propiedades de la roca de las formaciones a perforar, basados en datos geomecánicos. Para de esta manera incursionar en la industria con una aplicación móvil de este tipo que permita en cualquier escenario el desarrollo de una ventana segura del lodo, bajo aspectos geomecánicos y métodos previamente validados median valores reales de campo que permiten probar la calidad de los procesos desarrollados dentro del aplicativo, brindando al usuario la confiabilidad.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: M.Sc. Diego Armando Vargas Silva. Codirector: Ph. D. Zuly Himelda Calderón Carrillo

Abstract

Title: Mobile application to estimate the safe mud window while drilling a well, including geomechanical aspects*

Author: Carlos Fernando Bejarano Bobadilla, Olfier Eduardo Orduz rodríguez**

Key Words: Mobile Application, Geomechanical Model, Operational Window, Pore Pressure

Description: As is well known during the drilling of wells, various drawbacks can occur, which lead to its instability. Due to different problems such as an inadequate weight of the mud that can generate fractures, which could be reflected in lost circulation or, on the contrary, that the drilling mud cannot maintain the column or allows influences from the formation. Hence the importance of acting quickly and efficiently to correctly design and update the safe mud window defined by the fracture pressure, collapse pressure and pore pressure curves, which will provide a balance between the stresses and the resistance of the rock during the entire drilling and thus guarantee the mechanical integrity of the well.

Due to the lack of practicality when facing these problems, the alternative is the development of a mobile application with easy access and manipulation that provides in a fast, efficient and very practical way the design and update of the operational window of the sludge of drilling for the different scenarios that may arise during drilling according to the rock properties of the formations to be drilled, based on geomechanical data. In order to enter the industry with a mobile application of this type, which allows the development of a safe window of the mud in any scenario, under geomechanical aspects and previously validated methods, they measure real field values that allow testing the quality of the processes. developed within the application, providing the user with reliability.

** Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering, Petroleum Engineering School. Director: M.Sc. Diego Armando Vargas Silva. Codirector: Ph. D. Zuly Himelda Calderón Carrillo

Introducción

Es bien sabido que monitorear los recortes permite a los ingenieros de perforación tomar soluciones correctivas para controlar la inestabilidad del pozo durante la perforación. Desafortunadamente, la interpretación del volumen y las formas que presentan los recortes puede tardar mucho tiempo en llegar a superficie lo que conlleva a que la actualización de la ventana segura del lodo se genere demasiado tarde para solucionar el problema que se esté presentando y la inestabilidad del pozo puede volverse inmanejable. Además, la mayoría de los proyectos se perforan en áreas muy complejas debido a que los yacimientos convencionales se están agotando y el requerimiento energético ha impulsado a las empresas a explorar los no convencionales. Si transcurre demasiado tiempo después de que la inestabilidad del pozo comienza a ocurrir y la decisión de modificar la densidad del lodo se toma demasiado tarde, la situación final puede ser la tubería atascada, las operaciones de pesca e incluso la pérdida total del pozo. Comúnmente, la ventana de peso del lodo está diseñada usando presiones de poro y fractura como los límites inferior y superior de esta ventana, pero en formaciones tectónicamente activas esto no es suficiente para controlar las diferentes presiones a las que está sujeta la pared del pozo. Por esta razón, la geomecánica se ha convertido en una de las herramientas más útiles para identificar y reducir los riesgos con fines de perforación, por esto se quiere desarrollar una herramienta móvil que brinde características como lo son: Un acceso más rápido y sencillo sin necesidad de los datos de autenticación en cada acceso, una gran versatilidad en cuanto a su utilización o aplicación práctica, la atribución de funcionalidades específicas, mejora de la capacidad de conectividad y disponibilidad de servicios y productos, además que de que el dispositivo móvil podrá descargar los diferentes valores de la ventana calcula, lo que le brinda al usuario una disponibilidad completa

y detallada de los datos. Para de esta manera permitir al usuario cargar diferentes datos a la aplicación, y a partir de estos datos geomecánicos actualizar la ventana operacional de lodo segura cuantas veces sea necesario.

En el siguiente documento se tiene como objetivo explicar y argumentar de qué manera se realizó el aplicativo móvil en cuanto a términos de programación y principalmente en cuanto a términos de los diferentes métodos y teorías que se emplearon para la realización de los cálculos del modelo geomecánico para realización del modelo geomecánico. Partiendo de lo más básico como lo son los conceptos generales de la geomecánica, así como también una breve explicación de los diferentes modelos que hasta la actualidad se han desarrollado para calcular los diferentes parámetros utilizados en la construcción de una ventana segura del lodo, y finalmente hacer una explicación detallada de la metodología empleada para la realización de los diferentes métodos empleados en el presente proyecto de grado. Y finalmente una comparación de datos y resultados de la literatura, con los datos obtenidos al utilizar la aplicación desarrollada.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar aplicativo móvil para estimar la ventana segura del lodo durante la perforación de un pozo incluyendo aspectos geomecánicos.

1.2 Objetivos Específicos

Revisar las metodologías de construcción de modelos geomecánicos 1D planteadas en la industria y en investigaciones anteriores

Identificar las variables que se verán involucradas en la elaboración de una ventana segura de lodo.

Definir los datos de entrada, salida, formatos de variables, documentos etc. que tendrá la aplicación para la construcción de una ventana de lodo basados en conceptos geomecánicos.

Desarrollar una aplicación móvil mediante el uso de herramientas de programación el cual permita realizar una ventana segura de lodo.

Validar la aplicación mediante datos y modelos establecidos en la literatura.

2. Conceptos Generales

2.1 Geomecánica

Concepto definido etimológicamente como la mecánica de la tierra, por la unión de la palabra mecánica y el prefijo griego geo- que significa tierra; siendo este el estudio de la deformación de los sólidos, específicamente de las rocas, como respuesta a cambios de presión, temperatura y esfuerzos a los que se encuentra sometidos.

Según Cook la geomecánica es el estudio de cómo se deforman los suelos y las rocas, debido a que algunas veces fallan en respuesta a cambios de esfuerzos, presión, temperatura y otros parámetros ambientales. La geomecánica se divide en dos disciplinas importantes, la mecánica de suelos que trata el comportamiento del suelo desde pequeña escala a una escala mayor y “la mecánica de rocas concerniente a la respuesta de dichos esfuerzos con los campos de fuerzas en su ambiente físico.

2.2 Registros de Pozo

Los registros de pozo son herramientas geofísicas in situ que se basan en principios eléctricos, acústicos, nucleares y electromagnéticos, que son usadas con el fin de tener información de parámetros físicos y biológicos de la formación tales como: porosidad de la formación, saturación de fluidos formación, resistividad de las rocas, radioactividad de las rocas cantidad de petróleo móvil, descripción litológica, entre otras:

Es importante los registros para la construcción de un modelo geomecánico, debido a que este se basa en el análisis en conjunto de los perfiles generados por las herramientas de registro,

junto con datos de campo, sísmica, núcleos y entre otros, que permita conocer detalladamente el yacimiento para de esta forma perforar y explotar este de la manera más óptima y rentable.

En la actualidad existen una gran variedad de registros para el análisis y la interpretación de las formaciones en las cuales se puede identificar potencial de hidrocarburo, a continuación, se mostrarán los registros más relevantes en cuanto a geomecánica se trata haciendo un gran énfasis en los utilizados para nuestro caso que serán el registro Sónico el registro de Densidad.

2.2.1 Registro Gamma Ray

El registro de rayos Gamma es una herramienta que se utiliza para la medición de la radioactividad de las formaciones, estos resultan particularmente útiles porque las lutitas y las areniscas habitualmente poseen caracteres únicos diferentes de rayos gamma que pueden ser correlacionados fácilmente entre pozos. La emisión de rayos gamma se produce por tres series radioactivas que son Potasio (K40), Uranio y Torio. En las formaciones sedimentarias el registro normalmente refleja el contenido de arcilla de las formaciones porque los elementos radioactivos tienden a concentrarse en las arcillas y las lutitas, las lecturas más típicas son del orden de 80-300 API.

Las formaciones limpias generalmente tienen un nivel muy bajo de radioactividad, con valores menores a 30 API, a menos que contaminantes radiactivos como lo son las cenizas volcánicas o residuos de granito estén presentes o que las aguas de formación contengan sales radioactivas disueltas. Valores altos de Gamma Ray representan lutitas o arcillas a esa profundidad, mientras que valores bajos indican arenas limpias, donde potencialmente se podrían encontrar hidrocarburos, de modo que la herramienta permite definir los estratos de interés y aquellos donde podría existir problemas operacionales relacionados con las lutitas durante la perforación.

El registro Gamma Ray puede ser corrido en un pozo entubado lo que lo hace muy útil como una curva de correlaciones de operaciones de cañoneo. Con frecuencia se usa para complementar el registro del SP y como sustituto para la curva SP en pozos perforados con lodo salado, aire o lodos base aceite. Otros tipos de aplicaciones del registro Gamma Ray pueden ser:

- Identificación de la litología
- Definir y evaluar los minerales radioactivos
- Estudiar los ambientes deposicionales
- Evaluar el contenido de arcilla
- Detectar capas permeables
- Correlación con registros a pozo revestido.

2.2.2 Registro Sónico

Un tipo de registro acústico que muestra el tiempo de viaje de las ondas P versus la profundidad. Los registros sínicos se registran generalmente mediante la extracción del pozo de una herramienta operada con cable. La herramienta emite una onda acústica que se propaga desde la fuente hasta la formación y de regreso hasta un receptor.

Los registros sínicos son utilizados para la evaluación de las formaciones, estos pueden ser definidos como el reporte de uno o más parámetros del viaje de las ondas acústicas para la estimación de propiedades fundamentales de las rocas como porosidad, saturación y entre otras adicionalmente la medida de la velocidad obtenida a partir de estos puede ser utilizada para el cálculo de propiedades mecánicas de las rocas, por ejemplo, la resistencia compresiva no confinada y la relación de Poisson.

El perfil sínico y el tiempo de tránsito de una onda de compresión (onda P), y una onda de cizalla (onda SO) a través de la formación. El tiempo de tránsito del intervalo Δt es el recíproco de

la velocidad de la formación y se expresa en microsegundos por pie ($\mu\text{sec}/\text{ft}$) para evitar pequeñas fracciones decimales.

El registro sísmico es usado para determinar la porosidad de la formación midiendo el tiempo de tránsito de la onda compresional, que viaja a través de la formación en un eje axial. Los valores registrados dependen de la litología y la porosidad, para el caso de las arcillas estas tienen altos tiempos de tránsito debido a sus propiedades. Este registro tiene aplicaciones importantes, entre ellas la predicción de la presión de poro por medio de correlaciones en función del esfuerzo efectivo, propiedades mecánicas de la roca y detecta zonas de gas.

2.2.2.1 Ondas sísmicas medidas por el registro sísmico. Las ondas medidas por el registro sísmico son las compresiones (ondas P) y las ondas de cizallamiento (ondas S). las ondas P también llamadas de modo compresional normal u ondas primaria. Son un tipo onda sísmica rápida con velocidades entre 4-7 km/s proveniente de una fuente monopolar, que viaja a través de la pared del pozo. La dirección de la propagación de la onda es igual a la dirección de desplazamiento del material rocoso; la amplitud de la onda varía con la proporción de Poisson de la mezcla roca-fluido. Por otra parte, las ondas S también llamadas ondas transversales, rotacionales, secundarias. Se generan por la conversión de la onda compresional cuando se refracta en la cara del pozo. Se convierte nuevamente a una onda P cuando se refleja a través del pozo, para alcanzar el detector de la herramienta. La dirección de propagación de la onda es perpendicular al desplazamiento del material rocoso. presentan velocidades entre 2-3 km/s.

2.2.3 Registro de Densidad

El registro de densidad o registro Density es una técnica utilizada principalmente para determinar la porosidad de la formación. La medición de la densidad de la formación, también se

aplica en la identificación de minerales, detección de gas, evaluación de arenas arcillosas y litologías complejas en la determinación de las arcillas petrolíferas.

Una fuente radiactiva, que para este caso será una muestra que emite radiación Gamma, colocada en una almohadilla es aplicada contra la pared del pozo, esta fuente emite hacia la formación rayos Gamma, los cuales interaccionan con los electrones de la formación según el efecto Compton, según el cual los rayos son dispersados por los núcleos de la formación de dónde se obtiene rayos Gamma de Compton, que es una radiación secundaria producida en los átomos de la formación y que se origina porque la formación sede energía a los átomos dejándolos en estado excitado. Estos últimos rayos son detectados y evaluados con una medida de la densidad de la formación, ya que el número de rayos Gamma Compton está directamente relacionado con el número de electrones en la formación.

2.3 Esfuerzos In Situ

Sobre los estratos de subsuelo actúan tres esfuerzos principales: un esfuerzo vertical un esfuerzo horizontal máximo y un fuerza horizontal mínimo, estos varían en su origen, magnitud, y dirección. Los esfuerzos locales verticales son originados fundamentalmente por el peso de los estratos suprayacentes que generan una sobrecarga sobre los estratos inferiores.

Los esfuerzos horizontales poseen además un componente gravitacional que puede ser intensificado por la tectónica, los efectos térmicos y la estructura geológica, no obstante, otros factores tales como la litología, la presión de poro y la temperatura, inciden en la magnitud y en la orientación de los esfuerzos, además del grado en que la roca responde a los esfuerzos. El esfuerzo es una medida de la fuerza que actúa sobre un área determinada, está compuesto por componentes normales y componentes de corte.

El esfuerzo normal (σ): Es el que se aplica en forma perpendicular a un plano o superficie de la roca.

El esfuerzo de corte (τ): se aplica largo de la cara del plano. Matemáticamente, existe una orientación de ejes ortogonales que define las direcciones de los esfuerzos para los cuales los esfuerzos de corte son nulos. Esa orientación define los ejes de esfuerzos principales, en los que los esfuerzos aplicados son estrictamente normales.

2.4 Propiedades Mecánicas de la Roca

La mecánica de rocas es la ciencia teórica y aplicada el comportamiento mecánico de las rocas; esta rama de la mecánica está interesada en la respuesta de las rocas a los campos de esfuerzo de su ambiente físico (Judd, 1964). La mayoría de los materiales son capaces de resistir y recuperarse de deformaciones producidas por los esfuerzos, cuando esté no supera el límite de elasticidad del material, a esta capacidad se le conoce como elasticidad. La elasticidad puede considerarse como el aspecto fundamental de la mecánica de rocas.

Se entiende por estado de esfuerzos en sitio a la condición inicial o el estado de esfuerzos en equilibrio de la roca. Este estado de esfuerzos de la roca puede verse afectado ante la aplicación de cargas externas sobre ella, alterando las propiedades mecánicas que conservaban originalmente su estabilidad. Existen muchas propiedades que describen el comportamiento de la roca, pero existen unas específicas que son de interés para la comprensión de este trabajo. A continuación, se tratarán aquellas propiedades, relacionadas con las actividades cerca del hoyo, las cuales involucran inestabilidad asociada con la perforación del mismo y producción de arenas.

2.4.1 Modulo de Young

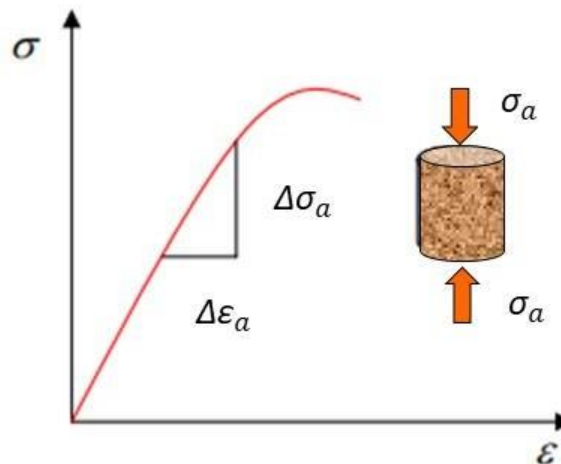
Antes de alcanzar la resistencia pico de un material rocoso, la curva esfuerzo-deformación presenta un comportamiento lineal o elástico para la mayor parte de las rocas. En el campo elástico, la deformación es proporcional al esfuerzo y se cumple la relación:

$$\varepsilon_{ax} = \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

La expresión anterior (Ecuación 1) es conocida como la ley de Hooke, donde E es la constante de proporcionalidad conocida como módulo de Young o módulo de elasticidad y ε_{ax} es la deformación axial (en la misma dirección que la fuerza aplicada) (Figura 1).

Figura 1.

Esquema de una celda triaxial para ensayos geomecánicos



Tomado de Santamaria R. Jorge R. Siem s. Criseida. (2006). Estimación de la ventana operacional de presión de lodo a partir de registros de pozo, para las formaciones del campo socororo, edo. anzoátegui. (Tesis de pregrado). Universidad Central de Venezuela.p.41

El módulo de Young es una medida de la rigidez o de la resistencia de una muestra de roca al ser comprimida por un esfuerzo uniaxial.

La ley de Hooke no es válida una vez superado el límite de elasticidad del material debido al esfuerzo aplicado en él.

2.4.2 Relación de Poisson.

La relación de Poisson ν es una medida de la extensión lateral relativa a la contracción longitudinal:

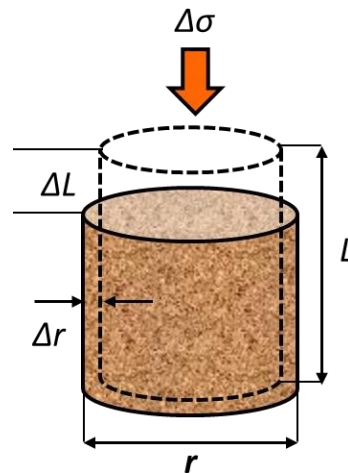
$$\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{ax}} \quad (2)$$

donde

ε_t es la deformación transversal de la roca al estar sometida a un esfuerzo.

Figura 2.

Relación de Poisson



Tomado de Santamaria R. Jorge R. Siem S. Criseida. (2006). *Estimación de la ventana operacional de presión de lodo a partir de registros de pozo, para las formaciones del campo socororo, edo. anzoátegui. (Tesis de pregrado). Universidad Central de Venezuela.p.41*

La relación de Poisson depende del tipo de litología.

Tabla 1.

Valores de Poisson

Tipo de Material	Relación de Poisson(adimensional)
------------------	-----------------------------------

Arcilla	0.4 - 0.45
Arena	0.30 - 0.40
Roca	0.15 - 0.25

Tanto el módulo de Young como la relación de Poisson pertenecen a un grupo de coeficientes llamados módulos elásticos. Los módulos elásticos de las rocas, bajo condiciones de origen y entorno de estas, dependerán de la naturaleza de su anisotropía.

2.4.3 Angulo de fricción

El ángulo de fricción φ es la representación matemática del coeficiente de rozamiento y viene dado por la relación entre las resistencias al corte y compresiva del material. Esta propiedad depende de varios factores, entre ellos algunos de los más importantes son: tamaño, forma, distribución, densidad y angulosidad de los granos y tipo de mineral presentes. La fricción es una medida de resistencia que opone un material al deslizamiento relativo de sus partículas a lo largo de un determinado plano. A medida que aumentan los esfuerzos normales sometidos a una roca aumenta también la fricción de sus granos.

2.4.4 Fuerza de cohesión

La cohesión C es una propiedad intrínseca de la resistencia de la roca, y se define como una medida de adherencia entre las partículas de la formación, debido a la presencia de fuerzas atractivas entre los enlaces químicos en los puntos de contacto superficiales de las mismas partículas. En las formaciones conformadas sólo por granos en los cuales no existe ningún tipo de material cementante que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a cero (0). Mientras, para aquellas formaciones que han sufrido poco grado de compactación y que no poseen mucho material cementante, como las que se encuentran en formaciones someras no sometidas a intenso tectonismo, son fácilmente disgregadas y se conocen como friables.

2.4.5 *Circulo de Mohr*

El círculo de Mohr es un método gráfico para determinar el estado de esfuerzos en los distintos puntos de un cuerpo. Entre los esfuerzos que existen en un cuerpo sometido a un cierto estado de cargas y con unas ciertas restricciones, importan en general las tensiones principales, que son las tensiones que existen sobre ciertos planos del cuerpo, donde los esfuerzos de corte nulos. Estos esfuerzos son de importancia para el estudio de la resistencia mecánica de las rocas. Este método tiene aplicación para estados tensionales en dos y tres dimensiones.

El círculo de Mohr proporciona soluciones gráficas fáciles de usar, para determinar la magnitud y orientación de los esfuerzos principales, así como esfuerzos normales y de cizalla, para planos de cualquier orientación. Son diversas las aplicaciones en cuanto a la Industria del petróleo como lo son: la interpretación de fallas en yacimientos (arenamiento, compactación cizallamiento y el criterio de falla de Mohr-Coulomb)

2.4.5.1 Criterio de falla de Mohr-Coulomb. La aplicación del criterio de Mohr Coulomb en la predicción de fallas de corte en la estabilidad de pozo proporciona resultados bastantes conservativos; lo que junto con su facilidad para aplicarlo lo han convertido en el criterio más popular. Es la unión de dos teorías la de Coulomb y la de Mohr.

Generalmente para el caso del criterio de Mohr-Coulomb, se define el criterio de rotura en función de la tensión tangencial y la tensión normal en un plano. En este caso la superficie de fluencia es de la forma $\tau = f(\sigma)$.

$$\tau = c + \sigma n \tan\varphi \quad (3)$$

donde:

c es la cohesión, una constante que representa la tensión cortante que puede ser resistida sin que haya ninguna tensión normal aplicada.

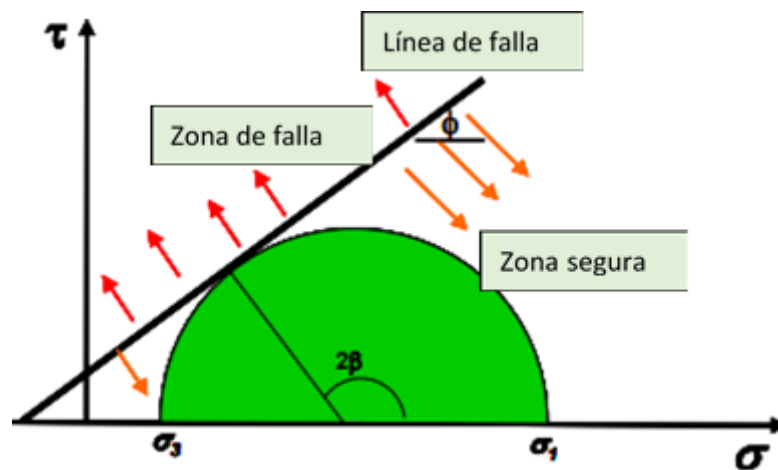
ϕ es el ángulo de fricción

τ es la tensión tangencial que actúa en el plano de rotura

σ_n es la tensión normal que actúa en el plano de rotura

Figura 3.

Criterio de Mohr Coulomb



Tomado de García. M. (2006). *Determinación de la orientación y magnitud del esfuerzo máximo horizontal a partir del modelamiento de breakouts en la zona del piedemonte llanero colombiano (tesis de pregrado)*. Universidad Industrial de Santander

2.5 Mecanismos de Falla

Las fallas en las rocas se generan cuando estas son sometidas a esfuerzos lo suficientemente largos, este importante fenómeno es el que origina problemas severos en la industria del petróleo tales como la inestabilidad de la formación y la producción de sólidos, por lo que su estudio permite predecir bajo qué condiciones de esfuerzos la roca fácilmente fallaría.

2.5.1 Falla por tensión.

Este tipo de fallas ocurren cuando el esfuerzo de tensión efectivo a través de un plano en la roca excede su límite crítico. Este límite es llamado resistencia a la tensión, está dada por el símbolo $\bar{\sigma}$ y tiene las mismas unidades del esfuerzo. La resistencia a la tensión es una propiedad característica de toda roca.

