

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTIMACIÓN DE LA VENTANA OPERACIONAL DE PRESIÓN DE LODO A PARTIR DE REGISTROS DE POZO, PARA LAS FORMACIONES DEL CAMPO SOCORORO, EDO. ANZOÁTEGUI.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Santamaria R. Jorge R.
Siem S. Criseida
Para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo

Caracas, 2006

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTIMACIÓN DE LA VENTANA OPERACIONAL DE PRESIÓN DE LODO A PARTIR DE REGISTROS DE POZO, PARA LAS FORMACIONES DEL CAMPO SOCORORO, EDO. ANZOÁTEGUI.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. MSc. Walter Poquioma.

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Massiel Rangel.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Santamaría R. Jorge R.
Siem S. Criseida
Para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo

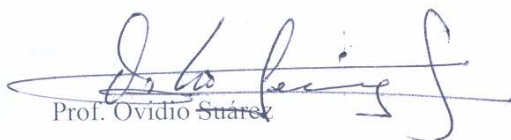
Caracas, 2006

Caracas, Junio 2006

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de escuela de Ingeniería de Petróleo, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres, Criseida Siem Suk, y Jorge R. Santamaría Romero, titulado:

**“ESTIMACIÓN DE LA VENTANA OPERACIONAL DE PRESIÓN DE LODO A
PARTIR DE REGISTROS DE POZO, PARA LAS FORMACIONES DEL
CAMPO SOCORORO, EDO. ANZOÁTEGUI.”**

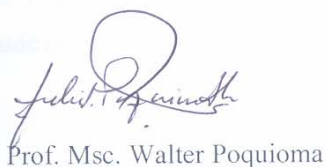
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero de Petróleo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.


Prof. Ovidio Suárez

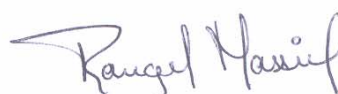
Jurado


Prof. Sergio Escalante

Jurado


Prof. Msc. Walter Poquioma

Tutor Académico



Ing. Massiel Rangel

Tutor Industria



DEDICATORIA

Jorge R. Santamaría R

A Dios, mis maestros y mi ángel, por guiar mis pasos y cuidarme en todo momento. Gracias por permitirme descubrir el camino.

A mi mamá, quien estuvo a mi lado desde siempre y en todo momento, ahora que no se encuentra a mi lado físicamente, sé que sigue estando muy cerca cuidándome y dándome fuerzas para continuar con las próximas metas que me proponga.

A mis padres Jorge y Olaida, a quienes les debo tanto, han sido un ejemplo a seguir, de ustedes he aprendido el valor de la palabra, la responsabilidad, la dedicación, la paciencia y la constancia entre muchas otras cosas; gracias por brindarme ese apoyo en los momentos difíciles de la carrera que ahora veo concluida, los quiero mucho.

A Mayely, por ser una amiga más que una hermana y brindarme la ayuda en los momentos en que los necesite, te quiero mucho.

A mis abuelos y demás familiares, quienes creyeron en todo momento en mí y me daban fuerzas para no decaer, a pesar de que en muchas ocasiones no pude compartir con cada uno de ustedes, pero mi pensamiento los abarcaba.

A las siguientes personas no sólo les dedico mi Trabajo Especial de Grado, sino mi vida entera, por ser mi esperanza y mi voluntad de todos los días.

A mis padres Sze Wah y Siu King, por enseñarme a buscar el dulce sabor del éxito, sus estrictos valores éticos y morales; y sobre todo, por darme la libertad de escoger mi propio camino.

A mis hermanos Karina y Armando, por ser siempre mi luz de cada día. Los quiero y sólo el cielo sabe cuánto.

A mi “pañito de lágrimas” Leonardo Ocampo, a mi “monstrico” Carlos Lee, a mi “feo” Onerazan Bornia y mi “ko ko” Eric Márquez; por su tanto cariño y preocupación, a pesar de la lejanía. A mis amigos Luis Santana, Fernando y Alexander Hung; por cada cima que me ayudaron alcanzar.

A mis admirables maestros e instructores, que no sólo cumplieron con decirme qué estudiar, sino a comprender que los libros son sólo páginas vacías al lado de la insensatez.

A mi Prof. Joel Adrián y mis compañeros del Tai Chi, por enseñarme el significado de las palabras “entrega” y “dedicación” a todo.

A todos mis amigos, compañeros de clase y de tesis; por sus palabras de aliento e incontables abrazos.

Y sobre todo a Dios; por estar siempre conmigo, por todas estas personas que has colocado en mi camino, por todas las cosas maravillosas que me has dado y más aún por todas aquellas que me has quitado.

AGRADECIMIENTOS

A la Ilustre Universidad Central de Venezuela, por proporcionarnos los conocimientos básicos para desenvolvemos en el campo laboral y personal.

A PetroUCV S.A. y a todas las personas que laboran en la empresa por la colaboración brindada, en especial, a los Ingenieros Jesús Patiño, José Vicente de Armas, Deborah Salas, Roman Paz, Len Flores y Hermes Romero; quienes siempre estuvieron dispuestos a ayudarnos.

A nuestro tutor académico, el MSc. Walter Poquioma, por habernos guiado en nuestros primeros pasos dentro del área de la geomecánica.

A nuestra tutora industrial, la Ing. Massiel Rangel por guiarnos y compartir sus conocimientos con tanta paciencia en el desarrollo de nuestro Trabajo Especial de Grado.

A la Baker Hughes y a todas las personas que laboran en la empresa, por brindarnos su colaboración y amistad incondicional, en especial a Marla García, Nelson Oriach, Patricia Rodríguez y Alexander Palacios.

Al Ing. Diego Maya, por apoyarnos desde el primer momento en que nos conocimos, en todo lo que estaba a su disposición para que pudiésemos culminar satisfactoriamente nuestros estudios.

Al Profesor Héctor Gatica y Judith Olivo por la orientación prestada en la elaboración de nuestro Trabajo Especial de Grado.

A nuestros incondicionales amigos y compañeros de clases por hacer de nuestros últimos meses de estancia en la escuela tan especial.

Criseida Siem Suk y Jorge Santamaría Romero

Santamaría R., Jorge R.

Siem S., Criseida

**ESTIMACIÓN DE LA VENTANA OPERACIONAL DE
PRESIÓN DE LODO A PARTIR DE REGISTROS DE POZO,
PARA LAS FORMACIONES DEL CAMPO SOCORORO, EDO.
ANZOÁTEGUI.**

Tutor Académico: MSc. Walter Poquioma. Tutor Industrial: Ing. Massiel Rangel. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo. Año 2006, 213 p.

Palabras Claves: Esfuerzos en sitio, Mohr-Coulomb, inestabilidad de hoyos, “*breakouts*”, arenamiento, ventanas de lodo, geomecánica, criterio de fallas.

Resumen. La geomecánica es aquella rama de la ingeniería que se encarga de estudiar las propiedades y el comportamiento mecánico del material geológico o rocoso sometido a esfuerzos asociados a la construcción y producción de pozos de hidrocarburos (crudo o gas). La misma persigue caracterizar las propiedades mecánicas de la roca, para analizar y predecir problemas como inestabilidad de hoyos, presiones anormales, arenamiento de pozos, compactación, subsidencia, diseño de fracturas hidráulicas, entre otros.

El alto porcentaje de los problemas asociados a la inestabilidad de hoyo es causado por los nuevos esfuerzos inducidos en el momento de perforación de la roca, a la sensibilidad de la lutita con el fluido de perforación y a aquellas actividades operacionales de completación y producción de los fluidos de la formación.

El criterio de falla de Mohr-Coulomb es uno de los criterios que permite analizar los parámetros y procesos básicos de la deformación de la roca para

predecir la formación de fallas compresivas y tensionales en la misma: derrumbes por ovalizaciones como los “*breakouts*” y producción de arena que generalmente se observan en formaciones débiles y no consolidadas, pero que en muchos casos se presentan también en arenas muy consolidadas en yacimientos con alto grado de tectonismo.

Una manera de prevenir el derrumbe de las formaciones y el arenamiento en el interior del pozo, debido a los nuevos esfuerzos inducidos en la pared del mismo, es compensar la alteración de las propiedades en sitio con el peso del lodo de perforación, a través de la determinación de una ventana operacional de presiones de lodo, para minimizar el riesgo de inestabilidad de hoyo y brindar beneficios a lo largo de toda la vida productiva del campo.

En la industria petrolera, los derrumbes ocurren en muchas oportunidades en las formaciones con alto contenido lutítico. Los yacimientos del Campo Socororo, Pariaguán, ubicados en Venezuela no están exentos de este tipo de rocas. Por ello, la necesidad de determinar los esfuerzos en sitio e inducidos de la formación partiendo de los registros disponibles de petrofísica y aplicando el criterio de falla de Mohr-Coulomb, para obtener una ventana operacional de presión de lodos que se ajuste, en lo posible, a las características mecánicas y resistencia del campo en estudio

ÍNDICE

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE	ix
LISTA DE TABLAS	xii
LISTA DE FIGURAS	xiv
INTRODUCCIÓN	18
CAPÍTULO I	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
Formulación del Problema	20
Objetivo General	21
Objetivos Específicos.....	21
Justificación	22
Tipo de Investigación.....	23
Antecedentes	23
CAPÍTULO II	
FUNDAMENTO TEÓRICO	25
Geomecánica.....	25
Clasificación de los Materiales	27
Comportamiento Mecánico de los Materiales	27
Esfuerzos.....	29
Deformación	29
Estado Mecánico	30
Estado Tensional.....	30
Tensión en Dos Dimensiones.....	31
Tensiones en Tres Dimensiones.....	32
Comportamiento Mecánico de las Rocas.....	35
Relación Esfuerzo-Deformación en las Rocas.....	35
Modelos de Comportamientos de las Rocas	38
Propiedades Mecánicas de las Rocas	39
Módulo de Young	40

Relación de Poisson	41
Anisotropía.....	42
Ángulo de Fricción	43
Fuerza de Cohesión.....	44
Poroeelasticidad	44
Resistencia y Rotura	47
Fallas Geológicas	48
Criterios de Fallas	50
Criterio de Falla de Mohr-Coulomb	51
Otros Criterios de Falla.....	59
Colapso de Poro	60
Esfuerzos Inducidos Durante la Perforación.....	61
Ventana Operacional de Presión de Lodo.....	66
Arenamiento.....	73
Causas de la Producción de Arena.....	74
Mecanismo del Arenamiento	75
Concepto del Diferencial de Presión Crítico.....	76
Propiedades Estáticas y Propiedades Dinámicas de la Rocas.....	77
Información Geomecánica a Partir de Ensayos de Laboratorio.....	78
Ensayos de Resistencia Mecánica.....	78
Información Geomecánica a Partir de Datos de Campo	79
Registros Petrofísicos.....	79
Registros de Rayos Gamma	80
Registros de Resistividad	81
Registros de Densidad.....	81
Registros Neutrónicos	82
Registro Sónico	83
Registro “caliper”	84
Pruebas de Inyectividad	84
Prueba “Microfrac”	85
Pruebas “Minifrac”	87

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA MAYOR DE SOCORORO.....	88
Ubicación Geográfica	88
Características Geológicas	89
Estructura	89
Estratigrafía.....	91
Características de las Formaciones	93
Sistema Petrolero	94

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO.....	95
Descripción de las Herramientas de Trabajo	95
Descripción de la Metodología	98
Revisión Bibliográfica	99
Recopilación de la Información	99
Análisis de los Problemas Operacionales	102
Evaluación de la Información de Registros como Control de Calidad.....	104
Evaluación Petrofísica de las Formaciones.....	104
Cálculo del Volumen de Lutita	108
Corrección del Volumen de la Lutita por Efecto de la Arcillosidad.....	108
Estimación de la Porosidad	109
Corrección por Hidrocarburo Liviano.....	111
Determinación de la Saturación de Agua.....	113
Identificación de la Litología y Fluidos de las Formaciones	113
Estimación de la Presión de Poros	114
Estimación de Propiedades Mecánicas y Resistencia de la Formaciones...	116
Caracterización de los Esfuerzos en sitio a través de un Retroanálisis.....	126
Formación de “ <i>Breakouts</i> ”	131
Evaluación de Estabilidad de Hoyos.....	136
Ventana Operacional de Presión de Lodo.....	136
Arenamiento.....	137
Obtención del Comportamiento Geomecánico del Área en General.....	138

CAPÍTULO V

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	140
--	-----

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES	196
--------------------	-----

RECOMENDACIONES	199
-----------------------	-----

CAPÍTULO VII

APÉNDICE	201
----------------	-----

FUENTES CONSULTADAS.....	208
--------------------------	-----

GLOSARIO	210
----------------	-----

NOMENCLATURAS.....	212
--------------------	-----

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Relación de Poisson asociado a diferentes tipos de material.....	42
---	----

Tabla 2. Ángulo de fricción según tipo de litología.....	43
--	----

Tabla 3. Resistencia compresiva según tipo de roca.....	52
---	----

Tabla 4. Tiempo de tránsito para ondas compresionales y de cizallamiento.....	83
---	----

Tabla 5. Ubicación de los pozos seleccionados.	99
---	----

Tabla 6. Compañía de servicios que obtuvo los registros.....	101
--	-----

Tabla 7. Parámetros generales de entrada al programa <i>SANDTM</i>	105
---	-----

Tabla 8. Parámetros generales de entrada al programa <i>SANDTM</i>	106
---	-----

Tabla 9. Curvas de entrada para el programa <i>SANDTM</i>	107
--	-----

Tabla 10. Curvas de salida del programa <i>SANDTM</i>	107
--	-----

Tabla 11. Corrección por arcillosidad en el pozo ES-451.	109
---	-----

Tabla 12. Gradiente de Presión para el Pozo ES-451.	114
--	-----

Tabla 13. Curvas de entradas al programa <i>PPORTM</i>	115
---	-----

Tabla 14. Curvas de salida del programa <i>PPORTM</i>	115
--	-----

Tabla 15. Curvas de entradas al programa <i>MECHPROPTM</i>	117
---	-----

Tabla 16. Curvas de salida del programa <i>MECHPROPTM</i>	117
--	-----

Tabla 17. Parámetros constantes del programa <i>PRELMPTM</i>	118
---	-----

Tabla 18. Curvas de entrada del programa <i>PRELMPTM</i>	118
Tabla 19. Curvas de salida del programa <i>PRELMPTM</i>	119
Tabla 20. Parámetros constantes del programa <i>LMPTM</i>	120
Tabla 21. Curvas de entrada al programa <i>LMPTM</i>	121
Tabla 22. Curvas de salida del programa <i>LMPTM</i>	122
Tabla 23. Curvas de entrada al programa <i>LMP_SANDANTM</i>	124
Tabla 24. Curvas de salida al programa <i>LMP_SANDANTM</i>	125
Tabla 25. Parámetros de entrada del programa <i>BIAS</i>	129
Tabla 26. Características de la perforación para los pozos del Campo Socororo Este.....	140
Tabla 27. Características de la perforación para los pozos del Campo Socororo Oeste.	141
Tabla 28. Curvas petrofísica.	145
Tabla 29. Curvas de módulos elásticos y resistencia	154
Tabla 30. Modo y Orientación de Falla.	169
Tabla 31. Pesos de lodos resultantes de las ventanas operacionales recomendables.	182
Tabla 32. Formación de “breakouts” en el pozo ES-451 con un diferencial de presión de 160 Lpc.....	189
Tabla 33. Formación de “breakouts” en el pozo ES-452 con un diferencial de presión de 140 Lpc.....	190
Tabla 34. Formación de “breakouts” en el pozo ES-457 con un diferencial de presión de 160 Lpc.....	193

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fuerza normal.....	28
Figura 2. Fuerza de corte.....	28
Figura 3. Esfuerzos sobre un plano.....	31
Figura 4. Componentes de tensiones en un sistema cartesiano	32
Figura 5. Tensiones en tres dimensiones.	33
Figura 6. Plano de fractura.....	35
Figura 7. Curva típica de esfuerzo-deformación para rocas.	37
Figura 8. Modelos de comportamiento esfuerzo-deformación.	39
Figura 9. Módulo de Young.....	40
Figura 10. Relación de Poisson.....	41
Figura 11. Estructura porosa.	45
Figura 12. Representación estructural de una falla normal.....	48
Figura 13. Representación estructural de una falla inversa.	49
Figura 14. Representación estructural de una falla de desgarre o “ <i>strike-slip</i> ”....	49
Figura 15. Geometría de la falla de cizalla.	52
Figura 16. Criterio de Mohr-Coulomb en el plano de los esfuerzos principales. .	53
Figura 17. Círculo de Mohr.	54
Figura 18. Representación gráfica de los esfuerzos en el círculo de Mohr.	55
Figura 19. Estados de esfuerzos.....	56
Figura 20. Envolvente de falla de Mohr-Coulomb.	56
Figura 21. Trayectoria de esfuerzos.....	58
Figura 22. Tipos de falla y ubicación en la envolvente de Mohr-Coulomb.....	60
Figura 23. Esfuerzos de campo y esfuerzos inducidos del pozo.....	62
Figura 24. Esfuerzos principales cerca del pozo con radio a.	65
Figura 25. Dirección del esfuerzo y daño del pozo.....	67
Figura 26. Ventana operacional de presión de lodo.....	68
Figura 27. Esquema de gradientes de ovalización por ruptura	69
Figura 28. Modos de fallas por tensión del hoyo.....	70
Figura 29. Modos de fallas de corte del hoyo.....	71
Figura 30. Cavidades cañoneadas en formaciones de arenas consolidadas.....	75

Figura 31. Puente y arqueo de arenas en formaciones no consolidadas.	75
Figura 32. Esquema de una celda triaxial para ensayos geomecánicos.	79
Figura 33. Magnitud del esfuerzo mínimo.	85
Figura 34. Comportamiento de presión del fondo del hoyo en un “ <i>Microfrac</i> ”. .	86
Figura 35. Ubicación geográfica del Área Mayor de Socororo.	88
Figura 36. Campo Socororo.	89
Figura 37. Mapa Estructural del Área Mayor de Socororo.	90
Figura 38. Columna estratigráfica del Área Mayor de Socororo.	92
Figura 39. Flujo Grama de Metodología.	98
Figura 40. Problemas operaciones pertenecientes al pozo ES-451.	103
Figura 41. Ventana para datos de entrada del programa <i>SANDTM</i>	104
Figura 42. Gráfico cruzado del pozo ES-451.	110
Figura 43. Ventana para datos de entrada del programa <i>MECHPROPTM</i>	116
Figura 44. Imagen sísmica de la falla principal de Cachicamo.	127
Figura 45. Gráfica Profundidad vs. “ <i>caliper</i> ” del pozo ES-451.	130
Figura 46. Esfuerzo tangencial máximo del pozo ES-451 a los 1940 pies.	131
Figura 47. Esfuerzo tangencial mínimo del pozo ES-451 a los 1940 pies.	132
Figura 48. Entrada de <i>BIAS</i> . Columnas de valores de esfuerzos horizontales.	133
Figura 49. Salida de <i>BIAS</i> . Columna de valores de tamaño de “ <i>breakout</i> ”	134
Figura 50. Gráfico de línea de tendencia del pozo ES-451.	135
Figura 51. Resultado estadístico obtenido del programa <i>SANDTM</i> para el pozo ES-439.	143
Figura 52. Resultado estadístico obtenido del programa <i>SANDTM</i> para el pozo ES-451.	143
Figura 53. Resultado estadístico obtenido del programa <i>SANDTM</i> para el pozo ES-452.	144
Figura 54. Resultado estadístico obtenido del programa <i>SANDTM</i> para el pozo ES-457.	144
Figura 55. Registro petrofísico obtenido del programa <i>SANDTM</i> para el pozo ES-439.	146
Figura 56. Registro petrofísico obtenido del programa <i>SANDTM</i> para el pozo ES-451.	147

Figura 57. Registro petrofísico obtenido del programa SAND TM para el pozo ES-452.....	148
Figura 58. Registro petrofísico obtenido del programa SAND TM para el pozo ES-457.....	149
Figura 59. Profundidad vs. Presión de poros para el Campo Socororo Este	152
Figura 60. Profundidad vs. Presión de poros para el Campo Socororo Oeste	153
Figura 61. Registro de módulos elásticos y resistencia obtenido del programa MECHPROP TM para el pozo ES-439.....	155
Figura 62. Registro de módulos elásticos y resistencia obtenido del programa MECHPROP TM para el pozo ES-451.....	156
Figura 63. Registro de módulos elásticos y resistencia obtenido del programa MECHPROP TM para el pozo ES-452.....	157
Figura 64. Registro de módulos elásticos y resistencia obtenido del programa MECHPROP TM para el pozo ES-457.....	158
Figura 65. Gráfica de Profundidad vs. Módulo de Young para los Campos Socororo Este y Oeste.....	161
Figura 66. Gráfica de Profundidad vs. Módulo de Poisson para los Campos Socororo Este y Oeste.....	162
Figura 67. Gráfica de Profundidad vs. UCS para los Campos Socororo Este y Oeste.	163
Figura 68. Gráfica de Profundidad vs. Ángulo de Fricción para los Campos Socororo Este y Oeste.....	164
Figura 69. Gráfica de Profundidad vs. Fuerza de Cohesión para los Campos Socororo Este y Oeste.....	165
Figura 70. Gráfica de Profundidad vs. Coeficiente de Biot para los Campos Socororo Este y Oeste.....	166
Figura 71. Gráfica de Profundidad vs. Presión de Lodo ECD para los Campos Socororo Este y Oeste.....	168
Figura 72. Gráfico Profundidad vs “caliper” para los pozos en estudio de los campos Socororo Este y Oeste.....	171
Figura 73. Gráfica de Profundidad vs. Esfuerzo Vertical para los Campos Socororo Este y Oeste.....	174

Figura 74. Gráfica de Profundidad vs. Esfuerzo Horizontal Máximo para los Campos Socororo Este y Oeste.....	175
Figura 75. Gráfica de Profundidad vs. Coeficiente de Biot para los Campos Socororo Este y Oeste.....	176
Figura 76. Ventana operacional de lodo para el pozo ES-439.....	178
Figura 77. Ventana operacional de lodo para el pozo ES-451.....	179
Figura 78. Ventana operacional de lodo para el pozo ES-452.....	180
Figura 79. Ventana operacional de lodo para el pozo ES-457.....	181
Figura 80. Ventana operacional para el Campo Socororo Este.	183
Figura 81. Ventana operacional para el Campo Socororo Oeste.	184
Figura 82. Gráfica de Profundidad vs. Ángulo de “ <i>breakouts</i> ” para el pozo ES-439.....	186
Figura 83. Gráfica de Profundidad vs. Ángulo de “ <i>breakouts</i> ” para el pozo ES-451.....	186
Figura 84. Gráfica de Profundidad vs. Ángulo de “ <i>breakouts</i> ” para el pozo ES-452.....	187
Figura 85. Gráfica de Profundidad vs. Ángulo de “ <i>breakouts</i> ” para el pozo ES-457.....	188

INTRODUCCIÓN

PetroUCV S.A., es una empresa mixta conformada por la Universidad Central de Venezuela y Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA). Nace el 24 de Noviembre del 2000, con la finalidad de vincular, por una parte, a la Universidad con las necesidades del negocio petrolero para atender sus requerimientos de talento; y por otra, a la industria petrolera en apoyo a las iniciativas académicas con una visión de negocio, que permita la autogestión de la Universidad y así crear y potenciar programas de Investigación y Desarrollo.

Bajo este convenio, PetroUCV S.A. realiza la explotación del Área Mayor de Socororo, ubicado en el Edo. Anzoátegui-Venezuela.

El Área Mayor de Socororo es un bloque irregular de aproximadamente 257 kilómetros cuadrados de superficie, constituido por los campos Socororo Este y Oeste, Cachicamo y Caricari. El mismo es una estructura monoclinal el cual posee dos sistemas de fallas predominantes.

La presencia de fallas en un campo petrolero juega un papel fundamental, puesto que determina las condiciones de los esfuerzos originales presentes. Sin embargo, una vez que se inicia la perforación del hoyo se rompe el equilibrio del estado de esfuerzos en sitio que guardaba tanto las rocas como los fluidos contenidos en la formación. A medida que se perfora un pozo se inducen nuevos esfuerzos: la magnitud y orientación se verán afectadas según sea la inclinación y dirección del hoyo, las propiedades del lodo de perforación y las actividades operativas de la mano del hombre.

Durante la etapa de la perforación, la estabilidad del hoyo se ve amenazada cuando a raíz de dichos esfuerzos inducidos se crean zonas problemáticas o daño a la formación: pueden ocurrir fallas tensionales o compresivas si las propiedades del lodo no son las adecuadas. Por ello, es de vital

importancia durante la perforación diseñar una ventana operacional de presión de lodo capaz de compensar las modificaciones de los esfuerzos originales.

Mientras que durante la etapa de la producción, una presión dada por una inadecuada ventana operacional de lodo podría causar el influjo de partículas sólidas, en el momento que se supere el diferencial de presión crítico mínimo necesario para que se produzca el fenómeno del arenamiento.

Siguiendo con las premisas de PetroUCV S.A, se desarrolla este trabajo especial de grado, el cual busca estimar una ventana operacional de presión de lodo a partir de registros de pozos para las formaciones del campo basándose en los conceptos de la geomecánica.

Para ello, la construcción de una ventana operacional de presión de lodo óptima ajustada al campo en estudio requiere del análisis de parámetros y variables geomecánicas tales como: comportamiento esfuerzo-deformación, módulo de Young, relación de Poisson, ángulo de fricción, fuerza de cohesión y poroelasticidad; que en conjunto con el criterio de falla de Mohr-Coulomb, logre establecerse las limitaciones de resistencia mecánica de las rocas que constituyen la formación.

La ventana operacional a determinarse para los campos en estudio Socororo Este y Oeste permitirá, en lo posible, correlacionar las características mecánicas de las formaciones involucradas. Asimismo, establecer partiendo de los resultados de los pozos, parámetros que sirvan como base de diseño para futuros programas de perforación de pozos.

Se persigue con la predicción del comportamiento mecánico de las formaciones ante esfuerzos inducidos, la reducción de los riesgos de inestabilidad de hoyo (derrumbes y producción de arena) y costos asociados al mantenimiento de los pozos actuales y futuros.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Formulación del Problema

Las actividades de perforación y producción de los fluidos de la formación alteran los esfuerzos en sitio que a veces no favorecen las actividades de explotación de los yacimientos.

Estas actividades, desde el momento que extraen de la formación materiales rocosos y fluidos, generan esfuerzos inducidos en la roca que conllevan a una alteración de los esfuerzos preexistentes. Esta modificación del estado inicial de la formación puede resultar en una gran contracción o en una expansión del hoyo inmediatamente adyacente a ella. Así, la formación puede bien restringir el movimiento de la mecha al punto de quedarse atrapada después de la perforación, como también, conseguir que la formación misma se fracture y ocasione una pérdida de circulación. Estos son, entre tantos ejemplos de inestabilidad de hoyo, problemas que podrían producirse y consecuencias que podrían acarrear y dificultar la perforación.

La generación de fracturas, derrumbes, ovalizaciones y arenamiento a raíz de la inestabilidad del hoyo, producto de un desequilibrio del estado de esfuerzos de la formación, podría traer consecuencias desastrosas desde el pozo hasta las instalaciones de superficie, que se traducen en costos de perforación más elevados y demoras en la producción.

En la industria petrolera gran parte de las rocas perforadas son lutitas y un alto porcentaje de los problemas de inestabilidad de hoyo se le asocia a ellas. Los yacimientos del Campo Socororo, Pariaguán, ubicados en Venezuela, no están

Problema

exentos de este tipo de rocas. Por ello, la importancia de realizar una evaluación geomecánica a dichos yacimientos, los cuales son propicios a seguir siendo explotados y perforados para diversos intereses productivos y económicos.

Dicha evaluación, se realizará a través del análisis de registros de pozos y demás información disponibles de campo, para estimar las propiedades mecánicas y las resistencias de las formaciones que contribuyan a la obtención de una ventana operacional de pesos de lodo segura. Esto con el propósito de compensar la alteración de las propiedades en sitio y conseguir la estabilidad de las actividades de perforación.

Objetivo General

Estudio y análisis de estabilidad de hoyo a través de la evaluación de registros de pozo para estimar la ventana operacional de pesos de lodo óptima, para los yacimientos del Campo Socororo, Pariaguán.

Objetivos Específicos

- Determinar para el Campo Socororo los volúmenes de fluido, litología y porosidad a partir de una evaluación petrofísica.
- Estimar para el Campo Socororo las propiedades mecánicas y las resistencias de las formaciones a partir de la información petrofísica y tiempos de tránsito de las ondas compresional y de corte.
- Estimar para el Campo Socororo la magnitud y orientación de los esfuerzos en sitio a través de la integración e interpretación de información

Problema

de campo, geología y registros de los pozos ES-439, ES-451, ES-452 y ES-457; pertenecientes al mismo.

- Determinar en conjunto con los datos de perforación y registros de los pozos ES-439, ES-451, ES-452 y ES-457; pertenecientes al Campo de Socororo, la magnitud de las presiones de poro presente y su importancia en la generación de las fracturas de la formación.
- Análisis de estabilidad de hoyo mediante la obtención de una ventana operacional representativa en todo el Campo Socororo, con la evaluación de los pozos ES-439, ES-451, ES-452 y ES-457; pertenecientes al mismo.
- Estimar un diferencial crítico de presión para prevenir la producción futura de arena y finos a hoyo abierto en formaciones semiconsolidadas y no consolidadas en el Campo Socororo.

Justificación

Debido a que la perforación del hoyo induce esfuerzos en la roca, y conforme sea su trayectoria y las prácticas operacionales posteriores, dichos esfuerzos varían, pudiéndose generar deformaciones y acentuar aquellas fracturas naturales preexistentes en ella. La roca alrededor del hoyo es cada vez más inestable, con consecuentes grietas y derrumbes en la misma.

Para incrementar el ciclo de vida y reducir costos asociados a eventos negativos durante las operaciones de perforación de pozos, es necesario, que todas las actividades de pozos que afecten y causen daños a la formación, sean estudiadas en conjunto con los aspectos geológicos y correlaciones con propiedades petrofísicas pertenecientes a la misma.

Problema

Por ello, es necesario realizar una ventana operacional de presión de lodo sobre bases geomecánicas e información pertenecientes a los pozos cercanos para mejorar el diseño de las trayectorias de las perforaciones, programas de lodos y demás consideraciones; a tener en cuenta en un futuro, durante las operaciones de construcción y producción de pozos.

Tipo de Investigación

El presente trabajo especial de grado sigue una línea de investigación exploratoria, basada en el área de la geomecánica. La metodología se desarrolla con ayuda de los datos de pozos provenientes del Campo Socororo, pertenecientes a PetroUCV S.A., con la colaboración técnica de la empresa Baker Atlas, proporcionando las herramientas y conocimientos técnicos en el área, para realizar las estimaciones de los parámetros necesarios, a fin de cumplir con los objetivos de este trabajo y con la asesoría técnica de la Escuela de Petróleo de la Universidad Central de Venezuela.

Antecedentes

Luego de una minuciosa investigación y consulta con la empresa PetroUCV S.A., se pudo constatar que por primera vez se realiza una investigación en profundidad sobre estudios geomecánicos relacionados a presiones de poro y gradiente de fractura en los campos de Socororo. Sólo algunos trabajos han enfocado brevemente el uso de una ventana operacional de presión de lodo y el estudio del problema de producción de arena en el campo.

Díaz Cristian y Díaz Yoslery (Abril 2002), presentaron su trabajo especial de grado ante la Escuela de Petróleo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela titulado “Diagnóstico del Problema de

Problema

Producción de Arena y Desarrollo de una Metodología para la Selección del Método más Adecuado para su Control en el Área Mayor de Socororo". Su investigación buscaba determinar las causas y características del problema de arenamiento en el área, desarrollando una metodología que permitiese la aplicación correcta de mecanismos óptimos de control de arena, que cooperaran a la maximización de la vida productiva de las nuevas localizaciones y de los pozos a rehabilitar.²

Por su parte, Vásquez Jinny y Martínez Pedro (Octubre 2002), presentaron su trabajo especial de grado ante la Escuela de Petróleo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela titulado "Estudio y Diseño de Cementación primaria de Pozos en el Área Mayor de Socororo". Dicho trabajo especial de grado hace mención, que al no tener información de presión de poro y gradiente de fractura en la zona de estudio, solicitaron apoyo a la Gerencia de Visualización, Conceptualización y Definición de Proyectos de Perforación (Gerencia VCD Perforación) encargada de elaborar las propuestas de perforación de pozos de PDVSA, para procesar registros sínicos y de formación de un pozo, con el fin de analizarlo mediante la ayuda de la aplicación de un "software" de ingeniería llamado *PREDICT*, permitiendo así determinar el tren de presión de poro y de fractura mediante los criterios de cálculo desarrollados por Ben Eaton.¹³

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

Geomecánica

La geomecánica es la disciplina que estudia las características mecánicas de los materiales geológicos que conforman las rocas de la formación, ante cambios del entorno físico (esfuerzos, presiones, temperaturas, etc.), basada en los conceptos y las teorías de mecánica de roca y de los suelos.

Esta disciplina tiene su origen en la ingeniería civil, principalmente, en el uso de suelos y rocas como materiales de construcción y en obras tales como: presas, túneles, vialidad, etc. (geomecánica civil). Luego, se utilizó la geomecánica para fines mineros en la construcción de túneles en minería subterránea y estabilidad en minería a cielo abierto (geomecánica minera).

La geomecánica, en las actividades petroleras comienza en la década de los 50-60, adquiriendo una mayor importancia en la década de los 70. Por ello, se considera una disciplina relativamente novedosa para la ingeniería de petróleo.

Estableciéndose así, la geomecánica aplicada a fines petroleros, como una rama de la ingeniería que se encarga de estudiar las propiedades y el comportamiento mecánico del material geológico o rocoso, sometido a esfuerzos asociados a la perforación, completación y producción de pozos de crudo o gas. La misma persigue analizar y predecir problemas como inestabilidad de hoyos, presiones anormales, arenamiento de pozos, compactación, subsidencia, diseño de fracturas hidráulicas, entre otros.

Teórico

El alto porcentaje de problemas que se presentan en el proceso de perforación, se deben a factores mecánicos, físico-químicos y externos. Las causas más frecuentes, que provocan los problemas de inestabilidad del hoyo durante las actividades de perforación, relacionadas a dichos factores son:

- **Factor mecánico:** Selección inapropiada de la trayectoria del pozo.
- **Factor físico-químico:** Selección inadecuada de la densidad y tipo de fluido de perforación.
- **Factores externos:** Problemas o deficiencias en las prácticas operacionales de perforación.¹

El presente trabajo se enfocará básicamente, para el estudio de la estabilidad del hoyo, en los siguientes aspectos:

- Geomecánicos:
 - a. Geología estructural.
 - b. Orientación y magnitud de los esfuerzos en sitio.
 - c. Propiedades mecánicas y de resistencia de la roca.
- Operacionales:
 - a. Ventana operacional (peso de fluido de perforación).⁶

Clasificación de los Materiales

En general, los materiales según la respuesta mecánica que tengan ante cargas o fuerzas externas aplicadas sobre ellos, se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Materiales elásticos:** Son aquellos que tienen la capacidad de recobrar su forma y dimensiones iniciales cuando cesa el esfuerzo que había causado su deformación.
- **Materiales frágiles:** Son aquellos que se fracturan al aplicar una fuerza externa sobre ellos, sin apenas deformación.
- **Materiales plásticos:** Son aquellos que al aplicarle una fuerza externa no recuperan su estado inicial.

Comportamiento Mecánico de los Materiales

Sobre un cuerpo pueden actuar dos tipos de fuerzas, las cuales son responsables del estado y del comportamiento mecánico de un sistema: las fuerzas gravitatorias y las superficiales.

Las fuerzas gravitatorias son aquellas que vienen de la atracción mutua que experimentan dos cuerpos. Mientras que las fuerzas superficiales son aquellas ejercidas sobre el cuerpo por los materiales que lo rodean, y actúan sobre las superficies de contacto entre partes adyacentes del sistema, transmitiéndose así, a cualquier punto del interior del cuerpo.

Teórico

La fuerza es una cantidad vector, representada por su magnitud, dirección y sentido de aplicación:

- Si es perpendicular al plano recibe el nombre de **fuerza normal**. Ésta es positiva (+) si es compresiva y negativa (-) si es de tracción o tensión, representada por vectores apuntando hacia dentro o hacia fuera del punto de aplicación, respectivamente (Figura 1).

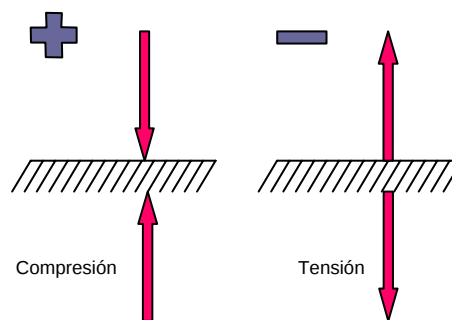


Figura 1. Fuerza normal.

- Si es paralela al plano recibe el nombre **fuerza tangencial, de corte o de cizalla**. Las fuerzas tangenciales son positivas (+) si el vector de fuerza y su vector asociado sobre la otra cara del plano tienen el sentido contrario a las agujas del reloj y negativas (-) para el caso contrario (Figura 2).

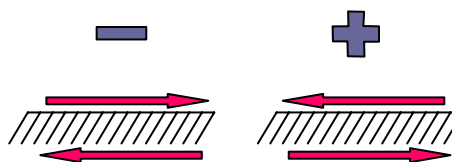


Figura 2. Fuerza de corte.

La fuerza se mide en unidades del sistema SI o CGS, como newton (N), dina (din), kilopondio (kp), toneladas fuerza (ton), etc.³

Teórico**Esfuerzos**

Si la fuerza total es referida al área A del plano sobre el cual actúa, se expresa como tensión o esfuerzo:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Ecuación 1})$$

El **esfuerzo** σ se define como la capacidad que tiene un cuerpo de resistir carga por unidad de área. Al igual que las fuerzas, los esfuerzos compresivos son positivos (+) y los tensionales son negativos (-).

El esfuerzo, como cualquier otro vector, puede ser descompuesto en sus componentes normal σ_n y tangencial τ ; referidas a cualquier plano dependiendo estas componentes de la orientación del plano elegido.

Las unidades del esfuerzo son kp/cm^2 , kN/m^2 o kPa , MN/m^2 o MPa , etc.³

Deformación

La **deformación** ε es la variación de longitud l o espacio de una partícula en dos estados mecánicos distintos, cuando el cuerpo es sometido a un sistema de fuerzas externas y experimenta cambios en relación a su configuración inicial. Esta definición puede expresarse como:

$$\varepsilon = \frac{(l_i - l_f)}{l_i} = \frac{\Delta l}{l_i} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Teórico

Sin embargo, cuando la deformación es volumétrica ocurre la **dilatación** del cuerpo, que no es más que la relación entre el cambio de volumen ΔV de un cuerpo y su volumen inicial V_i :

$$\Delta = \frac{V_i - V_f}{V_i} = \frac{\Delta V}{V_i} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Estado Mecánico

El estado mecánico de un determinado sistema se caracteriza por:

- La posición de cada una de las partículas del cuerpo dentro del sistema de coordenadas.
- Las fuerzas que actúan sobre las partículas del sistema.
- La velocidad con que las partículas cambian de posición.

Estado Tensional

El estado tensional del sistema es consecuencia de las fuerzas que actúan sobre él. La aplicación de nuevas fuerzas modifica la magnitud y la distribución de las preexistentes. Los desplazamientos, las deformaciones y los cambios en el estado tensional o de esfuerzos son los factores que determinan la diferencia entre dos estados mecánicos.

Tensión en Dos Dimensiones

Si se asume un material continuo y homogéneo sometido a un campo de fuerzas uniformes y se considera un cuadrado de área infinitesimal en reposo, el estado de esfuerzos en un punto queda definido por los esfuerzos resultantes sobre las caras de dicho cuadrado. Sobre cada cara actúa una componente normal y otra tangencial. Sobre el plano x : σ_y y τ_{xy} ; y sobre el plano y : σ_x y τ_{yx} (Figura 3).

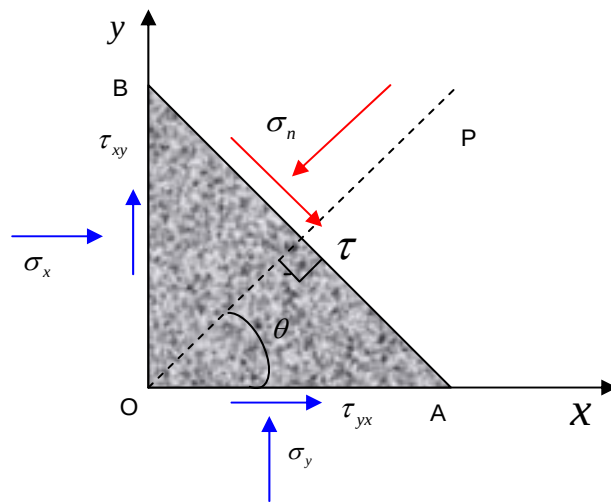


Figura 3. Esfuerzos sobre un plano.

Como el equilibrio rotacional requiere que los momentos sean iguales ($\tau_{xy} = \tau_{yx}$), el estado de esfuerzos en dos dimensiones puede determinarse con sólo tres componentes σ_x , σ_y y τ_{xy} :

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos 2\theta + \tau_{xy} \cdot \sin 2\theta \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \cdot \sin 2\theta + \tau_{xy} \cdot \cos 2\theta \quad (\text{Ecuación 5})$$

Tensiones en Tres Dimensiones

En cualquier punto de un cuerpo sometido a esfuerzos, se pueden encontrar tres planos ortogonales entre sí en los que los esfuerzos tangenciales son nulos: estos planos se denominan **planos principales de esfuerzo** y los esfuerzos normales que actúan sobre ellos son **las tensiones principales**. La mayor de las tres tensiones es σ_1 , la intermedia es σ_2 y la menor es σ_3 (Figura 4).

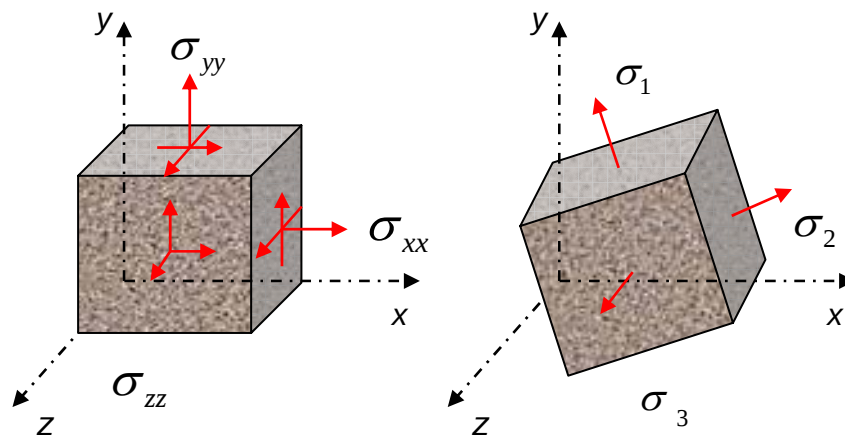


Figura 4. Componentes de tensiones en un sistema cartesiano

Las componentes normal y tangencial del esfuerzo resultante sobre el plano que contiene al punto para un cuerpo (Figura 5) quedan definidas por:

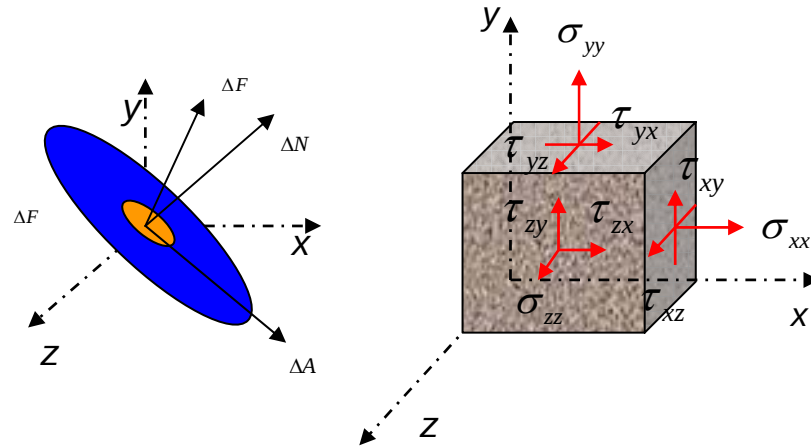


Figura 5. Tensiones en tres dimensiones.

$$\sigma_n = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta A} \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (\text{Ecuación 7})$$

El esfuerzo puede expresarse de manera matricial. La matriz de esfuerzo con las nueve componentes queda definida por:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Teórico

El estado de esfuerzos en un punto queda definido por nueve componentes de esfuerzos independientes: 3 normales y 6 tangenciales. Si se considera el cuerpo en equilibrio, esto es, sus momentos iguales; resulta:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad \text{(Ecuación 9)}$$

El tensor de esfuerzos correspondiente a los esfuerzos principales que actúan sobre un cuerpo será entonces:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad \text{(Ecuación 10)}$$

Igualmente, se puede calcular las componentes σ_n y τ a partir de σ_1 y σ_3 :

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \cos 2\theta \quad \text{(Ecuación 11)}$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \sin 2\theta \quad \text{(Ecuación 12)}$$

El estado de esfuerzos de un cuerpo explicado es equivalente para los cuerpos o macizos rocosos.³

El primer plano posible de fractura (Figura 6) es aquel perpendicular al esfuerzo principal mínimo σ_3 (o paralelo al esfuerzo principal máximo σ_1).

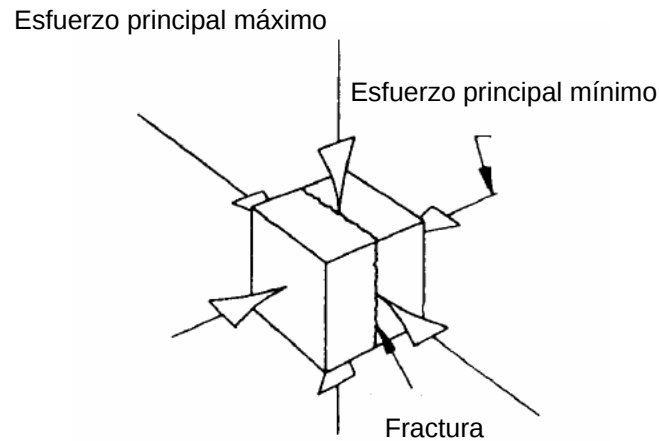


Figura 6. Plano de fractura.

Comportamiento Mecánico de las Rocas

Relación Esfuerzo-Deformación en las Rocas

La relación esfuerzo-deformación de un cuerpo rocoso viene definido por el comportamiento entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones producidas durante los ciclos de carga y descarga de esfuerzos en el proceso de construcción de pozos. Ésta describe la variación de la resistencia del material rocoso a distintas etapas o niveles de deformación:

- El comportamiento antes de llegar a la rotura.
- La forma en que se produce la rotura.
- El comportamiento después de la rotura.

La curva que representa la relación de esfuerzo-deformación de las rocas (curva $\sigma - \varepsilon$) no es lineal. El esfuerzo aplicado para que ocurra la deformación no es el mismo para todas las deformaciones y varía según tipo de roca.

Dicha relación puede verse afectada también por un fenómeno denominado histéresis, en el cual parte de la energía de deformación es disipada en el material rocoso por procesos irreversibles, como la generación de nuevas microfracturas, durante el ciclo de carga-descarga de las operaciones de perforación, completación y producción de pozos.¹²

Son muchas otras las causas que conducen a que estas curvas no sean lineales del todo y se irán explicando a su debido tiempo en el transcurso del capítulo.

El estudio del comportamiento mecánico de las rocas se lleva a cabo a partir de varios ensayos de aplicación de fuerzas compresivas, en donde se registran sus respectivas relaciones de esfuerzo-deformación a lo largo de las diferentes etapas.

Para mayor comprensión del lector la curva esfuerzo-deformación se dividirá en las siguientes regiones (Figura 7):

- **Región OA:** La relación esfuerzo-deformación muestra en esta etapa una curva cóncava hacia arriba. Esta falta de linealidad se atribuye al cierre de poros y microfracturas internas de la roca sin histéresis. Para esfuerzos de menores magnitudes, la formación se comporta elásticamente.
- **Región AB:** La relación esfuerzo-deformación es prácticamente lineal, lo cual sigue indicando un comportamiento elástico sin o con poca histéresis. Una vez cerrados los poros y las microfracturas de la roca, la formación no muestra aún una reorientación apreciable de granos en

su estructura física. En el punto B, que se refleja en una inflexión de la curva esfuerzo-deformación, recibe el nombre de **límite de elasticidad** σ_y , el cual representa el máximo límite elástico. Una vez superado éste, las deformaciones de la roca no se recuperarán aunque se retire totalmente la carga aplicada. A partir de este momento, la roca todavía puede mantener deformaciones importantes antes de llegar al límite de su resistencia.