Una muestra que sufre una falla por tensión típicamente se divide a lo largo de uno o unos pocos planos de fractura.

2.5.2 Fallas por cizalladura.

Las fallas por cizalladura o por esfuerzo cortante ocurren cuando un esfuerzo de corte a lo largo de algún plano de la muestra es suficientemente alto, eventualmente la zona de falla, y los lados del plano se moverán uno respecto al otro en un proceso de fricción.

El criterio de falla para esfuerzos cortantes es más complejo que para los esfuerzos de tensión, ya que la resistencia de la roca depende de los esfuerzos confinantes aplicados. Los esfuerzos confinantes proporcionan resistencia a la roca, por lo que las fallas ocurren debido a los esfuerzos desviadores, es decir a la transferencia entre ellos. El criterio de falla establece que el material cederá cuando se alcanza un nivel crítico de esfuerzos de corte.

2.6 Estabilidad e Inestabilidad de Pozo

La estabilidad de pozo es un proceso de prevención de fallas en rocas frágiles o deformación plástica en la roca que rodea el pozo debido a esfuerzos mecánicos o desequilibrios químicos. Según Zoback, un pozo estable no es necesariamente aquel que no presenta falla alguna durante su perforación y actividades posteriores a esta, debido a que se han estudiado miles de pozos verticales en los que se presentan rupturas y derrumbes, pero no presentaron problemas significativos de estabilidad. Para poder diseñar un pozo estable es necesario aumentar el peso del

fluido de perforación o alterar la trayectoria del pozo lo suficiente para limitar el ancho de una ruptura inicial a una cantidad aceptable y evitar el colapso del pozo.

Por otra parte, un pozo inestable según Zoback es aquel en el que la formación de ruptura en exceso produce tanto material fallido alrededor del pozo que el volumen total de cortes y material defectuoso en el pozo no puede circular por la circulación del lodo. De hecho, a medida que un pozo se agranda debido a la falla excesiva de la pared, disminuye la velocidad del lodo de perforación en el anular entre el exterior del conjunto del pozo inferior y la pared del pozo. Esto, a su vez, reduce la capacidad del lodo para limpiar los recortes y los escombros del pozo. Juntos, la roca defectuosa excesiva y la capacidad de limpieza reducida asociada con la circulación del lodo pueden hacer que los cortes y la roca defectuosa se adhieran al conjunto del orificio inferior. Esto a veces se llama colapso del pozo porque parece que el pozo se ha derrumbado en el conjunto del fondo del pozo. El peso del lodo necesario para estabilizar la pared del pozo y evitar que esto ocurra a veces se denomina presión de colapso.

3. Modelo Geomecánico 1D

Un modelo geomecánico puede revelar el comportamiento de las rocas cuando son sometidas a distintos esfuerzos. Los componentes principales de este son: el estado de esfuerzos (la orientación y magnitud de los tres esfuerzos principales), la presión de poro, presión de colapso, presión de fractura y las propiedades de la roca. Las leyes constitutivas que describen la deformación de la roca, fracturas y fallas en las formaciones de interés y las propiedades de la roca incluyendo la resistencia (la cual puede ser anisotrópica).

Un modelo geomecánico es una representación numérica de los estados de esfuerzos y las propiedades mecánicas de la roca para una sección estratigráfica específica, en un campo cuenca. Además de la presión de poro, qué sirve para predecir problemas de inestabilidad de pozo, problemas de arenamiento, reactivación de fallas, compactación y subsidencia, y diseño de fracturas hidráulicas.

La mayoría de los modelos geomecánicos son representados en una dimensión, cuya finalidad es mostrar la variación vertical de las propiedades geomecánicas de la roca en función de la profundidad a partir de datos específicos de un pozo, reportes diarios de perforación, datos de laboratorio de pruebas realizadas a núcleos y registros de pozos, permitiendo diseñar una ventana de peso de lo útil para dirigir el pozo en una trayectoria segura, previniendo así de esta manera problemas de inestabilidad.

Para la construcción adecuada de un modelo geomecánico se requiere la mayor cantidad de información posible de un campo, como lo es la geología, la geofísica, la mecánica de rocas, petrofísica, perforación y entre otras características del pozo, todo esto para determinar la mayor cantidad de propiedades geomecánicas posibles.

La construcción de una ventana segura de lodo requiere de la definición y comprensión de los factores críticos que definen a esta. A partir del entendimiento de los factores críticos y del entendimiento de las causas que pueden causar una variación de estos, va a depender la correcta construcción de la ventana segura de lodo la cual constituirá al final como la herramienta clave para evitar problemas operacionales que previamente se traducen en costos adicionales en el desarrollo de un proyecto específico.

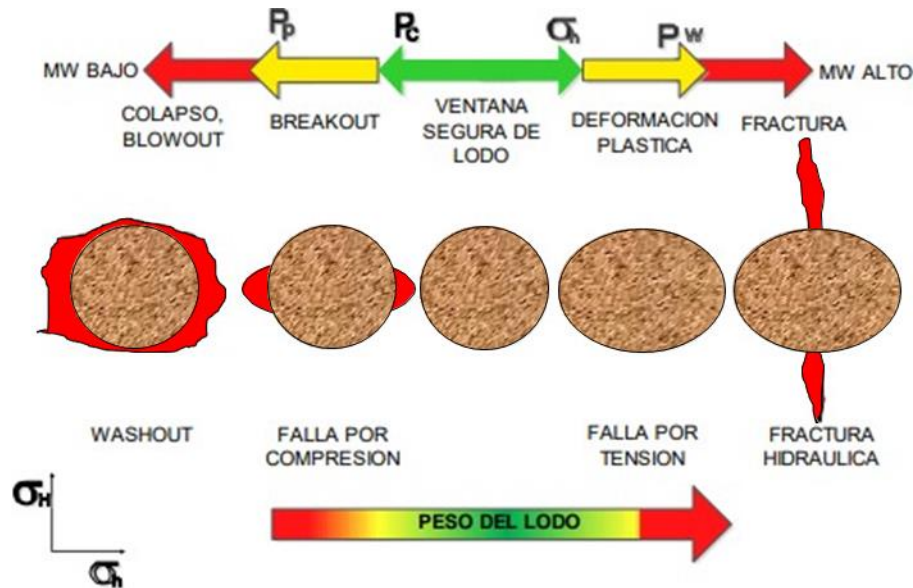
En la Figura 4. Se puede observar las causas de tener un peso de lodo muy bajo o un peso de lodo muy alto. Se puede apreciar también los puntos importantes de una ventana de lodo segura,

como lo son; Presión de poro (P_p), presión de colapso (P_c), esfuerzo mínimo horizontal (σ_h) y presión de fractura (P_w).

A continuación, se mencionan los diferentes parámetros utilizados para la realización adecuada del modelo geomecánico utilizado en este proyecto de grado, así como también diferentes métodos que existen en la literatura actualmente para determinar las diferentes propiedades para el desarrollo de un modelo geomecánico y el posterior diseño de la ventana segura del lodo.

Figura 4.

Esquema de gradientes de ovalización por ruptura y fracturamiento



Tomado de Gomez, D, Bernal.M. (2012). Desarrollo de una herramienta software para el cálculo de los factores críticos que definen una ventana segura de lodo. (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander

3.1 Presión de poro

Las rocas son materiales porosos, que tienen la capacidad de almacenar fluidos en dichos espacios vacíos. Estos fluidos están confinados en el medio poroso debido a los procesos de

depositación y compactación de sedimentos que se presentan sucesivamente sobre la roca. La presión de poro está definida como la presión que ejerce un fluido en los espacios porosos de la roca. También es llamada presión de formación o presión poral, dicha presión está en función de los fluidos de formación y de las cargas que están soportando. La presión de poro se clasifica de acuerdo con su valor en: presión normal, anormalmente alta y anormalmente baja.

- **Presión normal:** La presión de poro normal es aquella que varía entre la presión hidrostática y la litostática, aunque en algunas ocasiones dicha presión supera la litostática o está por debajo de la hidrostática, siempre y cuando la presión de poro se pueda controlar con una columna hidrostática con un gradiente de 0,433 psi/ft. En un ambiente de presión de poro normal, los sedimentos se compactan a medida que los fluidos son drenados por efecto de la carga que ejercen los sedimentos suprayacentes.
- **Presión anormalmente alta o sobrepresión:** Es cualquier presión que este por encima de la presión hidrostática o presión normal, de acuerdo a este concepto, esta presión está compuesta por la presión hidrostática mas una cantidad externa de presión. Dickinson en 1953, propone que la principal causa de sobrepresiones de los shale es por la compactación y que la mejor forma de evitar dichos problemas es colocando un casing cerca de las zonas sobrepresionadas, para poder usar un lodo más pesado y prevenir las pérdidas de circulación.

Hay diversos orígenes a cerca de las causas de sobrepresión como lo son compactación, compresión tectónica, fallas, gradientes geotérmicos altos, cambios en los minerales, generación de hidrocarburos, migración de fluidos a lo largo de las fallas y ósmosis. Dichas causas de sobrepresión pueden generar principalmente

por problemas como lo son, esfuerzos mecánicos, transferencia dinámica, compactación química, esfuerzos termales, diagénesis de arcillas y entre otras.

- **Presión anormalmente baja o presión subnormal:** Se define como cualquier presión menor a la presión de poro normal o a la hidrostática. Se da principalmente en las zonas en donde los fluidos han sido drenados, siendo un ejemplo claro un yacimiento depletado. Según la experiencia en la industria del petróleo, en la exploración de pozos las formaciones con presiones anormalmente bajas no son tan comunes como lo son las zonas sobrepresionadas. Muchas formaciones de presión subnormal han sido inducidas artificialmente por la producción de hidrocarburos o agua subterránea, en yacimientos aislados en los que no hay una zona de recarga que permita introducir fluidos suficientes para reponer los fluidos retirados.

Al conocer la presión de poro se puede realizar la planeación segura de un pozo, principalmente logra un diseño adecuado de la ventana segura del lodo que evite cualquier tipo de influjo, amagos de reventón o fracturamiento de la formación durante la perforación y desarrollo del pozo, de ahí la importancia de determinar de la manera más adecuada y exacta la presión de poro, actualmente existen diversos métodos para la determinación de esta, a lo largo de la historia se han venido desarrollando dependiendo de los diferentes casos de estudio, a continuación se hará una breve descripción de los métodos más comunes en la literatura.

3.1.1 Método de Hottman y Johnson “1965”

En 1965, Hottman y Johnson presentaron un método para predecir las magnitudes de las sobrepresiones por medio de registros de resistividad y registros sínicos. Esta técnica ha recibido una gran aceptación a pesar de que los estudios fueron realizados solo en los sedimentos terciarios de las costas del Golfo.

El método utiliza gráficos que relaciona las líneas de tendencia de los registros que indican la presión de poros con la gradiente de presión de poros a una cierta profundidad.

Los autores plantean dos métodos por medio de los cuales se pueden obtener la presión de poro, lo cuales se mencionarán a continuación:

3.1.1.2 método sínico. Uno de los aportes de los registros sínicos ha sido la estimación de la porosidad de las rocas sedimentarias entre otros factores. Las velocidades sínicas son dependientes de diferentes parámetros, esto incluye el grado de compactación, la porosidad, el contenido de fluido y la litología, si se encuentran variaciones en las líneas de tendencia normal de la porosidad o de la densidad, la velocidad sínica cambiará por lo tanto también la tendencia de la presión de poros, identificando la zona de sobrepresión. Según investigaciones en condiciones normales (presiones normales), indican que el tiempo de tránsito (Δt_h) disminuye con el aumento de la profundidad, esto indica que su porosidad decrece y la densidad aumenta.

Según Hottman y Johnson (1965), el procedimiento para estimar una presión de poros por medio de registros sínicos es el siguiente:

- 1.- Graficar la línea de tendencia normal de la curva de tránsito de tiempo.
- 2.- Identificar el tope de la formación de la zona sobrepresionada para diferenciar de la línea de tendencia graficada.
- 3.- La presión de reservorio a cualquier profundidad se encuentra con los siguientes pasos: Encontrar el tope de la divergencia de la tendencia normal, diferenciar $\Delta t_{ob} - \Delta t_n$ y encontrar la gradiente de presión y finalmente multiplicar la gradiente de presión por su respectiva profundidad.

3.1.1.2 Método resistivo. Hottman y Johnson (1965) reconocieron el significado principal de la teoría y desarrollaron una relación entre los registros de resistividad y las sobrepresiones. Ellos expresaron que las rocas tienen una mayor resistividad eléctrica que el agua de formación,

por lo tanto, las lutitas que tienen una buena compactación y contienen poco fluido de formación (el fluido ha disipado) tienen una resistividad mayor que las lutitas menos compactadas que contienen más fluido (el fluido no ha podido disipar). Por consiguiente, se conoce que, en una sedimentación normalmente compactada, la línea de tendencia normal de resistividad incrementa con respecto a la profundidad.

El procedimiento de este método para estimar la presión de poro utilizando los registros de resistividad es el siguiente:

Graficar el registro de resistividad vs. La profundidad en una escala logarítmica. -
Establecer la línea de tendencia normal de la resistividad.

1. Identificar la formación sobrepresionada, encontrando los puntos de divergencia de la resistividad observada y la línea de tendencia de esta.
2. Para encontrar la gradiente de presión se siguen los siguientes pasos: primero divide la resistividad normal entre la resistividad observada, después se determina el gradiente de presión con el resultado de la relación (R_n/R_o) , y por último se multiplica el gradiente de presión de poro por la profundidad respectiva y se tendrá la presión de poros en unidades de psi.

3.1.2 Método exponente “d” “1966”

El método exponente “d” es uno de los más utilizados para predecir la presión de poros durante la perforación o después de ella; los ingenieros de mud logging normalmente estiman la presión de poro usando los parámetros de perforación ya que es la información que se tiene a disposición en la perforación, mientras que los registros eléctricos son generalmente tomados cuando ya se ha perforado la sección.

Hoy en día la industria petrolera ha avanzado en términos de registros eléctricos y estos ya se pueden adquirir mientras se perfora, esta tecnología es conocida como LWD cuyas siglas en inglés significan Logging While Drilling. El Exponente “d” o Método del Perforador está en función de la rata de penetración (ROP), del peso sobre la broca (WOB), la velocidad de rotación de la broca (RPM), el tipo y diámetro de la broca (BS) y las características de las formaciones.

Diferentes maneras para normalizar la rata de penetración han sido efectuadas en los últimos 20 años. El objetivo es disminuir los efectos de variación de parámetros de perforación. En el campo de trabajo se ha demostrado que utilizando el método más conocido como exponente “d” es el más simple y económicamente rentable, pero también se ha demostrado que tiene un grado de incertidumbre alto porque puede ser afectado por variaciones en los parámetros de perforación y cambios en los diseños de los ensamblajes que se bajan al pozo. Se recomienda confirmar y validar los resultados de presión de poros obtenidos mediante este Método con otros métodos que se basen en registros eléctricos los cuales están midiendo directamente las características de la roca.

Jorden & Shirley resolvieron la ecuación de el exponente “d” por la introducción de las constantes las cuales permiten estandarizar las unidades de la industria del petróleo. El resultado son valores de “d” los cuales pueden variar por sus parámetros.

$$d = \frac{\log \frac{R}{60N}}{\log \frac{12W}{10D}} \quad (3)$$

Donde:

R= velocidad de perforacion (pies/hora)

N= revoluciones por minuto (RPM)

W= peso sobre la broca (Klibra)

D= diametro de la Broca (pulgadas)

3.1.3 Método de Eaton “1975”

Eaton propuso optimizar el método de Hottman y Johnson (1965), mejorando la relación de los registros observados y registros en tendencia normal, ya que el método de Hottman y Johnson utilizaba datos muy empíricos causando mayor incertidumbre al calcular la presión de poro. Según la teoría de Eaton, la principal causa de esta incertidumbre es por las diferencias de gradientes de sobrecarga.

Este método de predicción de presión de poro encuentra una relación del esfuerzo de sobrecarga, presión de poro normal, el registro observado y el valor del registro en una tendencia normal, los dos últimos elevados a un exponente empírico. Puede estar en función del registro sísmico, registro de resistividad, como también del exponente “d”.

Se traza una línea de tendencia en el perfil resistividad, tiempo de tránsito o exponente d y el punto de divergencia de esta línea en relación con las lecturas medidas nos da el tope de anomalía en la presión de formación. La curva de presión de poro es calibrada por el exponente que se eleva a la división del registro observado con el normal (o viceversa, dependiendo que registro sea), y la línea de tendencia normal hasta llegar a un perfil donde coincida con los eventos de sobrepresión en el pozo perforado.

Eaton desarrolla unas correlaciones para estimar la presión de poro utilizando una relación entre el esfuerzo efectivo normal y un factor que indica un exceso de presión. El valor de este factor es determinado de un registro, tomando el dato observado y el valor normal, elevado a un exponente el cual depende del registro usado para tal cálculo. A continuación, se presentan las diferentes opciones para estimar la presión de poro.

Resistividad

$$Ph = \sigma_v - \left[(\sigma_v - P_h) \left(\frac{\Delta R_o}{\Delta R_n} \right)^{1.2} \right] \quad (4)$$

Conductividad

$$Ph = \sigma_v - \left[(\sigma_v - P_h) \left(\frac{\Delta C_n}{\Delta C_0} \right)^{1.2} \right] \quad (5)$$

Sonico

$$Ph = \sigma_v - \left[(\sigma_v - P_h) \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t_0} \right)^3 \right] \quad (6)$$

Exponente “dc”

$$Ph = \sigma_v - \left[(\sigma_v - P_h) \left(\frac{dc_0}{dc_n} \right)^{1.2} \right] \quad (7)$$

3.1.4 Método de Bowers “1995”

Es un método que estima la presión de poro en función de la velocidad sónica o velocidad sísmica, este método a diferencia del resto es calculado dependiendo del mecanismo que generó la sobrepresión. Estos pueden ser por fenómeno de subcompactación o expansión de los fluidos.

Bowers desarrollo en el año 1995 un método de estimación del esfuerzo efectivo, con el cual, por medio de la ecuación de Terzagui se puede obtener el valor de la presión de poro. El estudio de Bowers se basa en la velocidad sónica o velocidad sísmica, tomando en cuenta que la presión de poro anormal no sólo se genera debido a la compactación como lo suponen los estudios previos que se propusieron para hallar la presión de poro a través de datos geofísicos sino que además de la compactación, otras causas de sobrepresión son los mecanismos de expansión de fluidos como: calentamiento, maduración del hidrocarburo, migración de los fluidos desde otras zonas y diagénesis de la arcilla. Según la causa de presión anormal, el método propone dos correlaciones obtenidas a partir de datos de Registro de pozos y pruebas RFT (Repeat Formation Tester) para lutitas en el golfo de México.

3.1.5 Modelo de Terzaghi

En el modelo de Terzaghi, la sobrepresión está relacionada con la compactación mecánica en completa y se establece una relación entre la disminución de la porosidad y la compactación de sedimentos, la obtención del modelo se basa en una base de masa de flujo incomprensible y monofásico. Este modelo es muy usado en un modelamiento de cuencas 1D, tiene en cuenta las siguientes consideraciones.

1. La presión litostática se considera teniendo en cuenta sola sólo la componente vertical del tensor de esfuerzos como fuerza principal máxima. La presión litostática es igual al esfuerzo de sobrecarga. Los esfuerzos horizontales son fijados proporcionalmente a la presión litostática. Adicionalmente, la tectónica de esfuerzos debida a las fuerzas de compresionales y extensionales son nulas.
2. La formación de la presión de poro es causada por la sobrecarga. El flujo de fluidos y la compactación determinada como la presión es formada y distribuida en la cuenca. La compactación está relacionada con la salida de fluido del poro y disminuye la sobrepresión. Se considera que la roca está saturada por un solo fluido y es controlada por las permeabilidades. Se asume comunicación de la presión en el medio poroso.
3. La compactación mecánica de los poros tiene en cuenta el reagrupamiento de los granos. La compactación es relacionada con la reducción de la porosidad causada por la salida del fluido del poro, esta reducción es controlada por el esfuerzo efectivo de Terzaghi. Se asume una relación entre el máximo esfuerzo efectivo y la porosidad.
4. El agua es considerada incomprensible.

5. Mediante la teoría de compactación de suelos de Terzaghi teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, el modelo diferencial planteado es el que se muestra en la ecuación.

$$\frac{du}{dt} = Cte \frac{d^2u}{dy^2} \quad (8)$$

3.1.6 Método de Doyen “2004”

Este método propuso una metodología mecánica-física para predecir la presión de poros usando un modelo geomecánico 3D, Doyen expresa una ecuación en función de la velocidad interválica obtenida de las velocidades sísmica, esfuerzos de sobrecarga, porosidad, y volumen de arcillas, junto a parámetros que serán calibrados, por lo general se utiliza el método de Doyen para calcular la presión de poro en todo un campo, realizando un modelo 3D, utilizando las ecuaciones de Gauss.

Los valores de cada punto de un modelo 3D son el resultado de la interpolación de los registros eléctricos de los pozos estudiados en el campo.

3.1.7 Método de Dutta “2002”

Dutta describe la relación de la porosidad y el esfuerzo efectivo. Considerando una tendencia normal de la compactación, observamos que la porosidad disminuye y por ende el esfuerzo efectivo aumenta. Sucederá lo contrario si se encuentra una tendencia anormal de compactación.

La relación de la porosidad es la medida más directa para identificar zonas sobrepresionadas por ese motivo Dutta expresa una relación entre la porosidad y la profundidad.

3.1.8 Mecanismos de predicción de la presión de poro durante la exploración

Durante la planeación de pozo siempre es importante tener algún indicio del comportamiento de presión que se va a encontrar durante la perforación, para esto existen dos posibles fuentes útiles de datos dependiendo el grado de desarrollo del campo.

3.1.8.1 Datos sísmicos. La predicción de presión de poro utilizando datos sísmicos quizás sea la única herramienta planeación de la cual se dispone. La predicción es realizada a partir del concepto la velocidad sísmica, término usado para referirse al recíproco del tiempo de tránsito sísmico o acústico, el cual puede ser graficado y obtener algo similar a un registro sísmico promediado para grandes sesiones. Con los datos sísmicos aproximados obteniendo de la sísmica, es posible implementar algunos de los métodos explicados anteriormente que usan datos sísmicos como Eaton (1975) o Bowers (1995).

3.1.8.2 Pozos análogos. Al terminar de perforar un pozo es muy probable que se hayan aplicado varios métodos de predicción, monitoreo o confirmación de la presión de poro, agregando los métodos durante la perforación, por lo que en su fase final los datos de presión de un pozo son de alta confiabilidad, que resultan muy útiles y deben ser correlacionados en nuestras zonas de estudio para próximas perforaciones.

3.2 Esfuerzos

Uno de los principales componentes de un modelo geomecánico son el estado de esfuerzos existentes; la inestabilidad en el pozo ocurre debido a que los esfuerzos concentrados alrededor de la circunferencia del pozo exceden la resistencia de la roca. El esfuerzo es una fuerza que actúa sobre un área dada con una dirección específica, está descrito por un tensor de esfuerzos, que describe la densidad de las fuerzas actuando en todas las superficies a través de un punto dado. En este se incorporan tres esfuerzos principales y seis esfuerzos cortantes o tangenciales, que

representan el estado de esfuerzos interno que tiene un punto determinado dentro de un cuerpo sólido. Para garantizar el equilibrio del elemento, la magnitud de estos debe ser igual, de lo contrario se puede llegar a un evento de inestabilidad.

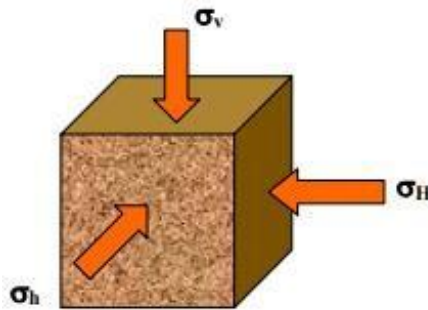
Si se cambia el esfuerzo que actúa sobre una roca, ésta se deforma alterando su volumen y geometría, además de los trayectos del flujo de fluido presentes en su interior. Son múltiples los factores que pueden impactar el régimen de los esfuerzos a los que está sometida una formación, incluyendo el tipo de roca, los ambientes depositacionales, la tectónica regional, los episodios de erosión o levantamiento, las perturbaciones sísmicas locales e incluso las variaciones de las mareas. Las diferencias en la estructura de las rocas complican aún más la influencia de tales cambios en los esfuerzos.

La manera en que las formaciones reaccionan a los cambios de los esfuerzos se está transformando en un asunto de interés creciente para las compañías de E&P. Los esfuerzos locales en los yacimientos, habiendo alcanzado un estado de equilibrio a lo largo del tiempo geológico, son alterados por el proceso de perforación, producción e inyección. Si los cambios de los esfuerzos inducidos por las operaciones de perforación o producción no se anticipan, los desafíos y costos que implica el manejo de un área prospectiva pueden exceder de manera significativa las expectativas iniciales de un operador. Para caracterizar el esfuerzo, la deformación relativa y la deformación presentes en sus yacimientos, las compañías de E&P recurren a la geomecánica. Este campo amplio aplica la mecánica de los sólidos y fluidos, la ingeniería, la geología y la física para determinar cómo las rocas y los fluidos que éstas contienen responden a la fuerza o a los cambios en los esfuerzos, la presión y la temperatura, producidos por las operaciones de perforación, terminación y producción de pozos.

En el pasado, la mayoría de los departamentos de perforación y producción no estaba particularmente al tanto de los esfuerzos presentes en las formaciones y la geomecánica; muchos yacimientos se consideraban técnicamente sencillos y habían experimentado un grado de agotamiento apenas limitado. Pero la declinación de las reservas y los precios favorables del petróleo están induciendo a los operadores a perforar pozos más profundos e intrincados, a la vez que las nuevas tecnologías prolongan las vidas productivas de los campos maduros. Por lo tanto, los operadores están centrando más su atención en la geomecánica cuando evalúan las dificultades que se plantean en las operaciones de perforación y producción; especialmente aquellos que se esfuerzan por proteger sus inversiones en operaciones de terminación de pozos costosos, particularmente en áreas prospectivas tectónicamente activas o de aguas ultraprofundas en ambientes de alta presión y alta temperatura.

Figura 5.

Acción de los esfuerzos principales.



Tomado de Huffman, Alan R. y Bowers, Glenn L. 2001. Pressure Regimes in Sedimentary Basins and Their Prediction. Volume 76. American Association of Petroleum Geologist.

El hecho de ignorar la importancia de la geomecánica puede acarrear consecuencias severas. Un grado excesivo de pérdida de lodo, inestabilidad del pozo, compresión o cizalladura de la tubería de revestimiento, compactación del yacimiento, subsidencia de la superficie, producción de arena, reactivación de fallas y pérdida de sello del yacimiento puede, en todos los

casos, ser una manifestación de cambios. De ahí la importancia de la geomecánica aplicada los esfuerzos que actúan sobre la roca, para poder determinar de qué manera se deben intervenir los pozos dependiendo de la operación que se le esté implementando a este; por eso se tiene como objetivo exponer a continuación los principales esfuerzos que actual sobre las rocas.

3.2.1 Esfuerzo de sobrecarga (σ_v).

El esfuerzo de sobrecarga en cuencas sedimentarias es primordial para la predicción de la presión de poros y en general para el cálculo de los esfuerzos in-situ. El esfuerzo de sobrecarga es el esfuerzo creado por el peso de los sedimentos que se han depositado en la cuenca, la sobrecarga está en función de la densidad de las formaciones rocosas y de su espesor. Si no se tuviera un registro de densidad, la densidad puede calcularse por medio de correlaciones normalmente en función de los registros de onda sonora o registros sínicos. El esfuerzo de sobrecarga está definido por la siguiente fórmula:

Donde:

$$S = g \int_0^Z \rho dD \quad (9)$$

S = esfuerzo de sobrecarga (psi)

ρ = densidad (g/cc)

g= constante de gravedad

Z = profundidad requerida (m)

dD= Variación de profundidad (m)

Para el caso de los yacimientos petrolíferos es imposible asumir que los materiales son homogéneos, por lo que en este caso la densidad varía con respecto a la profundidad, estos valores variantes son obtenidos por medio del registro de densidad.

La estimación del perfil de sobrecarga es especialmente crítica en ambientes de muy alta presión y en regiones donde hay evidencias de que el esfuerzo mínimo puede estar muy próximo al esfuerzo vertical. Es conocido que mientras aumente la profundidad del pozo, el esfuerzo de sobrecarga de este será mayor y la presión de poro aumentará. A continuación, se muestran las densidades de los materiales y fluidos más comunes.

Tabla 2.

Densidad de los materiales y fluidos más comunes

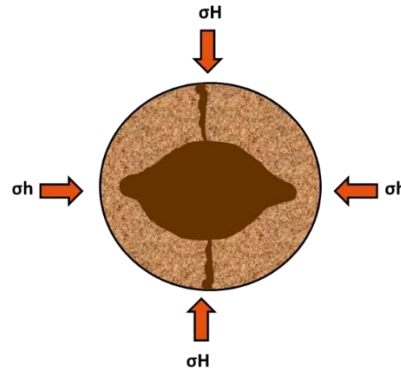
Tipo de Material	Relación de Poisson(adimensional)
Arenisca	2.65
Limolita	2.71
Dolomita	2.87
Arcilla	2.7 - 2.8
Anidrita	2.98
Aceite	0.6 - 0.7

3.2.2 Esfuerzos horizontales

Las rocas de una determinada formación se encuentran sometidas un campo de esfuerzos aportado por las rocas adyacentes en todas las direcciones, para la discretización y entendimiento de estos, se realiza una simplificación de los mismos en tres esfuerzos principales, el esfuerzo de sobrecarga que es el aportado por las rocas de formaciones supra yacentes, y dos esfuerzos horizontales principales, como se ilustra en la figura 6.

Figura 6.

Breakouts y fracturas en el pozo.



Tomado de Huffman, Alan R. y Bowers, Glenn L. 2001. *Pressure Regimes in Sedimentary Basins and Their Prediction*. Volume 76. American Association of Petroleum Geologist

La fractura se propaga en dirección perpendicular al esfuerzo mínimo horizontal, pero antes de ocurrir la fractura se presenta una ovalación (breakouts) de la forma del pozo.

La importancia de conocer la magnitud del esfuerzo mínimo horizontal radica en que operacionalmente tenemos que evitar el breakout en el pozo mientras se está perforando, ya que después que se genera el breakout, se fracturara la formación.

En la dirección horizontal actúan dos esfuerzos de acuerdo con su magnitud se denominan esfuerzo horizontal máximo (σ_H) y esfuerzo horizontal mínimo (σ_h). Se usan diferentes métodos y técnicas para estimar la magnitud de estos esfuerzos, algunas permiten obtener la magnitud de los dos esfuerzos mientras que otras solo realizan la estimación de uno de ellos como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.

Mecanismos de cálculo para σ_H y σ_h

Magnitud de σ_H y σ_h	Magnitud de σ_H	Magnitud de σ_h
- Pruebas de integridad	- Fracturas inducidas durante la perforación	- Minifrac
- Fracturamiento hidráulico	- Técnica de los Breakouts	- Correlaciones empíricas para zonas de fallas normales
- Polígono de esfuerzos		

De manera general, cuando no se cuentan con los datos suficientes para realizar el calculo de la magnitud del esfuerzo horizontal minimo, ya que es una medida indirecta, que depende de varios datos que deben ser conocidos previamente.

Para determinar la magnitud de los esfuerzos horizontales minimos y maximos se deben usar pruebas y correlaciones como se muestran a continuacion:

Esfuerzo horizontal minimo:

- Mediciones directas
- Extended Leak off Test (ELOT)
- Presion de cierre
- Datos de Minifrac
- Mediciones indirectas
- Eventos de pérdida de circulación
- Presion de cierre en un fracturamiento hidraulico.

Esfuerzo horizontal maximo:

- No hay mediciones directas
- Mediciones indirectas
- Modelo geomecanico a través del esfuerzo horizontal mínimo, presión de fractura y presión de colapso.

El proposito de una Leak off Test es determinar la maxima presion que puede soportar el pozo en la nueva sección que se va a perforar sin causar fracturas y perdidas de circulación, sin embargo esta prueba no permite determinar el esfuerzo horizontal minimo, sino la densidad del lodo adecuada para la nueva sección del pozo.

3.2.2.1 Esfuerzo horizontal mínimo (σ_h). El esfuerzo horizontal mínimo en cuencas petrolíferas se suele estimar utilizando los resultados de pruebas tipo leak-off. Este tipo de prueba es comúnmente utilizado durante las operaciones de perforación para estimar el máximo peso de lodo que se puede utilizar para perforar la siguiente sección. La prueba consiste probar cuál es la presión que produciría una fractura hidráulica en una sección aislada del pozo. Esta presión, que teóricamente generaría una fractura hidráulica, no representa exactamente la magnitud del esfuerzo horizontal mínimo. En este caso, la presión de fractura se ve influenciada por la distribución de esfuerzos alrededor del pozo y por la resistencia a la tensión de la roca. Sin embargo, este valor es comúnmente aceptado como una buena aproximación a la magnitud del esfuerzo mínimo.

Otro tipo de datos disponible son los resultados de ensayos de fractura hidráulica. El análisis de las curvas de declinación realizado por las compañías de fractura a partir de las medidas de presión durante el ensayo puede ser utilizado en ciertos casos para caracterizar la magnitud del esfuerzo mínimo horizontal. Idealmente, cuando un ensayo de mini-frac se lleva a cabo en un contexto de agujero abierto, es posible determinar la presión de cierre de la fractura hidráulica. Sin embargo, en casos de pozos cementados, entubados y perforados, no existe una correspondencia directa entre la presión de cierre de fractura y la magnitud del esfuerzo horizontal mínimo.

3.2.2.2 Esfuerzo horizontal máximo (σ_H). La magnitud del esfuerzo horizontal máximo es la componente del tensor de esfuerzos más difícil de determinar. Dado que la magnitud de este esfuerzo no se puede medir directamente, hay que recurrir a inferir su magnitud a partir de modelos matemáticos.

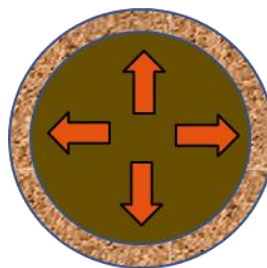
Cuando un pozo se perfora en un medio elástico, homogéneo e isótropo, los esfuerzos alrededor del pozo se reorganizan de tal manera que la máxima concentración de esfuerzos se localiza en la dirección del esfuerzo mínimo y la menor concentración de esfuerzos ocurre en la

dirección del máximo esfuerzo. En el caso de un pozo vertical, alineado con uno de los ejes principales de esfuerzos, el mínimo esfuerzo tangencial se localiza en la orientación del esfuerzo máximo horizontal, mientras que el máximo esfuerzo tangencial ocurre en la dirección del esfuerzo mínimo horizontal. Cuando el esfuerzo tangencial excede la resistencia a la compresión de la roca (UCS) la parte del pozo en compresión se deforma por cizalla y se generan derrumbes (“breakouts”) a 90 grados de la dirección del esfuerzo horizontal máximo. Si el esfuerzo tangencial pasa al dominio de tensión y excede la resistencia a la tensión de la roca, se generan fracturas de tensión inducidas. Estas fracturas inducidas se orientan paralelas a la dirección del esfuerzo horizontal máximo. Por ende, los derrumbes generados por contraste de esfuerzos en las paredes de un pozo proporcionan información sobre la orientación de los esfuerzos.

3.2.2.3 Esfuerzo radial. Es el esfuerzo que se ejerce perpendicularmente a la pared del pozo.

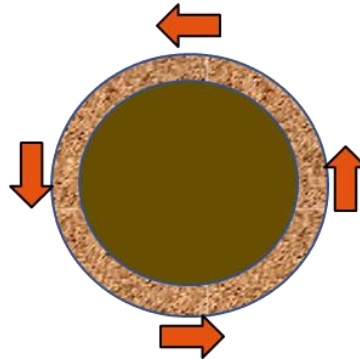
Figura 7.

Esfuerzo radial



Tomado de Huffman, Alan R. y Bowers, Glenn L. 2001. Pressure Regimes in Sedimentary Basins and Their Prediction. Volume 76. American Association of Petroleum Geologist

3.2.2.4 Esfuerzo tangencial. Es el esfuerzo que se ejerce alrededor del pozo.

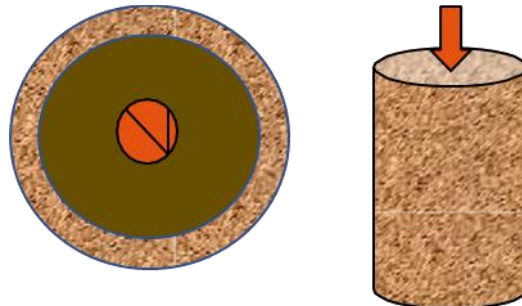
Figura 8. *Esfuerzo tangencial*

Tomado de Huffman, Alan R. y Bowers, Glenn L. 2001. *Pressure Regimes in Sedimentary Basins and Their Prediction*.
Volume 76. American Association of Petroleum Geologist

3.2.2.5 Esfuerzo axial. Es el esfuerzo que se ejerce en dirección paralela al pozo.

Figura 9.

Esfuerzo Axial.



Tomado de Huffman, Alan R. y Bowers, Glenn L. 2001. *Pressure Regimes in Sedimentary Basins and Their Prediction*.
Volume 76. American Association of Petroleum Geologist

3.3 Presión de fractura

Es la presión a la cual se presenta falla mecánica de una formación, originándose una pérdida de circulación. Estas presiones se pueden originar por trabajar con lodos de alta densidad, cambios bruscos de presión como el efecto del pistón o mantener una presión arriba de la presión

máxima permisible. Las formaciones de edad geológica reciente de poca profundidad contienen proporcionalmente más agua y son más porosas y por lo tanto son más ligeras que las rocas más profundas y se fracturan a presiones más bajas que las rocas más densas y comprimidas que se encuentran a mayor profundidad. Sin embargo, también, estas presiones aparecen en las formaciones geológicas más viejas que se encuentran a mayor profundidad.

La presión de fractura es la máxima presión que puede ejercer un lodo antes de fracturar la formación. La manera más común por la cual se determina la presión de fractura es por medio de pruebas LOT, XLOT y minifrac.

3.4 Presión de colapso

El colapso de las paredes de un pozo se presenta cuando los esfuerzos in situ alrededor del pozo, superan la resistencia de la roca, la cual está determinada por la cohesión y la fuerza de fricción de esta, en pocas palabras, cuando los esfuerzos desestabilizadores actuando sobre la formación (tasas de flujo y gradientes de presión) son mayores que la resistencia mecánica de la formación. Cuando esta resistencia es excedida, ocurre desprendimiento de granos hacia el pozo. El valor de la presión de colapso está directamente relacionado con el tipo de formación, en formaciones con alta anisotropía, o alto grado de laminación y alto buzamiento, la falla de la formación como producto del colapso está directamente relacionada a la geología de los estratos, y finalmente va a estar determinada por la dirección de los esfuerzos a los que se encuentra sometida y el grado de heterogeneidad.

Las formaciones a una profundidad dada en la tierra están expuestas a un esfuerzo vertical, a esfuerzos horizontales compresivos (generalmente anisotrópicos) y a la presión de poro. Cuando un pozo es perforado, la roca que lo rodea debe soportar la carga que antes era soportada por la roca removida. Si la roca tiene un comportamiento elástico lineal, se generará una concentración

de esfuerzos alrededor del pozo. Si la roca es lo suficientemente débil, esa concentración de esfuerzos podría ocasionar una falla del hueco. Dicha falla del hueco puede ser mitigada seleccionando un peso de lodo adecuado para perforar cada formación. Debido a esto, se hace necesario calcular la presión de colapso mediante la evaluación de los esfuerzos que actúan alrededor del pozo (radial σ_r , tangencial σ_θ y axial σ_z) y la influencia de los esfuerzos in situ en los mismos, así como la influencia de la trayectoria del pozo.

4. Metodología para el desarrollo del modelo geomecánico 1d

El siguiente modelo geomecánico es construido a partir de datos de registros, basando la construcción de la ventana del lodo operacional en los esfuerzos in-situ y la presión de poro que actúan en el pozo de esta manera obteniendo el intervalo de operación para la perforación teniendo en cuenta una presión de colapso y una de fractura.

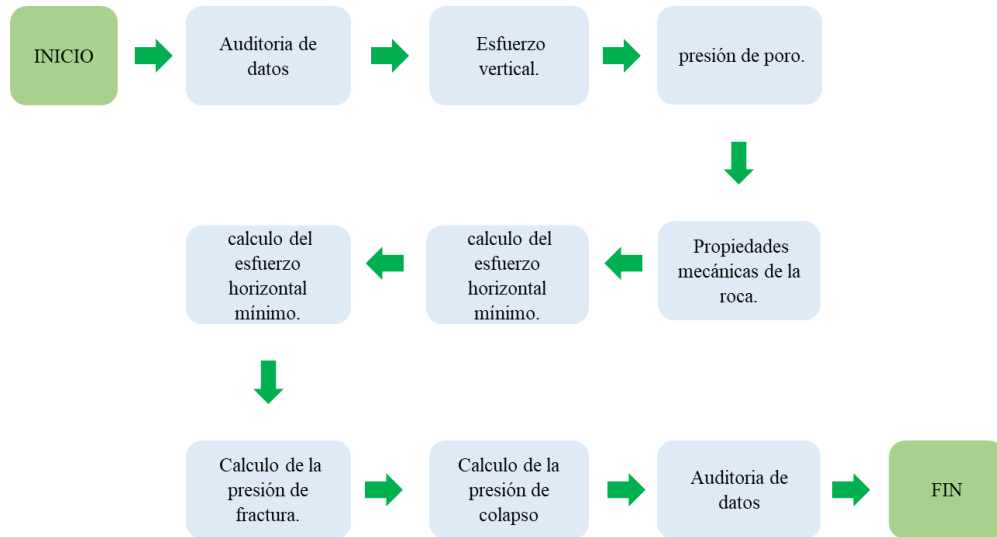
La metodología aplicada para el desarrollo del modelo geomecánico 1D se compone de manera general en 9 pasos.

- Auditoria de datos
- Esfuerzo vertical.
- presión de poro.
- Propiedades mecánicas de la roca.
- Determinación del esfuerzo horizontal mínimo.
- Determinación del esfuerzo horizontal máximo.
- Presión de fractura.
- Presión de colapso.

- Ventana operacional de lodo.

Figura 10.

Diagrama de flujo general para el desarrollo de un modelo geomecánico 1D.



4.1 Auditoria de datos

En primer lugar, para el desarrollo de un modelo geomecánico es la recolección y organización de datos disponibles del área de estudio la cual incluye datos geomecánicos, registros de pozo (sónico, resistividad, porosidad etc.) esto se hace con el fin de tener un inventario general de la información del pozo para facilitar la selección de modelos que se adapten a los datos disponibles.

Para la metodología implementada en este proyecto se basa a partir de datos de registros Sónico (DTC) y porosidad los cuales nos brindan información acerca de la velocidad de tránsito y porosidad de la roca respectivamente, además es necesario conocer las diferentes densidades con respecto a su profundidad.

4.2 Esfuerzo vertical

El esfuerzo vertical corresponde a la presión ejercida por los estratos suprayacentes, por lo cual la técnica más usada para su determinación es la integración del registro de densidad, aunque existen otras técnicas que son útiles cuando no se cuenta con los datos de densidad suficientes para hacer el cálculo

En este caso determinamos el esfuerzo vertical por medio de la integración de la densidad de la roca hasta la profundidad de interés y está definida por la ecuación (10)

$$\sigma_v = 0,433 * \sum \rho_b * \Delta Z \quad (10)$$

Donde:

ρ_b = Densidad de la roca, g/cm³

ΔZ = Profundidad, ft

4.3 Estimación de la presión de poro

La presión de poro es un parámetro muy importante ya que de este dependerá el éxito del desarrollo de la ventana segura del lodo, por eso se implementaron tres metodologías para para la estimación de esta, en función de la disponibilidad de datos con los que se cuenten, estas metodologías se basan a partir datos de velocidades sísmicas (Método de Eaton-1975), a partir de datos de porosidad y en el caso donde no se disponga de datos sísmicos se hará una estimación a partir de la creación de un sísmico sintético.

4.3.1 Estimación de la presión de poro a partir del método de Eaton (1975)

Como se mencionó anteriormente este método establece una diferencia entre el tiempo de tránsito obtenido con el registro sísmico y un estimado de la tendencia normal para deducir el

incremento en la presión de poro. El método de Eaton utiliza una línea de tendencia construida a partir de la tendencia de compactación normal mediante una aproximación lineal.

A partir de la ecuación (11) se obtiene la presión de poro por medio de información del perfil sísmico.

$$P_p = \sigma_v - (\sigma_v - P_n) \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t_{log}} \right)^3 \quad (11)$$

Donde:

P_p : Presion de poro, psi

σ_v : Presion de sobrecarga

P_n : Presion normal(hidrostatica), psi

Δt_n : Tiempo de tránsito en la línea de la tendencia normal a la profundidad seleccionada, $\mu sec/ft$.

Δt_n : Tiempo de tránsito en la línea de la tendencia normal a la profundidad seleccionada, $\mu sec/ft$.

4.3.2 Estimación de la presión de poro a partir de la porosidad.

La porosidad puede considerarse como una medida directa de la compactación y se reconoce que la porosidad decrece exponencialmente con la profundidad en formaciones normalmente compactadas. Athy (1930) propone la ecuación (12) para expresar este comportamiento:

$$\phi = \phi_0 e^{-cz} \quad (12)$$

Donde:

ϕ : Porosidad a una profundidad Z

ϕ_0 : Porosidad a una profundidad Z=0

C: Constante de compactación en 1/m o 1/ft.

Z: Profundidad (TVD)

Empleando el concepto de Terzaghi, Zhang (2008) mencionado anteriormente este plantea la ecuación (13) para predecir la presión de poro a partir de la ecuación de acuerdo a la tendencia normal de compactación, en función del esfuerzo vertical y porosidad.

$$P_p = \sigma_v - (\sigma_v - P_n) \left(\frac{\ln \phi_0 - \ln \phi}{cZ} \right) \quad (13)$$

Donde:

Φ : Porosidad a una profundidad Z

ϕ_0 : Porosidad a una profundidad Z=0

σ_v : Presion de sobrecarga

P_n : Presion normal(hidrostatica), psi

C: Constante de compactación en 1/m o 1/ft.

Z: Profundidad (TVD).

4.3.3 Estimación de la presión de poro a partir de un registro sísmico sintético.

En momentos donde no se cuenten con datos de registro sísmico podemos realizar una estimación de este a partir de datos de densidad por medio de la correlación de Gardner la cual se muestra en la ecuación (14).

$$\Delta t_{gardner} = \frac{\left(\frac{25}{\rho_r}\right)^4}{140} \quad (14)$$

Donde:

Δt = Tiempo de tránsito, $\mu sec/ft$

ρ_r = Densidad de la roca, g/cm^3

Cuando se realiza la estimación del registro sónico sintético el paso siguiente es aplicar la metodología desarrollada en el primer método para hacer la estimación de la presión de poro.