- **Región BC:** La relación esfuerzo-deformación muestra una curva cóncava hacia abajo con valor máximo en el punto C, con presencia de histéresis. Esto ocurre cuando la diferencia entre los esfuerzos máximo y mínimo persiste y aumenta en magnitud, la roca deja entonces de mantener su comportamiento elástico y comenzará a producirse deformaciones dúctiles o plásticas. En consecuencia de ello, los granos se reorientarán y no lograrán conseguir su configuración inicial.
- **Región CD:** La relación esfuerzo-deformación muestra una curva de pendiente negativa. Esta caída de la curva se debe a la liberación de la energía y pérdida de la resistencia, producto de la falla de la roca, una vez superado su límite de resistencia.⁵

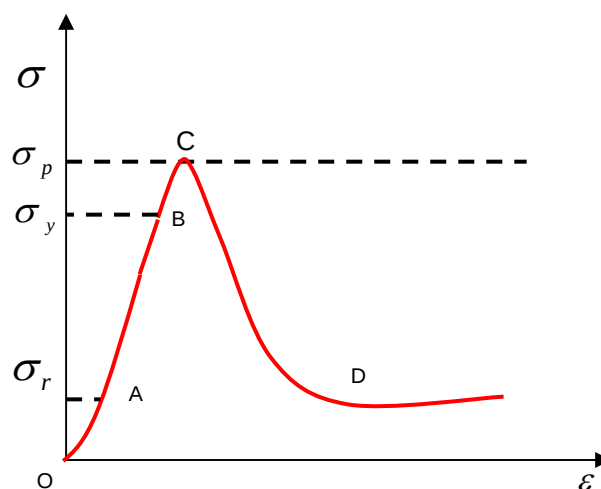


Figura 7. Curva típica de esfuerzo-deformación para rocas.

El punto más alto de la curva esfuerzo-deformación (Figura 7) corresponde a la **resistencia pico** σ_p del material rocoso. Representa la resistencia al corte máxima que posee el material que no ha sido fallado previamente. Un pequeño incremento de la carga a partir de entonces puede dar lugar a la rotura definitiva del material.

La resistencia al corte que posee el material después de haber ocurrido la falla se denomina **resistencia residual** σ_r .

Modelos de Comportamientos de las Rocas

Una vez que la carga aplicada haya superado la máxima resistencia que puede tener una determinada roca para evitar fracturarse, puede presentarse, según la diferencia entre la resistencia pico y aquella residual, los siguientes comportamientos:

- **Comportamiento frágil:** La fractura frágil implica una pérdida casi instantánea de la resistencia (valor próximo a cero) de la roca a través de un plano sin ninguna o muy poca deformación plástica (Figura 8a). Es un comportamiento típico de rocas duras con alta resistencia.
- **Comportamiento frágil-dúctil:** La resistencia de la roca decrece hasta cierto valor después de haberse alcanzado deformaciones importantes. Es el caso que presentan las discontinuidades rocosas o materiales arcillosos sobreconsolidados (Figura 8b).

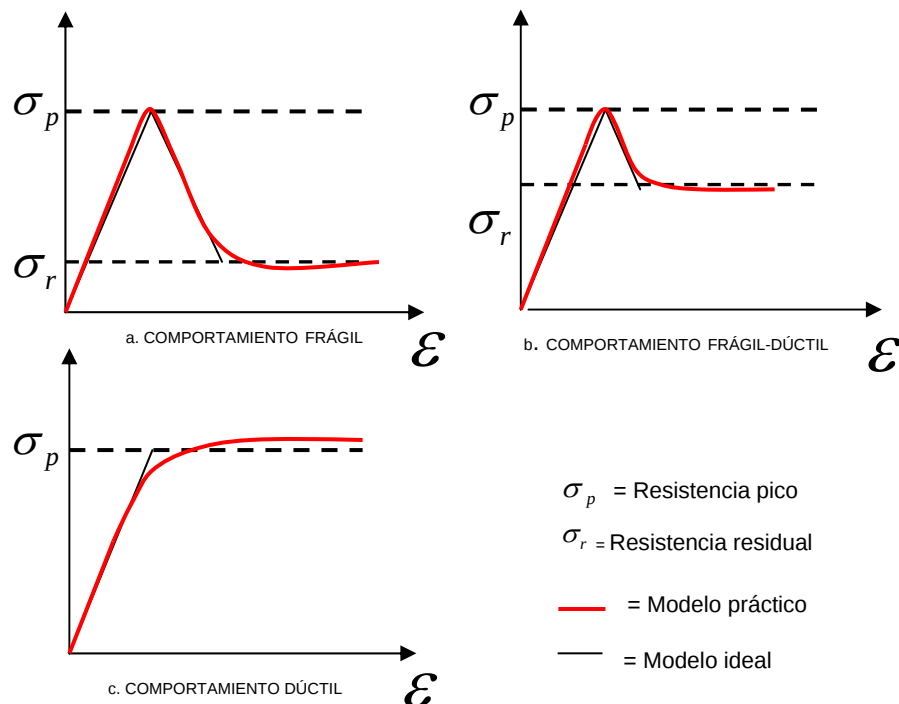


Figura 8. Modelos de comportamiento esfuerzo-deformación.

- **Comportamiento dúctil:** La resistencia se mantiene constante después de grandes deformaciones. Es el caso que presenta determinados tipos de materiales blandos como las sales (Figura 8c).³

Propiedades Mecánicas de las 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.

Módulo 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:

$$\varepsilon_{ax} = \frac{\sigma}{E} \quad (\text{Ecuación 13})$$

La relación (Ecuación 13) 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 9).

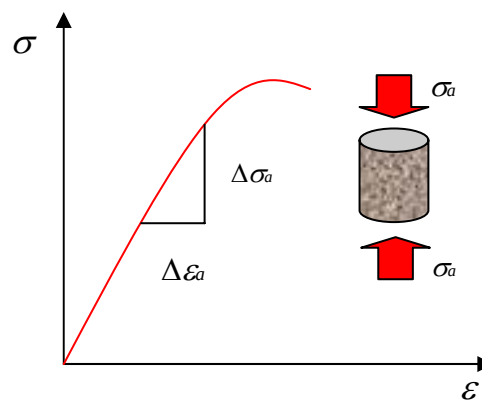


Figura 9. Módulo de Young.

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.

Relación de Poisson

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

$$\nu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{ax}} \quad (\text{Ecuación 14})$$

donde ε_t es la deformación transversal de la roca al estar sometida a un esfuerzo (Figura 10).

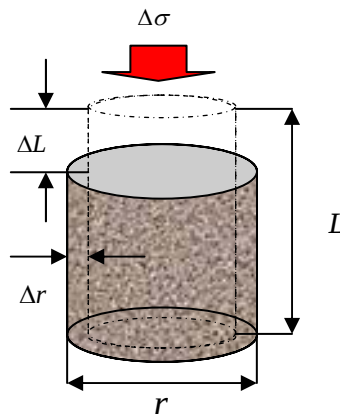


Figura 10. Relación de Poisson.

El signo negativo de la relación de Poisson representa que cuando hay un alargamiento longitudinal se produce, al mismo tiempo, una contracción lateral y viceversa. La relación de Poisson es adimensional.

La relación de Poisson depende del tipo de litología (Tabla 1):

Tabla 1. Relación de Poisson asociado a diferentes tipos de material.¹⁵

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 las mismas, dependerán de la naturaleza de su anisotropía.

Anisotropía

Cuando la respuesta mecánica del material rocoso es independiente de la orientación de la aplicación de esfuerzo se conoce como **materiales isotrópicos**. A diferencia de éstos, la respuesta elástica de los **materiales anisotrópicos** es dependiente de la orientación del material para una configuración dada. Conociendo esto, se tienen dos tipos de anisotropías:

- **Anisotropía litológica o intrínseca:** Ésta viene dada por la heterogeneidad de la composición del material y la distribución de tamaño de granos entre finos y gruesos.
- **Anisotropía inducida por los esfuerzos:** Ésta es causada por microgrietas generadas por diferencias de esfuerzos.

Ángulo 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.

El ángulo de fricción multiplicado por el esfuerzo normal da el esfuerzo de rozamiento que hay que superar para producir el deslizamiento.

La fricción depende de la presión de poros y tipo de litología (Tabla 2).

Tabla 2. Ángulo de fricción según tipo de litología.

Tipo de Litología	Ángulo de Fricción (grados)
Calizas	40-45
Lutitas	30
Areniscas Consolidadas	45
Areniscas no consolidadas	15

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**.

Los valores típicos de la resistencia cohesiva para las rocas oscilan entre 5 y 200 MPa aproximadamente.

Poroelasticidad

Los materiales geológicos son sistemas heterogéneos multifásicos compuestos por partículas sólidas minerales, que crean una estructura porosa donde residen los distintos fluidos de los yacimientos. La parte sólida, representada por la matriz, es considerada como la principal responsable de la deformación del material geológico. El fluido intersticial que puede fluir a través de los poros interconectados puede alterar en cierta medida el comportamiento mecánico de las rocas.

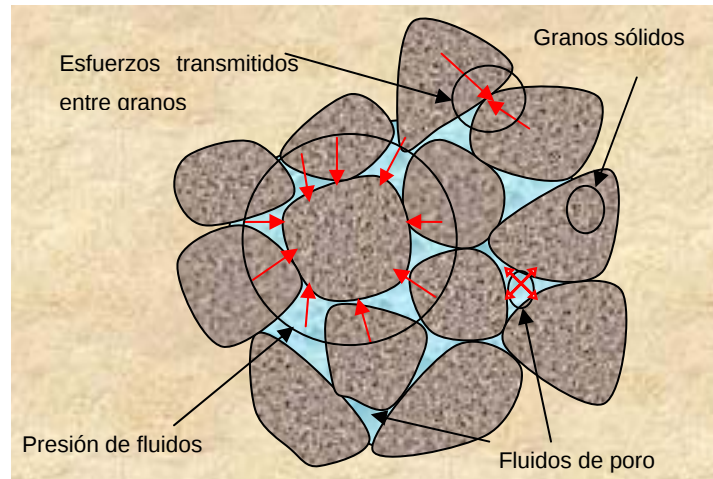


Figura 11. Estructura porosa.

La **poroelasticidad** es una teoría que describe el proceso acoplado de difusión (movimiento lento de los fluidos de un punto a otro) y deformación del medio poroso, considerando la respuesta del medio ante cambios en los esfuerzos efectivos (Figura 11).

Los **esfuerzos efectivos** σ' son aquellos esfuerzos soportados por el esqueleto mineral sólido, es decir, únicamente por la matriz.

La presión hidrostática del fluido alojado en los poros del material rocoso es conocida como **presión de poros** p_f . De acuerdo con la convención de signos, todos los esfuerzos, incluyendo la presión de poros, son positivos en compresión.

El concepto de esfuerzos efectivos fue introducido en mecánica de sólidos por Terzaghi (1923) sobre una base empírica. Él mismo argumentaba que:

- I. *“El incremento de la presión hidrostática externa produce el mismo cambio de volumen del material que la reducción de las presiones de poros en la misma cantidad”.*
- II. *“La resistencia al corte depende sólo de la diferencia entre el esfuerzo normal y la presión de poros”.*¹²

Teórico

La segunda aseveración (II) implica que el esfuerzo efectivo determina si la roca falla o no debido a la carga externa mas no debido al esfuerzo total. Entonces, para materiales geológicos porosos, si existe presión de poros, el esfuerzo queda modificado en sus componentes normales solamente, ya que la presión hidrostática no actúa sobre las componentes tangenciales:

$$\sigma' = \sigma - p_f \quad (\text{Ecuación 15})$$

Posteriormente, Biot (1945) introdujo el parámetro α para tomar en cuenta el proceso acoplado de difusión-deformación del medio poroso al concepto de esfuerzo efectivo definido por Terzaghi:

$$\sigma' = \sigma - \alpha \cdot p_f \quad (\text{Ecuación 16})$$

Físicamente, la ecuación modificada (Ecuación 16) significa que la presión de poro ayuda a contrarrestar el esfuerzo mecánico soportado a través del contacto grano a grano.

La constante de poroelasticidad o también conocida como el **coeficiente de Biot** α , mide la cantidad de esfuerzo que toma el fluido y viene dado de la siguiente manera:

$$\alpha = 1 - \frac{c_{ma}}{c_b}, \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (\text{Ecuación 17})$$

donde c_{ma} y c_b son las compresibilidades de la matriz y de todo el cuerpo rocoso, respectivamente.

En rocas débiles o no consolidadas α es cercano a 1.

Resistencia y Rotura

Cuando se aplica una carga en la cual los esfuerzos superan la resistencia del material rocoso se alcanzan deformaciones irreversibles. En consecuencia, se pierden las fuerzas cohesivas y permanecen únicamente las fuerzas de fricción de la roca, dando origen así a la rotura de la misma acompañada de la generación de planos de fractura a través de ella, cuya dirección depende de:

- La dirección de aplicación de las fuerzas.
- Las anisotropías presentes en el material rocoso a nivel microscópico.

A escala de macizo rocoso fracturado, la rotura puede ocurrir a través de la matriz rocosa o a favor de las discontinuidades preexistentes, siendo también posible la creación de planos de roturas mixtos.

Fallas Geológicas

Las **fallas** son fracturas en la corteza a lo largo de las cuales ha tenido lugar un desplazamiento apreciable.

La importancia de conocer el régimen de esfuerzos es que nos permite acotar la magnitud de los esfuerzos in situ, conjuntamente con la observación de modos de fallas en los pozos.

Las fallas se clasifican según sea la dirección del desplazamiento de las rocas que cortan:

Falla normal: Fallas generadas por tensión. El movimiento es predominantemente vertical respecto al plano de falla, el cual típicamente tiene un ángulo de 60 grados respecto a la horizontal. El esfuerzo máximo principal es el vertical y el esfuerzo mínimo principal es el horizontal (Figura 12).

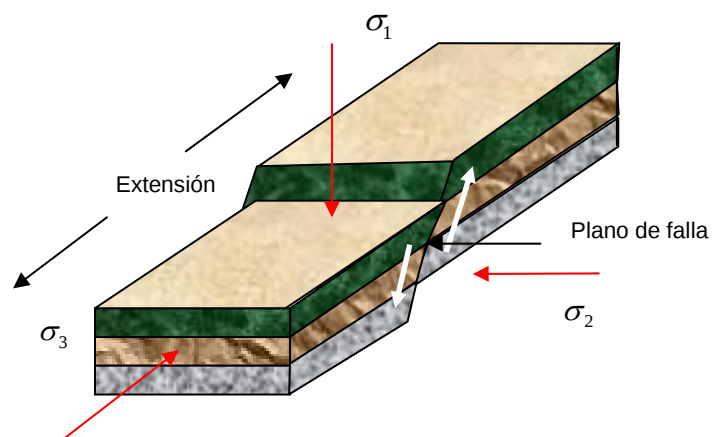


Figura 12. Representación estructural de una falla normal.

Falla inversa: Fallas generadas por compresión. El movimiento es preferentemente horizontal y el plano de falla tiene típicamente un ángulo de 30 grados respecto a la horizontal. El esfuerzo máximo principal es el horizontal y el esfuerzo mínimo principal es el vertical (Figura 13).

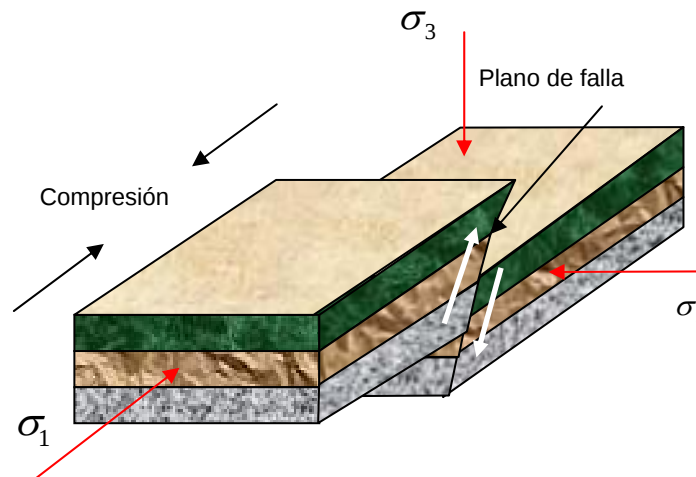


Figura 13. Representación estructural de una falla inversa.

Falla de desgarre o “strike-slip”: Fallas verticales con movimiento de bloques horizontal, con poco o sin desplazamiento vertical. El esfuerzo intermedio es vertical (Figura 14).

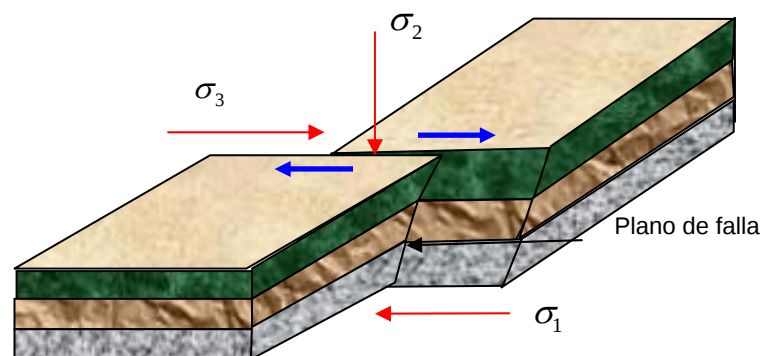


Figura 14. Representación estructural de una falla de desgarre o “strike-slip”.

Criterios de Fallas

Ante la imposibilidad práctica de obtener todas las propiedades que rigen el comportamiento mecánico de los materiales rocosos, se emplea una serie de criterios de fallas los cuales permiten estimar qué magnitudes de esfuerzos podrían exceder la resistencia de la roca, para que ocurra la rotura de la misma.

Los **criterios de fallas** son expresiones matemáticas, obtenidas empíricamente a partir de ensayos de laboratorios, representados en modelos simples para estimar la resistencia del material en base a los esfuerzos aplicados y a sus propiedades resistentes, y predecir cuándo ocurre la rotura. En general:

$$\text{resistencia} = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, K_i) \quad (\text{Ecuación 18})$$

donde K_i es un conjunto de parámetros representativos de las rocas.

Teóricamente, se considera que la falla ocurre cuando una relación característica del material satisface:

$$\sigma_1 = f(\sigma_2, \sigma_3) \quad (\text{Ecuación 19})$$

El esfuerzo intermedio σ_2 , bajo el concepto de esfuerzos desviadores, tiene poca influencia con respecto al esfuerzo mínimo σ_3 en la determinación de la resistencia pico de los materiales rocosos, como se verá más adelante. Esto hace que los criterios de falla en general se expresen de la forma:

$$\sigma_1 = f(\sigma_3) \quad (\text{Ecuación 20})$$

Es de suma importancia entender la interpretación física de los criterios de falla antes que ellos sean aplicados a problemas asociados a la construcción de pozos.

Los criterios de falla son utilizados para generar representaciones gráficas o espaciales llamados **superficies o envolventes de falla**. Las mismas sirven para separar aquellas zonas estables de las inestables de un material rocoso bajo la influencia de los esfuerzos. A continuación se presentan los criterios de fallas útiles para el estudio de la estabilidad de los hoyos:

Criterio de Falla de Mohr-Coulomb

El criterio de falla comúnmente conocido es el criterio de falla Mohr-Coulomb (1900), el cual relaciona la resistencia al corte con los contactos de fuerzas que existen alrededor de los granos. Una aproximación lineal de la envolvente de falla es:

$$\tau = C + \sigma' \cdot \tan \phi \quad \text{(Ecuación 21)}$$

El criterio o la ecuación de Mohr-Coulomb establece que la roca fallará si el esfuerzo compresivo máximo supera dos propiedades de la materia: la resistencia compresiva no confinada C obtenida del ensayo uniaxial (también denotado como UCS por sus siglas en inglés, “*unconfined compressive stress*”) y el ángulo de fricción interna ϕ . Los factores C y ϕ son coeficientes de linealización y son determinados experimentalmente.

El ensayo uniaxial se explicará con más detalles en apartados posteriores.

Teórico

Cada tipo de roca tiene una resistencia compresiva que la describe (Tabla 3):

Tabla 3. Resistencia compresiva según tipo de roca.

Tipo de Roca	Resistencia Compresiva (Lpc)
Resistencia muy alta	>32000
Resistencia alta	16000-32000
Resistencia media	8000-16000
Resistencia baja	4000-8000
Resistencia muy baja	<4000

La envolvente de falla es la tangente que pasa por los diversos círculos de Mohr, en el que cada uno representa un ensayo triaxial. Este ensayo se explicará con más detalles en apartados posteriores.

El ángulo de fricción se puede obtener gráficamente determinando la pendiente de la recta tangente y el mismo se relaciona con el ángulo de cizalla β , medido entre la dirección del esfuerzo mínimo y el plano de falla (Figura 15), por medio de la siguiente ecuación:

$$\beta = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad \text{(Ecuación 22)}$$

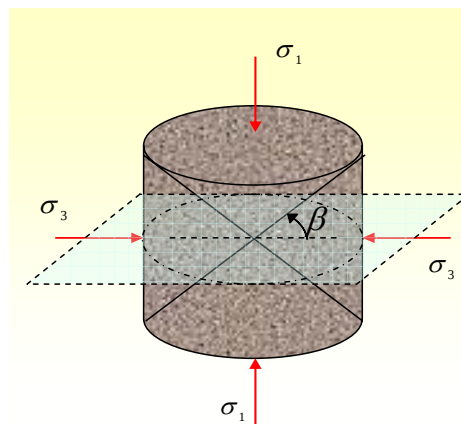


Figura 15. Geometría de la falla de cizalla.

Teórico

La envolvente lineal de Mohr-Coulomb puede ser expresada igualmente en términos de los esfuerzos principales (σ_1 y σ_3) (Figura 16), de la siguiente manera:

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \cdot \sigma_3 + C_0 \quad (\text{Ecuación 23})$$

donde C_0 es la fuerza de cohesión en el plano de los esfuerzos principales.

$$C_0 = 2C \cdot \tan(\beta) = 2C \cdot \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (\text{Ecuación 24})$$

La ecuación es equivalente a:

$$\sigma_1 = C_0 + \sigma_3 \cdot \tan^2(\beta) \quad (\text{Ecuación 25})$$

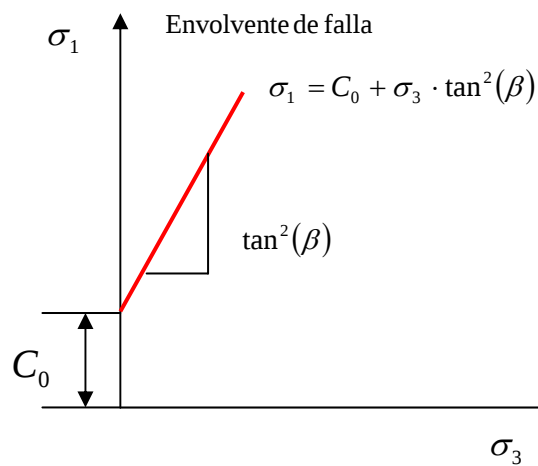


Figura 16. Criterio de Mohr-Coulomb en el plano de los esfuerzos principales.

La fricción que presentan los materiales granulares hace que la falla del material geológico no ocurra en el plano de 45 grados (con respecto a la horizontal) donde ocurren los mayores esfuerzos, sino a un plano de $45^\circ + \phi/2$ a menor esfuerzo. Razón por la cual, la estabilidad puede ser analizada calculando los esfuerzos normales (Ecuación 11) y de corte (Ecuación 12) para una situación dada, asumiendo un ángulo de corte de 45 grados. Esta consideración facilita la representación del estado de esfuerzos en un punto mediante la construcción del círculo de Mohr (Figura 17).

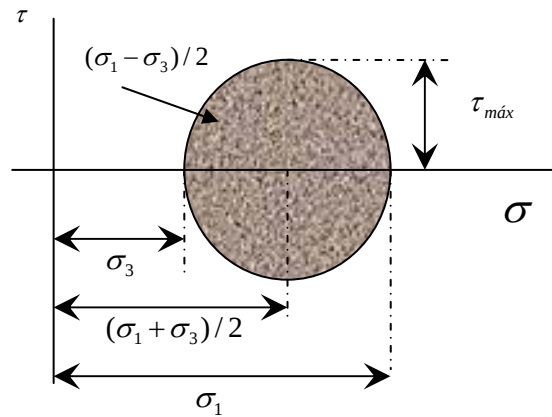


Figura 17. Círculo de Mohr.

Las intersecciones del círculo con el eje σ son los esfuerzos principales σ_1 y σ_3 . El radio del círculo representa el máximo valor del esfuerzo tangencial τ . Cualquier punto del círculo representa el estado de esfuerzos sobre un plano cuya normal forma un ángulo θ con la dirección del esfuerzo principal mayor σ_1 . Dado los esfuerzos σ_1 y σ_3 se pueden calcular gráficamente los valores de σ y τ para cualquier plano (Figura 18).

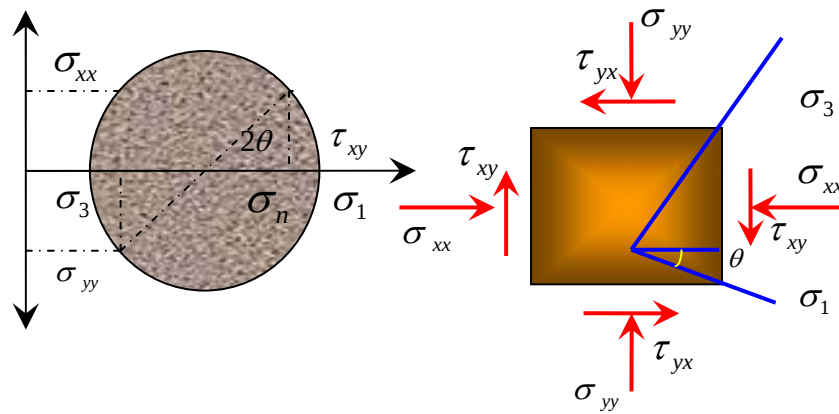


Figura 18. Representación gráfica de los esfuerzos en el círculo de Mohr.