4.4 Propiedades mecánicas de la roca

La determinación de las propiedades mecánicas de la roca caracteriza la resistencia de la roca, por lo que su estimación más acertada se da por medio de pruebas de laboratorio, realizada en muestras de roca directamente, sin embargo, cuando se carecen de estas, algunas correlaciones pueden ser útiles, seleccionando la más conveniente de acuerdo a las propiedades de las formaciones de estudio, unas de las propiedades calculadas se muestran a continuación.

4.4.1. Relación de Poisson

Es un indicador que expresa cuanto se dilata un sólido en un eje con respecto a una contracción que sufre en su otro eje, en el presente proyecto se obtendrá por medio del nomograma de Eaton, el cual está en función de la profundidad de cada formación de interés, en la ecuación (15).

$$\nu = 0,0645 * \ln(D) - 0,0673 \quad (15)$$

Donde:

D = Profundidad de interés, ft

4.4.2 Cohesión

La cohesión C es una propiedad intrínseca de la resistencia de la roca, y se define como una medida de adherencia entre las partículas de la formación, debido a la presencia de fuerzas atractivas entre los enlaces químicos en los puntos de contacto superficiales de las mismas partículas, esta se puede determinar de manera gráfica o a partir de la ecuación (16).

$$C = \frac{1}{2} (\sigma_v - \sigma_h) \quad (16)$$

4.4.3. Ángulo de Fricción Interna.

El ángulo de fricción interna, ϕ , se encuentra relacionado con el coeficiente de fricción interna. Tiene una variación permisible de 0° a 90° (en la práctica puede llegar a tomar valores aproximadamente entre $20-35^\circ$). En este proyecto calcularemos este valor con una ecuación que relaciona al ángulo de fricción interna con el tiempo de transito compresivo (Barrios, Lobo, Oroño, & Campos, 2017). ecuación (17).

$$\phi = \arcsin \left(\frac{\left(\frac{304,8}{\Delta tc} \right) - 1}{\left(\frac{304,8}{\Delta tc} \right) + 1} \right) * \frac{180}{\pi} \quad (17)$$

Donde:

ϕ : Angulo de fricción interna.

Δtc : Tiempo de tránsito, $\mu sec/ft$

4.4.4. Construcción del círculo de Mohr.

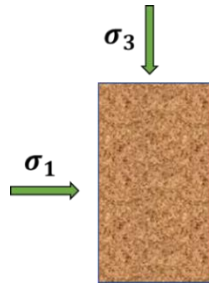
El diagrama de Mohr-Coulomb, el cual está basado en el círculo de Mohr, permite trasladar los esfuerzos de su condición de planos principales donde solo actúan los esfuerzos normales, a los planos en los que están orientadas las fracturas, para determinar cómo afectan los esfuerzos de corte a cada fractura lo cual determina su condición fractura críticamente esforzada o no.

En la actualidad el círculo de Mohr sigue siendo una herramienta muy útil, ya que permite tener una representación gráfica del estado de esfuerzos cambiando el sistema de referencia, la cual permite evaluar los estados de forma intuitiva cómo conocer las direcciones principales.

Para la construcción y para entender más el funcionamiento del círculo de Mohr se asume un cuerpo como se muestra en la Figura el cual es sometido a dos esfuerzos principales.

Figura 11.

Esfuerzos principales sobre un cuerpo.



Sobre éste se van a evaluar los esfuerzos sobre un plano cualquiera de estudio que corte el cuerpo, lo cual se puede realizar de forma matemática teniendo en cuenta el ángulo entre el esfuerzo principal mayor (σ_1) y las siguientes ecuaciones.

Esfuerzo efectivo normal en el círculo de Mohr.

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\theta) \quad (18)$$

Donde

σ_n = Esfuerzo efectivo normal, psi.

σ_1 = Esfuerzo máximo, psi.

σ_3 = Esfuerzo mínimo, psi.

Esfuerzo de corte en el círculo de Mohr.

$$\tau = \frac{\sigma_1}{2} \sin(2\theta) - \frac{\sigma_3}{2} \sin(2\theta) \quad (19)$$

Donde:

τ = Esfuerzo de corte, [psi].

σ_n = Esfuerzo efectivo normal, psi.

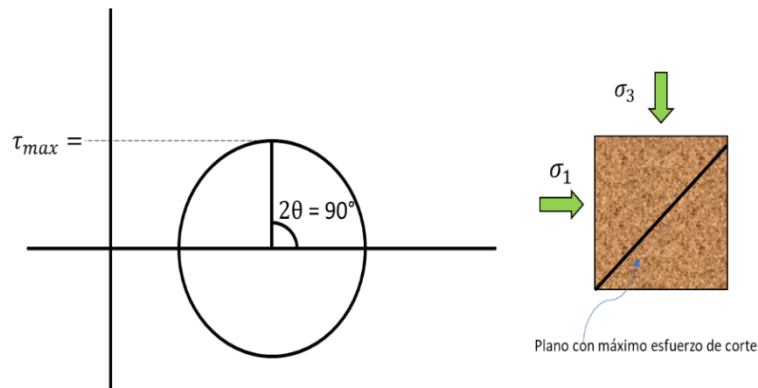
σ_1 = Esfuerzo máximo, psi.

σ_3 = Esfuerzo mínimo, psi.

Al realizar la representación gráfica de los planos con diferentes orientaciones, se llega a que estos puntos describen una circunferencia, lo cual se puede verificar sustituyendo los valores de esfuerzo normal y esfuerzo de corte, de tal forma que se encuentra una expresión que coincide con la ecuación canónica de la circunferencia. Además, cómo se describió anteriormente; intuitivamente se puede evidenciar que el esfuerzo de corte máximo está presente cuando el ángulo entre el esfuerzo principal y el plano es 45° , cómo se observa en la Figura.

Figura 12.

Círculo de Mohr.



4.5 Estimación del esfuerzo horizontal mínimo

Como se mencionó anteriormente e las literaturas se pueden encontrar varias correlaciones empíricas desarrolladas para zonas específicas del mundo que permiten calcular al menos uno de los esfuerzos principales, en este caso el esfuerzo horizontal mínimo, lo que provee información valiosa para la estabilidad de pozo durante la perforación.

Una de ellas es la desarrollada por Holbrook (1990) involucra la porosidad, el esfuerzo vertical, presión de poro y propone la relación mostrada en la ecuación (20).

$$\sigma_h = (1 - \Phi)(S_V - P_p) + P_p \quad (20)$$

Donde:

σ_h : Esfuerzo horizontal minimo.

σ_v : Presion de sobrecarga

P_p : Presion de poro, psi

Φ = Porosidad

4.6 Estimación del esfuerzo horizontal máximo

Es el tercer esfuerzo in-situ que es de importancia conocer, debido a que servirá como un dato de entrada en el modelo de análisis de estabilidad del pozo. Se han desarrollado varios métodos indirectos para calcular un estimado de la magnitud del esfuerzo horizontal máximo. Sin embargo, debido a que no se poseen muestras de núcleos de la formación es imposible conocer sus respectivos datos de la deformación causada por este esfuerzo, y en ausencia de mediciones de algún fracturamiento hidráulico que nos proporcione de forma directa el valor del esfuerzo máximo horizontal.

Tal cómo se expresó en el marco teórico, la determinación del esfuerzo horizontal máximo se puede realizar con el conocimiento de amplitud del breakout o identificando la presencia de fracturas inducidas por tensión, por lo cual una de las pocas herramientas es partir de que el esfuerzo horizontal máximo es aproximadamente 1,2 veces el esfuerzo horizontal mínimo (Ecuación 21).

$$\sigma_H = 1,2\sigma_h \quad (21)$$

4.7 Estimación de la presión de fractura.

La presión de fractura es la máxima presión que puede ejercer el lodo antes de fracturar la formación. La manera más común por la cual se determina la presión de fractura es por medio de pruebas LOT, XLOT y minifrac, Sin embargo, existen ocasiones donde no se disponen de estos

datos por eso existen varias correlaciones que también pueden ser implementadas para la estimación de la presión de fractura, Un método para hallar la presión de fractura es por medio de las ecuaciones (22) y (23) según Aadnoy B, & Looyeh, R. 2011, la cual asume que el esfuerzo tangencial mínimo es igual a la resistencia ténsil y aparecerá una falla por tensión.

$$Pf = 3\sigma_x - \sigma_y - Pp \text{ si } \begin{cases} \sigma_x < \sigma_y \\ \theta = 90 \end{cases} \quad (22)$$

$$Pf = 3\sigma_y - \sigma_x - Pp \text{ si } \begin{cases} \sigma_y < \sigma_x \\ \theta = 90 \end{cases} \quad (23)$$

Donde:

Pf : Presión de fractura

σ_x, σ_y : Esfuerzos en el plano X y Y respectivamente

θ : Ángulo de rotación de acuerdo a la inclinación del pozo medido desde el eje X

4.8 Estimación de la presión de colapso

A cierta profundidad de la tierra las formaciones se encuentran expuestas a un esfuerzo vertical (σ_v), a esfuerzos horizontales (σ_h y σ_H) y a la presión de poro (PP). Cuando se realiza las operaciones de perforación en un pozo, la roca que rodea al pozo de soportar la carga que era soportada antes por la roca removida. En otras palabras, la presión de colapso es la mínima presión que debe ejercer el lodo para evitar las fallas de corte en el pozo, la cual Puede calcularse a partir de las ecuaciones (24 y 25) según Aadnoy B, & Looyeh, R. 2011.

$$P_c = \frac{1}{2}(3\sigma_x - \sigma_y)(1 - \text{sen}\phi) - c * \text{cos}\phi + P_p \text{sen}\phi \text{ si } \begin{cases} \sigma_x < \sigma_y \\ \theta = 90 \end{cases} \quad (24)$$

$$P_c = \frac{1}{2}(3\sigma_y - \sigma_x)(1 - \text{sen}\phi) - c * \text{cos}\phi + P_p \text{sen}\phi \text{ si } \begin{cases} \sigma_y < \sigma_x \\ \theta = 90 \end{cases} \quad (25)$$

Donde:

σ_x, σ_y : Esfuerzos en el plano X y Y respectivamente

Φ : Ángulo de fricción interna

P_p : Presion de poro, psi

c : Cohesión = $1/2 (\sigma_1' - \sigma_3')$

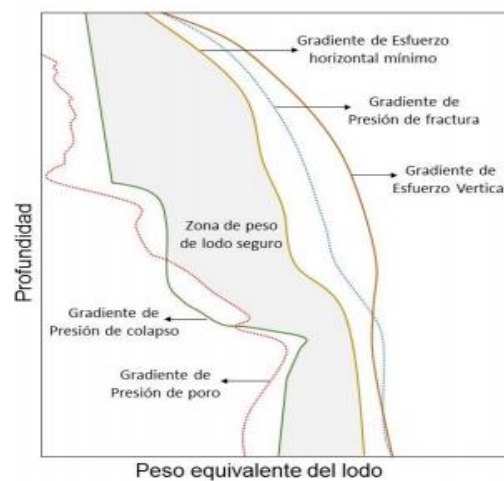
Θ : Angulo de rotación de acuerdo a la inclinación del pozo medido desde el eje X.

4.9 Ventana operacional de lodo

La ventana segura de lodo es el resultado más importante del estudio geomecánico y el cual tiene como objetivo encontrar el mínimo y máximo peso de lodo permitido para evitar problemas de estabilidad anteriormente descritos. La ventana de lodo está conformada por la línea de presión de poro, presión de fractura, presión de colapso y la del esfuerzo vertical tal como se muestra en la figura.

Figura 13.

Esquema de una ventana de lodo.



Tomado de FJAER, E.; HORSRUD, P.; RAAEN, A. and RISNES, R. Petroleum related rock mechanics. Second edition. 2008. The Netherlands: Elsevier.

5. Validación de la metodología

La validación de la metodología será realizada por medio del programa Excel usando datos de campo los cuales permitirá la validación de la metodología expuesta en el capítulo anterior, realizando comparaciones entre los métodos seleccionados y finalmente con la construcción de la ventana segura del lodo correspondiente a cada método.

5.1 Auditoria de datos

Para la validación de la metodología inicialmente se identificaron los datos que se encontraban disponibles en la información proporcionada, se realiza un análisis de datos en cuanto a la metodología expuesta en el capítulo anterior, se logran identificar datos de registros sísmico (DTC) density (DRHO) Y Gamma Ray, los cuales es información suficiente para el desarrollo de la ventana segura de lodo.

Por motivos de confidencialidad estos datos no serán presentados y solo se expondrán los resultados gráficos.

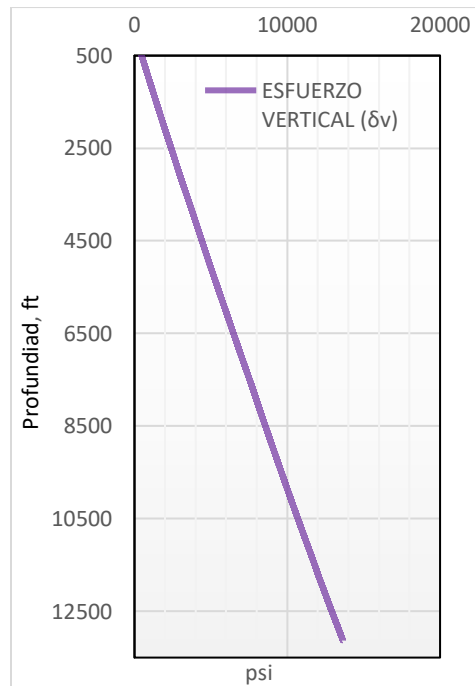
5.2 Esfuerzo vertical

Como se mencionó el capítulo anterior la estimación del esfuerzo vertical se realizó por la integración de la densidad de la roca por medio de la ecuación ya mencionada anteriormente. Con los datos suministrados se realiza la construcción de la curva del esfuerzo vertical tal como se muestra en la (figura 13 se observa la tendencia de los datos obtenidos además de manera general

se puede concluir que el resultado es confiable ya que se contaba con un registro density de buena calidad.

Figura 14.

Curva esfuerzo vertical, modelo Excel.



5.3 Presión de poro

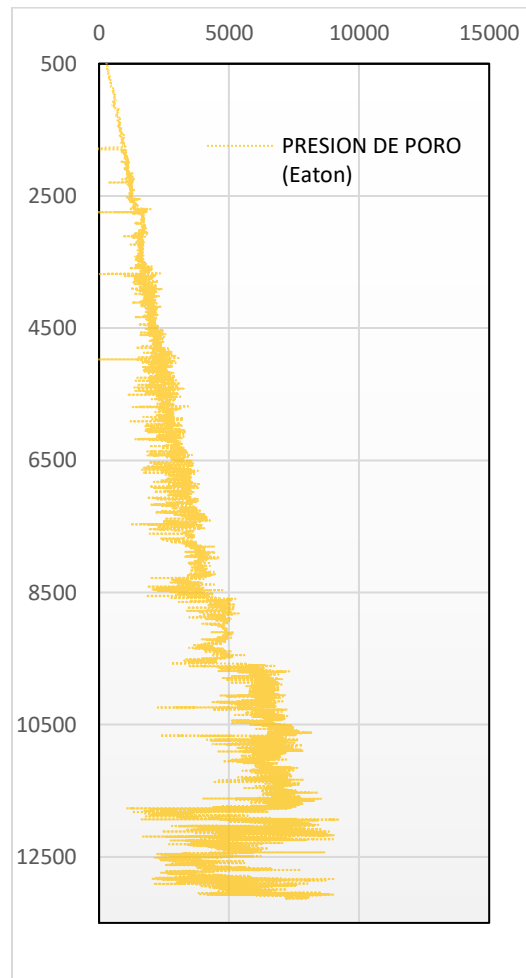
Siguiendo con la metodología expuesta anteriormente para el cálculo de la presión de poro, se cuenta con registros sísmicos y density los cuales son necesarios para hacer su estimación a partir de las metodologías seleccionadas.

5.3.1 Estimación de la presión de poro a partir del método de Eaton (1975)

En la aplicación de este método se usó la correlación disponible para el registro sísmico (ecuación 11), se usan los datos del registro con un intervalo de profundidad de 0.5 ft. Como se muestra en la (figura 14)

Figura 15.

Curva de presión de poro a partir del método Eaton, modelo Excel.

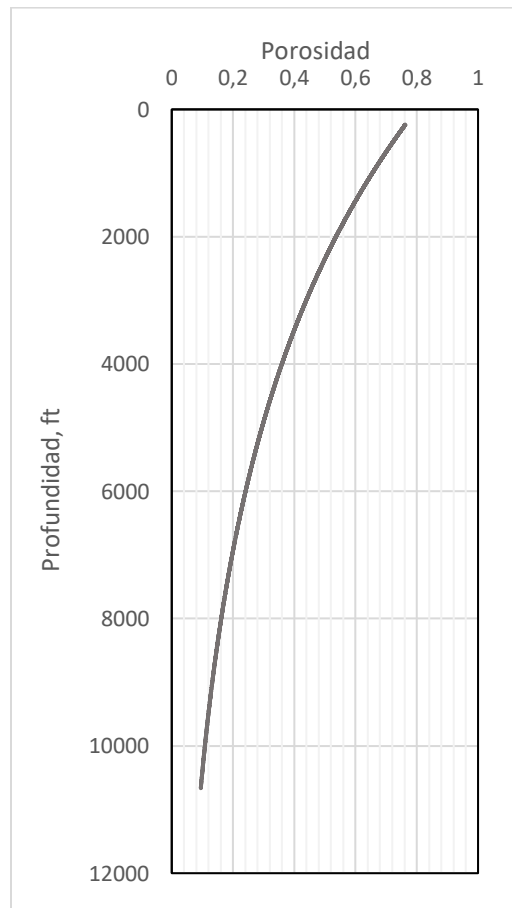


5.3.2 Estimación de la presión de poro a partir de la porosidad.

Para determinar la presión de poro mediante este método inicialmente se debe hacer una estimación de la tendencia de porosidad de compactación normal a partir de la ecuación (12), en la (figura 15) se muestra dicha tendencia.

Figura 16.

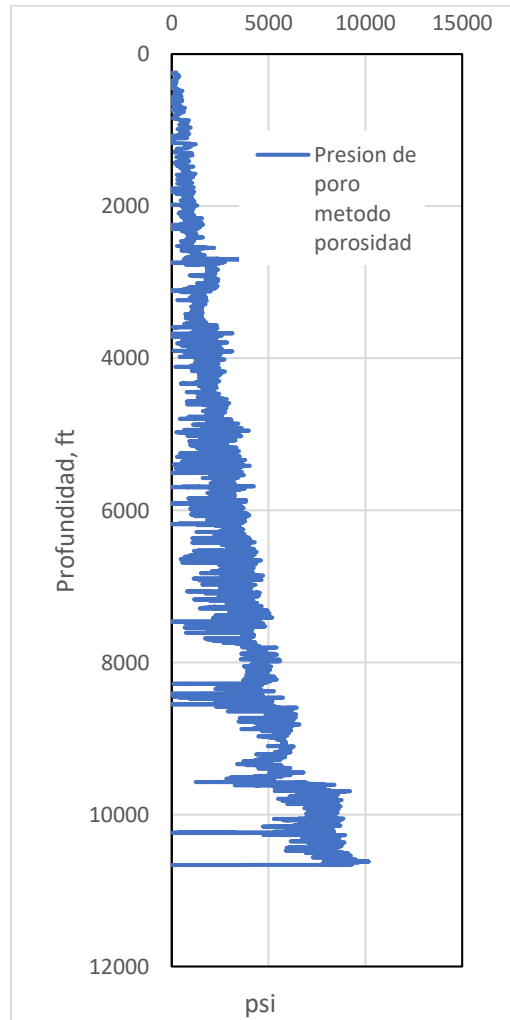
línea de tendencia de porosidad de compactación normal. modelo Excel.



En el siguiente paso se aplica (ecuación 13) la cual determina la presión de poro teniendo en cuenta la constante de compactación (c) obtenida anteriormente, la curva de presión de poro a partir de este método se muestra en la (figura 16)

Figura 17.

Curva de presión de poro a partir del método de porosidad, modelo Excel.

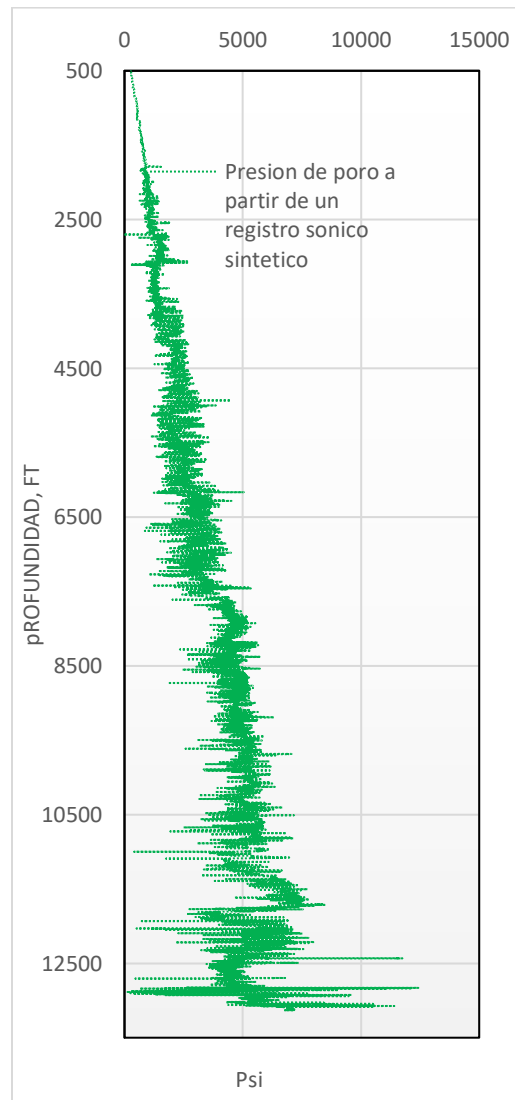


5.3.3 Estimación de la presión de poro a partir de un registro sísmico sintético.

Se pueden presentar situaciones donde no se cuenta con datos de registro sísmico, por eso es necesario crear un registro sísmico sintético a partir de los datos disponibles, en este caso se cuenta con un registro density, así que implementando la (ecuación 14) se generan valores de tiempo de tránsito para la zona de estudio, una vez teniendo los datos de tiempo de tránsito estimados se aplica la (ecuación 11) y a partir de ahí implementando la misma metodología del primer método mencionado se obtiene la presión de poro, el resultado se muestra en la (figura 17)

Figura 18.

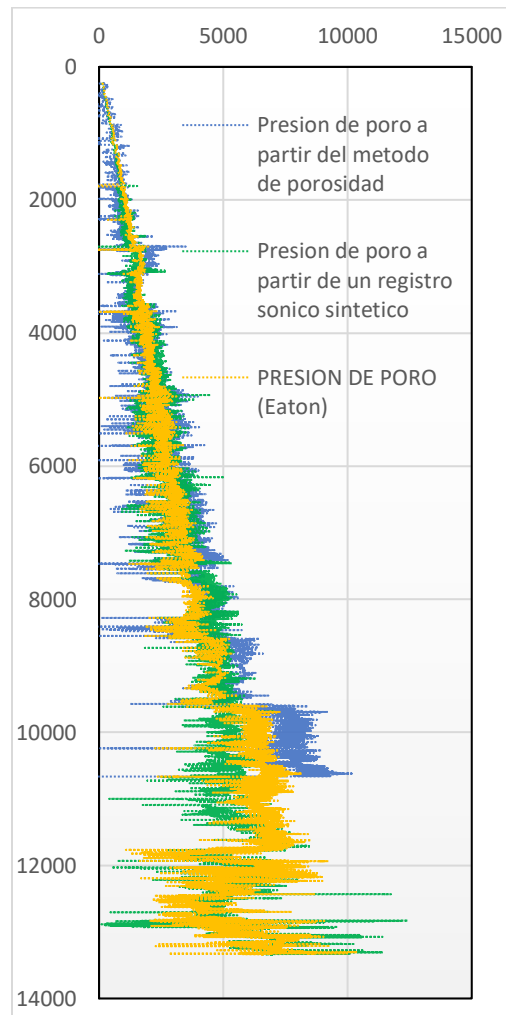
Curva de presión de poro a partir de un registro sísmico sintético, modelo Excel.