La diferencia entre los esfuerzos $(\sigma_1 - \sigma_3)$ se denomina **esfuerzo desviador**. Los esfuerzos fuera de este rango darán pie a que la roca alcance la resistencia pico y se deforme de manera tal, que la reorientación de las partículas que la conforman no logrará recuperar su configuración inicial.

El círculo de Mohr permite representar diferentes estados de esfuerzos (Figura 19):

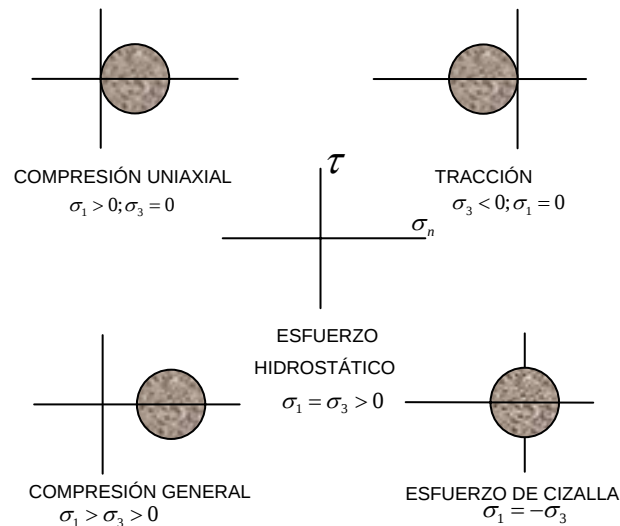


Figura 19. Estados de esfuerzos.

Hasta ahora se ha venido explicando la aproximación lineal de la envolvente de falla obtenida de varios círculos de Mohr para mayor comodidad en la determinación de los parámetros que intervienen. Sin embargo, todas las rocas exhiben un comportamiento no lineal, una curva usualmente cóncava hacia abajo (Figura 20).

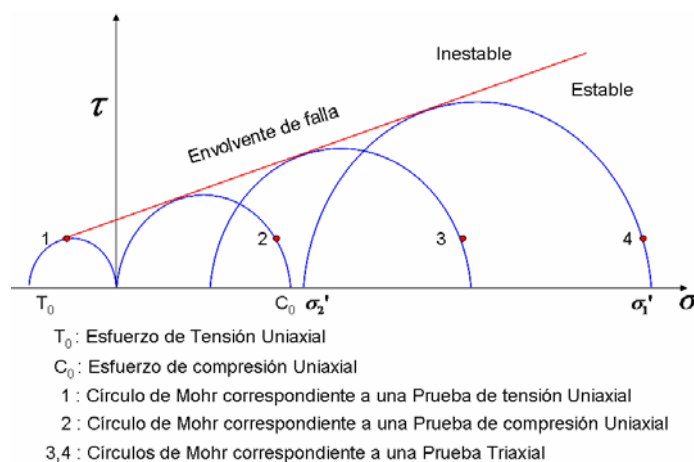


Figura 20. Envolvente de falla de Mohr-Coulomb.

La envolvente de Mohr representa los límites de resistencia mecánica para el material al estar sometido bajo fuerzas externas y tiene las siguientes implicaciones:

- Condiciones de esfuerzos por debajo de la envolvente son estables.
- Condiciones de esfuerzos por encima de la envolvente no existen, ya que el material ya ha fallado.
- El círculo de Mohr tangente a la envolvente ha alcanzado la resistencia máxima en un determinado plano.

El modelo de esfuerzos basado en el criterio de falla de Mohr-Coulomb, asume que el esfuerzo máximo en sitio está gobernado por la resistencia al corte de la formación. Si la falla está controlada por el deslizamiento a lo largo de una superficie preexistente, la resistencia compresiva puede asumirse como despreciable.

El círculo de Mohr es una ventaja gráfica que demuestra que mientras más aumenta la profundidad de la formación mayor tiene que ser el esfuerzo máximo para fracturar la misma a dicha profundidad. Para las condiciones normalmente encontradas en la formación: la carga litostática aumenta con la profundidad. En consecuencia de ello, el esfuerzo mínimo aumenta haciendo que el círculo de los esfuerzos se desplace más a la derecha, encontrándose más lejos de la envolvente de falla. En cambio, en las proximidades de la superficie, las fallas se producen más por cizallamiento. La roca suele romperse en láminas delgadas que se ven forzadas a deslizarse unas respecto las otras debido a la poca carga litostática.

Las rocas localizadas a grandes profundidades no sólo dependen de la carga litostática y las altas presiones sino también de las temperaturas elevadas, que las conducen a que se comporten de manera dúctil durante la deformación, formándose más bien pliegues sin fracturarse.

La envolvente de falla generada por los círculos de Mohr es independiente de la temperatura, por lo que, la misma podría resultar imprecisa para muy extremas magnitudes térmicas.

Un uso incorrecto del modelo lineal puede dar lugar a errores importantes, sobrevalorando o infravalorando las capacidades mecánicas del material rocoso. Por ello, es necesario que los criterios de resistencia o rotura lineales como el caso de Mohr-Coulomb sean establecidos en términos de esfuerzos efectivos, que son los que realmente rigen el comportamiento mecánico de la roca.

En el diagrama de Mohr el efecto de presión de poros se refleja en un desplazamiento hacia la izquierda de los círculos de esfuerzos, en una longitud igual al valor del esfuerzo o presión intersticial p_f (Figura 21).

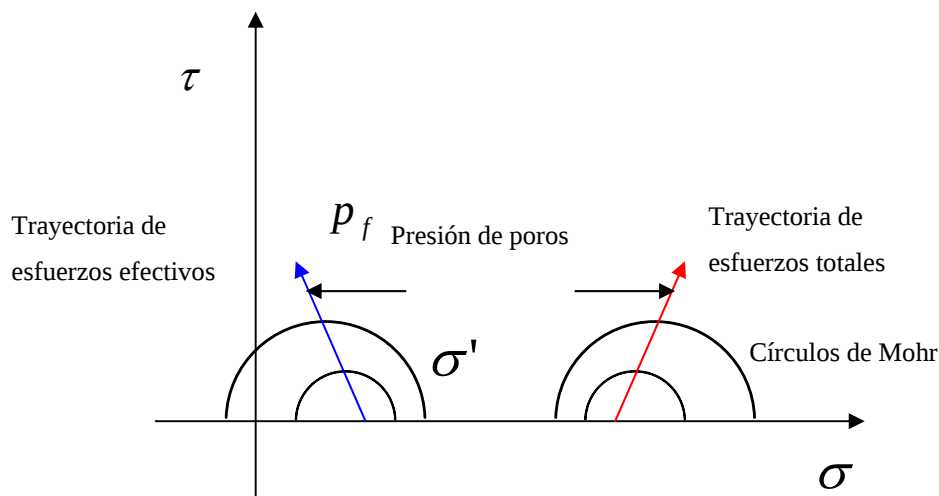


Figura 21. Trayectoria de esfuerzos.

Dichos desplazamientos describen las siguientes trayectorias:

- Trayectoria de esfuerzos efectivos.
- Esfuerzos totales menos presión de poros.
- Esfuerzos totales.

Otros Criterios de Falla

Se han desarrollado otros criterios para la determinación y predicción de fallas, los cuales no son tan prácticos y sencillos de aplicar como el criterio de falla de Mohr-Coulomb, por lo que, se harán sólo mención de ellos. Éstos son:

- Criterio de Falla de Hoek-Brown.
- Criterio de Falla de Tresca.
- Criterio de Falla de Von Mises.
- Criterio de Falla de Drucker-Prager (Extendido Von Mises).

Los criterios de resistencia o rotura pueden ser expresados para matriz rocosa, para superficies de discontinuidad o para macizos rocosos.

Colapso de Poro

El colapso de poro es causado por el agotamiento severo de la presión de poro, el cual puede crear problemas en el yacimiento tales como reducción de la porosidad, la permeabilidad, producción de arena y migración de finos. El colapso de poro también puede causar compactación a lo largo de capas de sobrecarga, que conducen a la subsidencia o al fracturamiento del hoyo, la cual podría resultar con el tiempo, el colapso de los revestidores.

La siguiente envolvente de Mohr-Coulomb (Figura 22) ilustra las diversas regiones o localizaciones de campo de esfuerzos propensas a que ocurran determinados tipos de fallas:

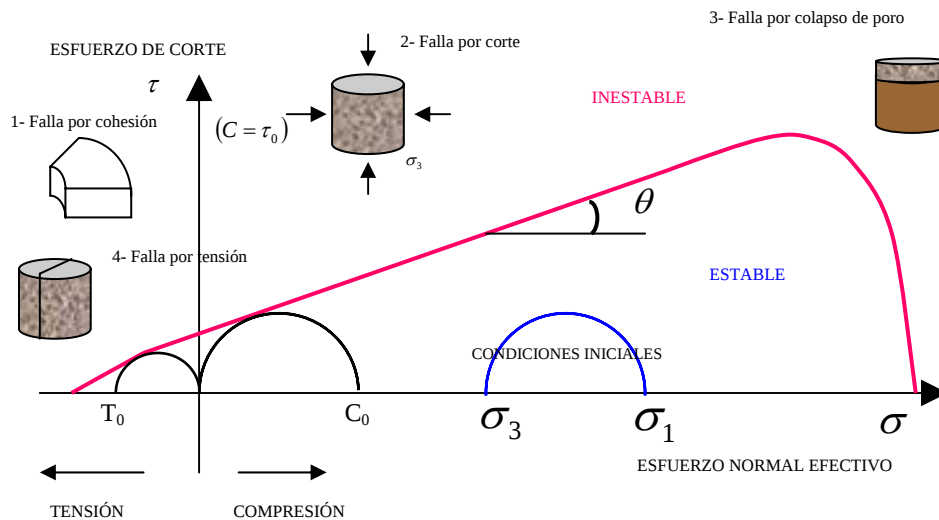


Figura 22. Tipos de falla y ubicación en la envolvente de Mohr-Coulomb.

Esfuerzos Inducidos Durante la Perforación

Una vez que se inicia la perforación del hoyo se rompe el equilibrio del estado de esfuerzos en sitio que guardaban tanto las rocas como los fluidos contenidos en la formación. A medida que se perfora un pozo, la presión hidrostática ejercida por la columna de lodo debe reemplazar la pérdida de soporte causada por la remoción de la columna original. Pero dado que la presión del lodo es uniforme en todas las direcciones, no es posible balancear los esfuerzos completamente a diferentes condiciones de perforación (profundidades, temperaturas, inclinación del pozo y reacciones químicas que podrían ocurrir a la exposición del fluido de perforación, etc.); en consecuencia, la formación alrededor del pozo pierde estabilidad al sufrir cambios de esfuerzos tensionales, compresivos y cargas de corte. Dicha condición de esfuerzos causados por las actividades del hombre es conocida como estado de **esfuerzos inducidos**.

En general, existen dos tipos de esfuerzos que son necesarios considerarse en el análisis: los esfuerzos en sitio y los esfuerzos inducidos por el proceso de perforación. Los esfuerzos inducidos actúan sobre la formación en la interfase lodo/formación y son controlados durante las operaciones de perforación, por la densidad del lodo y por los esfuerzos en sitio. En cambio, los esfuerzos en sitio no se ven tan influenciados por los esfuerzos inducidos del pozo.

Los esfuerzos en sitio están representados en un sistema de coordenadas cartesianas, descrito por un esfuerzo vertical y dos ortogonales, los cuales son horizontales (Figura 23). Si la magnitud de estos últimos a su vez son diferentes, que es lo que generalmente ocurre, habrá entonces un esfuerzo horizontal mínimo y un esfuerzo horizontal máximo. La dirección de ambos esfuerzos horizontales completa la descripción total de los esfuerzos de campo:

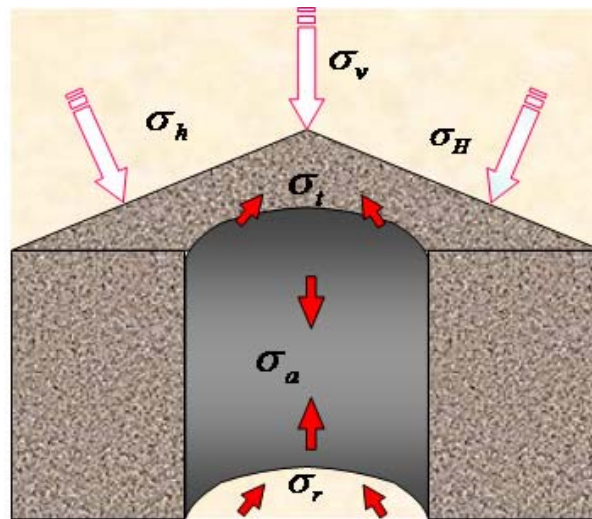


Figura 23. Esfuerzos de campo y esfuerzos inducidos del pozo.

Esfuerzo vertical σ_v : Representa el esfuerzo de sobrecarga el cual ejerce una presión sobre la formación a una profundidad dada, debido al peso total de la roca y los fluidos encima de esa profundidad. Por ello, a medida que se profundiza, los esfuerzos verticales aumentan originando disminución de porosidad y aumento de la densidad del material.

Esfuerzos horizontales σ_h , σ_H : Cuando se perfora cerca de ciertas estructuras, sobre todo aquellas ubicadas en áreas tectónicamente activas, los esfuerzos horizontales pueden diferir entre sí y se describen como componentes de esfuerzos mínimo y máximo.

Antes de la perforación, el estado de esfuerzos de la roca es descrito por los esfuerzos en sitio mencionados anteriormente. Sin embargo, cuando el hoyo es perforado resulta un nuevo conjunto de esfuerzos que describen la magnitud y dirección de los esfuerzos de un hoyo. Éstos son representados por medio de un sistema de coordenadas cilíndricas. Para obtener el esfuerzo efectivo que deforma la estructura rocosa, se debe restar la fuerza de oposición del fluido del sistema:

$$\alpha \cdot p_f \quad (\text{Ecuación 26})$$

Esfuerzo radial efectivo σ'_{rr} : Es el esfuerzo ejercido por la presión hidrostática dentro del pozo contra la pared del hoyo y actúa a lo largo del radio del mismo. Se define como la diferencia entre la presión ejercida por el lodo en el hoyo p_{MUD} y la presión de poro p_f .

$$\sigma'_{rr} = p_{MUD} - \alpha \cdot p_f \quad (\text{Ecuación 27})$$

En las mediciones de registros las variaciones del esfuerzo vertical se puede obtener por medio del gradiente de presión del lodo de perforación.

Esfuerzo axial efectivo σ'_{zz} : Es uno de los dos esfuerzos ortogonales y está orientado a lo largo de todo el hoyo. Depende de los esfuerzos en sitio, aunque no está directamente afectado por el peso del lodo.

Para el caso de un pozo vertical el esfuerzo axial y el vertical serán los mismos, pero para un pozo inclinado, dependerá de la sobrecarga y los esfuerzos horizontales:

$$\sigma'_{zz} = \sigma_{zz} - 2\nu \cdot (\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \cdot \cos 2\theta - 4\nu \cdot \tau_{xy} \cdot \sin 2\theta - \alpha \cdot P_f \quad (\text{Ecuación 28})$$

Esfuerzo tangencial efectivo $\sigma'_{\theta\theta}$: Esfuerzo ortogonal dirigido alrededor de la circunferencia del pozo. Depende de la presión ejercida por el peso del lodo y de los esfuerzos en sitio:

(Ecuación 29)

$$\sigma'_{\theta\theta} = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) - 2(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \cdot \cos 2\theta - 4\tau_{xy} \cdot \sin 2\theta - P_{MUD} - \alpha \cdot P_f$$

Los esfuerzos radial, axial y tangencial son compresivos y originan esfuerzos de corte en la roca. Sin embargo, esta condición puede cambiar modificando el peso del lodo de perforación y la trayectoria del hoyo. Los valores para los esfuerzos de corte son calculados de la siguiente manera:

$$\sigma'_1 = \frac{\sigma'_{\theta\theta} + \sigma'_{zz}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma'_{\theta\theta} - \sigma'_{zz}}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2} \quad \text{(Ecuación 30)}$$

$$\sigma'_3 = \frac{\sigma'_{\theta\theta} + \sigma'_{zz}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma'_{\theta\theta} - \sigma'_{zz}}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2} \quad \text{(Ecuación 31)}$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma'_{\theta\theta} - \sigma'_{zz}}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2} \quad \text{(Ecuación 32)}$$

En un pozo con cierto grado de acimut o inclinación del hoyo, es importante considerar como parte de la estabilidad del hoyo la distribución desigual de los esfuerzos tangenciales y axiales alrededor de la circunferencia del pozo. Esto a diferencia de un pozo vertical con esfuerzos horizontales iguales, en donde los esfuerzos tangenciales están uniformemente distribuidos alrededor del hoyo y dependen del peso del lodo y la magnitud de los esfuerzos verticales solamente.

Para el caso de pozos verticales, los esfuerzos principales cambian en magnitud a medida que se van aproximando al pozo (Figura 24). Los esfuerzos

Teórico

son generalmente graficados como una función del radio adimensional (r/a), que es la distancia radial dentro de la formación (r) normalizado al radio del pozo (a).

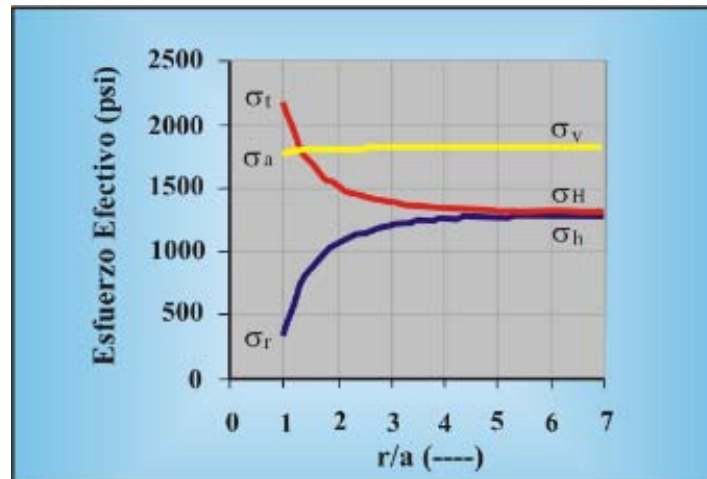


Figura 24. Esfuerzos principales cerca del pozo con radio a .

Inclusive, durante la perforación, la presión del hoyo podría variar significativamente el estado de esfuerzos presentados en el escenario anterior.

Los problemas de inestabilidad de hoyo pueden ser causados por los siguientes mecanismos de falla:

- Fallas de cizalla sin una deformación plástica apreciable, como los “breakouts”.
- Deformación y compactación plástica, las cuales pueden causar colapso poral.
- Falla de tensión, las cuales causan separación de la formación.
- Falla de cohesión, equivalente a erosionar, la cual causa migración de finos y producción de arena.

- “Creep” o fluencia, los cuales causan tensión en el hoyo durante la perforación.

Una de las maneras para controlar estas situaciones o prevenirlas, desde el diseño de la trayectoria del pozo a perforar, es a través de la construcción de una ventana de presión de lodos.

Ventana Operacional de Presión de Lodo

Los problemas de estabilidad de hoyo tienen lugar cuando los esfuerzos en las cercanías del hoyo exceden la resistencia de la roca. Para prevenir este problema, debe existir y mantenerse un balance entre los esfuerzos y la resistencia de la roca durante toda la perforación del hoyo.

La columna de material rocoso y fluido extraída durante la perforación no sólo induce nuevos esfuerzos, sino también, modifica las presiones del hoyo.

La manera de mantener el balance entre esfuerzos, resistencia de la roca ya perforada y presiones del hoyo es a través de un control de la composición y peso del fluido de perforación, es decir, un programa de lodos en el cual se tome en cuenta los estados de esfuerzos presentes en el hoyo, sin que el fluido de perforación reaccione químicamente con las rocas que lo conforman.

Una **ventana de presiones de lodos o ventana operacional de perforación** establece, a partir de evaluaciones y análisis geomecánicos del campo, un determinado rango de densidades para la columna de lodo que permita mantener la estabilidad del hoyo.

La ventana operacional de perforación se construye considerando el producto de la combinación de los gradientes de ovalización y fractura y un factor de seguridad, como datos claves para prevenir la iniciación de las fallas de corte y de fractura, durante las actividades de perforación (Figura 25).

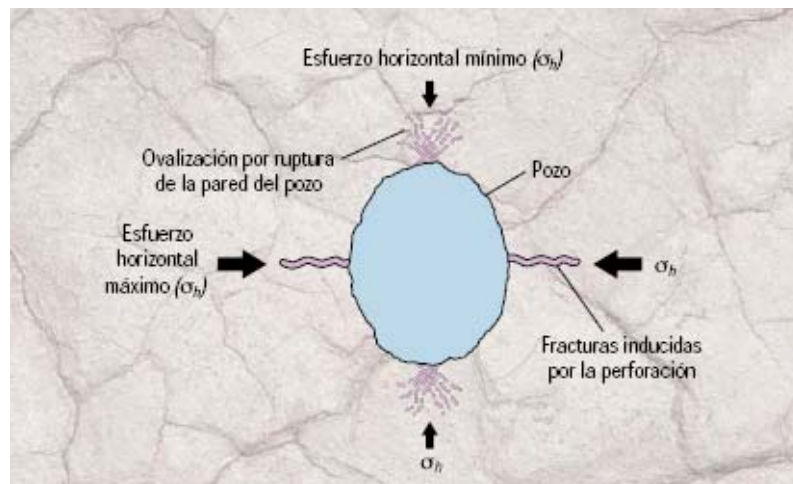


Figura 25. Dirección del esfuerzo y daño del pozo.¹

El peso del fluido de perforación está limitado por dos fronteras:

Frontera superior: Es la presión que causa la falla de tensión que origina la pérdida de fluido de perforación (Figura 26). La frontera es estimada desde el campo de esfuerzos in situ, representado por un gradiente de fractura o presión máxima determinada. La máxima densidad del lodo es la que crea una presión de poro que supera la suma de las resistencias a la tracción de la formación y el esfuerzo tangencial en la pared del pozo.

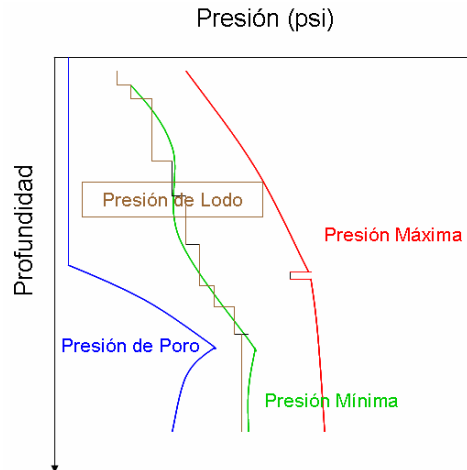


Figura 26. Ventana operacional de presión de lodo.

Frontera inferior: Es la presión requerida para proveer el esfuerzo de confinamiento, el cual es removido durante la perforación (Figura 26). El esfuerzo de confinamiento promueve la creación de una zona plástica y previene la falla de corte. La frontera es estimada desde el campo de esfuerzos en sitio. La presión mínima de lodo es la que crea un gradiente de presión de ovalización por ruptura de la pared del pozo, determinado a partir de la presión de poro, esfuerzos horizontales, tensionales y el módulo de Poisson.

Un esquema de gradientes de ovalización por ruptura de la pared del pozo y fracturamiento muestra la densidad estática equivalente ESD (por sus siglas en inglés "*Equivalent static density*") y la densidad de circulación equivalente ECD (por sus siglas en inglés "*Equivalent circulating density*"), la cual incluye efectos dinámicos (Figura 27). La ESD es mayor que la densidad del lodo debido a la presencia de ripios y la compresibilidad del lodo. El esquema indica el tipo de falla posible dentro de cada régimen de esfuerzo. La estabilidad del pozo se consigue cuando la ESD y la EDC se mantienen dentro de la ventana segura (barra verde). Para las densidades de lodo inferiores, menores que la ESD mínima (izquierda), la formación puede ovalizarse en el pozo generando una falla por esfuerzo de corte. En cambio, para las densidades de lodo superiores, mayores a la

ECD, podrían alcanzar el esfuerzo horizontal mínimo, generando daño por tracción en la formación.¹

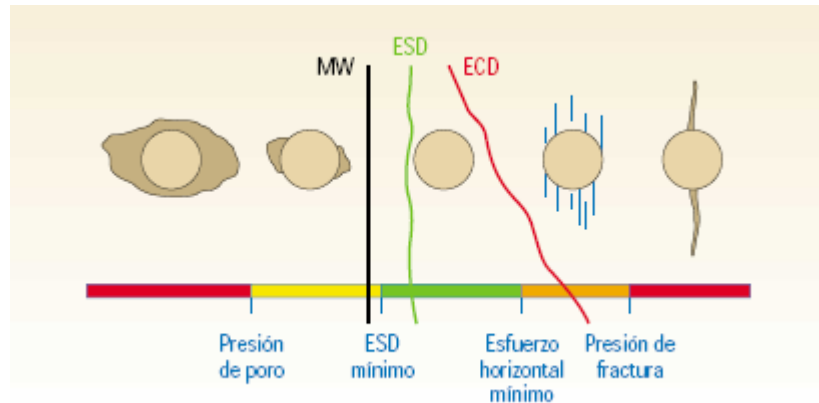


Figura 27. Esquema de gradientes de ovalización por ruptura de la pared del pozo y fracturamiento.¹

Si la densidad de lodo está por debajo de la presión de poro o por encima de la presión de fractura, el pozo puede colapsarse o la formación fracturarse respectivamente, los cuales constituyen condiciones severas de pérdida de control de pozo.