En la (figura 18) se muestran los datos de presión de poro obtenidos por cada uno de los métodos seleccionados, es importante recalcar que los datos muestran un buen ajuste en comparación uno del otro, por el cual se puede decir que los métodos aplicados tienen una confiabilidad aceptable.

Figura 19.

Presión de poro a partir de los métodos seleccionados, modelo Excel.



5.4 Propiedades mecánicas de la roca

Para el cálculo de las propiedades mecánicas de la roca se debe cuestionar si se dispone de pruebas de laboratorio que permitan la determinación de dichas propiedades, lo que sería la manera más ideal y exacta de calcularlas, para este caso no se disponen de dichos datos por lo que se implementaron las ecuaciones que aparecen en la metodología anteriormente descrita.

5.4.1 Relación de Poisson

Esta propiedad es importante conocerla a la hora de hacer una ventana de estabilidad de un pozo ya que es una medida de la deformación lateral respecto a la deformación longitudinal, es decir si sobre la roca actúa una fuerza compresiva esta será la relación de elongación lateral respecto a la contracción longitudinal.

Para hacer la estimación de la constante de Poisson se aplicó la (ecuación 15)

5.4.2 Ángulo de Fricción Interna.

En la literatura mencionada anteriormente se pueden encontrar varias correlaciones para la estimación del ángulo de fricción interna, para este caso se estimó a partir de la (ecuación 17) ya que mostró buenos resultados, es decir, se obtuvieron valores en un rango de 19 a 40° el cual se considera un rango valido para las litologías en estudio.

5.4.3 Cohesión

Este es un parámetro muy importante en cuanto al desarrollo de la ventana de estabilidad ya que nos ayuda a proporcionar variables importantes como es la presión de colapso, para su estimación aplicamos la ecuación (16) citada anteriormente.

En la (figura 19) se muestra el comportamiento obtenido para cada una de las propiedades mecánicas de la roca con las correlaciones seleccionadas.

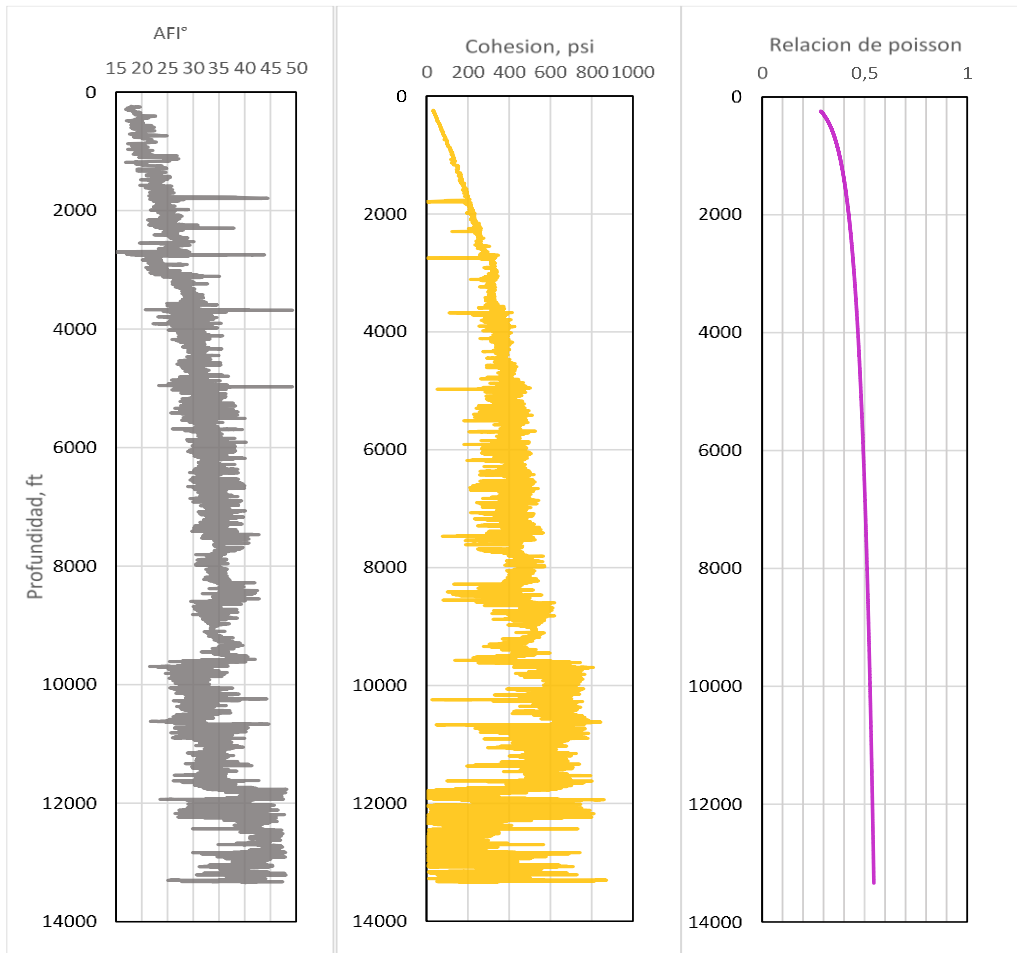
5.5 Estimación de esfuerzo horizontal mínimo (modelo Excel).

Siguiendo con lo que corresponde a la metodología propuesta, el cálculo del esfuerzo horizontal mínimo se realiza a partir de la correlación descrita en el capítulo anterior.

En este proceso, el cálculo del esfuerzo horizontal mínimo depende de la presión de poro, es decir que se obtiene valores de esfuerzo horizontal mínimo dependiendo de la metodología seleccionada, en la (figura 20) se muestran los datos obtenidos para cada uno de los métodos.

Figura 20.

Propiedades mecánicas de la roca, modelo Excel.



5.6 Estimación de esfuerzo horizontal máximo (modelo Excel).

El esfuerzo horizontal mínimo como se mencionó en los capítulos anteriores se puede determinar de diferentes formas, en este caso no se contaba con la información suficiente para su

estimación por lo se hace un supuesto y es que el esfuerzo horizontal mínimo es 1,2 veces mayor que el esfuerzo horizontal mínimo.

Figura 21.

Curvas de esfuerzo horizontal mínimo, modelo Excel.

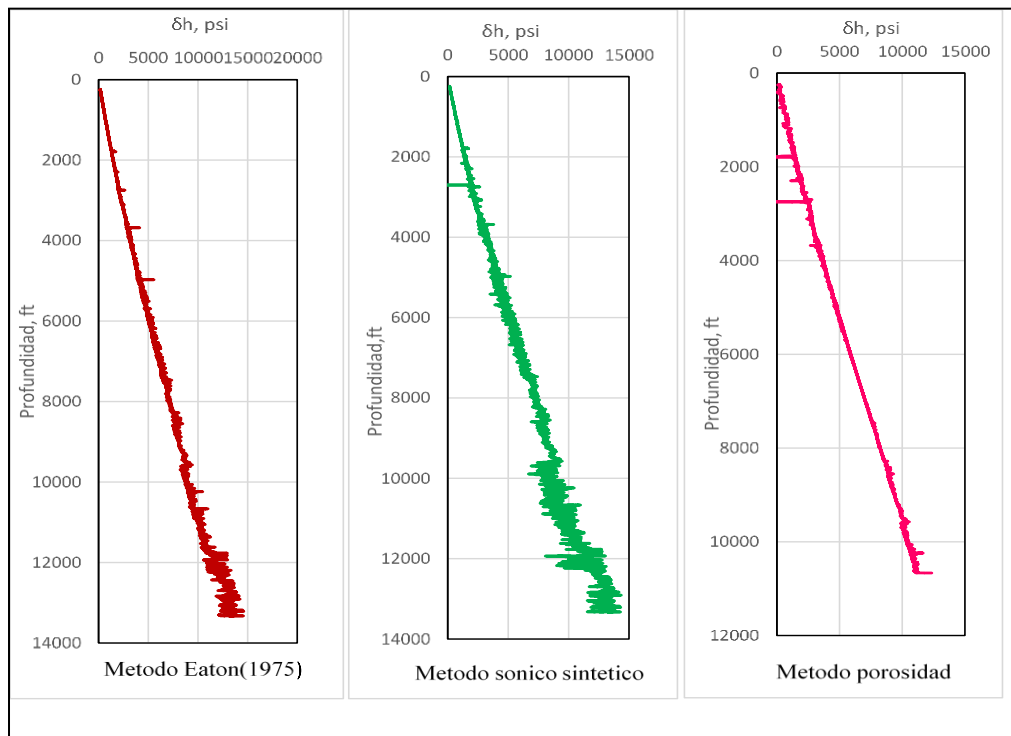
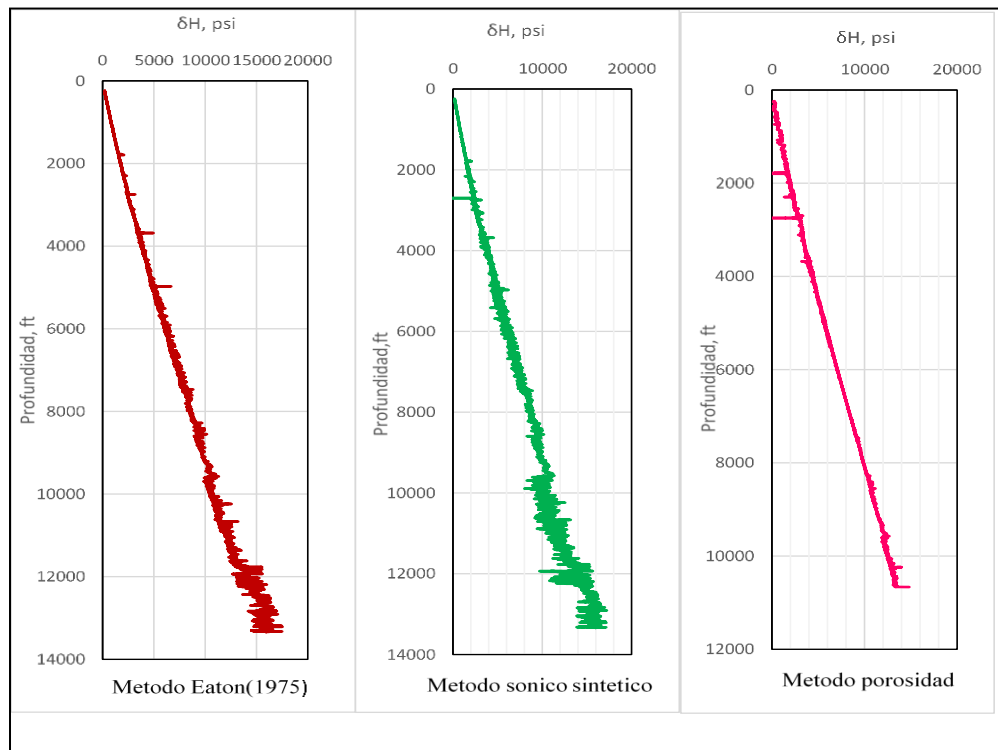


Figura 22.

Curvas de esfuerzo horizontal máximo. Modelo Excel



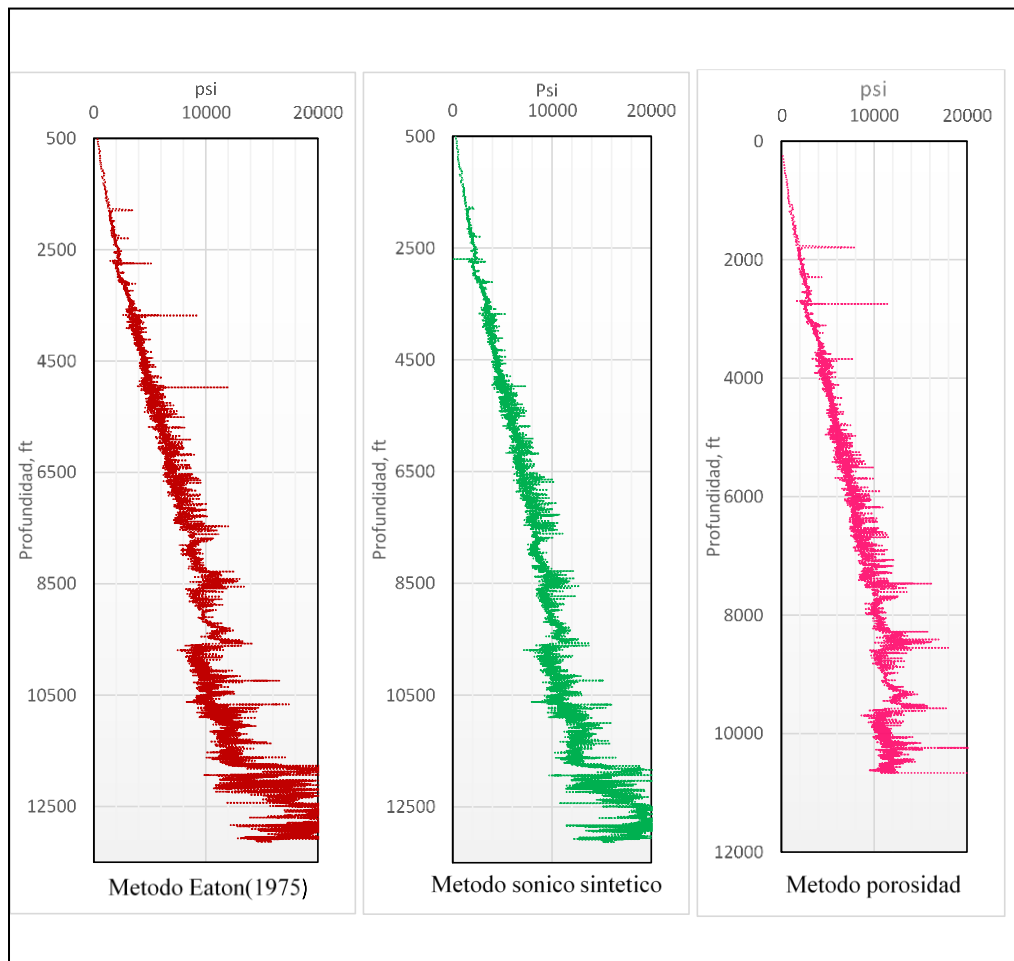
5.7 Estimación de la presión de fractura (modelo Excel).

El cálculo de la presión de fractura se realizó en función de los esfuerzos horizontales y la presión de poro mediante la (ecuación 22), esta se realizó para cada uno de los métodos de estimación de presión de poro, ya que la presión de fractura depende de dicha variable.

En la (figura 22) se muestran las curvas de presión de fractura para cada uno de los métodos seleccionados.

Figura 23.

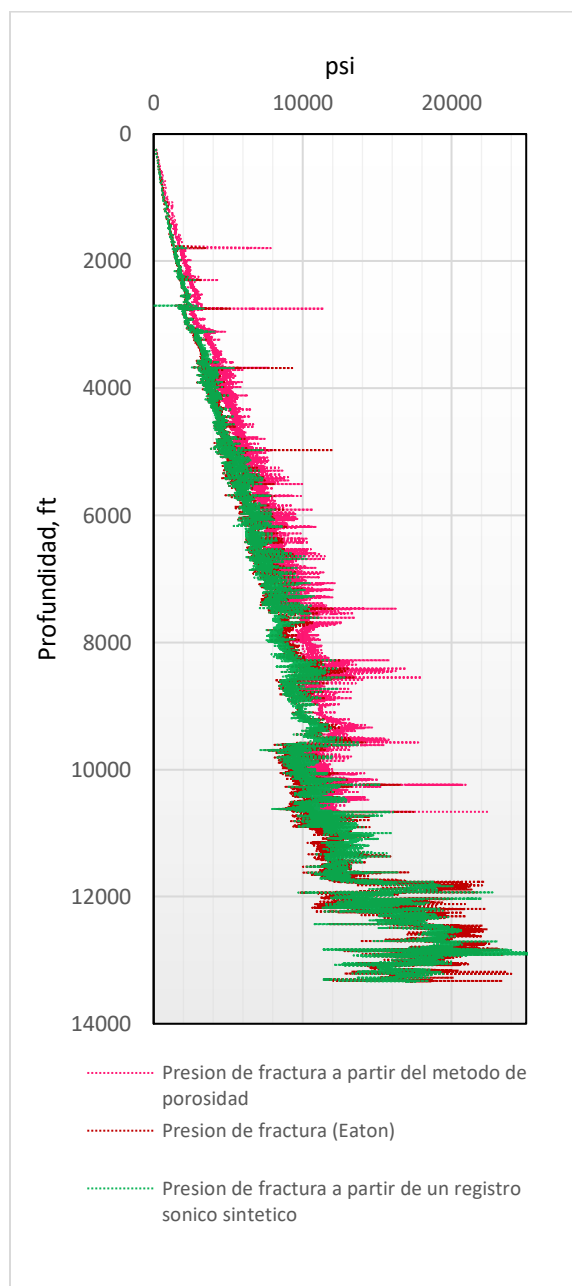
Curvas de presión de fractura modelo Excel.



En la (figura 23) se muestra la comparación de las curvas de presión de fractura obtenidas para cada uno de los métodos, es importante recalcar que las curvas muestran un buen ajuste, es decir que cualquier método que sea seleccionado puede arrojar valores confiables.

Figura 24.

Presión de fractura a partir de los métodos seleccionados, modelo Excel.

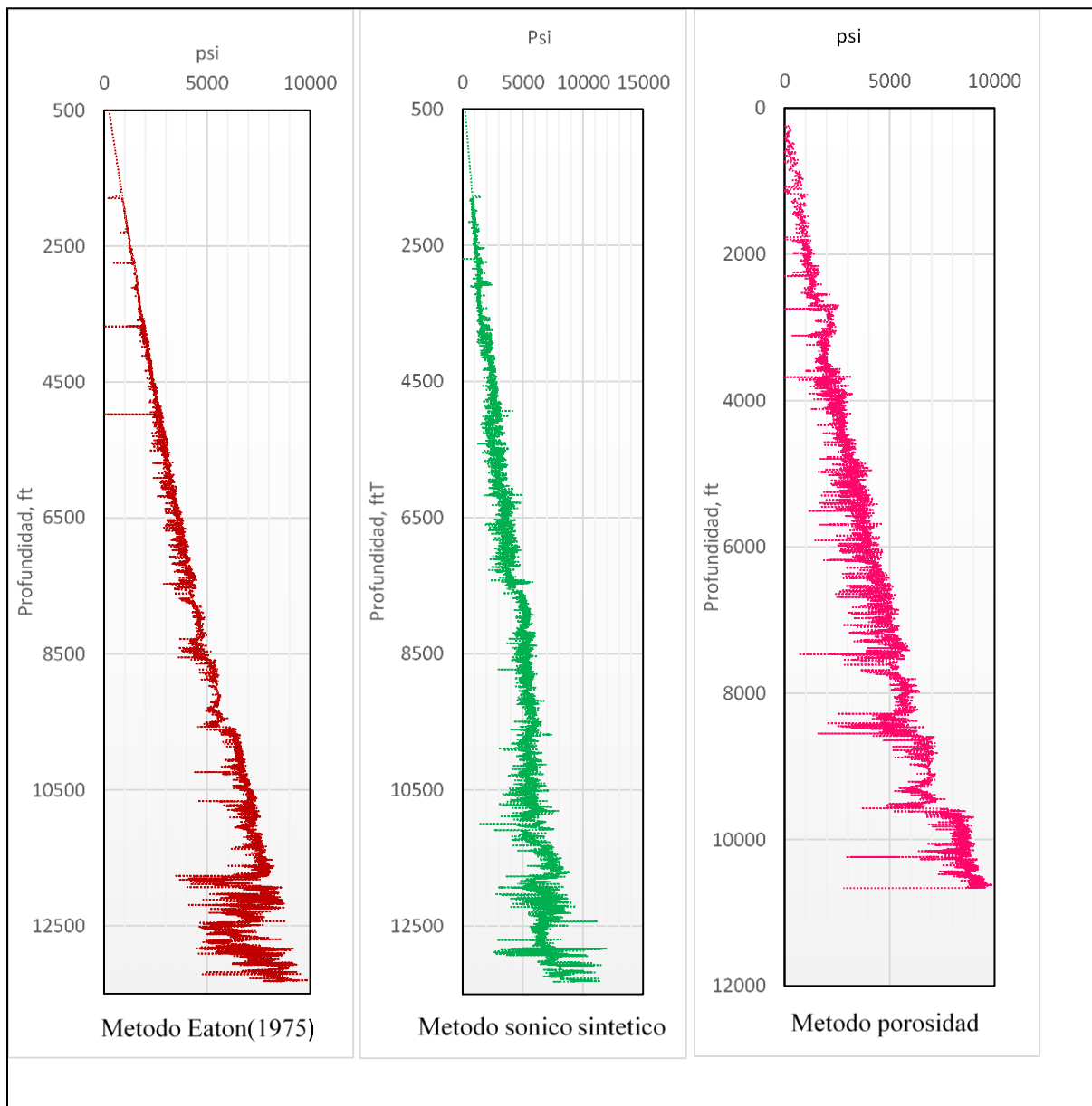


5.8 Estimación de la presión de colapso (modelo Excel).

Siguiendo con la metodología propuesta la presión de colapso sabemos que está en función de los esfuerzos horizontales, la presión de poro, la cohesión y el ángulo de fricción interna, los resultados obtenidos se muestran en la (figura 24)

Figura 25.

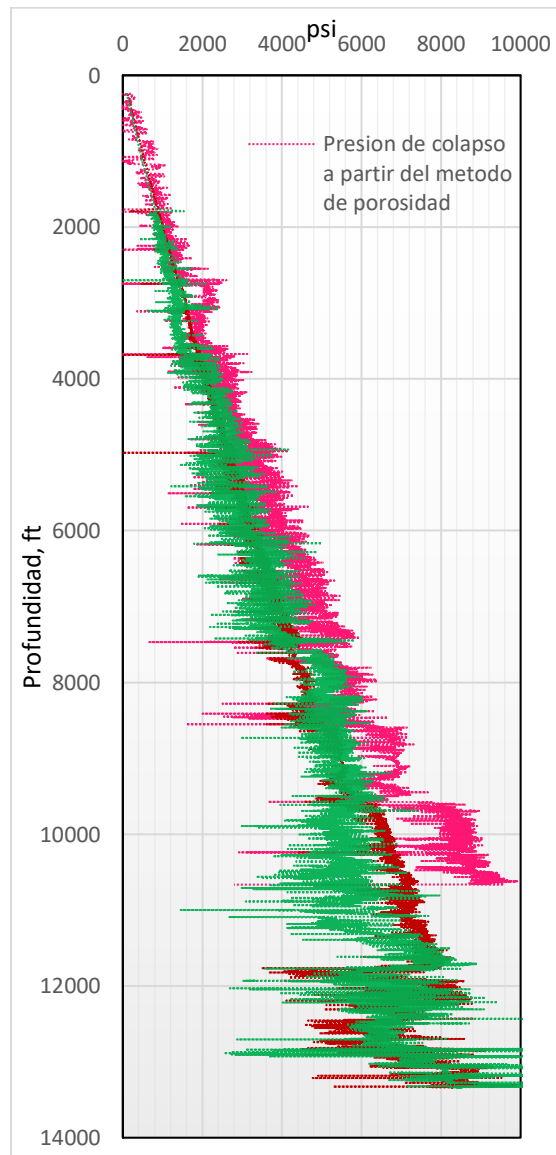
Curvas de presión de colapso, modelo Excel.



En la (figura 25) se puede ver la tendencia de las curvas de presión de colapso obtenidas para cada uno de los métodos, es importante recalcar que las curvas muestran un buen ajuste, es decir que cualquier método que sea seleccionado puede arrojar valores confiables.

Figura 26.

Presión de colapso a partir de los métodos seleccionados, modelo Excel.



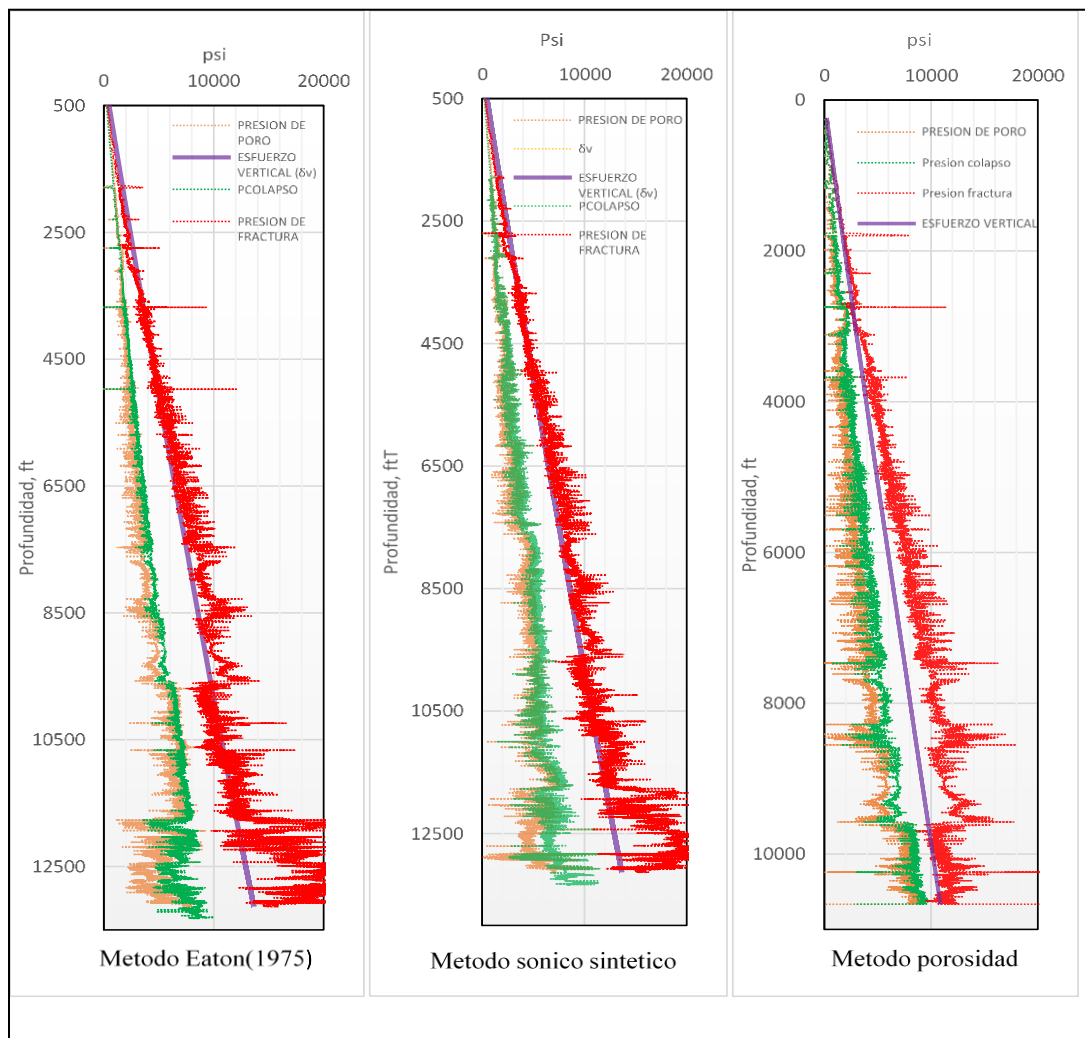
5.9 Ventana operacional de lodo (modelo Excel).

De acuerdo con el planteamiento de la metodología se hace el cálculo de la ventana operacional del lodo una vez hecho la estimación de las variables anteriores, se grafica una ventana para cada método aplicado, esta ventana como se mencionó anteriormente se calculó a partir de parámetros geomecánicos.

En la (figura 26) se muestra la ventana segura del lodo encontrada de acuerdo al método seleccionado

Figura 27.

Ventana de lodo obtenida para cada método, modelo Excel.



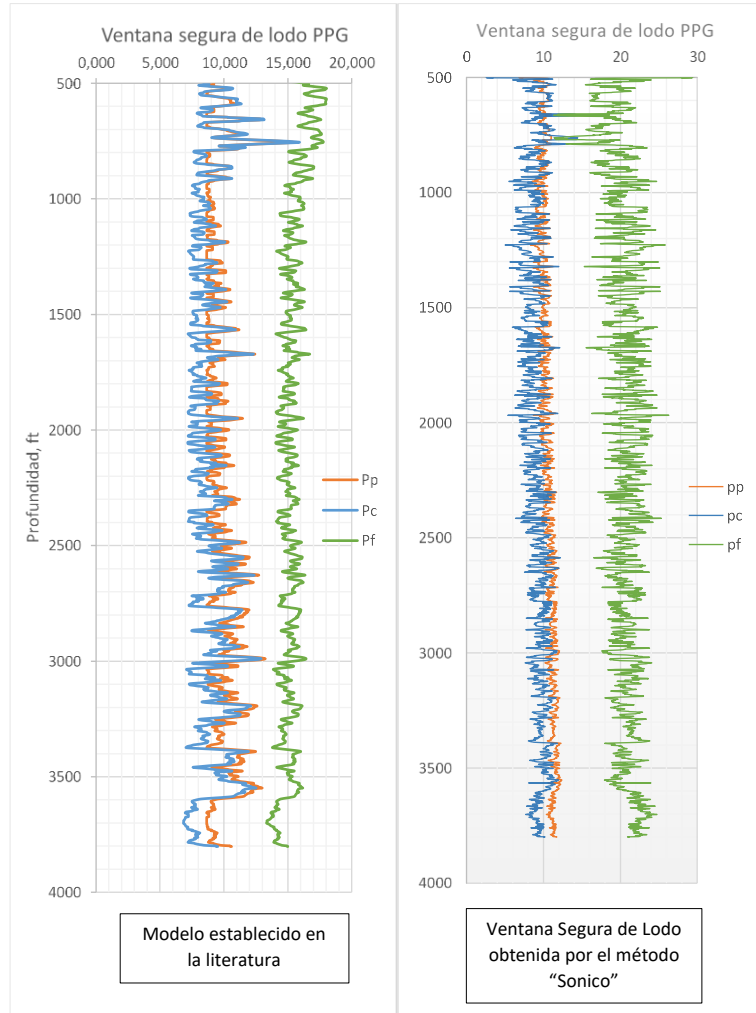
6. Validación de la metodología mediante datos y modelos establecidos en la literatura.

En este capítulo se quiere hacer la validación de la metodología expuesta en el capítulo 4 por medio de datos establecidos en la literatura, esto se hace con el fin de comprobar y comparar resultados obtenidos entre modelos ya realizados y los obtenidos mediante la metodología propuesta en este proyecto.

Para llevar a cabo esta sección se tomaron datos que fueron utilizados en el trabajo de pregrado titulado “metodología para diseñar el modelo geomecánico 1d de estabilidad de pozos” desarrollada por Olga, D & Vanessa, M. (2016). A continuación, se muestran cada una de las ventanas operacionales de lodo construidas a partir de los métodos propuestos; Sonico, Sonico sintético y Porosidad,

Figura 28.

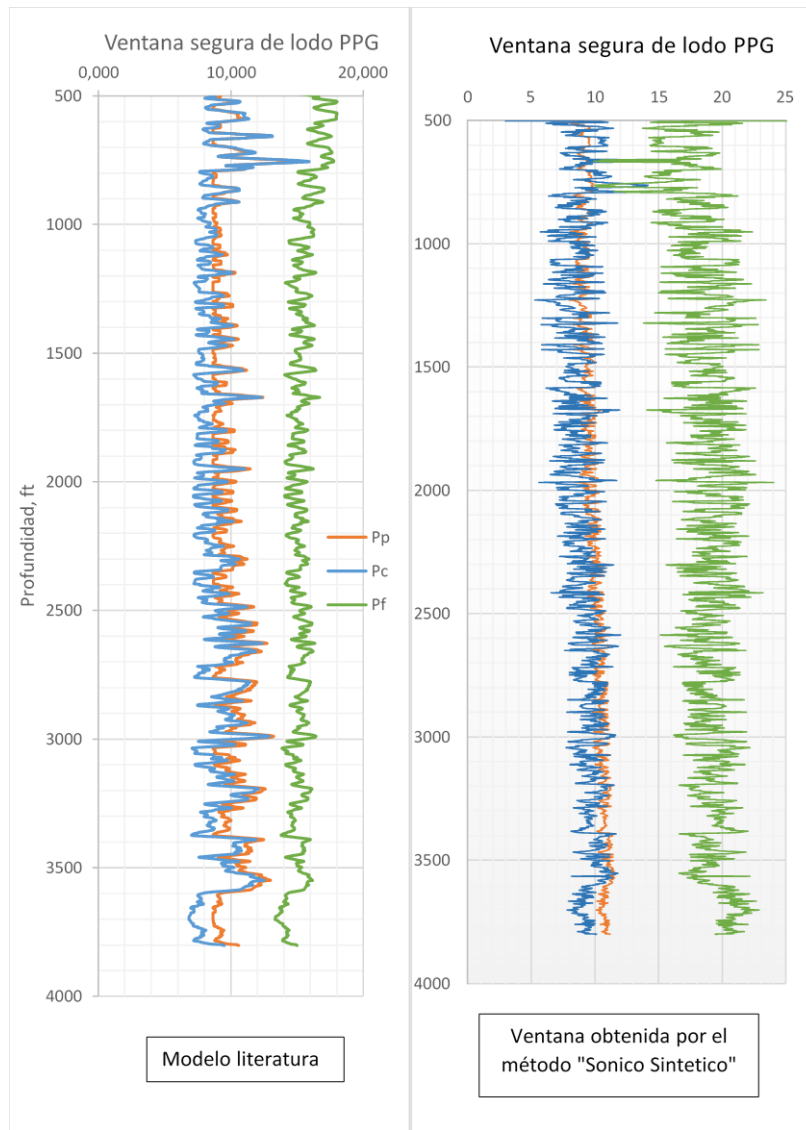
Validación de la metodología con datos establecidos en la literatura (Método sónico)



En la (figura 28) se muestra la comparación entre la ventana operacional del lodo a partir del modelo establecido en la literatura y el modelo propuesto, también se puede observar que cada una de las curvas obtenidas por el método Sónico se ajustan de una manera aceptable permitiendo así poder el poder validar dicho método.

Figura 29.

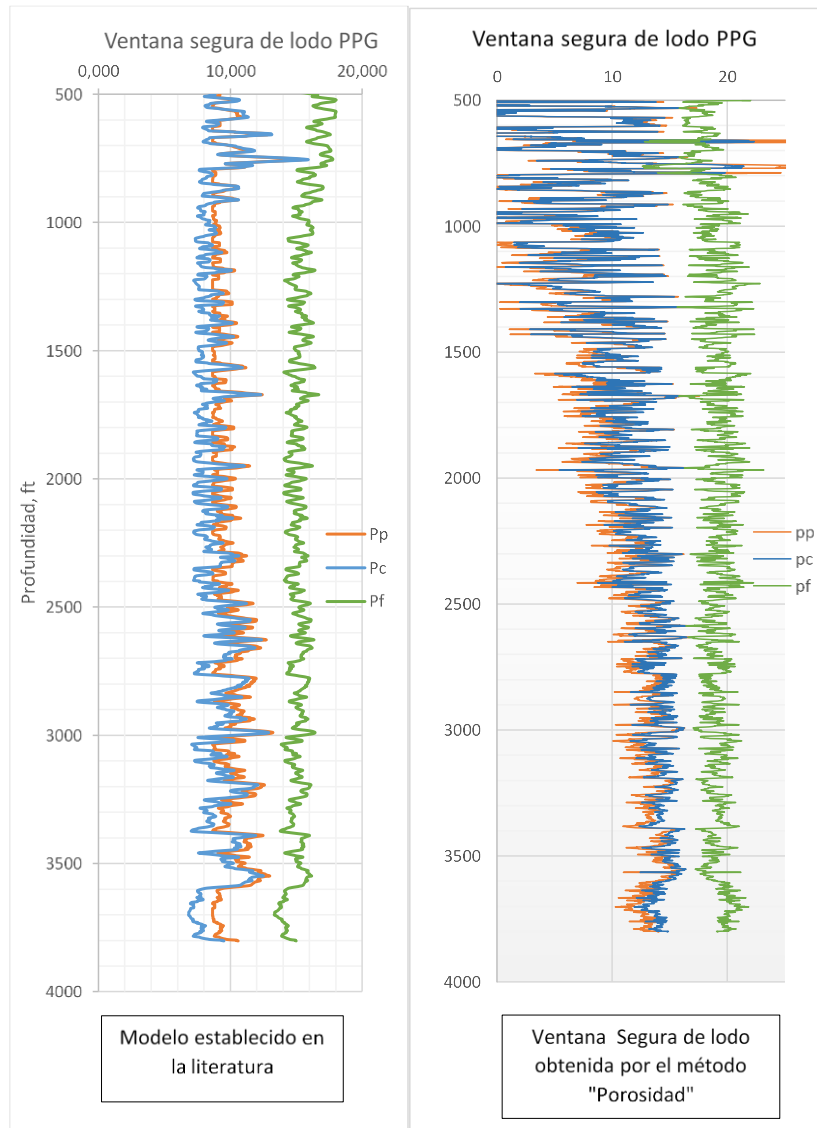
Validación de la metodología con datos establecidos en la literatura (Método sónico sintético)



En la (figura 29) se muestra la comparación entre la ventana operacional del lodo a partir del modelo establecido en la literatura y el modelo propuesto, Así como en el método Sonico, en el Sonico Sintético también se puede observar que cada una de las curvas obtenidas se ajustan de una manera aceptable permitiendo así el poder validar dicho método.

Figura 30.

Validación de la metodología con datos establecidos en la literatura (Método Porosidad)



En la figura 30 se presenta la comparación entre el modelo obtenido en la literatura y el modelo llamado “método porosidad”, en esta figura se observa que este método no se ajustó de manera eficiente debido a que la información de porosidad era muy pobre y se tuvo que hacer una estimación aproximada de la porosidad a partir de datos de registros sísmico, esto se hizo ya que el

“método porosidad” requiere obligatoriamente datos de porosidad para poder hacer los cálculos de cada una de las curvas que conforman la ventana segura de lodo.

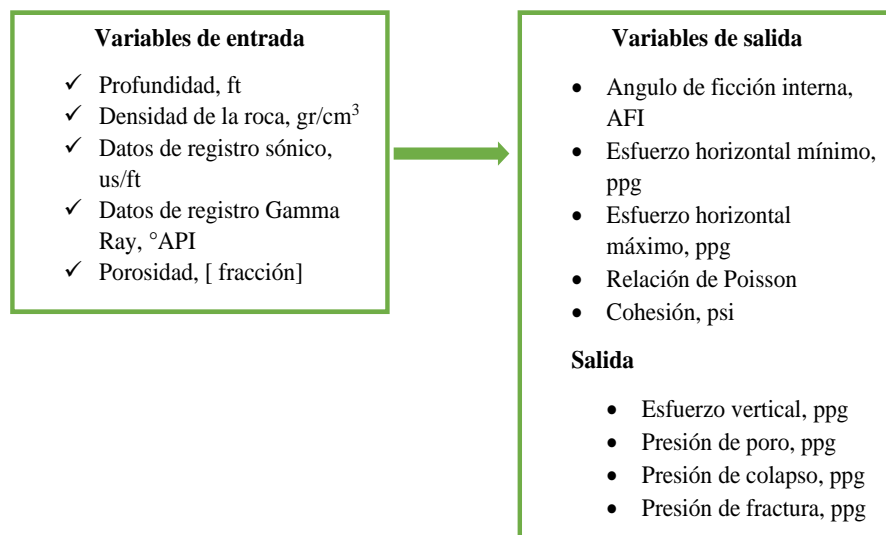
En este punto se puede concluir que las metodologías evaluadas anteriormente tanto, Método Sonico, Sonico sintético y Porosidad se pueden llegar a utilizar de manera confiable y segura esperando resultados de buena calidad.

7. Definición de variables de entrada y salida del aplicativo móvil

Para el desarrollo del aplicativo móvil inicialmente es necesario definir los parámetros de entrada y salida ya que a raíz de esto se definen las funciones que deberá cumplir la aplicación, en la metodología descrita anteriormente se mencionaron los procedimientos con la cual se logra calcular todas las variables de salidas y con las que el usuario podrá interactuar e incluso almacenar, en la (figura 27) se muestran las variables de entrada y salida.

Figura 31.

Variables de entrada y salida definidas por los autores.



La estabilidad y el rendimiento están relacionados con la calidad de datos ingresados, en consecuencia, datos veraces, otorgaran buenos resultados. Por otra parte, se considera que el aplicativo tiene una portabilidad que se ajusta a la de los usuarios en la industria Oil & Gas, debido a que no necesita estar conectada a internet para su funcionamiento y además de eso presta un servicio móvil

8. Metodología para el desarrollo de la aplicación

Un aplicativo móvil o aplicación, es una aplicación informática diseñada para ser ejecutada en teléfonos inteligentes, tabletas y otros dispositivos móviles. Este tipo de aplicaciones permiten al usuario efectuar un variado conjunto de tareas profesional, de ocio, educativas, de acceso a servicios, etc. Facilitando las gestiones o actividades a desarrollar. Por lo general, se encuentran disponibles a través de ciertas plataformas de distribución, o por intermedio de las compañías propietarias de los sistemas operativos móviles tales como Android, iOS, BlackBerry OS, Windows Phone, entre otros.

En esta sección se llevaron a cabo varias fases las cuales según Gasca, Camargo y Medina (2014), son análisis, diseño, desarrollo, pruebas de funcionamiento y entrega. Estas son fundamentales para el desarrollo de una aplicación.

En la actualidad existen diferentes tipos de lenguajes de programación para el desarrollo de aplicativos móviles, ya que estos son la base para construir todas las aplicaciones digitales. Entre los lenguajes más comunes podemos encontrar: BASIC 4 ANDROID, JAVA, KOTLIN,

HTML5 + CSS entre otros. Para el presente proyecto se aplicó el lenguaje de programación BASIC4 A NDROID (B4A)

8.1 Análisis.

En esta fase se analiza la problemática a resolver o requerimientos del cliente para la cual se quiere desarrollar el aplicativo, además en esta etapa se determina los parámetros o características que debe tener la aplicación, así como definir las variables de entrada y salida las cuales ya se definieron en el capítulo 7.

El desarrollo de aplicaciones para dispositivos móviles requiere tener en cuenta las limitaciones de estos dispositivos. las principales características que se deben considerar son: gran variedad de tamaños de pantalla, datos específicos de software y hardware como también distintas configuraciones. El desarrollo de aplicaciones móviles requiere el uso de entorno de desarrollo integrados.

8.2 Diseño

En esta fase lo que se hace es plasmar la idea así de esta manera integrar aspectos técnicos, funcionales mediante la definición del escenario y la estructura del software.

8.2.1. Definir el escenario.

Las aplicaciones móviles se pueden aplicar en diferentes escenarios dependiendo del sistema de conexión y sincronización con el que se quiera trabajar o con las especificaciones para la cual fue desarrollada la aplicación, estos escenarios son, desconectado, semiconectado y conectado.

- **Desconectado.** Permite que la aplicación funcione, realice los procesos sin necesidad de estar conectado a una red de internet.

- **Semiconectado.** Los procesos también pueden ejecutarse en el dispositivo sin necesidad de estar conectado, pero se requiere establecer conexión en algún momento para terminar el proceso, al sincronizar la información con el servidor o aplicación central.
- **Conectado.** Para este caso el dispositivo siempre debe estar conectado a alguna red de internet para que esta pueda realizar de manera correcta todos los procesos.

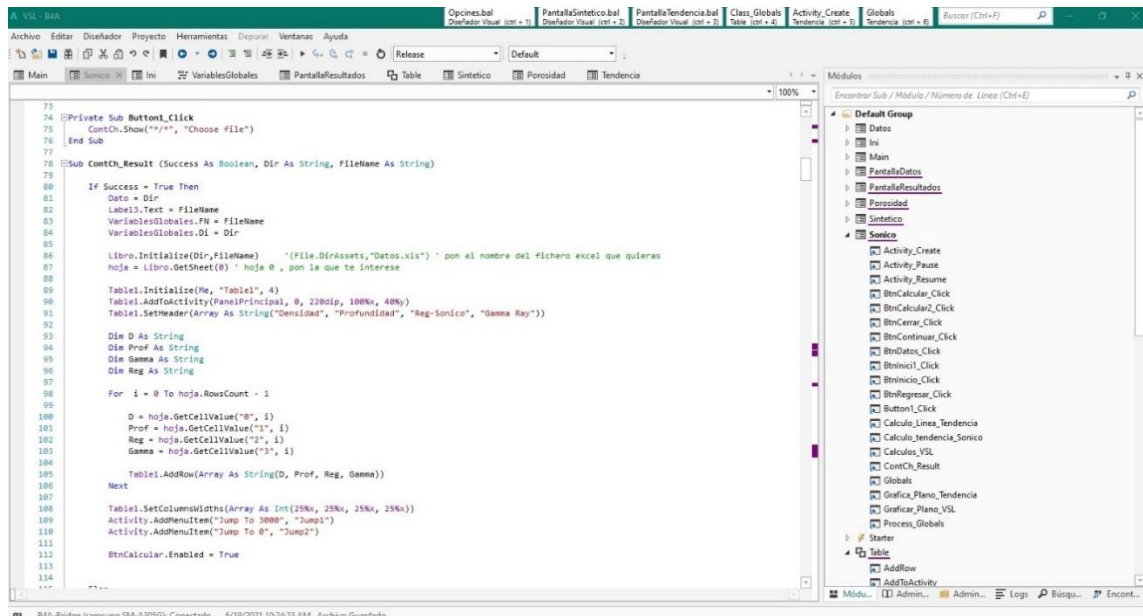
La aplicación “VSL” ha sido desarrollada para trabajar en un escenario desconectado, donde no es necesario estar conectado a internet para poder que esta realice todas las funciones o procesos, este escenario se eligió basados en las necesidades del usuario, ya que hay zonas donde no se presentan conectividad a internet inestable o nula de esta manera permitiendo que sea utilizada en cualquier momento.

8.2.2 Estructurar el software.

Para determinar la estructura de una aplicación se pueden utilizar diagramas en los que se puedan visualizar las diferentes perspectivas dependiendo de las necesidades que se quieran cumplir con el software. Los diagramas de modelado de lenguaje unificado, *Unified Modeling Language* (UML) permiten generar este tipo de diagramas para la visualización de objetos, estados y procesos dentro de un sistema como se muestra a continuación.

Figura 32

Formato lenguaje B4A (L. Basic).