Cuando se incrementa la densidad del lodo se observa una disminución del esfuerzo tangencial y un incremento del esfuerzo radial. En el caso que se incremente excesivamente la densidad del lodo, ocurre que la diferencia entre los esfuerzos tangencial y radial sea mayor que la original. Así, el esfuerzo tangencial cambia de sentido y una vez superado el valor de la resistencia a la tensión de la roca, comienzan a generarse fracturas en la formación que a la larga crea la condición de inestabilidad del hoyo.

Las fallas por tensión que ocurren en la pared del hoyo son clasificadas en términos de los esfuerzos principales definidos dentro de un sistema de coordenadas cilíndricas (Figura 28):

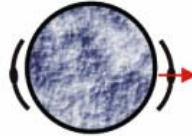
Modos de Fallas por Tensión		
Tipos	Condición	Representación Gráfica
Hidráulica	$\sigma_{\theta} < \sigma_r, \sigma_{\theta} - p_f < 0$	
Exfoliación	$\sigma_r < \sigma_{\theta}, \sigma_r - p_f < 0$	

Figura 28. Modos de fallas por tensión del hoyo.

Por el contrario, una disminución del peso del lodo conduce a una disminución del esfuerzo radial, a su vez, un aumento del esfuerzo tangencial. De igual forma, una disminución excesiva del peso del lodo puede originar esfuerzos compresivos tan altos que pueden inducir fallas por corte en las paredes del hoyo.

Teórico

Las fallas de corte que ocurren en la pared del hoyo, producto de una concentración de esfuerzos inducidos debido a la anisotropía en el plano perpendicular al hoyo, son clasificadas en cuatro modos en términos de los esfuerzos principales definidos dentro de un sistema de coordenadas cilíndricas (Figura 29):

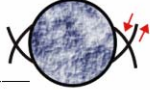
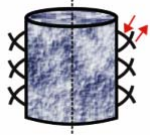
Modos de Fallas de Corte		
Tipos	Condición	Representación Gráfica
“Breakout”	$\sigma_{\theta} > \sigma_z > \sigma_r$	
Tórico	$\sigma_z > \sigma_{\theta} > \sigma_r$	
Helicoidal	$\sigma_z > \sigma_r > \sigma_{\theta}$	
Elongado	$\sigma_r > \sigma_{\theta} > \sigma_z$	

Figura 29. Modos de fallas de corte del hoyo.

Los “breakouts” y el tipo tórico son ovalizaciones causadas por fallas de corte y ocurren cuando la presión de lodo no es lo suficientemente alta. Mientras que los tipos helicoidal y elongado son ovalizaciones causadas por fallas de corte, debido a una presión de lodo excesivamente alta.

Teórico

Cerca del pozo, el criterio de presión mínima de lodo se puede estimar dependiendo de cual sea el esfuerzo principal menor:

- En caso que el esfuerzo radial sea aquel esfuerzo principal menor, se tiene:

(Ecuación 33)

$$\frac{(\sigma'_{\theta\theta} + P_{MUD}) + \sigma'_{zz} - P_{MUD}}{2} + \sqrt{\left(\frac{(\sigma'_{\theta\theta} + P_{MUD}) - \sigma'_{zz} - P_{MUD}}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2} = C_0 + (P_{MUD} - \alpha \cdot P_f) \cdot \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)$$

- En el caso que el esfuerzo tangencial menor sea el mínimo, se tiene:

(Ecuación 34)

$$\frac{(\sigma'_{\theta\theta} + P_{MUD}) + \sigma'_{zz} - P_{MUD}}{2} + \sqrt{\left(\frac{(\sigma'_{\theta\theta} + P_{MUD}) - \sigma'_{zz} - P_{MUD}}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2} = C_0 + \sigma'_3 \cdot \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)$$

Estas ecuaciones tienen que ser resueltas según la presión de confinamiento en cada punto de la formación para obtener las presiones críticas las cuales dan lugar a la generación de los “breakouts”. Mientras que la solución para la presión de lodo máxima permitida para prevenir una fractura es más simple, puesto que la resistencia a la tensión de la roca puede ser tratada como una constante y no depender de la presión de confinamiento:

(Ecuación 35)

$$\frac{(\sigma'_{\theta\theta} + P_{MUD}) + \sigma'_{zz} - P_{MUD}}{2} - \sqrt{\left(\frac{(\sigma'_{\theta\theta} + P_{MUD}) - \sigma'_{\theta\theta} - P_{MUD}}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2} \geq T_0$$

donde T_0 corresponde a un número negativo:

(Ecuación 36)

$$P_{MUD \max} = -T_0 + (\sigma'_{\theta z} + P_{MUD}) - \frac{\tau_{\theta z}^2}{-T_0 + \sigma'_{zz}}$$

Teórico

Cuando el eje del hoyo es paralelo a uno de los esfuerzos principales, el esfuerzo de corte es cero (0) y la presión para generar la fractura hidráulica queda de la siguiente manera:

(Ecuación 37)

$$P_{MUD} = (\sigma'_{\theta\theta} + P_{MUD}) = (\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) - 2(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \cdot \cos 2\theta - \alpha \cdot P_f$$

Como la presión de lodo es la presión hidrostática aplicada uniformemente sobre la pared del hoyo, el valor máximo derivado de la ecuación anterior es la presión mínima requerida para prevenir los “*breakouts*”. La localización donde se requiere la presión de lodo máxima a lo largo de la circunferencia del hoyo es la misma, que aquella donde se encuentra el esfuerzo máximo tangencial. De la igual manera, se aplica a la presión de lodo máxima para prevenir la fractura hidráulica en el hoyo, la cual coincide con la ubicación con el punto en el cual el esfuerzo mínimo tangencial alcanza su valor mínimo.

Arenamiento

El fenómeno de arenamiento se origina cuando los esfuerzos de arrastre y gradiente de presión son mayores que la resistencia mecánica de la formación, trayendo como consecuencia el desprendimiento de material de la misma, bien sea, en forma de granos individuales de arena que se producen continuamente o en pedazos enteros de formación.

El concepto de arenamiento difiere con el de migración de finos en cuanto al tamaño de las partículas o granos del material detrítico que se producen. Son consideradas arenas aquellas partículas con un diámetro ubicado en un rango de 2 a 0.0625 mm. Granos de tamaño inferior son considerados finos o arcillas. Debido a que el ojo humano no puede ver partículas de tamaños menores que 0.0625 mm,

Teórico

cuando se habla de problemas arenamiento involucra por igual el término de migración de finos.

El desprendimiento de partículas de arcillas es causada principalmente por una interacción química entre los fluidos y los sólidos de la formación. Estas partículas de arcillas pueden migrar y causar taponamiento de los poros aumentando considerablemente el daño a la formación.

Causas de la Producción de Arena

- Falta de compactación y cementación entre los granos.
- Factores geológicos y geográficos.
- Flujo monofásico o multifásico.
- Altas tasas de flujo de fluidos de perforación o producción.
- Efectos químicos.
- Efectos térmicos.

Mecanismo del Arenamiento

En rocas consolidadas, la resistencia al arenamiento viene dada por el grado de estabilidad de las cavidades producto de las actividades de cañoneo (Figura 30).

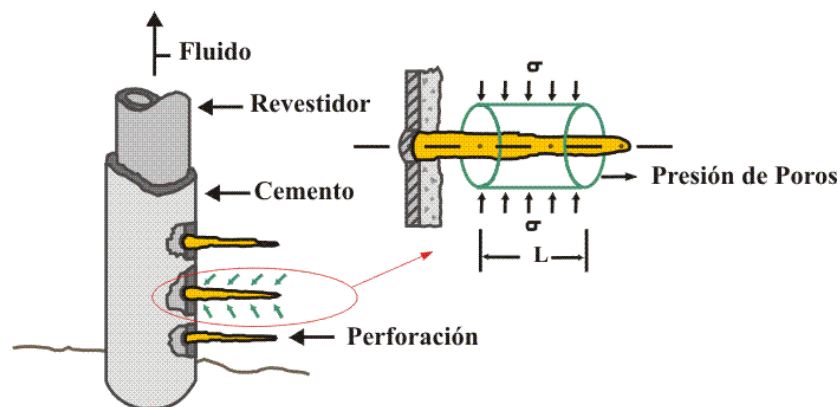


Figura 30. Cavidades cañoneadas en formaciones de arenas consolidadas.

En rocas no consolidadas, la resistencia al arenamiento viene dada por el grado de estabilidad de las estructuras del puente de arena (“sand bridge”) y/o de arqueado de arena (“sand arch”) que se forman en las entradas de orificios por donde fluye el hidrocarburo; como pueden ser las aperturas de una rejilla, garganta de poros de las gravas de empaques o los orificios cañoneados (Figura 31).

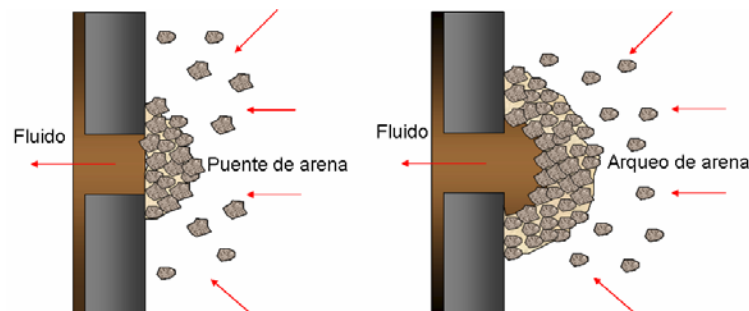


Figura 31. Puente y arqueado de arenas en formaciones no consolidadas.

Teórico

Si las cavidades y estructuras mencionadas son estables durante la vida del pozo nunca existirá desprendimiento de partículas que son las causantes del arenamiento.

La producción de arenas en las formaciones, puede acarrear problemas como:

- Acumulación de arenas y finos en los equipos de superficies.
- Erosión de los equipos de fondo y superficie.
- Reducción de la permeabilidad de la formación en la vecindad del pozo.
- Reducción u obstrucción de los orificios cañoneados para la producción de hidrocarburos.
- Socavación de los orificios cañoneados, las cuales pueden ir creciendo a medida que continúa la producción de arena. Si este fenómeno persiste creará grandes cavidades en la formación detrás del revestidor dejando a este último sin soporte, lo que puede provocar que el mismo colapse.

Concepto del Diferencial de Presión Crítico

En un pozo productor a condiciones de flujo constantes, el aumento del diferencial de presión Δp se produce, debido a la disminución de la presión de fondo fluyente, mientras que la presión del yacimiento p_r se mantiene constante. El diferencial de presión causa un aumento en los esfuerzos de corte. Si estos esfuerzos son mayores que la resistencia al corte de la formación, puede ocurrir falla del material geológico.

Lo anteriormente expuesto lleva a la conclusión, que existe un diferencial de presión crítico Δp_c , que al ser superado origina el arenamiento al ocurrir fallas mecánicas de la formación, debido al aumento de los esfuerzos de corte. Por lo tanto, mantener el pozo en un rango de diferencias de presiones por debajo del diferencial de presión crítico, podría evitar el desprendimiento del material geológico y el problema del arenamiento y migración de finos.

Propiedades Estáticas y Propiedades Dinámicas de la Rocas

Las **propiedades estáticas** de las rocas son aquellas determinadas a partir de núcleos mediante ensayos de laboratorio.

Las **propiedades dinámicas** son aquellas determinadas a partir de perfiles petrofísicos en pozos petroleros, para registrar las propiedades de la roca en su condición original de yacimiento a cualquier profundidad.

Es recomendable comparar o calibrar las propiedades dinámicas de campo con las estáticas obtenidas del laboratorio, para obtener valores confiables de las propiedades de la roca en estudio y elaborar correlaciones predictivas más acertadas del comportamiento mecánico de la formación.

La razón de la calibración viene del hecho que la fractura de la roca se propaga en un régimen cuasiestático y no a la velocidad del sonido. Por lo tanto, los valores de deformación obtenidos de manera estática a la dinámica pueden tener una diferencia apreciable.

Información Geomecánica a Partir de Ensayos de Laboratorio

Con los ensayos geomecánicos de laboratorio aplicados a núcleos obtenidos de las zonas de interés (prefiriéndose aquellos de menor perturbación) se pueden medir propiedades de las rocas de la formación tales como: módulo de Young, relación de Poisson, módulo volumétrico, resistencia a la tracción, resistencia a la compresión, permeabilidad y comportamiento esfuerzo-deformación; por conveniencia, según las direcciones de los esfuerzos principales (si los núcleos están orientados debidamente). Todos estos parámetros pueden ser determinados bajo diferentes condiciones de esfuerzo y presiones de fluidos.

A continuación se explicará brevemente en qué consiste sólo los ensayos de interés para el presente trabajo:

Ensayos de Resistencia Mecánica

- **Compresión no confinada:** Consiste en comprimir sucesivamente un cilindro de roca sin confinamiento hasta alcanzar su resistencia máxima. Tradicionalmente se mide la resistencia a la compresión sin confinar, módulo de Young y la relación de Poisson.
- **Ensayo compresión triaxial:** Consiste en comprimir un cilindro de roca, bajo una presión de confinamiento constante, hasta llegar a su resistencia máxima. Se miden para una presión de confinamiento dada, el comportamiento esfuerzo-deformación, la resistencia mecánica, el módulo de Young, la relación de Poisson, el ángulo de fricción, la cohesión y los parámetros de cedencia en arenas no consolidadas. Utilizando varios ensayos triaxiales a diferentes presiones de confinamiento se genera la envolvente de falla. Este tipo de ensayo se realiza en una celda triaxial que

permite someter la muestra a diferentes condiciones de presión y temperatura para simular las condiciones de yacimiento (Figura 32).

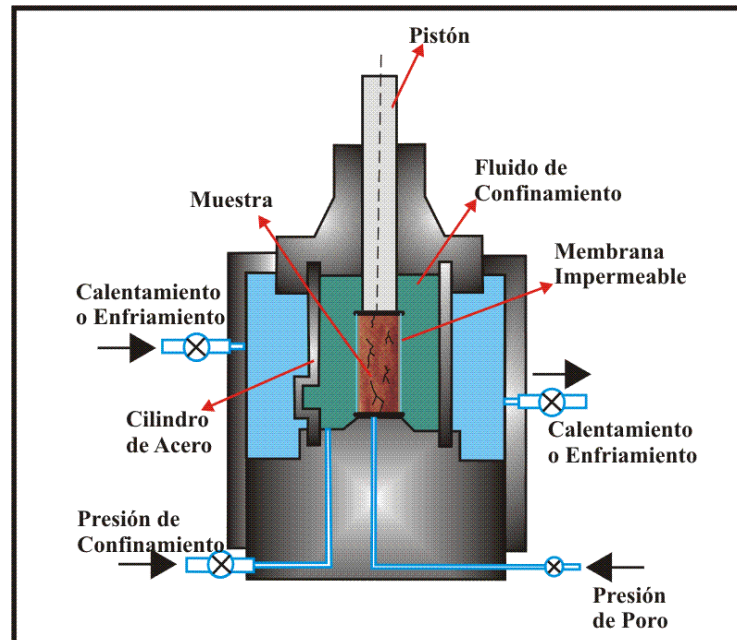


Figura 32. Esquema de una celda triaxial para ensayos geomecánicos.

Información Geomecánica a Partir de Datos de Campo

Registros Petrofísicos

Las lecturas de los diversos registros petrofísicos permiten detectar anomalías de porosidad y grados de compactación a diversas profundidades del hoyo, y de la misma manera, conocer la distribución y la densidad, bien sea, de tipo litológico o correspondiente a los fluidos de la formación, que puedan contribuir a los estudios y análisis geomecánicos del campo de interés.

Además, a través de los registros petrofísicos se pueden obtener la magnitud y la orientación del esfuerzo y realizar calibraciones junto con los

Teórico

ensayos de resistencia mecánica de la roca, facilitando así la selección de la profundidad, la dirección preferencial de un pozo y demás parámetros de perforación.

Registros de Rayos Gamma

El registro de rayos gamma GR es una medición de radioactividad natural emitida espontáneamente por elementos contenidos en las formaciones como el potasio, torio, uranio, entre otros. En formaciones sedimentarias el registro normalmente refleja el contenido de la arcilla porque los elementos radiactivos tienden a concentrarse en arcillas y lutitas. Las formaciones limpias generalmente tienen un nivel muy bajo de radiactividad, a menos que contaminantes radiactivos estén presentes o que las aguas de formación contengan sales radiactivas disueltas.

El registro de GR se puede utilizar cuantitativamente como indicador de la arcillosidad.

Bajo la influencia del efecto Compton, la deflexión del registro de GR es entonces función de la radiactividad, densidad de las formaciones y las condiciones de agujero (diámetro, peso del lodo, tamaño y posición de la herramienta).

Generalmente, las arenas limpias y los carbonatos tienen niveles de radioactividad que varían de 5 hasta 20 unidades gAPI, mientras que las lutitas la fluctuación es de 120 a 140 unidades gAPI.

Registros de Resistividad

La resistividad de la lutita y la arena depende del electrolito que contenido en ellas, al estar bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado entre lugares de intercambio de iones en la superficie de sus partículas.

El efecto real de la arcillosidad depende de la cantidad, tipo y distribución relativa de las lutitas, de la naturaleza y cantidades relativas de aguas de formación. La presencia de lutitas como componente de areniscas arcillosas aporta una conductividad, que debe ser incluida en la evaluación de la conductividad del agua encontrada en los poros de la formación.

Si las resistividades utilizadas son las incorrectas en los cálculos de una zona de arenas arcillosas para un yacimiento convencional, el resultado será una sobrestimación de la saturación de agua. La resistividad de la formación es un parámetro clave para determinar la saturación de hidrocarburos.

Registros de Densidad

Los registros de densidad se usan principalmente como registros de porosidad. Otros usos incluyen identificación de minerales, detección de gas, determinación de la densidad de la formación, evaluación de arenas con arcilla y litologías complejas, determinación de producción de lutitas con contenido de petróleo, cálculo de presión de sobrecarga y propiedades mecánicas de las rocas.

Una fuente radioactiva en la sonda emite constantemente rayos gamma de alta energía a la formación. Bajo el efecto Compton, el número de colisiones de los rayos gamma contra los átomos de la formación está directamente relacionado con el número de electrones de la misma. En consecuencia, la respuesta de la herramienta está determinada esencialmente por la densidad de los electrones de la formación.

La densidad de un material se define como el peso de un volumen unitario de ese material. La densidad total ρ_b , para el caso de una roca porosa, está en función de la densidad de la matriz ρ_{ma} y la densidad de los fluidos ρ_f contenidos en dicha matriz. A su vez, la densidad de la matriz de la roca dependerá de su composición mineralógica, mientras que la densidad de los fluidos dependerá de su composición química, estado físico, temperatura y presión encontradas.

Registros Neutrónicos

Los registros neutrónicos se utilizan principalmente para delinear las formaciones porosas y para determinar su porosidad. Responden principalmente a la cantidad de hidrógeno en la formación. Por lo tanto, las formaciones limpias cuyos poros estén saturados con agua o petróleo, el registro de neutrones refleja la cantidad de porosidad saturada de fluido.

Una fuente radioactiva en la sonda emite constantemente neutrones de alta energía. Bajo el efecto Compton, el número de colisiones de los rayos gamma contra los átomos de la formación está directamente relacionado con la masa o índice de hidrógeno de la misma.

No todas las arenas son completamente limpias ni todas las lutitas están libres de arenas, en consecuencia, se tendrá una amplia variación de la curva neutrón dentro de este rango de cambio litológico. Para una misma porosidad y concentración de hidrógeno en la formación, la deflexión de la curva de neutrón será mayor mientras mayor sea el contenido de material arcilloso.

Registro Sónico

La herramienta sónica consiste de un transmisor que emite impulsos sónicos y un receptor que los capta y los registra. Dicho registro está en función del tiempo t , que requiere una onda sonora para atravesar un pie de formación. Este es conocido como **tiempo de tránsito** Δt , siendo t el inverso de la velocidad de las ondas sonoras P (compresionales) y S (de cizalla) en la formación. El tiempo de tránsito para una formación dependerá de su litología y su porosidad.

En los registros sónicos de pozos, la pared y rugosidad del agujero, las capas de la formación y las fracturas pueden representar discontinuidades acústicas significativas.

El análisis de los registros sónicos y de las formas de las ondas proporciona el medio para obtener mediciones continuas de las velocidades compresionales (ondas P) y de cizallamiento (ondas S) (Tabla 4).

Tabla 4. Tiempo de tránsito para ondas compresionales y de cizallamiento.⁷

Tiempo de Tránsito t_{ma}		
	Ondas Compresionales	Ondas de Cizallamiento
Dolomita	44 $\mu s / pie$	76 $\mu s / pie$
Arenisca	53 $\mu s / pie$	86 $\mu s / pie$
Agua	190 $\mu s / pie$	350 $\mu s / pie$

Los módulos elásticos dinámicos se derivan de la medición de las velocidades de ondas elásticas primarias y secundarias del material (V_p y V_s). Estos datos, junto con una medición de densidad total, permiten además de la identificación de los minerales de las matrices y los fluidos de los poros, el cálculo en sitio de las propiedades mecánicas de la roca alrededor del agujero.

Registro “caliper”

El “caliper” determina la orientación del campo de esfuerzos. Además, registra los cambios de geometría del hoyo a lo largo de toda la trayectoria del pozo. Para ello, esta herramienta cuenta con una serie de brazos independientemente articulados, en cuyos extremos se encuentran alojados una serie de sensores. Estos dispositivos permiten, a pesar de las irregularidades o las rugosidades encontradas generalmente, registrar las variaciones en el diámetro del hoyo, las cuales son una indicación cualitativa de la condición del mismo.

Pruebas de Inyectividad

Las pruebas de inyectividad consisten en bombear de manera controlada un fluido en determinado intervalo del pozo, hasta causar una pequeña fractura hidráulica en las paredes del hoyo, mientras se van midiendo los valores de tasa de flujo, presión y temperatura. Las mediciones tomadas a diferentes instantes permiten obtener diversos parámetros, entre los cuales se destaca el esfuerzo principal mínimo en sitio, la presión de yacimiento y el coeficiente de pérdida de flujo.

Durante las pruebas de inyectividad se debe llevar un registro continuo de factores como presión de fondo, presión de superficie, volumen de fluido y tiempo de bombeo.

Prueba “Microfrac”

La prueba “microfrac” es un método utilizado principalmente para la obtención de la magnitud del esfuerzo principal mínimo ($\sigma_{\min}$) (Figura 33). Éstas se realizan a hoyo desnudo mediante la inyección de un pequeño volumen de fluido (10-20 galones) a unas tasas de bombeo entre 3 a 25 gpm. Un sistema de empaaduras aísla el intervalo en el cual se origina la microfractura.

El esfuerzo principal mínimo se define como la presión requerida para mantener abierta una fractura, y se obtiene del análisis de la caída de presión (en cada ciclo) después del cierre de la fractura creada.

En términos generales, si una vez iniciada la fractura se detiene el bombeo de fluido se está efectuando un ensayo tipo “leak-off”, usado para computar el gradiente de la formación. Si el bombeo se mantiene por cierto período para permitir la propagación de la misma, se está efectuando entonces un ensayo tipo “leak-off” extendido.

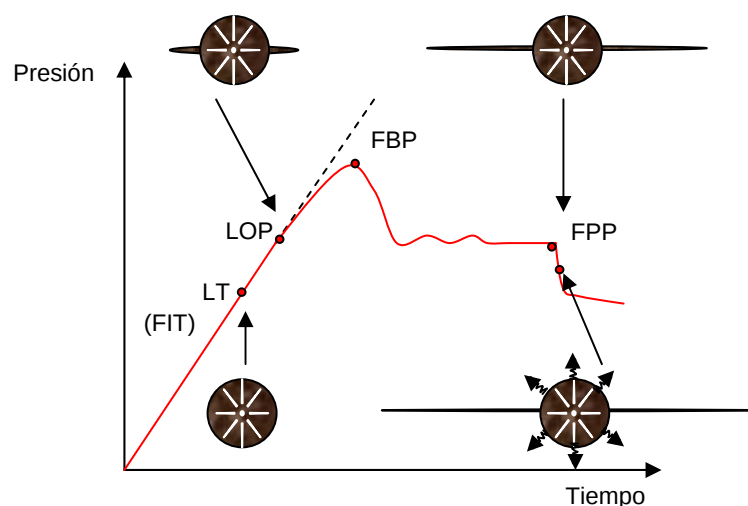


Figura 33. Magnitud del esfuerzo mínimo.