Screenshot tomado del programador de Basic 4 Android

Para nuestro caso de estudio se empleará el lenguaje de programación B4A debido a que es una herramienta de desarrollo rápido de aplicaciones para aplicaciones nativas de Android, dicho lenguaje de programación es uno de los más completos y sencillos a la hora de manejar. Está cuenta además con un diseñador visual que simplifica el proceso de creación de interfaces de usuario dirigidas a teléfonos y tabletas con diferentes tamaños de pantalla. Los programas compilados se pueden probar en emuladores de AVD Manager o en dispositivos Android reales usando Android Debug Bridge y B4A Bridge.

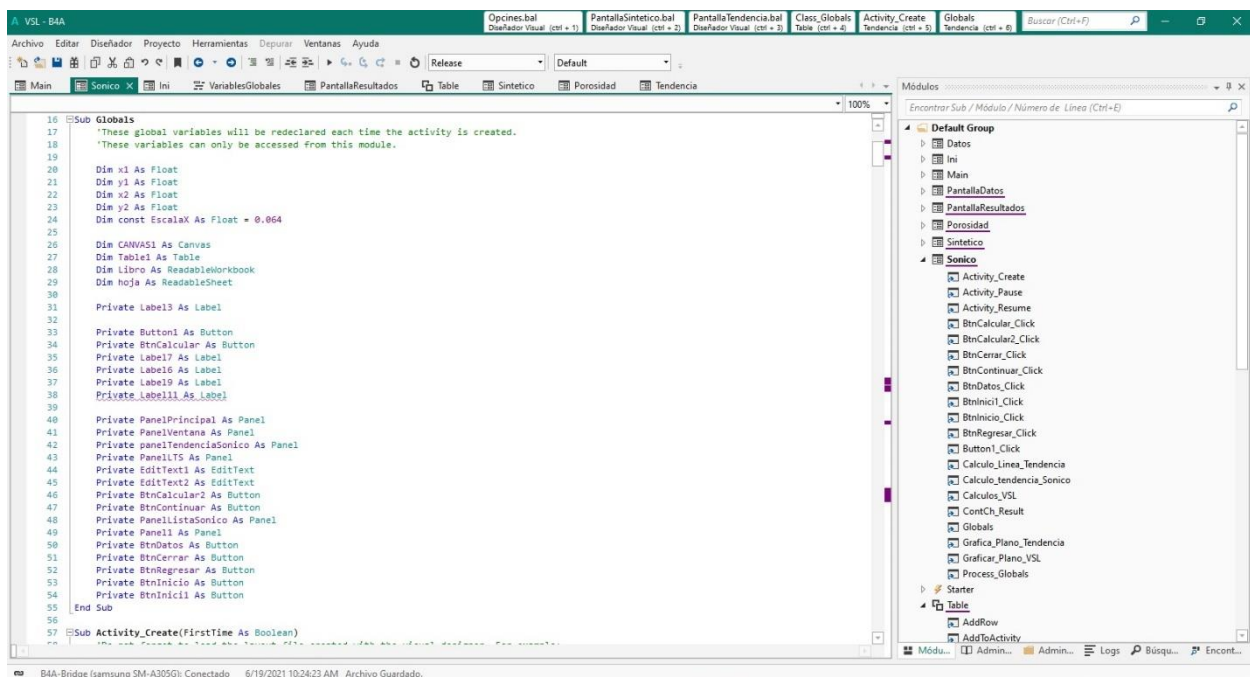
8.3 Desarrollo

En esta parte del proyecto se implementará los procesos descritos anteriormente, dicho proceso se realizará como se mencionó anteriormente mediante el uso del lenguaje de programación B4X de Basic4Android.

Otra de las principales ventajas es que el lenguaje utilizado en sí, es similar a Visual Basic y Visual Basic .Net, aunque está adaptado al entorno nativo de Android, B4A es un lenguaje basado en objetos e impulsado por eventos, así como también se generan aplicaciones estándar de Android firmadas que se pueden cargar en tiendas de aplicaciones como Google Play, Samsung Apps y Amazon Appstore sin que se requieran dependencias especiales ni marcos de ejecución. En la siguiente imagen se puede ilustrar cómo funciona el lenguaje descrito anteriormente.

Figura 33.

Ventana de código individual.



Screenshot tomado del programador de Basic 4 Android

El lenguaje de B4A funciona de manera didáctica y práctica, el código funciona de manera que el lenguaje de la programación en dos partes, la ventana de diseño y la ventana del código. En la figura anterior se observa la ventana de diseño en las cuales se pueden observar las diferentes pestañas de los Layout de los diferentes módulos; para el caso de la figura anterior se muestra el código utilizado para un método en específico como lo es método del registro sónico que funciona de manera independiente con sus diferentes fórmulas y procedimientos.

Otra de las principales ventajas es que el lenguaje utilizado en sí es similar a Visual Basic y Visual Basic .Net, aunque está adaptado al entorno nativo de Android, B4A es un lenguaje basado en objetos e impulsado por eventos, así como también se generan aplicaciones estándar de Android firmadas que se pueden cargar en tiendas de aplicaciones como Google Play, Samsung Apps y Amazon Appstore sin que se requieran dependencias especiales ni marcos de ejecución.

Figura 34.

Ventana de código colectivo.

```

98 CANVAS1.DrawLine(1 + MargenIzq, DistRealV * MultipV, DistReal * Multi, DistRealV * MultipV, 0xFF000000, 1dip) 'Horizontal EJE X
99 CANVAS1.DrawLine(1 + MargenIzq, DistRealV * MultipV, 1 + MargenIzq, 1 + MargenV, 0xFF000000, 1dip) 'Vertical EJE Y
100
101 'LINEAS SECUNDARIAS HORIZONTALES
102
103 CANVAS1.DrawLine(1 + MargenIzq, margenV + (6 * MultipV) - 6, DistReal * Multi, margenV + (6 * MultipV) - 6, 0xFF050505, 1DIP) 'valor 0.2
104 CANVAS1.DrawLine(1 + MargenIzq, margenV + (48 * MultipV) - 6, DistReal * Multi, margenV + (48 * MultipV) - 6, 0xFF050505, 1DIP) 'valor 0.4
105 CANVAS1.DrawLine(1 + MargenIzq, margenV + (90 * MultipV) - 6, DistReal * Multi, margenV + (90 * MultipV) - 6, 0xFF050505, 1DIP) 'valor 0.6
106 CANVAS1.DrawLine(1 + MargenIzq, margenV + (132 * MultipV) - 6, DistReal * Multi, margenV + (132 * MultipV) - 6, 0xFF050505, 1DIP) 'valor 0.8
107 CANVAS1.DrawLine(1 + MargenIzq, margenV + (174 * MultipV) - 6, DistReal * Multi, margenV + (174 * MultipV) - 6, 0xFF050505, 1DIP) 'valor 1
108 CANVAS1.DrawLine(1 + MargenIzq, margenV + (216 * MultipV) - 6, DistReal * Multi, margenV + (216 * MultipV) - 6, 0xFF050505, 1DIP) 'valor 1.20
109 CANVAS1.DrawLine(1 + MargenIzq, margenV + (258 * MultipV) - 6, DistReal * Multi, margenV + (258 * MultipV) - 6, 0xFF050505, 1DIP) 'valor 1.40
110
111 'LINEAS SECUNDARIAS VERTICALES
112
113 CANVAS1.DrawLine((41 * Multi) + MargenIzq, DistRealV * MultipV, (41 * Multi) + MargenIzq, 1, 0xFF050505, 1dip)
114 CANVAS1.DrawLine((82 * Multi) + MargenIzq, DistRealV * MultipV, (82 * Multi) + MargenIzq, 1, 0xFF050505, 1DIP)
115 CANVAS1.DrawLine((123 * Multi) + MargenIzq, DistRealV * MultipV, (123 * Multi) + MargenIzq, 1, 0xFF050505, 1DIP)
116 CANVAS1.DrawLine((164 * Multi) + MargenIzq, DistRealV * MultipV, (164 * Multi) + MargenIzq, 1, 0xFF050505, 1DIP)
117 CANVAS1.DrawLine((205 * Multi) + MargenIzq, DistRealV * MultipV, (205 * Multi) + MargenIzq, 1, 0xFF050505, 1DIP)
118 CANVAS1.DrawLine((246 * Multi) + MargenIzq, DistRealV * MultipV, (246 * Multi) + MargenIzq, 1, 0xFF050505, 1DIP)
119
120 'valores horizontales
121 CANVAS1.DrawText("0", 110, 250dip, Typeface.DEFAULT, 10, Colors.Black, "LEFT")
122 CANVAS1.DrawText("2000", 225, 250dip, Typeface.DEFAULT, 10, Colors.Black, "LEFT")
123 CANVAS1.DrawText("4000", 370, 250dip, Typeface.DEFAULT, 10, Colors.Black, "LEFT")
124 CANVAS1.DrawText("6000", 510, 250dip, Typeface.DEFAULT, 10, Colors.Black, "LEFT")
125 CANVAS1.DrawText("8000", 665, 250dip, Typeface.DEFAULT, 10, Colors.Black, "LEFT")
126 CANVAS1.DrawText("10000", 820, 250dip, Typeface.DEFAULT, 10, Colors.Black, "LEFT")
127 CANVAS1.DrawText("12000", 970, 250dip, Typeface.DEFAULT, 10, Colors.Black, "LEFT")
128
129 'VALORES VERTICALES
130 CANVAS1.DrawText("0", 23dip, 710, Typeface.DEFAULT, 10, Colors.Black, "RIGHT")
131 CANVAS1.DrawText("0.2", 23dip, 618, Typeface.DEFAULT, 10, Colors.Black, "RIGHT")
132 CANVAS1.DrawText("0.4", 23dip, 525, Typeface.DEFAULT, 10, Colors.Black, "RIGHT")
133 CANVAS1.DrawText("0.6", 23dip, 432, Typeface.DEFAULT, 10, Colors.Black, "RIGHT")
134 CANVAS1.DrawText("0.8", 23dip, 339, Typeface.DEFAULT, 10, Colors.Black, "RIGHT")

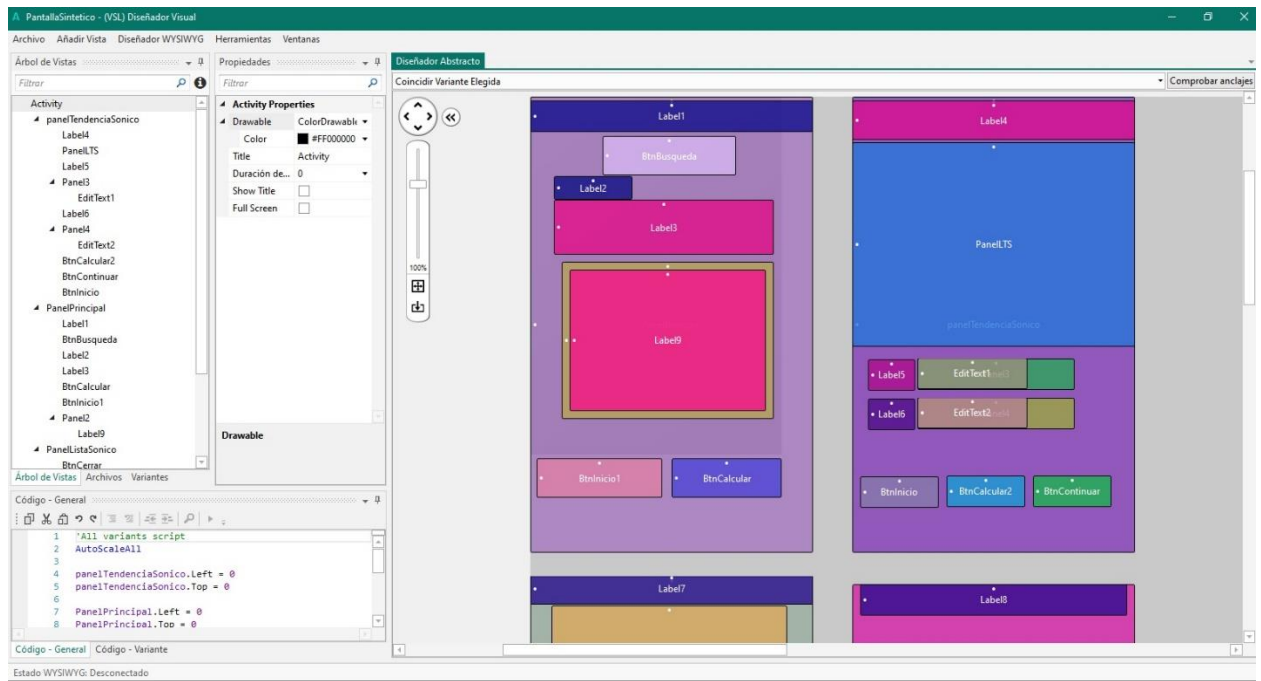
```

Screenshot tomado del programador de Basic 4 Android

Como se mencionó anteriormente B4A se programa en lenguaje Basic, pero la gran ventaja de este es que al momento de compilarlo internamente se transforma en un segundo plano en un lenguaje nativo de JAVA lo que facilitara la ejecución de desarrollo de la app. Debido a esto se

Figura 35.

Ventana de diseño



Screenshot tomado del diseñador visual de Basic 4 Android

desarrolla el programa de forma más didáctica y practica en cuanto a gráficos y esquemas del mismo.

Como se puede ilustrar (Figura 36) en la ventana de diseño, se crea toda la parte grafica del Layout, modificando y revisando en tiempo real todo tipo de cambios e implementaciones que se realicen en el programa.

Para de esta manera poder tener un complemento entra la ventana de código con sus diferentes pestañas, y la ventana de diseño; y de esta manera poder realizar la programación de la manera más óptima y eficaz.

9. Funcionalidad, usabilidad y accesibilidad de la aplicación.

9.1 Ingreso de datos

Es importante tener en cuenta como se deben cargar los datos a la aplicación ya que de esto depende el buen funcionamiento de la aplicación para la construcción de la ventana operacional del lodo, por eso a continuación se muestra la forma correcta para cada uno de los métodos del cómo cargar los datos en un documento de Excel para así evitar problemas en cuanto a la lectura de dichos datos.

Es importante que el usuario tenga almacenado los datos en un archivo tipo “.xls” y que el archivo se llame “Datos”.

Ingreso de datos para el método Sonico (Eaton 1975). La forma correcta para cargar los datos a la aplicación seleccionando el método de Eaton se muestra en la (figura 37) donde a partir de la columna A hasta la D se cargan la información de densidad de la roca, profundidad, registro sísmico y registro gamma Ray respectivamente.

Figura 36.

Ingreso de datos para el método Sonico (Eaton.).

	DENSIDAD DE LA ROCA gr/cm ³	PROFUNDIDAD ft	REGISTRO SONICO us/ft	GAMMA RAY, gAPI
	A	B	C	D
1	2,151436091	239,5	161,4989014	91,58059692
2	2,152244806	240	161,1855011	96,16970062
3	2,152710438	240,5	161,0054016	100,6504974
4	2,152995586	241	160,8951874	104,149498
5	2,153051376	241,5	160,873703	106,2970963
6	2,152938128	242	160,9174042	107,5398026
7	2,152726889	242,5	160,9989929	107,5718994
8	2,152484179	243	161,0929108	105,8379974
9	2,152611017	243,5	161,0437927	102,4001007
10	2,153125048	244	160,8451996	98,52020264

Ingreso de datos para el método de porosidad. Para este método es necesario cargar la información como se muestra en la (figura 38), se debe tener los datos ordenados de la siguiente manera: Densidad de la roca, profundidad, porosidad y por último el registro sónico.

Figura 37.

Ingreso de datos para el método porosidad.

	DENSIDAD DE LA ROCA gr/cm ³	PROFUNDIDAD ft	Porosidad (ϕ)	REGISTRO SONICO us/ft
	A	B	C	D
1	2,151436091	239,5	0,794767921	161,4989014
2	2,152244806	240	0,792429113	161,1855011
3	2,152710438	240,5	0,791085087	161,0054016
4	2,152995586	241	0,790262592	160,8951874
5	2,153051376	241,5	0,790102261	160,873703
6	2,152938128	242	0,790428389	160,9174042
7	2,152726889	242,5	0,791037261	160,9989929
8	2,152484179	243	0,79173814	161,0929108
9	2,152611017	243,5	0,791371587	161,0437927
10	2,153125048	244	0,789889549	160,8451996

Ingreso de datos para el método sónico sintético. Para este método se hace de la forma como se muestra en la (figura 39) donde solo se ven involucradas las variables de densidad de la roca, profundidad y registro gamma Ray.

Figura 38.

Ingreso de datos para el método sónico sintético.

	DENSIDAD DE LA ROCA gr/cm ³	PROFUNDIDAD ft	GAMMA RAY, gAPI
	A	B	C
1	2,151436091	239,5	91,58059692
2	2,152244806	240	96,16970062
3	2,152710438	240,5	100,6504974
4	2,152995586	241	104,149498
5	2,153051376	241,5	106,2970963
6	2,152938128	242	107,5398026
7	2,152726889	242,5	107,5718994
8	2,152484179	243	105,8379974
9	2,152611017	243,5	102,4001007
10	2,153125048	244	98,52020264

9.2 Pruebas y manual de funcionamiento

Es muy importante corroborar que la aplicación esté funcionando de la manera correcta, con el fin de verificar que los cálculos programados dentro de la app tengan un comportamiento aceptable, por eso se comprueba con los resultados obtenidos en la validación de la metodología (Modelo Excel).

Para esta sección se hará una descripción del proceso de la aplicación desde el ingreso de datos, hasta el resultado final, es decir la ventana segura de lodo.

Una vez que la aplicación se ha instalado correctamente es preciso ubicar el ícono ejecutable de la aplicación descargada, para asegurarse que se encuentra instalada correctamente.

Para hacer uso de la aplicación VSL, sólo es necesario tocar el icono de la aplicación para abrirla y empezar a trabajar con ella. En la (figura 40) se muestra la interfaz de inicio.

Figura 39.

Interfaz de inicio de la aplicación.



Figura 40.*Interfaz de inicio de la aplicación*

Cuando la aplicación halla iniciado correctamente, se abre un menú donde el usuario podrá elegir uno de los tres métodos que están disponibles para estimar la ventana operacional del lodo. Es importante recordar que la selección del método dependerá de los datos con los que el usuario dispone, ya que si se elige un método y no se cuenta con la información necesaria se obtendrán valores erróneos. En la (figura 42) se muestra el menú donde el usuario podrá elegir el modo.

Figura 41.

Menú para la selección del método de cálculo.



Al momento de seleccionar el método dentro del menú de la aplicación móvil automáticamente lo dirige al almacenamiento interno de teléfono, (figura 43), ahí se podrá buscar y seleccionar el archivo tipo (.xls) de nombre “Datos” el cual deberá cumplir con las especificaciones mencionadas anteriormente. Una vez ubicado y seleccionado el documento presionar el botón “cargar” para que la app pueda subir y procesar la información.

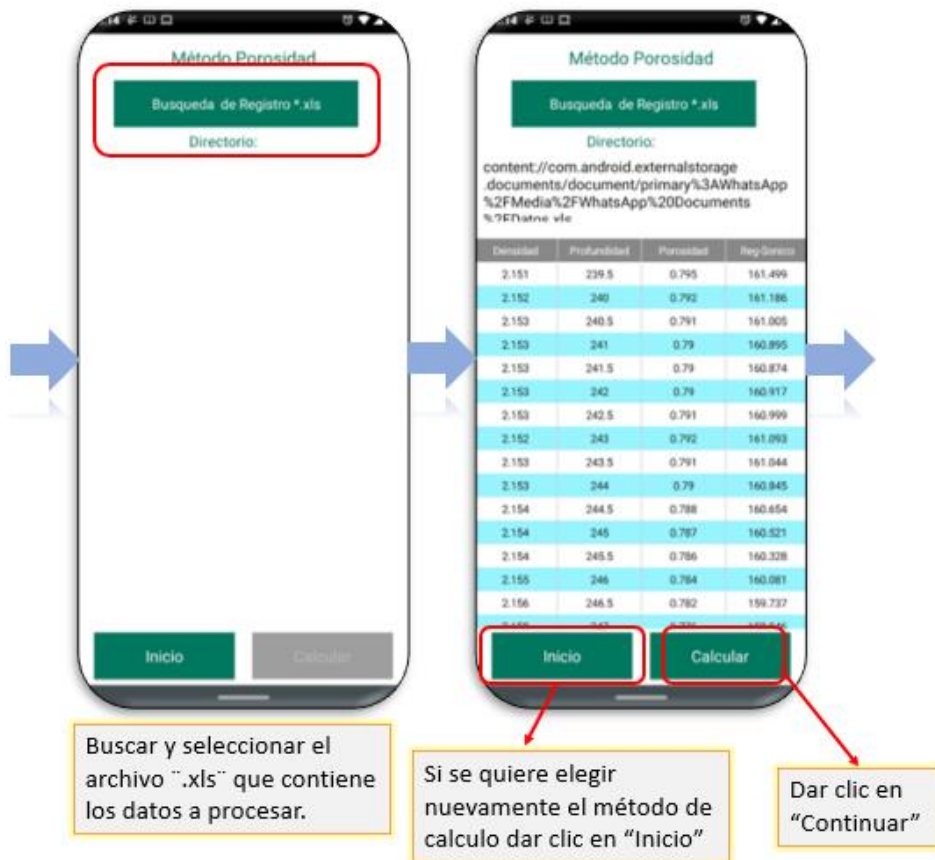
A la hora de cargar los datos en la aplicación esto puede llegar a tardar un par de segundos, esto dependerá del número o cantidad de datos que se vayan a procesar.

Una vez estos datos se cargen correctamente, estos se verán reflejados en la pantalla, de tal forma que el usuario pueda corroborar la información seleccionada, luego deberá presionar el

boton “calcular” para que la aplicación haga los calculos. De tal forma como se muestra en la (figura 38).

Figura 42.

Importación de datos.

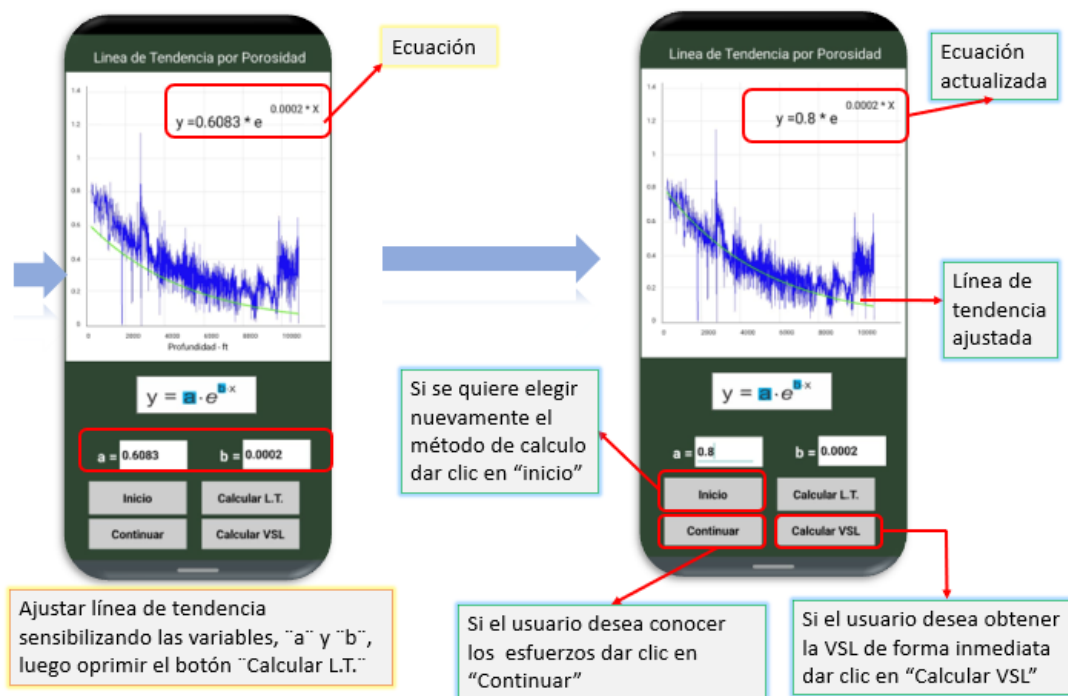


Se mostrará en la pantalla la curva de registro sónico, us/ft vs profundidad, ft o porosidad vs profundidad, ft, dependiendo del método que se haya seleccionado, además se muestra la curva de tendencia normal, si para el usuario esta curva es aceptable entonces deberá ingresar las constantes de la ecuación que se muestra junto a dicha curva, (figura 44), de lo contrario el usuario deberá tomar sus propias consideraciones para modificar las constantes y ajustarla obteniendo así una curva más tolerable para el usuario, esto lo podrá hacer las veces que sean necesarias.