El ensayo “microfrac” involucra para la determinación de la magnitud del esfuerzo mínimo las siguientes presiones (Figura 34):

- **LT:** Prueba límite (por sus siglas en inglés “*Limit test*”).
- **LOP:** Prueba “*Leak-off*”.
- **FIT:** Prueba de integridad de la formación (por sus siglas en inglés “*Formation integrity test*”).
- **FBP:** Presión de formación de “*break-down*” (por sus siglas en inglés “*Formation break-down pressure*”).
- **FPP:** Presión de propagación de la fractura (por sus siglas en inglés “*Fracture propagation pressure*”).
- **ISIP:** Presión de cierre instantáneo (por sus siglas en inglés “*Instantaneous shut in pressure*”).
- **FCP:** Presión de cierre de fractura (por sus siglas en inglés “*Fracture closure pressure*”).

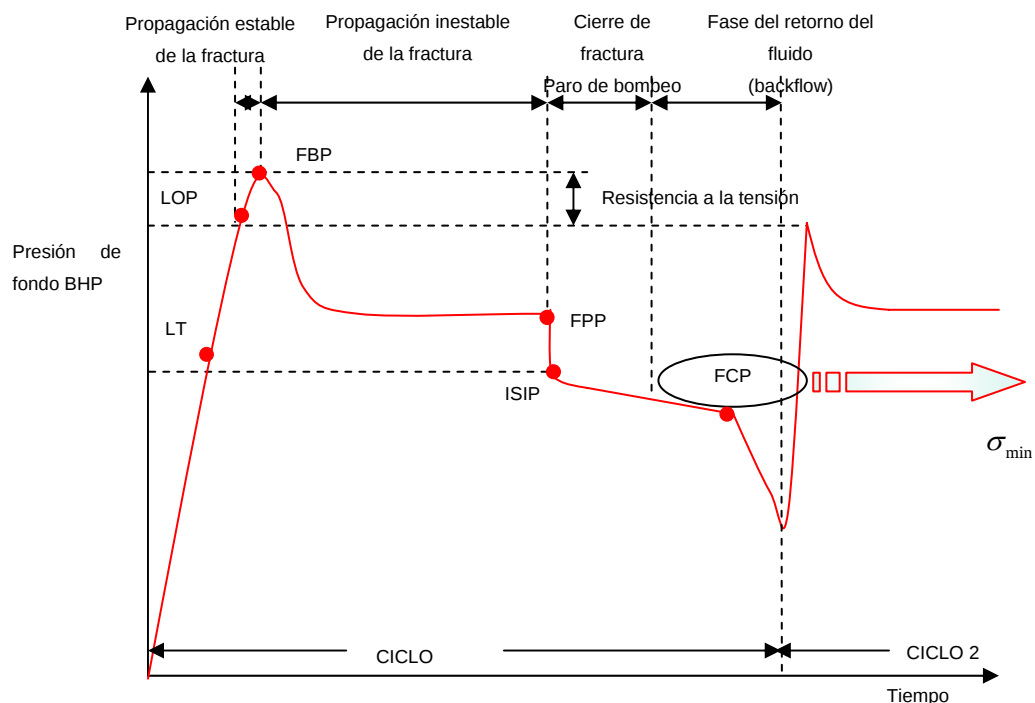


Figura 34. Comportamiento de presión del fondo del hoyo en un “Microfrac”.

El propósito general de la prueba es la determinación de un valor preciso de ISIP. Es aceptado generalmente que la magnitud del esfuerzo mínimo sea igual al de ISIP.

La mayoría de las pruebas de “*microfrac*” muestra que las presiones de las fracturas reabiertas tienden a declinar sucesivamente a medida que se van repitiendo los ciclos de bombeo.

Pruebas “*Minifrac*”

A diferencia del ensayo “*microfrac*”, el cual se utiliza para determinar la magnitud del esfuerzo horizontal mínimo, el ensayo “*minifrac*” tiene como propósito obtener los parámetros sobre los fluidos de fracturamiento para optimizar el diseño de una fractura hidráulica.

El ensayo “*minifrac*” se realiza antes de un tratamiento de fractura hidráulica con un fluido de fractura a una tasa de inyección de 42 a 2100 gpm, a hoyo desnudo o entubado. Los parámetros que pueden obtenerse de esta prueba son:

- Presión de cierre de la fractura y su tiempo de cierre asociado.
- Eficiencia del fluido.
- Coeficiente de pérdida de fluido basado en el modelo utilizado en el simulador.
- Magnitud y tasa de cambio de la presión de inyección en función de la tasa de bombeo y el fluido inyectado.

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA MAYOR DE SOCORORO

Ubicación Geográfica

El Área Mayor de Socororo está ubicada geográficamente en las cercanías de la población de Pariaguán y El Pao, Estado Anzoátegui; geológicamente se encuentra en la parte suroeste del flanco sur de la Cuenca Oriental de Venezuela (Figura 35).

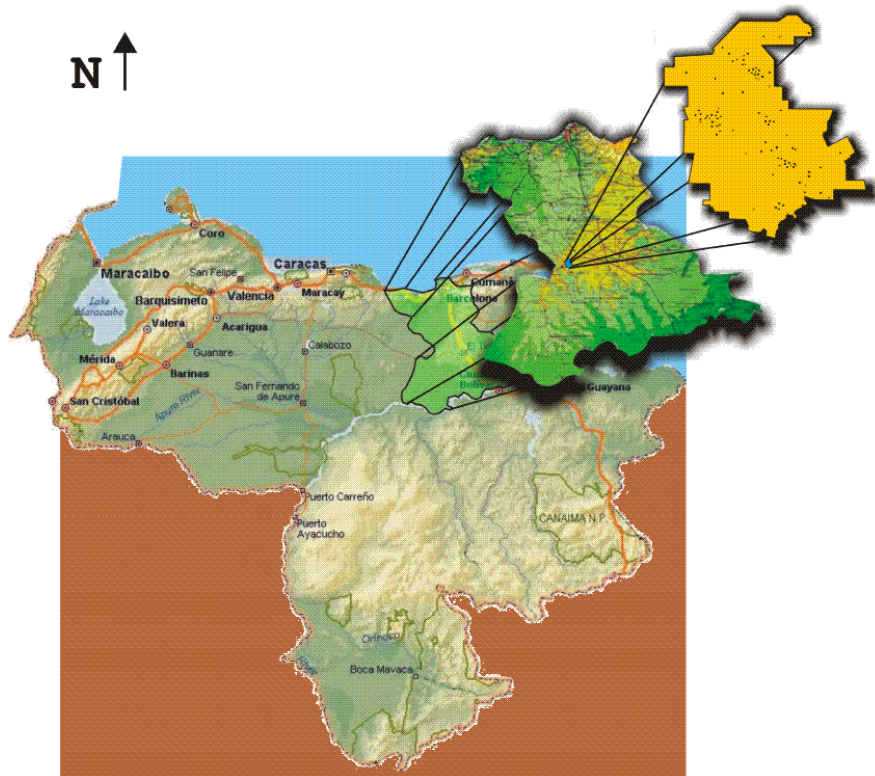


Figura 35. Ubicación geográfica del Área Mayor de Socororo.

El Área Mayor de Socororo es un bloque irregular de aproximadamente 257 kilómetros cuadrados de superficie, constituido por los campos Socororo Este y Oeste, Cachicamo y Caricari (Figura 36). El Área Mayor de Socororo se encuentra limitado al oeste por el Campo Budare, al sur por los campos de Petrozuata, al este por el Campo Yopales y al norte por el Campo Caracoles.

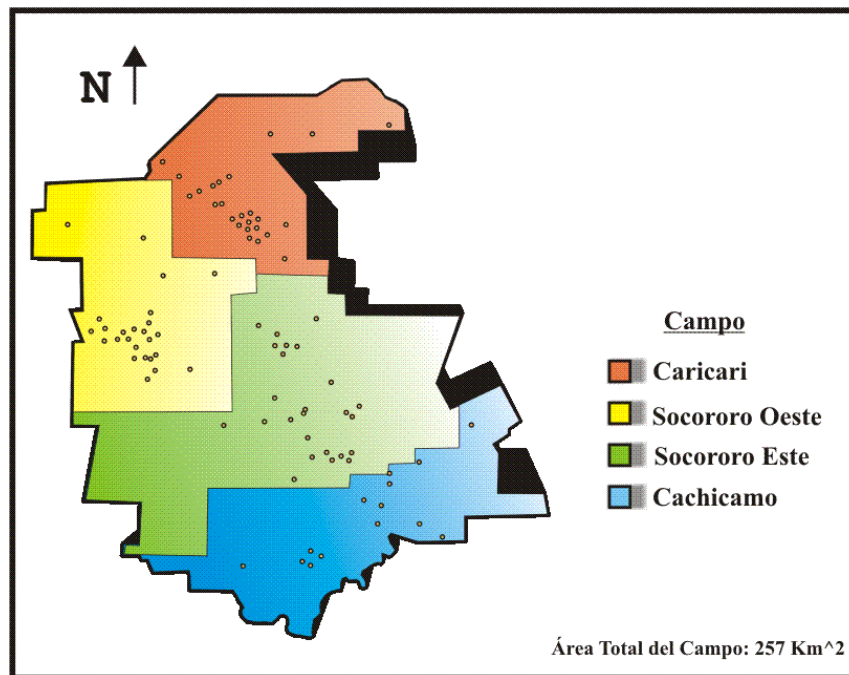


Figura 36. Campo Socororo.

Características Geológicas

Estructura

El Área Mayor de Socororo es una estructura monoclinal fallado de rumbo noroeste (NO) y de buzamiento de 2–3 grados hacia el norte.

Posee dos sistemas de fallas predominantes (Figura 37), casi perpendiculares entre si.

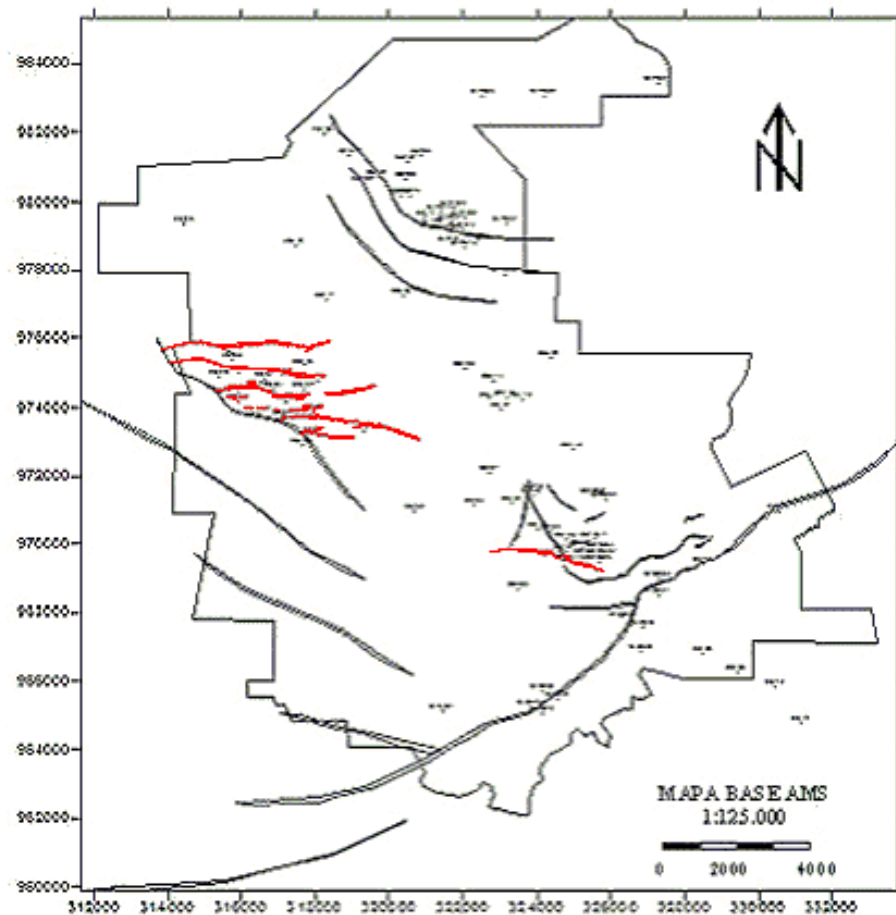


Figura 37. Mapa Estructural del Área Mayor de Socororo.

Uno de los sistemas de fallas posee rumbo noroeste-sureste (NO-SE), paralelo al rumbo de sus estratos, por lo general, las mismas buzanan hacia el sur. El salto de estas fallas varía de 25 a 100 pies, predominando los saltos del orden de 40 pies.

El otro sistema de falla posee un rumbo noreste-oeste (NE-O) y éstas buzanan indistintamente hacia el este y oeste. En este sistema de fallas se encuentra la falla principal del Campo Cachicamo de rumbo noroeste-sureste (NO-SE),

considerándose como el elemento estructural más importante de los cuatro campos que conforman el Área Mayor de Socororo, por la magnitud de su salto de 70 a 180 pies (otras fallas pertenecientes a este sistema varían de 20 a 70 pies).

Desde el punto de vista de las acumulaciones de hidrocarburos descubiertas en los campos de Socororo y Caricari, el sistema de fallas paralelo al rumbo de las capas, juega un papel fundamental por cuanto constituye la barrera, buzamiento arriba, para los hidrocarburos en su proceso migratorio.

Estratigrafía

La columna estratigráfica del Área Mayor de Socororo está constituida por (Figura 38):

- Formación Mesa.
- Formación Las Piedras.
- Formación Freites.
- Formación Oficina.
- Formación Merecure.
- Formación Grupo Temblador.
- Formación Carrizal.
- Formación Hato Viejo.

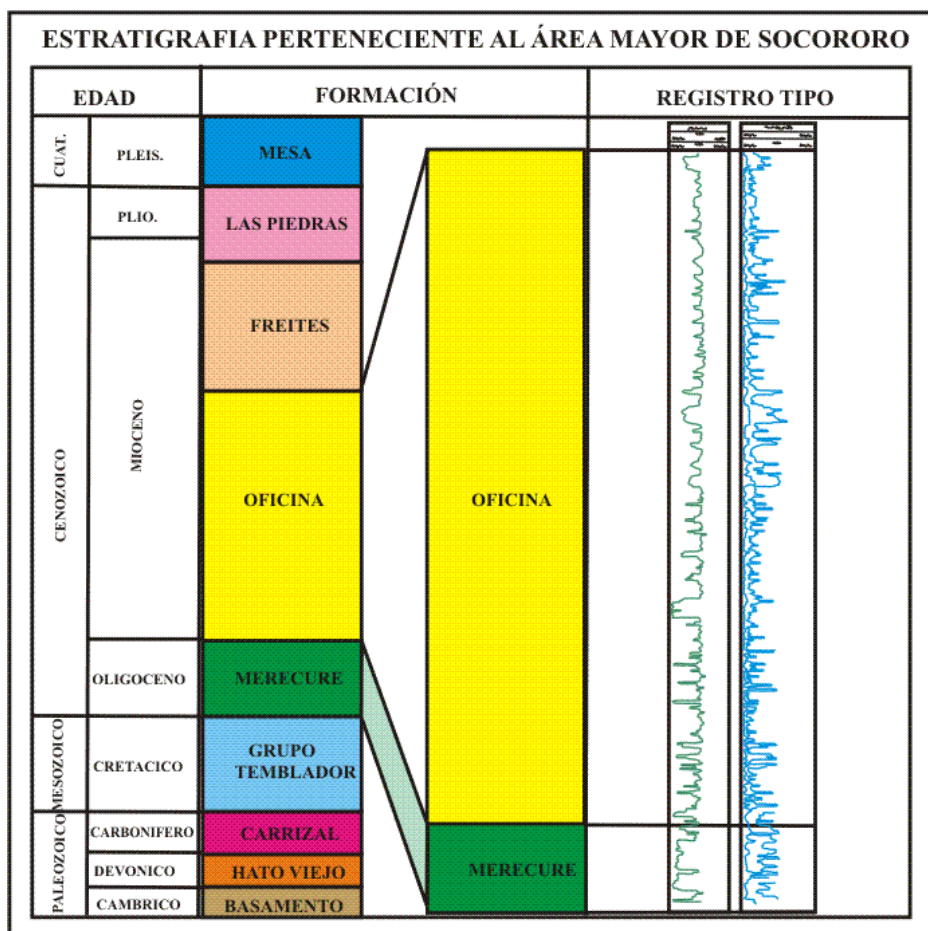


Figura 38. Columna estratigráfica del Área Mayor de Socororo.

Todas las secuencias sedimentarias descansan sobre el basamento ígneo-metamórfico del complejo basal de Guayana del precámbrico. En ellas se encuentran rocas ígneas y metamórficas intensamente plegadas y erosionadas.

No hay pruebas que indiquen que las formaciones del Grupo Temblador y Carrizal sean productoras, comercialmente, de hidrocarburo; por lo que, se describirán a continuación las características de aquellas formaciones que son de interés para el presente trabajo de investigación (Mesa, Las Piedras, Freites, Oficina, Merecure).

Características de las Formaciones

- **Formación Mesa (Cuaternario, Pleistoceno):** La formación está compuesta de arenas de granos gruesos y gravas, con cemento ferruginoso, cementadas y muy duras; arenas con estratificación cruzada, también contiene lentes discontinuos de arcilla fina y limolita (González de Juana, 1946).
- **Formación Las Piedras (Terciario, Mioceno Tardío-Plioceno):** La formación posee una litología conformada principalmente por sedimentos finos mal consolidados, que incluyen areniscas y limolitas, más o menos carbonosas; lutitas arcillosas, arcillas y lignitos (González de Juana, 1946). También se encuentran algunas calizas arenosas duras (Parnaud, 1985).
- **Formación Freites (Terciario, Mioceno Medio a Mioceno Tardío Basal):** Litológicamente se describen lutitas físis, con areniscas en el tope y la base, que permiten la subdivisión de la unidad en tres intervalos: Un intervalo superior con capas delgadas de areniscas arcillosas de grano fino, de color blanco verdoso, algo glauconíticas y muy persistentes lateralmente; un intervalo predominantemente lutítico y un intervalo inferior de lutitas intercaladas con areniscas, de granos medio a gruesos, glauconíticas, calcáreas o sideríticas y muy fosilíferas (Hedberg, 1947).
- **Formación Oficina (Terciario: Mioceno Inferior a Medio):** La formación está compuesta de areniscas y lutitas alternadas con lignitos de amplia extensión. Los grupos de arenas persisten en forma lenticular desapareciendo con el desarrollo progresivo de las lutitas hacia el eje de la cuenca. En general, las areniscas se hacen más abundantes, de grano más grueso y de mayor espesor hacia la base de la formación (González de Juana, 1980).

- **Formación Merecure (Terciario: Oligoceno-Mioceno Inferior):** La formación se compone en más del 50% de areniscas, masivas, mal estratificadas y muy lenticulares, duras, de grano fino a grueso, incluso conglomerática, con estratificación cruzada y una variabilidad de porosidad y permeabilidad; el crecimiento secundario de cuarzo es común. Se separan por láminas e intervalos delgados de lutitas, carbonáceas, irregularmente laminadas, algunas arcílitas ferruginosas y ocasionales lignitos (Funkhouser *et al.*).

Sistema Petrolero

El sistema petrolero que presenta el Área Mayor de Socororo está conformado por:

- **Roca Madre:** En mayor proporción, perteneciente a la edad del Cretácico, las formaciones Querecual, y en menor proporción de edad del Oligo-Mioceno, la Formación Carapita.
- **Roca Recipiente:** Perteneciente a la edad del Oligoceno y Mioceno, las formaciones de Merecure y Oficina respectivamente.
- **Roca Sello:** Perteneciente a la edad del Mioceno Medio y Oligo-Mioceno, las formaciones Freites y Carapita constituyen un sello regional de los yacimientos petrolíferos de la Formación Oficina, específicamente en el Área Mayor de Oficina.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

Descripción de las Herramientas de Trabajo

EXPress™ es un programa de uso múltiple utilizado por la Baker Atlas el cual facilita el procesamiento de los datos de campo de los registros petrofísicos, en conjunto con los parámetros asignados por el analista según sean las condiciones en sitio, para los análisis de perfiles. Además, el mismo permite que se le incorpore eventualmente otros programas desarrollados por la compañía de servicios, bajo una estación o ambiente de trabajo de tareas múltiples llamado UNIX®. Asimismo, ofrece despliegues gráficos de los registros para una mejor visualización del comportamiento de los mismos.

Dentro de **EXPress™** se pueden encontrar múltiples programas, pero para el interés del proyecto, se mencionan:

- **SAND™**: Es un programa de análisis de registros eléctricos que facilita la evaluación de arenas y lutitas. Este programa utiliza los registros de rayos gamma, resistividad, densidad y neutrón para determinar la litología, saturación y porosidad, respectivamente.
- **MECHPROP™**: Es un programa de análisis de registros eléctricos que facilita la evaluación de los esfuerzos y la resistencia de la formación. Este programa utiliza los registros acústicos para determinar las propiedades dinámicas mecánicas de la roca como: Módulo de Young, relación de Poisson, resistencia a la compresión (confinada y no confinada), ángulo de fricción, fuerza de cohesión y constante de Biot de la formación.

Metodológico

- ***PRELMPTM***: Programa complementario que organiza y prepara las curvas de entrada para el programa ***LMPTM***.
- ***LMPTM*** (por sus siglas en inglés “*Logging of Mechanical Properties*”): Programa producto de Baker Atlas creado para generar perfiles continuos de las propiedades estáticas mecánicas y de resistencia de la roca, para secuencias de arenas y lutitas, en función de la profundidad. El programa ***LMPTM*** realiza simulaciones de las pruebas o ensayos de laboratorio para la determinación de las propiedades mecánicas de las rocas, partiendo de una muestra de roca que él mismo crea usando la data disponible de los registros densidad, acústicos (de compresión y cizallamiento) y de litología. La muestra creada, es entonces, sometida a una simulación de cargas externas aplicadas, a constantes y diferentes presiones de confinamiento (ensayo de compresión uniaxial y triaxial), para construir una envolvente que describa el comportamiento esfuerzo-deformación basada en el criterio de falla Mohr-Coulomb. Las curvas de comportamiento provenientes de los ensayos de laboratorio proveen propiedades estáticas elásticas de la roca como son: Módulo de Young, relación de Poisson, resistencia a la compresión (confinada y no confinada), ángulo de fricción, fuerza de cohesión y constante de Biot de la formación. El programa ***LMPTM*** simula la deformación de los granos de arena y alteraciones, debido al cierre y desplazamiento de las fracturas o grietas preexistentes y la formación de otras nuevas.
- ***LMP_SANDANTM***: Programa que ejecuta la conversión de unidades de los parámetros calculados por los realizados con el ***LMPTM*** (de métricas a inglesas).
- ***PPORTM***: Programa utilizado para la obtención de la presión de poro a las diversas profundidades partiendo de los datos de gradientes de presión estática de la formación.

Metodológico

BIAS (por sus siglas en inglés “*Borehole Integrity Analysis System*”) es un programa desarrollado por Baker Atlas, el cual provee soluciones innovadoras a los problemas geomecánicos para optimizar las estrategias de perforación y producción: Parámetros de diseños como la más óptima trayectoria del hoyo y presiones adecuadas del fluido de perforación para mantener la estabilidad mecánica de la roca y evitar, de esta manera, la producción de arena. Entre las aplicaciones de **BIAS** se pueden mencionar:

- Análisis de los esfuerzos en sitio.
- Análisis de la estabilidad de hoyo.
- Predicción y selección de la trayectoria de una perforación estable.
- Determinación de la ventana operacional de perforación estable.
- Predicciones de puntos potenciales de arenamiento.
- Diagnóstico del mecanismo de falla del hoyo.
- Generación a partir de un análisis geomecánico gráficas de contornos las cuales son una forma conveniente de presentar los parámetros del pozo (peso de lodo, tamaño de los “*breakouts*”, etc.) para un pozo perforado con cualquier acimut y desviación.