Por último, cuando el usuario haya ajustado la línea de tendencia normal, se oprime el botón “calcular” así permitiendo que la aplicación realice los cálculos de cada una de las variables que componen la ventana operacional del lodo, pero antes de que se muestre la ventana operacional de lodo se incluyeron una secuencia de imágenes que muestran las correlaciones utilizadas y propiedades mecánicas calculadas, esto se hizo con el fin de que el usuario pueda saber qué tipo de parámetros fueron tenidos en cuenta para la construcción de la ventana de lodo como lo muestra la (figura 45).

Figura 43.

Ajuste de línea de tendencia por parte del usuario.



Una vez se muestren las curvas que conforman la ventana operacional del lodo de perforación se tiene la opción de ver o descargar en un archivo tipo (.xlsx) todos los datos obtenidos o que conforman cada una de las curvas, esto se hace para que el usuario pueda realizar un análisis más detallado de dichos datos o simplemente que el usuario los requiera con un fin académico.

El logro de la construcción de la ventana operacional del lodo de manera precisa y eficiente por medio del aplicativo requiere que se calculen diferentes parámetros de las propiedades mecánicas de la roca como lo son el estado de esfuerzos, ángulo de fricción interna, la cohesión, la relación de Poisson y el círculo de Mohr.

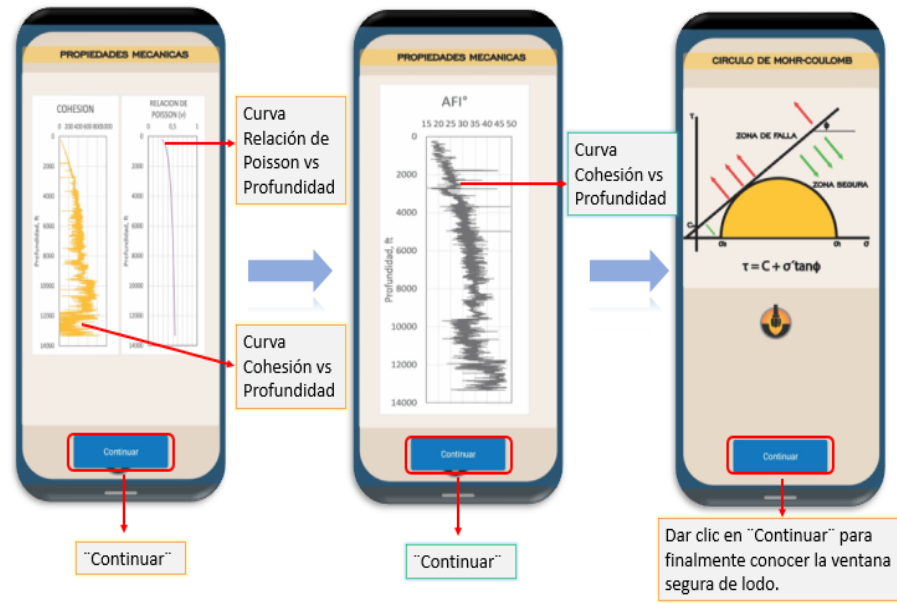
Figura 44

interfaz de contextualización de parámetros.



Figura 45.

interfaz de contextualización de parámetros.



La aplicación está programada para seguir ciertos lineamientos en cuanto a la manera correcta de cargar los datos, que no se ingresen datos anormales, en que la línea de tendencia tenga un buen ajuste, si se cumplen estos parámetros la construcción de la ventana segura de lodo será exitosa, a continuación, se muestra el resultado final de la ventana segura del lodo con sus diferentes curvas

Figura 46

Ventana operacional del lodo obtenida por el aplicativo VSL.



Es de vital importancia que el usuario tenga en cuenta que al ver los datos generados por el aplicativo tiene la posibilidad de descargar los resultados finales de los diferentes parámetros de la ventana segura del lodo permitiendo que de esta manera posea los datos en cualquier momento y bajo cualquier circunstancia para usos prácticos. A continuación, se muestra más a detalle lo mencionado anteriormente.

Figura 47.*Datos finales obtenidos por el aplicativo VSL*

Prof.	PC	PP	PF	EV
239.5	15.500	16.700	14.234	17.911
240	14.799	15.973	14.177	17.911
240.5	14.670	15.734	14.160	17.911
241	14.340	15.495	14.142	17.911
241.5	14.346	15.500	14.144	17.911
242	14.351	15.505	14.145	17.911
242.5	14.590	15.752	14.165	17.911
243	14.826	15.997	14.185	17.911
243.5	14.599	15.761	14.168	17.911
244	14.373	15.525	14.151	17.911
244.5	13.917	15.090	14.117	17.912
245	13.692	14.816	14.102	17.912
245.5	13.468	14.583	14.086	17.912
246	13.014	14.110	14.053	17.912
246.5	12.561	13.638	14.021	17.912
247	11.179	12.204	13.920	17.912
247.5	9.320	10.277	13.786	17.912
248	7.308	8.092	13.635	17.912
248.5	4.832	5.641	13.467	17.913
249	2.674	3.418	13.318	17.913
249.5	.987	1.683	13.204	17.913

Si el usuario desea descargar la tabla de resultados para fines prácticos dar clic en “Exportar datos .xls” el archivo tipo .xls quedara guardado en el almacenamiento interno del teléfono.

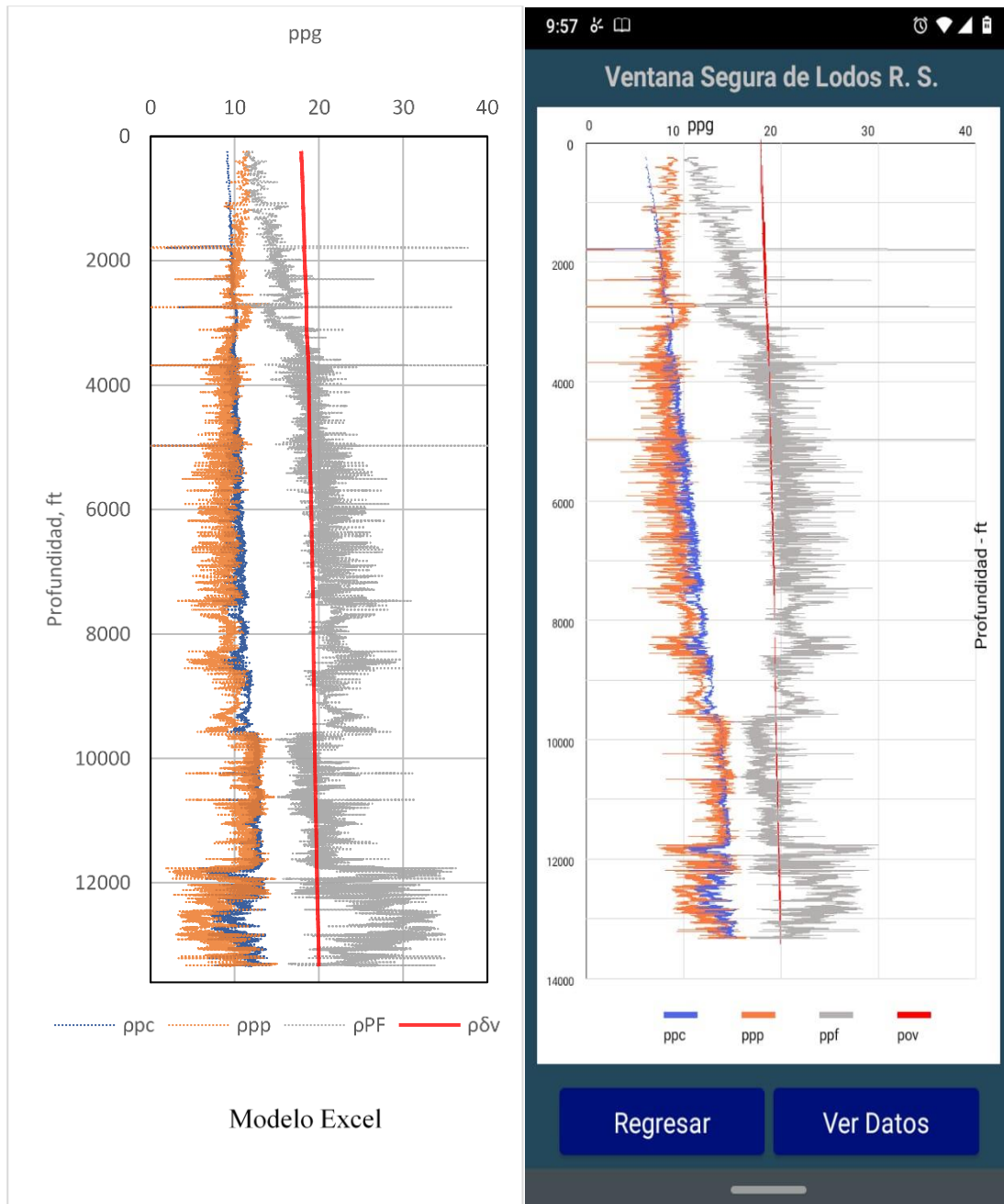
Volver a la grafica

Por último, para verificar que los cálculos se realizaron de la manera correcta se hace una comparación entre la ventana obtenida con la aplicación y la obtenida con el modelo de Excel, esto se hace para cada uno de los métodos ya mencionados en los capítulos anteriores.

9.2.1 Comparación de resultados entre modelo Excel y aplicativo móvil. (Método Eaton)

Figura 48.

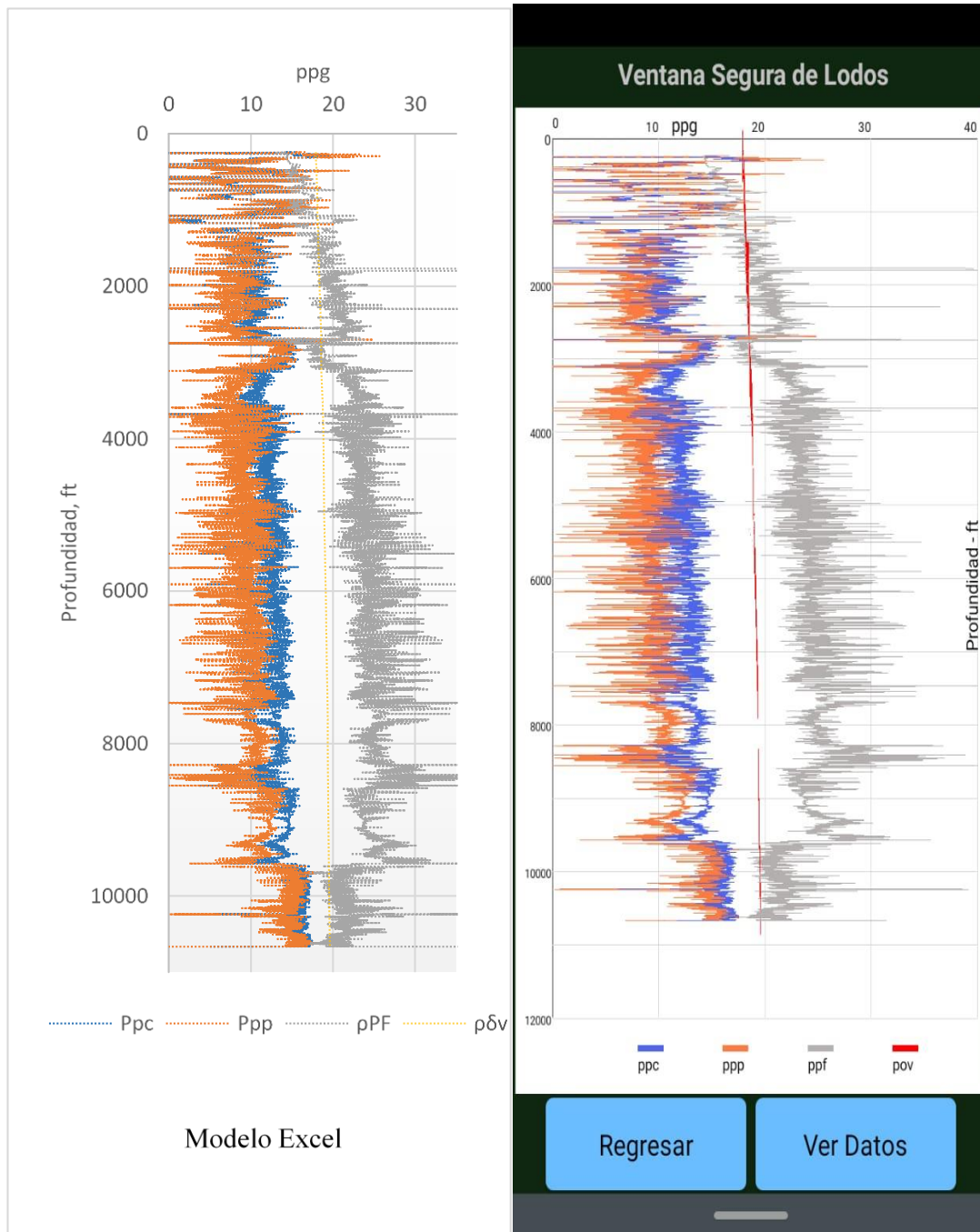
Ventana segura de lodo, modelo Excel vs aplicativo móvil. (Método Eaton).



9.2.2 Comparación de resultados entre modelo Excel y aplicativo móvil. (Método Porosidad)

Figura 49.

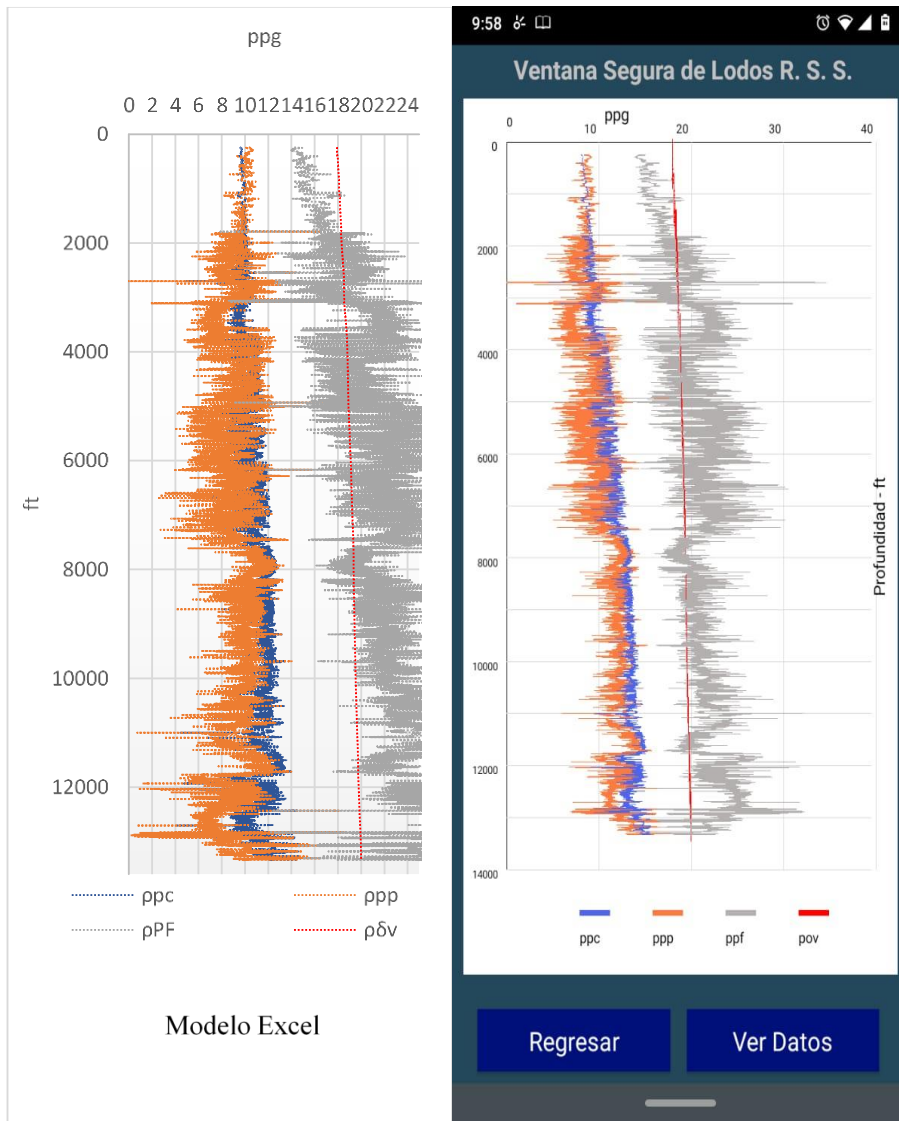
Ventana segura de lodo modelo Excel vs aplicativo móvil. (Método Porosidad).



9.2.3 Comparación de resultados entre modelo Excel y aplicativo móvil. (Método Sonico sintético)

Figura 50.

Ventana segura de lodo modelo Excel vs aplicativo móvil. (Método Sonico Sintético)..



Con base a todo lo anterior, se comprueba la veracidad de los datos del aplicativo, para cada uno de los métodos, los resultados mostraron un excelente comportamiento. En este punto se puede

decir que la aplicación está finalizada, bajo un producto mínimo viable, es decir, con posibilidad de realizar actualizaciones según los requerimientos de nuevos usuarios.

10. Conclusiones

El desarrollo de la aplicación “Ventana segura de lodo” y la validación de la metodología con valores reales de campo permite probar la calidad de los procesos desarrollados dentro del aplicativo, brindando al usuario la confiabilidad.

Existen diferentes modelos que ayudan a la construcción de una ventana segura de lodo y los cuales se pueden aplicar dependiendo de la información disponible, en este proyecto se emplearon tres metodologías, pero con la posibilidad de realizar actualizaciones a un corto plazo en cuanto a implementar más modelos de cálculos que permitan estimar la ventana segura de lodo.

Es muy importante que los datos de entrada que se ingresan en la aplicación sean de una calidad buena, para que esta logre arrojar resultados coherentes y verídicos, y así se pueda llevar a cabo de forma satisfactoria la construcción de la ventana operacional de lodo, ya que al ingresar datos no habituales la aplicación los procesa arrojando resultados erróneos dado que está aún no tiene la capacidad de reconocer datos atípicos, para disminuir estos problemas la aplicación posee guías que ayudaran al usuario a ingresar los datos de la manera correcta.

Es una realidad que en la actualidad la mayoría de las personas poseen un dispositivo smartphone “teléfono inteligente” y esto es debido a que todos queremos abastecernos de cualquier información interesante al momento, sin esperas y al alcance de nuestros dedos. Por eso, el implementar una herramienta que permita realizar procedimientos de una manera rápida, practica y en ocasiones sin necesidad de estar conectado a una red Wi-Fi como lo es el desarrollo de un

aplicativo móvil sin duda es una de las formas más fáciles, prácticas y eficientes de llevar a cabo diferentes tareas.

En el momento cuando se está perforando un pozo es muy importante tener un peso adecuado de lodo, ya que de esto depende el éxito y eficiencia del proyecto, por eso se desarrollan este tipo de herramientas que ayuden al usuario hacer una elección del lodo adecuado de una manera rápida y práctica.

11. Recomendaciones

La versión del aplicativo móvil puede llegar a tener nuevas actualizaciones con el fin de agregar más servicios en cuanto a la construcción de una ventana de lodo segura, implementando más métodos para estimar la presión de poro, incluyendo variables de campo.

Desarrollar un algoritmo que permita identificar datos atípicos que están siendo subidos a la aplicación, para que estos no sean tomados en cuenta o alertar al usuario de que se está cargando información errónea.

Se podría agregar más idiomas a la aplicación, con el fin de que esta tenga un mayor alcance y fácil manejo para los usuarios.

El aplicativo móvil puede ser usado por la Universidad Industrial de Santander como material didáctico con el fin de fortalecer los conocimientos en cuanto se refiere a aspectos geomecánicos.

Implementar el aplicativo en sistema operativo IOS

Referencias Bibliográficas

- Aadnoy, B. & Looyeh, R. (2011). Petroleum rock mechanics: drilling operations and well design. First edition. Oxford: Elsevier.
- Bonilla, D & Pérez, F. (2017). Evaluación de la relación de fracturas en estado crítico de esfuerzos con las pérdidas de circulación en un pozo de Ecopetrol s.a. (tesis pregrado). Fundación Universidad de América.
- Calderon, Z (2012). Introducción a la mecánica de rocas y sus aplicaciones en la industria del petróleo. Bucaramanga: Ediciones Universidad Industrial de Santander.
- Cavero, C. (2010). Análisis de métodos para la predicción de presión de poros aplicado a la estabilidad de pozos de perforación petrolera. Lima: Universidad Ricardo Palma. Facultad de ingeniería.
- Cook, John (2015). The Defining Series: Geomechanics. Schlumberger: Oilfield review.
- Delgado, O, Manrique, V. (2016). Metodología para diseñar el modelo geomecánico 1d de estabilidad de pozos (Tesis pregrado). Universidad Industrial De Santander. Bucaramanga. Colombia.
- Falla, V, Elías, J interpretación de registros de pozos de petróleo monografía técnica tomado de: https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basic/falla_ve/cap3.pdf.
- Fernández, A, Alvarelllos, J. Modelos geomecánicos 3d y su creciente aplicación en la industria petrolera. Tomado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/296528421.pdf>
- García, M. (2006). Determinación de la orientación y magnitud del esfuerzo máximo horizontal a partir del modelamiento de breakouts en la zona del piedemonte llanero colombiano (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander.

- Gomez, D, Bernal, M. (2012). Desarrollo de una herramienta software para el cálculo de los factores críticos que definen una ventana segura de lodo. (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander.
- Herrera, A & Uguña, E. (2017). Optimización de la perforación mediante el diseño de un modelo geomecánico (tesis pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Huffman, Alan R. y Bowers, Glenn L (2001). Pressure Regimes in Sedimentary Basins and Their Prediction. Volume 76. American Association of Petroleum Geologist.
- Javier Cuello – Jose Vittone: Junio/2013: Diseñando apps para móviles: CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Olga, D & Vanessa, M. (2016). Metodología para diseñar el modelo geomecánico 1d de estabilidad de pozos (tesis pregrado). Universidad Industrial de Santander.
- Paramo, L. (2016). Análisis Geomecánico y de Estabilidad para el pozo #3 del campo caso estudio. (tesis de posgrado). Universidad Nacional de Colombia.
- Santamaria R. Jorge R. Siem S. Criseida. (2006). Estimación de la ventana operacional de presión de lodo a partir de registros de pozo, para las formaciones del campo socororo, edo. anzoátegui. (Tesis de pregrado). Universidad Central de Venezuela.
- Schlumberger (1989). Principios / Aplicaciones de la interpretación de registros.
- Serrano, A., Vargas, G. (2010). Beyond Mud-Weight Window: A Geomechanical Approach to Evaluating and Achieving Drilling Goals. Society of Petroleum Engineers.
- Zoback, Mark D. Reservoir Geomechanics. 1 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010, 461 p. ISBN: 978-0521146197.