El programa **BIAS** requiere perfiles continuos de las propiedades mecánicas y resistencias de la roca en estudio, suministrados con el **LMPTM** como datos de entrada críticos, para que este programa pueda ejecutarse eficientemente.¹⁴

Metodológico**Descripción de la Metodología**

El siguiente flujo grama muestra una síntesis de la metodología que se llevó a cabo para la realización de este Trabajo Especial de Grado (Figura 39):

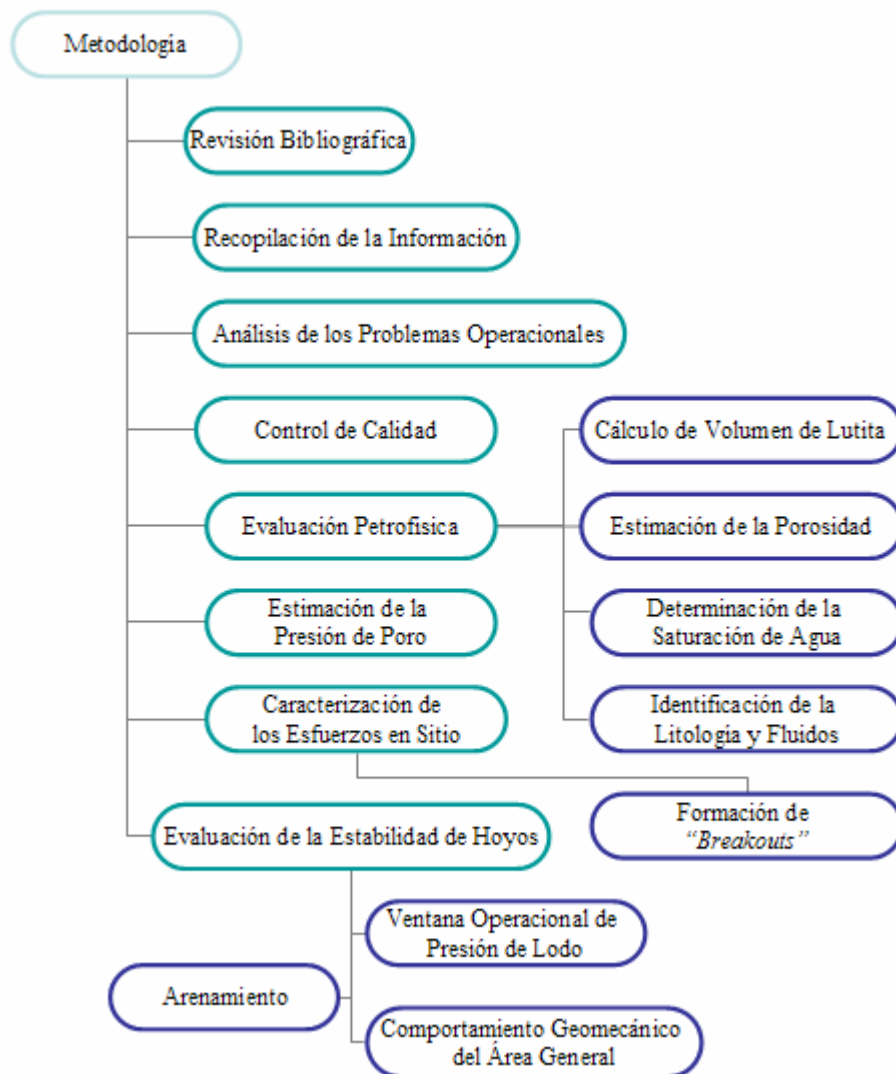


Figura 39. Flujo Grama de Metodología.

Revisión Bibliográfica

Inicialmente, se llevó a cabo una búsqueda general de información asociada a los conceptos y teorías de la geomecánica aplicada a la estabilidad de hoyo, mecánica de rocas e interpretación de registros petrofísicos en campos petroleros; la cual comprendió la revisión bibliográfica de materiales como libros, publicaciones y trabajos especiales de grado relacionados al tema, necesarios para el desarrollo de este trabajo.

Recopilación de la Información

La selección de los pozos a ser evaluados se realizó en base a los reportes de perforación y registros petrofísicos disponibles, requeridos para la evaluación geomecánica, tratando de cubrir la mayor área posible para un estudio más completo del campo. Según el criterio mencionado anteriormente, la empresa PetroUCV S.A. proporcionó los datos (Tabla 5) de los siguientes pozos:

Tabla 5. Ubicación de los pozos seleccionados.

Campo	Pozo	Ubicación
Socororo Este	ES-439	Latitud: norte - 149.875,73 Longitud: este - 505.811,81
	ES – 451	Latitud: norte - 969.919,99 Longitud: este - 325.200,02
Socororo Oeste	ES – 452	Latitud: norte - 974.158,66 Longitud: este - 317.215,02
	ES – 457	Latitud: norte - 973.721 Longitud: este – 317.123

Metodológico

A continuación se muestran los datos obtenidos de los pozos seleccionados:

1. **Información geológica:** Contiene información de la geología regional. Ésta se divide en:

- 1a. **Información geológica estratigráfica:** Referida a la descripción de aquellas formaciones de interés: Localizaciones de los topes de formaciones, profundidades y espesores de arena a ser evaluadas.

- 1b. **Información geológica estructural:** Referida a la descripción de los sistemas de fallas (localización, tipo y orientación) de importancia en el campo. Ésta se halla también representada sobre mapas estructurales.

2. **Información de yacimiento:** Contiene la recopilación de las presiones halladas en las formaciones de cada pozo involucrado en el estudio, tipo y características del fluido encontrado en la formación.

3. **Información de perforación:** Contiene el seguimiento que se le ha hecho a los pozos durante las actividades de perforación. Informa cada evento y problema presentado durante el proceso, presiones y profundidades. Tipos y pesos de lodos utilizados, inclusive.

4. **Registros de pozos:** Los registros petrofísicos poseen aplicaciones tanto cualitativa como cuantitativa. Estos tipos de registros fueron utilizados para realizar evaluaciones de límites de capas, litología, saturaciones, tipos de fluidos y porosidad:

- Curvas de rayos gamma.
- Curvas de resistividad.

Metodológico

- Curvas de porosidad: densidad y neutrón.
- Acústicos (velocidades compresionales y de cizallamiento).
- “Caliper”.

Los registros de pozos fueron obtenidos luego de haber sido perforados, por compañías de servicios (Tabla 6) distintas, por lo que a lo largo de este capítulo se observarán nombres de curvas con el mismo propósito, que difieren uno de los otros según la compañía que las haya tomado, aunque la aplicación de la metodología fue la misma para todos los pozos, vale esta acotación.

Tabla 6. Compañía de servicios que obtuvo los registros.

Compañía de Servicio que obtuvo los registros	
Pozo	Compañía
ES-439	Schlumberger
ES-451	Baker Hughes
ES-452	Baker Hughes
ES-457	Schlumberger

Análisis de los Problemas Operacionales

El seguimiento de los eventos u operaciones diarios de perforación realizados por los profesionales encargados de los pozos en campos petroleros quedan registrados en los llamados **sumarios de perforación**. Cada pozo contiene un reporte diario el cual se pudo identificar los siguientes parámetros de perforación:

- Tiempo de perforación a las distintas profundidades.
- Tipo y peso de lodo de perforación utilizado.
- Diámetro de perforación de cada mecha.
- Características de la formación perforada.
- Problemas operacionales presentados en la perforación del pozo: Repasos, viajes, pérdidas de circulación, influjos, pegas de tuberías y atascamientos de herramientas.

En esta fase se identificaron los problemas presentados al momento de realizar la perforación para posteriormente, a medida que vaya avanzando el estudio geomecánico, analizar la naturaleza de cualquier evento durante dichas actividades y sus posibles causas.

Metodológico

Para ello, partiendo del uso de una hoja de cálculo **EXCEL**, se generaron gráficas de profundidad en función del tiempo, para facilitar la visualización de los problemas operacionales y detectar puntos potenciales de inestabilidad de hoyo para cada pozo. La siguiente figura (Figura 40) muestra los diversos problemas operacionales encontrados en el pozo ES-451 a sus respectivos tiempos y profundidades de ocurrencia.

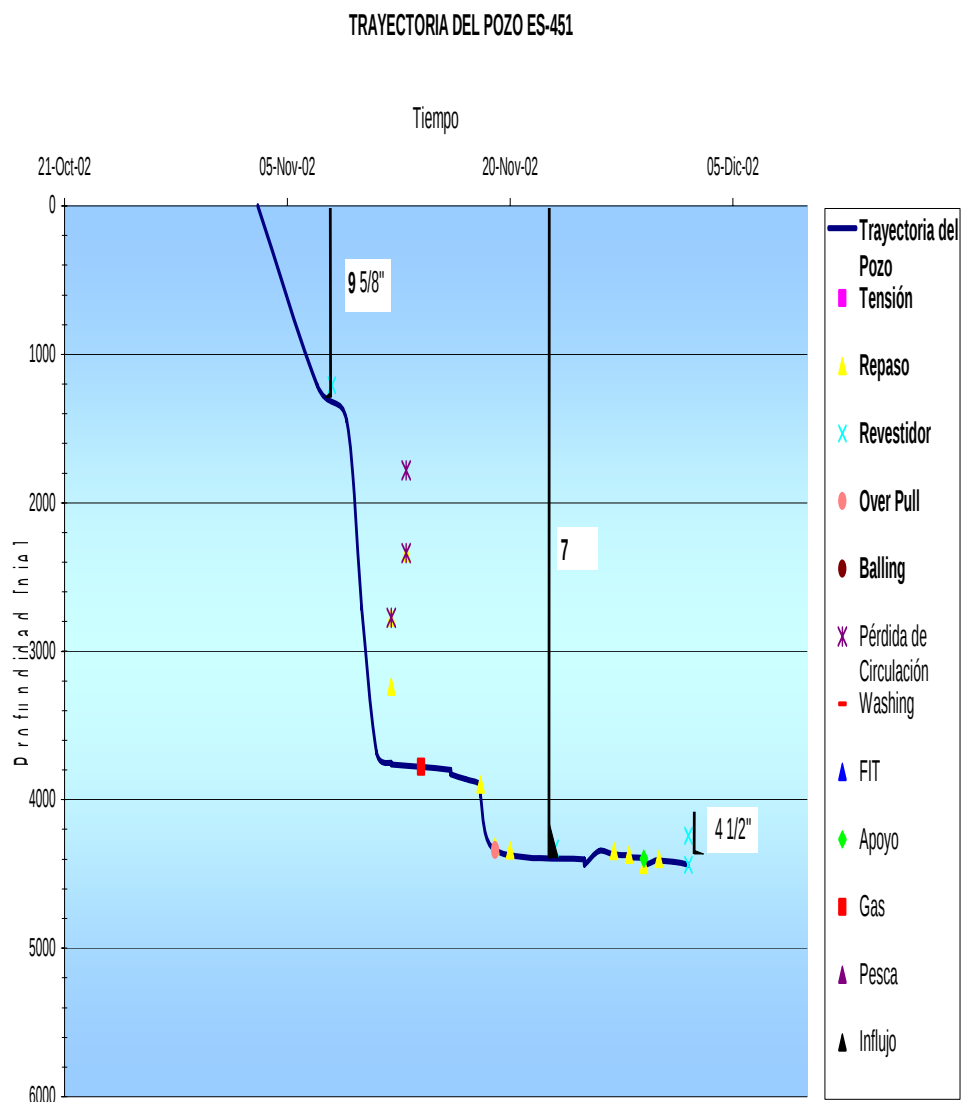


Figura 40. Problemas operaciones pertenecientes al pozo ES-451.

Evaluación de la Información de Registros como Control de Calidad

Como los registros petrofísicos tienen aplicaciones tanto cualitativa como cuantitativa en el estudio de la estabilidad de hoyo, fue necesario realizar una evaluación de los datos obtenidos en campo de los pozos en estudio.

Estas evaluaciones se realizaron a través de gráficos de los registros, el cual facilitó la lectura y visualización de los distintos perfiles utilizados, de tal manera, que asegurase la continuidad de información en cada una de las profundidades a lo largo de la trayectoria de perforación.

Evaluación Petrofísica de las Formaciones

Se realizó el análisis petrofísico utilizando el programa *SANDTM* para procesar los datos de campo provenientes de los registros de pozos, con la finalidad de determinar la litología (volumen de arena y lutitas), la porosidad y las saturaciones de agua en el intervalo evaluado (Figura 41).

The screenshot displays the 'Control Deck Editor' window for the SAND™ software. The window title is 'Control Deck Editor:sand [sand_ES-451.Inp: Edited]'. The menu bar includes 'File', 'Edit', 'Options', 'View', 'Run', and 'Help'. The 'Data File Name' is 'ES-451.inp' and the 'Interval Description' is '1920,22-90'. The 'Current Interval' is set to 1, and 'Total Intervals' is 1. A left-hand pane lists categories: 'Define Intervals', 'Namezone Parameters', 'Input curves' (selected), 'Output curves', 'General parameters', 'Fluid resistivity', 'Clay and porosity', 'Coal analysis', 'Dispersed clay & productivity', 'Permeability parameters', 'Shale Volume Options', 'Water saturation', 'Ownto', 'Curve rescaling', and 'Curve Creation'. The main area shows a table of parameters and their values:

Category	Parameter	Value
Input curves	Acoustic Interval Transit Time(us/cft)	?
	AC	AC
	Borehole Diameter (inches)	?
	CAL	CAL
	Neutron Porosity (%)	?
	CN	CN
	Bulk Density (gm/cc)	?
	DEN	DEN
	Gamma Ray (API)	?
	GR	GR
	Neutron Lifetime Gate 2 Counts (CPS)	?
	G2	G2
	Spectralog Potassium (%)	?
	K	K
	API Neutron Counts (API Units)	?
	NEU	NEU
Neutron Lifetime Ratio	?	
RATO	RATO	
Resistivity of the Uninvaded Zone	?	
RT	RT	
Resistivity of the flushed Zone	?	
RXO	RXO	
Neutron Lifetime Sigma	?	
SGMA	SGMA	
Spontaneous Potential (mV)	?	
SP	SP	

Figura 41. Ventana para datos de entrada del programa *SANDTM*.

Metodológico

Dicho programa, para realizar la evaluación se le asignaron los siguientes parámetros (Tabla 7 y Tabla 8), curvas de entrada (Tabla 9) y salida (Tabla 10) para cada pozo. Éstos se muestran a continuación:

Tabla 7. Parámetros generales de entrada al programa *SANDTM*.

Parámetros Generales <i>SANDTM</i>				
Pozos	ES-439	ES-451	ES-452	ES-457
Tamaño de la mecha, BITS (pulg)	8.5	8.5	8.5	8.5
Resistividad de los Fluidos de la Formación				
Gradiente de temperatura/profundidad, GRAD (°F/100 pie)	1.63	1.57	1.77	1.71
Profundidad de referencia, RDEP (pies)	4904	4440	4490	4667
Temperatura a la profundidad de referencia, TEMP (°F)	160	150	180	160
Temperatura de referencia para R_w , RTMP (°F)	180	180	180	180
Arcilla y Porosidad				
Porcentaje mínimo de arcilla mojada en lutita, CLM (%)	70	70	70	70
Densidad de la arcilla mojada, DCL (gr/cc)	2.15	2.35	2.15	2.25
Densidad de la matriz limpia, DG (gr/cc)	2.65	2.65	2.65	2.65
Máxima porosidad para la corrección por hidrocarburos, HCMX (%)	40	40	40	40
Porosidad neutrón de la arcilla, NCL (%)	50	48	54	45
“Cut-off” del volumen de lutita para la reducción de la porosidad, SHCT (%)	70	70	70	70

Tabla 8. Parámetros generales de entrada al programa *SANDTM*.

Parámetros Generales <i>SANDTM</i>				
Pozos	ES-439	ES-451	ES-452	ES-457
Opciones para el Volumen de Lutita				
Rayos gamma de la formación limpia, C1 (API)	12	5	5	5
Rayos gamma de la lutita, S1 (gAPI)	105	110	115	115
Potencia del rayos gamma, E1 (adimensional)	3.7	3.7	3.7	3.7
Saturación del Agua				
Constante de la resistividad de la formación, a	1	1	1	1
Exponente de cementación, m	2	2	2	2
Exponente de Saturación, n (%)	2	2	2	2
Resistividad del agua de formación a la temperatura de referencia (ohm/m)	0.2	0.2	0.2	0.2

Los parámetros petrofísicos a, m y n son derivados de forma empírica y varían de acuerdo a la heterogeneidad de la roca. En este estudio, por experiencia práctica dichos valores se asumieron constantes.

Metodológico**Tabla 9. Curvas de entrada para el programa *SANDTM*.**

Curvas de entrada <i>SANDTM</i>				
Pozos	ES-439	ES-451	ES-452	ES-457
Diámetro del hoyo, CAL (pulg)	CAL	CAL	CAL	CAL
Porosidad neutrón, CN (%)	NPHIC	CNCFC	CNCFC	NPHIC
Densidad total, DEN (gr/cc)	RHOB	DENC	ZDENC	RHOZC
Rayos Gamma, GR (gAPI)	GRC	GRC	GRC	GRC
Resistividad de la zona invadida, R _{xo} (ohm/m)	LLS	M2R3	M2R3	M2R3
Resistividad de la zona no invadida, R _t (ohm/m)	LLD	M2RX	M2RX	M2RX

Las curvas de salida requeridas de cada pozo se realizaron bajo los mismos nombres:

Tabla 10. Curvas de salida del programa *SANDTM*.

Curvas de salida <i>SANDTM</i>			
Curva	Descripción	Nombre asignado para la salida	Unidades
POR	Porosidad efectiva	SNDPOR	Fracción
PORW	Porosidad para el agua en la zona no-invadida	SNDPORW	Fracción
VSH	Volumen de lutita	SNDSSH	Fracción
SW	Saturación del agua en la zona no-invadida	SNDSW	%

Cálculo del Volumen de Lutita

El V_{sh} se define como la fracción volumétrica de arcilla por volumen total de la roca. El **índice de rayos gamma** I_{GR} utilizado para determinar dicha fracción, con la supuesta ausencia de cualquier otro mineral radiactivo aparte de las arcillas, se cálculo a través del mismo programa **SANDTM** con la siguiente ecuación:

$$I_{GR} = \frac{GR - GR_{cl}}{GR_{sh} - GR_{cl}} \quad \text{(Ecuación 38)}$$

donde:

I_{GR} : Índice de radioactividad (adimensional).

GR : Valor de rayos gamma leído del registro (unidades gAPI).

GR_{cl} : Valor mínimo de rayos gamma asignado a arenas limpias (unidades gAPI).

GR_{sh} : Valor máximo de rayos gamma asignado a las lutitas (unidades gAPI).

El porcentaje de volumen de lutita fue determinado, para formaciones del terciario, utilizando la siguiente expresión:

$$V_{sh} = 0.083 * (2^{3.7 * I_{GR} - 1}) \quad \text{(Ecuación 39)}$$

Corrección del Volumen de la Lutita por Efecto de la Arcillosidad

La curva de rayos gamma depende tanto de la radiactividad como de la densidad de los minerales que componen la formación adyacente al pozo. Asumir una misma línea base de arena y lutitas a lo largo de todo el pozo, cuando la densidad va variando, debido al efecto de sobrecarga litostática acarrea resultados erróneos en la lectura del registro rayos gamma, que es necesario considerar para el análisis petrofísico.

Metodológico

La corrección del volumen de lutita se efectuó por intervalos de profundidad y para cada uno de ellos se definió su línea base de arenas y lutitas según su curva de rayos gamma.

A continuación se muestran los valores de las líneas base de arenas y lutitas de los registros de rayos gamma utilizados, para el cálculo del volumen de lutita realizado para el pozo ES-451 (Tabla 11):

Tabla 11. Corrección por arcillosidad en el pozo ES-451.

Corrección por efecto de la arcillosidad. Pozo: ES-451				
Opciones para el volumen de Lutita	Intervalos corregidos (pies)			
	[1900,2240]	[2240,2970]	[2970,3700]	[3700,4420]
C1 (gAPI)	50	50	40	25
S1 (gAPI)	110	110	120	120
E1 (adimensional)	3,7	3,7	3,7	3,7

Estimación de la Porosidad

El gráfico cruzado representa una interrelación que tiene por finalidad mostrar cómo varias combinaciones de registros responden, de manera conjunta, a la litología y la porosidad de una determinada formación partiendo de la información petrofísica disponible.

El gráfico cruzado fue realizado para cada pozo en función de las porosidades de densidad y de neutrón, graficados en escalas lineales, mientras que las curvas de arenisca, calizas y dolomitas fueron definidas por puntos que corresponden a litologías puras y saturadas de agua graduadas en unidades de porosidad. Una escala de magnitudes de rayos gamma adicional facilitó el reconocimiento visual de la litología de acuerdo a su grado de radiactividad.

Metodológico

En la figura (Figura 42) que se presenta a continuación se observa el gráfico combinado de densidad-neutrón, realizado para el pozo ES-451:

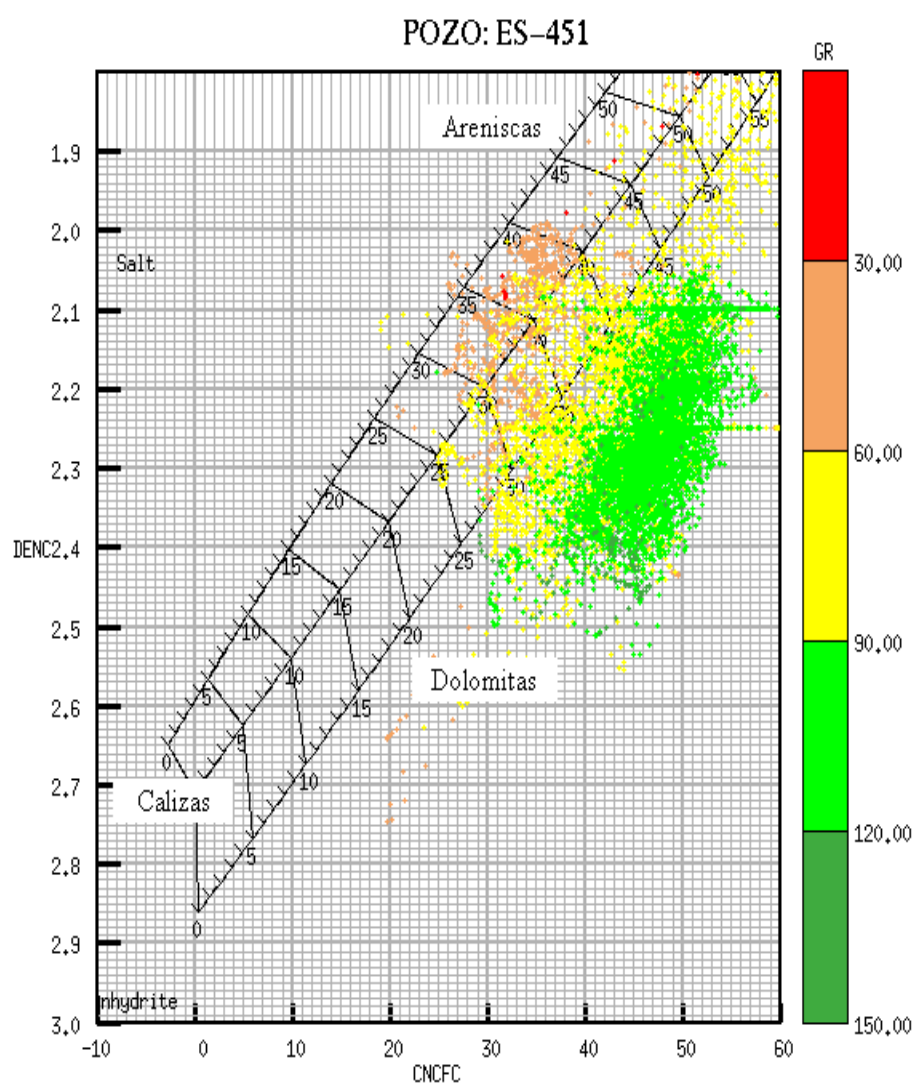


Figura 42. Gráfico cruzado del pozo ES-451

Metodológico

Las porosidades del gráfico cruzado se obtuvieron a partir de la densidad de las formaciones limpias: se consideró para la matriz de la arenisca limpia un valor de densidad equivalente a 2.65 g/cc y para el agua presente en la roca una densidad igual a 1 g/cc:

$$\varphi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad \text{(Ecuación 40)}$$

donde:

φ : Porosidad (fracción).

ρ_b : Densidad total, obtenida del registro (gr/cc).

ρ_{ma} : Densidad de la matriz (gr/cc).

ρ_f : Densidad de los fluidos (gr/cc).

Corrección por Hidrocarburo Liviano

La presencia de hidrocarburos gaseosos o livianos provoca que la porosidad aparente del registro de densidad y del registro de neutrones disminuya, trayendo esto como consecuencia una lectura de valor de porosidad total menor a la real para hidrocarburos más livianos que el agua, y mayor en caso contrario. Para aquellas mediciones de las herramientas de porosidad cuyas respuestas se saben que varían de manera notable a la obtenida en estratos acuíferos, en especial, el gas, fue necesario realizar las correcciones pertinentes sobre los perfiles de porosidad y aplicar fórmulas, para obtener una evaluación más precisa en formaciones limpias recipientes de hidrocarburos livianos.

Metodológico

La corrección por efecto de hidrocarburos se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$\varphi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - [S_{xo} \cdot \rho_{mf} + (1 - S_{xo}) \cdot \rho_h]} \quad \text{(Ecuación 41)}$$

donde:

φ : Porosidad (fracción).

S_{xo} : Saturación del filtrado en la zona invadida, igual a $(1 - S_{hr})$ (fracción).

ρ_{ma} : Densidad de la matriz (gr/cc).

ρ_{mf} : Densidad del filtrado de lodo (gr/cc).

ρ_b : Densidad total, obtenida del registro (gr/cc).

ρ_h : Densidad de los hidrocarburos a las condiciones de la formación (gr/cc).

Al no tener el valor de ρ_h , se procedió a hacer la corrección por hidrocarburo liviano manualmente, es decir, se desplazaron las curvas de densidad y neutrón en las zonas de gas hasta la lectura dada por la línea indicativa de arena limpia.

Determinación de la Saturación de Agua

La saturación es la fracción que representa el volumen poroso ocupado por un fluido. La ecuación utilizada por el programa *SANDTM* para determinar los valores de la saturación de agua en las zonas de arenas arcillosas, tomando en cuenta los efectos de las arcillas es la **ecuación de Simandoux** (1963):

$$\frac{1}{R_t} = \frac{\phi^m \cdot S_w^n}{a \cdot R_w} + \frac{V_{sh} \cdot S_w}{R_{sh}} \quad \text{(Ecuación 42)}$$

donde:

R_t : Resistividad de la formación (ohm/m).

R_w : Resistividad del agua de formación (ohm/m).

R_{sh} Resistividad de las arcillas (ohm/m).

V_{sh} : Volumen de arcillas (fracción).

S_w : Saturación de agua (fracción).

ϕ : Porosidad (fracción).

a : Constante de la ecuación de Archie.

m : Constante de la ecuación de Archie. Exponente de cementación (adimensional).

n : Constante de la ecuación de Archie. Exponente de Saturación (adimensional).

Identificación de la Litología y Fluidos de las Formaciones

La combinación de las curvas de Rayos Gamma, resistividades, densidad y neutrón permitieron deducir la litología y los fluidos de la formación presentes a las distintas profundidades para cada uno de los pozos.

Estimación de la Presión de Poros

El cálculo de la presión de poros se llevó a cabo, considerando un gradiente de presión proporcionado por PetroUCV S.A., dependiendo de los fluidos presentes en la formación (Tabla 12).

Tabla 12. Gradiente de Presión para el Pozo ES-451.

Arena	Fluido	Profundidad (pies)	Gradiente de Presión (Lpc/pies)
A11,12	Petróleo	2182	0.335
D3U	Petróleo	2424.4	0.344
F7	Gas	2833.1	0.345
H4	Gas	2974.1	0.345
H5,6	Gas	3000.4	0.346
J3	Petróleo	3251.3	0.376
L3	Gas	3426.2	0.364
N2	Gas	3650.2	0.365
N2	Gas	3670.4	0.363
N2	Petróleo/Agua	3690	0.362
P1	Gas	3813	0.355
P2	Petróleo	3836	0.392
R0U	Petróleo	3892	0.367
R0M	Gas	3903.2	0.368
R4L	Petróleo	4111.1	0.373
U1U	Petróleo	4369.2	0.328
U1M	Petróleo	4398.2	0.372

Metodológico

Con el programa complementario **PPORTM**, se construyó una curva con sus respectivos gradientes de presión (PPGC) a las diferentes profundidades mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$p_f = G \cdot h \quad \text{(Ecuación 43)}$$

donde:

p_f : Presión de poro (Lpc).

G : Gradiente de presión (Lpc/pies).

h : Profundidad (pies).

Las curvas de entradas y salidas del programa (Tabla 13 y Tabla 14) se presentan a continuación:

Tabla 13. Curvas de entradas al programa **PPORTM.**

Curvas de entrada PPORTM		
Curva	Descripción	Unidades
DEPTH	Profundidad	Pies
VSH	Volumen de lutita	Fracción
PPGC	Gradiente de presión	Lpc/pies

Tabla 14. Curvas de salida del programa **PPORTM.**

Curvas de salida PPORTM		
Curva	Descripción	Unidades
DEPTH	Profundidad	Pies
SNDSH	Volumen de lutita	fracción
PPOR	Presión de poro	Lpc

Estimación de Propiedades Mecánicas y Resistencia de la Formaciones

La estimación de las propiedades dinámicas mecánicas y resistencia de las formaciones se determinó partiendo de la información de los registros sínicos a través del programa *MECHPROP*TM (Figura 43). Sin embargo, para este estudio en particular dicho programa fue usado solamente para hallar una curva representativa de la relación de Poisson, necesaria para ejecutar los tres programas complementarios *PRELMP*TM, *LMP*TM y *LMP_SAND*TM.

The screenshot shows the 'Control Deck Editor: mechprop [mechprop.inp: Edited]' window. It has a menu bar (File, Edit, Options, View, Run, Help) and a status bar (Data File Name: ES-451.xdf, Current Interval: 1, Total Intervals: 1). The main area is divided into a left sidebar with a tree view and a right pane with a table of parameters.

Left Sidebar (Tree View):

- Define Intervals
- General Processing Switches
- Input Curves Names
- Output Curve Names
- Alpha Processing Options
- Density Replacement Option
- Compressional Slowness Replacement Option
- Shear Slowness Replacement Option
- Shear Prediction Option
- Fluid Parameters
- Rock Parameters
- Curve Creation

Right Pane (Table):

Category	Parameter	Value
Input Curves Names	Bulk Density	?
	DEN	DEN
	Compressional Slowness	?
	DTC	DTC
	Shear Slowness	?
	DTS	DTS
	Stoneley Slowness	?
	DTST	DTST
	Effective Porosity	?
	POR	FOR
	Bulk Volume of Anhydrite	?
	VANH	VANH
	Bulk Volume of Dolomite	?
	VDOL	VDOL
	Bulk Volume of Limestone	?
	VLIM	VLIM
	Bulk Volume of Sandstone	?
VSND	VSND	
Bulk Volume of Shale	?	
VSH	VSH	
Bulk Volume Matrix for Mineral 1	?	
VM1	VM1	
Bulk Volume Matrix for Mineral 2	?	
VM2	VM2	

Figura 43. Ventana para datos de entrada del programa *MECHPROP*TM.

Metodológico

A continuación se presentarán las curvas de entrada (Tabla 15) y salida (Tabla 16) obtenidas del programa **MECHPROPTM** para cada uno de los pozos:

Tabla 15. Curvas de entradas al programa **MECHPROPTM.**

Curvas de entrada MECHPROPTM			
Curva	Descripción	Nombre asignado para la entrada	Unidades
ACC	Onda compresional	DTC	μs/pies
ACS	Onda de cizallamiento	DTS	μs/pies

Tabla 16. Curvas de salida del programa **MECHPROPTM.**

Curva de salida MECHPROPTM			
Curva	Descripción	Nombre asignado para la salida	Unidades
POIS	Relación de Poisson	POISDIN	Adimensional

Metodológico

A continuación se presentarán los parámetros (Tabla 17), curvas de entrada (Tabla 18) y salida (Tabla 19) obtenidas del programa **PRELMP™** para cada uno de los pozos:

Tabla 17. Parámetros constantes del programa *PRELMP™*.

Parámetros constantes <i>PRELMP™</i>			
Curvas	Descripción	Valor asignado	Unidades
KOIL	Módulo volumétrico del petróleo	1.4	GPa.
DENOIL	Densidad del crudo	0.8	gr/cc
OVDEN	Av. De densidad de formación	2.2	gr/cc
PMUD	Densidad del lodo con el cual fue perforado el pozo	9.6	Lpg
DEP.	Unidades de profundidad del archivo de datos	1	m
ALFA	Constante de Biot	1	Adimensional
CVUI	SW/POR	1	Fracción

Tabla 18. Curvas de entrada del programa *PRELMP™*.

Curvas de entrada <i>PRELMP™</i>		
Curva	Descripción	Unidades
VSH	Volumen de lutita	Fracción
POR	Porosidad de la formación	Fracción
SW	Saturación de agua	Fracción
DEN	Densidad de la formación	gr/cc
POIS	Relación de Poisson	Adimensional
PPGC	Gradiente de presión	Lpc/pies

Metodológico

El esfuerzo vertical considerado como el peso de sobrecarga fue obtenido a partir de la multiplicación de la profundidad por un gradiente de sobrecarga de 2.2 gr/cc equivalente a 0.9525 Lpc/pies.

Tabla 19. Curvas de salida del programa *PRELMP™*.

Curvas de salida <i>PRELMP™</i>		
Curva	Descripción	Unidades
DEPTHM	Profundidad del pozo	m
VSNDF	Volumen de arena	Fracción
VSHF	Volumen de lutita	Fracción
PORF	Porosidad efectiva	Fracción
VW	Volumen de agua	Fracción
VHC	Volumen de hidrocarburo	Fracción
KHC	Módulo volumétrico de hidrocarburo	GPa.
SV	Esfuerzo vertical	KLpc.
SVM	Esfuerzo vertical	MPa.
SHOR	Esfuerzo horizontal	KLpc.
SHORM	Esfuerzo horizontal	MPa.
PPOR	Presión de poro	KLpc.
PPORM	Presión de poro	MPa.

Una vez ejecutado el programa *PRELMP™*, se procedió a construir una curva bajo el nombre de LMP. A la misma se le asignó el valor correspondiente al selector de tabla de calibración de la litología presente en la formación: (12) Arenisca-lutita.

Metodológico

A continuación se presentarán los parámetros (Tabla 20), curvas de entrada (Tabla 21) y salida (Tabla 22) obtenidas del programa **LMPTM** para cada uno de los pozos:

Tabla 20. Parámetros constantes del programa **LMPTM.**

Parámetros constantes LMPTM		
Parámetros	Descripción	Unidades
CONFP	Presión de Confinamiento a la cual las Propiedades Mecánicas son computadas	MPa.
C1	Primer “Cut-Off” de la Lutita	Fracción
	Si VSH<C1: usa sólo la Tabla de Arenisca BAS_SS.ASC	
C2	Segundo “Cut-Off” de la Arenisca	Fracción
	Si VSH>C2: usa sólo la Tabla de Lutita BAS_SH.ASC	
	Nota: Si C1<VSH<C2: Usa la combinación lineal entre ambas tablas de Arenisca y Lutita	
CLIM	Límite del Volumen de la Lutita	Fracción
	Si VSH>CLIM usa correlación en vez de LMPTM	
PORFAC	1: Si Volumetrics están en función de la Porosidad Efectiva	
	0: Si Voluménes están en función de la Porosidad Total	
WD	Profundidad del Agua	m

MetodológicoTabla 21. Curvas de entrada al programa *LMP™*.

Curvas de entrada <i>LMP™</i>		
Curvas	Descripción	Unidades
TVD	Profundidad Vertical Verdadera o Profundidad de los Pozos Verticales	m
SAND	Volumen de Arenisca	Fracción
SHALE	Volumen de Lutita	Fracción
WATER	Volumen Total de Agua (SWt*PHIt)	Fracción
OIL	Volumen Total de HC ((1-SWt)*PHIt)	Fracción
KOIL	Módulo volumétrico del petróleo (1/compresibilidad del petróleo)	GPa.
ACC	Tiempo de Tránsito Acústico Compresional de la Formación	μs/pies
ACS	Tiempo de Tránsito Acústico de Cizallamiento De la Formación (puede ser omitido)	μs/pies
VERS	Esfuerzo Vertical (Densidad Integrada)	MPa.
PORP	Presión de Poro de la Formación	MPa.
HORS	Esfuerzo Horizontal en sitio (si es omitido, éste puede ser calculado a través de las correlaciones empíricas)	MPa.
LMPCRV	Selector de Tabla de Calibración 1: Solamente Tabla de Arenisca BAS_SS.ASC 2: Solamente Tabla de Lutita BAS_SH.ASC 3: Solamente Tabla de Caliza BAS_CH.ASC 12: Arenisca-Lutita 13 y 23 pueden ser simulados con tablas renombradas	

MetodológicoTabla 22. Curvas de salida del programa *LMPTM*.

Curvas de salida <i>LMPTM</i>		
Curvas	Descripción	Unidades
FRCAN	Ángulo de Fricción	Grados
COHES	Cohesión	MPa.
KMODT	Módulo Volumétrico Total	MPa.
SMOD	Módulo de Cizallamiento	MPa.
STRG	Esfuerzo de Compresión de la Formación a la Presión de Confinamiento CONFP	MPa.
EMOD	Módulo de Young Estático de la Formación a la Presión de Confinamiento CONFP	MPa.
POIS	Relación de Poisson Estática de la Formación a la Presión de Confinamiento CONFP	MPa.
QUAL	Indicador de la Calidad de la Data (error relativo)	
ERRFG	``Error Flag``	
	0: No error	
BIOT	Constante de Biot	
KMODK	Módulo volumétrico, no calculado a 0 MPa de presión de confinamiento	
DTSO	Velocidad de la Onda de Cizalla igual que en la entrada o calculada por <i>LMPTM</i>	
SIGH	Esfuerzo Horizontal Calculado por <i>LMPTM</i> si no está dado por la entrada	

Metodológico

De la simulación de una muestra de roca creada por el programa y tablas de calibración contenidas en el mismo se obtuvieron los siguientes parámetros:

- Módulo de Young medido bajo distintas presiones de confinamiento.
- Relación de Poisson.
- Resistencia a la compresión medida bajo diferentes presiones de confinamiento.
- Ángulo de fricción interna medida bajo distintas presiones de confinamiento.
- Fuerza de cohesión.
- Coeficiente de Biot.

Metodológico

A continuación se presentarán las curvas de entrada (Tabla 23) y salida (Tabla 24) obtenidas del programa *LMP_SANDANTM* para cada uno de los pozos:

Tabla 23. Curvas de entrada al programa *LMP_SANDANTM*.

Curvas de entrada <i>LMP_SANDANTM</i>		
Curvas	Descripción	Unidades
UCS	Resistencia a la compresión de la presión sin Confinamiento	MPa.
FRCAN	Ángulo de fricción	Grados
SV	Esfuerzo vertical o sobrecarga	KPa.
STRG	Resistencia a la compresión de la formación a una presión de confinamiento CONFP	MPa.
EMOD	Módulo de Young estático de la formación Para una presión de confinamiento CONFP	MPa.
POIS	Relación de Poisson Para una presión de confinamiento CONFP	Fracción
VSH	Volumen de arcilla	Fracción
BIOT	Constante de Biot	Adimensional
KMODH	Módulo volumétrico (no es calculado a 0 MPa. de confinamiento)	MPa.

Tabla 24. Curvas de salida al programa *LMP_SANDANTM*.

Curvas de salida <i>LMP_SANDANTM</i>		
Curvas	Descripción	Unidades
SMOD	Módulo de corte	MLpc
BMOD	Módulo de densidad promedio de la formación	MLpc
SHIN	Resistencia inicial de corte	KLpc.
MPMX	Máxima densidad de lodo	Lpg
MPMNC	Presión mínima de lodo	Lpg
MPMN	Presión mínima de lodo	Lpg
MPA	Mínima densidad de lodo	Lpg
RAD	Esfuerzo radial	Lpc
TANS	Esfuerzo tangencial	Lpc
MPI	Presión de lodo ideal	Lpg
PMUDP	Densidad del lodo con la cual fue perforado el pozo	Lpg
DDPR	Diferencial de Presión	Lpc
YMODL	Módulo de Young	MLpc
UCSL	Presión de confinamiento	KLpc.
FANGCV	Ángulo de fricción	Grados

Caracterización de los Esfuerzos en sitio a través de un Retroanálisis

En general, para cada pozo la caracterización de los esfuerzos en sitio se realizó partiendo de la evaluación de los sumarios de perforación, propiedades mecánicas y resistencia de la formación mediante la utilización del programa **BIAS**. Se procedió con los siguientes pasos:

Se calcularon las presiones de lodo obtenidas a partir de los valores de ECD suministrados por los reportes de perforación de cada uno de los pozos. Éstas fueron calculadas con la siguiente fórmula:

$$P_{MUD} = 0.052 * ECD * h \quad \text{(Ecuación 44)}$$

donde:

P_{MUD} : Presión calculada para una densidad ECD (Lpc).

ECD : Densidad equivalente de circulación (Lpg).

h : Profundidad (pies).

Metodológico

Se determinó la dirección de los esfuerzos (acimut y desviación), mediante el análisis de los sistemas de fallas representados en las imágenes sísmicas y en el mapa estructural del campo.

A continuación se presenta una de las imágenes (Figura 44) sísmicas utilizada para definir las direcciones de las fallas:

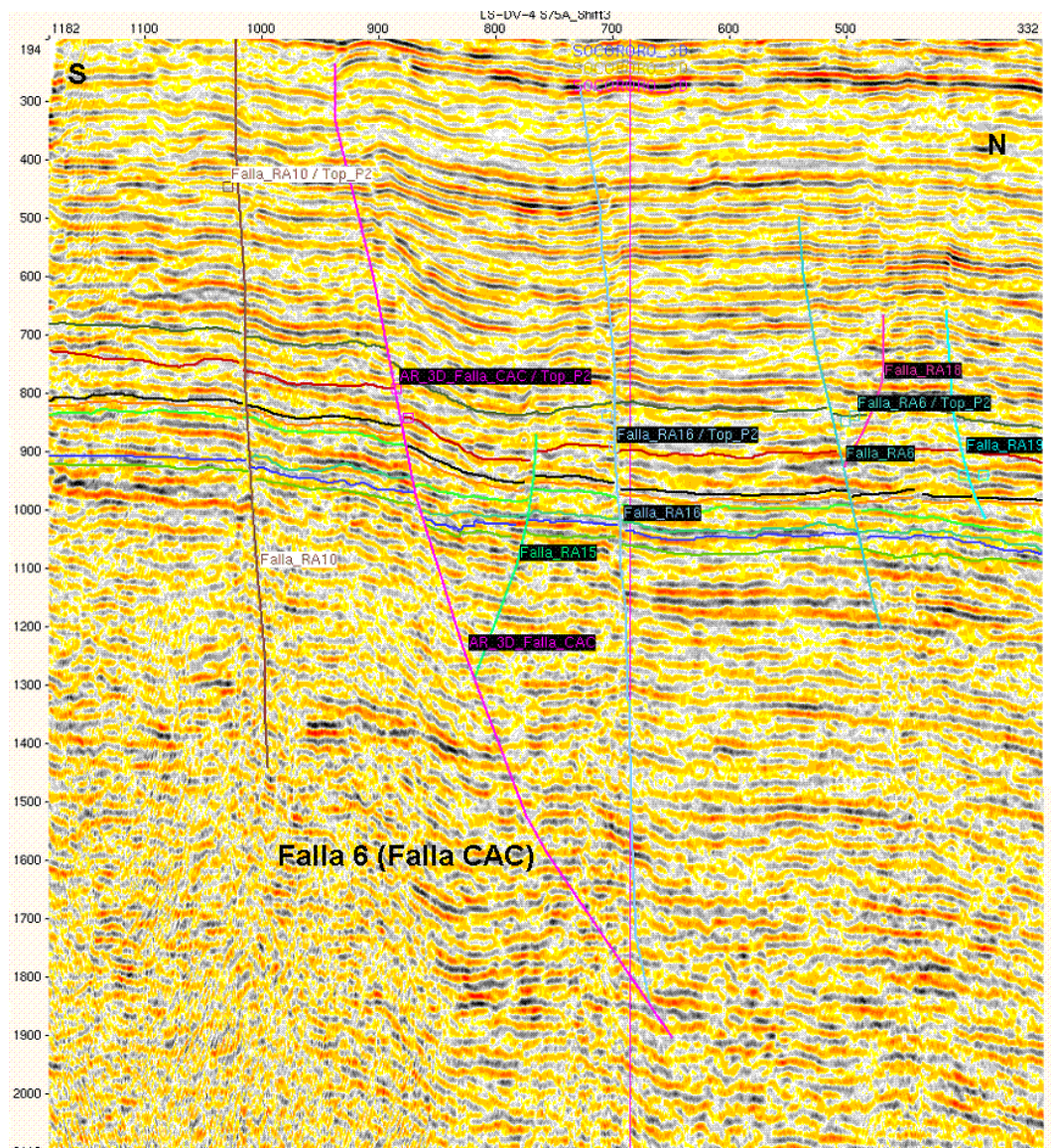


Figura 44. Imagen sísmica de la falla principal de Cachicamo.

Metodológico

El esfuerzo horizontal mínimo fue calculado utilizando la siguiente ecuación:

$$\sigma_h = \left(\frac{\nu}{1-\nu} \right) (\sigma_v - \alpha \cdot P_f) + \alpha \cdot P_f \quad \text{(Ecuación 45)}$$

donde:

σ_h : Esfuerzo horizontal mínimo (Lpc).

σ_v : Esfuerzo vertical (Lpc).

ν : Relación de Poisson (adimensional).

α : Coeficiente de Biot (adimensional).

P_f : Presión de poro (Lpc).

A continuación se muestran los parámetros de entrada para la ejecución programa **BIAS** (Tabla 25).

MetodológicoTabla 25. Parámetros de entrada del programa *BIAS*.

Parámetros de entrada de <i>BIAS</i>		
Curvas	Descripción	Unidades
DEPTH	Profundidad	Pies
SV	Esfuerzo Vertical Máximo	KLpc.
AZ1	Acimut del Esfuerzo Vertical Máximo	Grados
DEV	Desviación del Esfuerzo Vertical Máximo	Grados
S2	Esfuerzo Horizontal Intermedio	KLpc.
AZ2	Acimut del Esfuerzo Horizontal Intermedio	Grados
DEV2	Desviación del Esfuerzo Horizontal Intermedio	Grados
S3	Esfuerzo Horizontal Mínimo	KLpc
AZ3	Acimut del Esfuerzo Horizontal Mínimo	Grados
DEV3	Desviación del Esfuerzo Horizontal Mínimo	Grados
PPOR	Presión de Poro	Lpc
YMODL	Módulo de Young	MLpc
POISDIN	Relación de Poisson	Fracción
UCS	Resistencia a la compresión de la presión sin confinamiento	KLpc.
T0	Resistencia a la tracción	KLpc.
COHESL	Cohesión	KLpc.
FANGCV	Ángulo de fricción	Grados
BBOT	Coeficiente de Biot	Adimensional
AZBH	Acimut del hoyo perforado	Grados
DEVBH	Desviación del hoyo perforado	Grados
PMUD	Presión calculada para una densidad ECD	Lpc

Estos parámetros fueron cargados en el programa **BIAS** para la estimación de los esfuerzos horizontales máximo. Debido a la falta de registros de imágenes se vio en la necesidad de realizar gráficas de “Profundidad vs. “caliper””, con la finalidad de obtener una mejor visualización de las zonas con ovalizaciones o derrumbes a lo largo de la trayectoria del hoyo perforado (Figura 45).

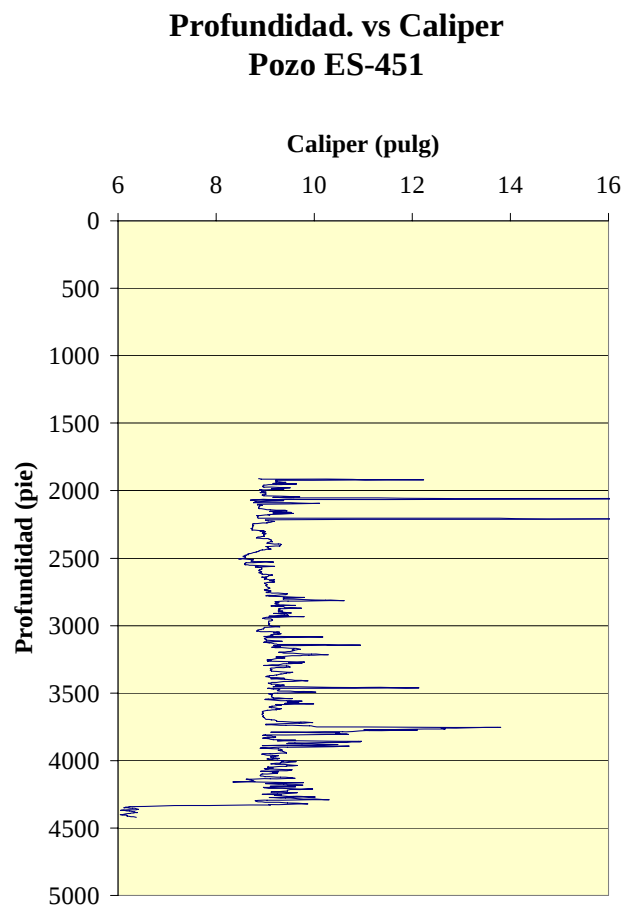


Figura 45. Gráfica Profundidad vs. “caliper” del pozo ES-451.

Formación de “Breakouts”

El valor de presión de lodo mínimo fue calculado basándose en el esfuerzo tangencial máximo, como función de presión de lodo. En teoría, cuando el esfuerzo compresivo máximo excede el esfuerzo compresivo de la formación, se formarán fallas en forma de “breakout” o colapso de hoyo (Figura 46). Los valores para los esfuerzos de corte fueron calculados por el programa **BIAS** con la formulación del esfuerzo tangencial máximo (Ecuación 32).

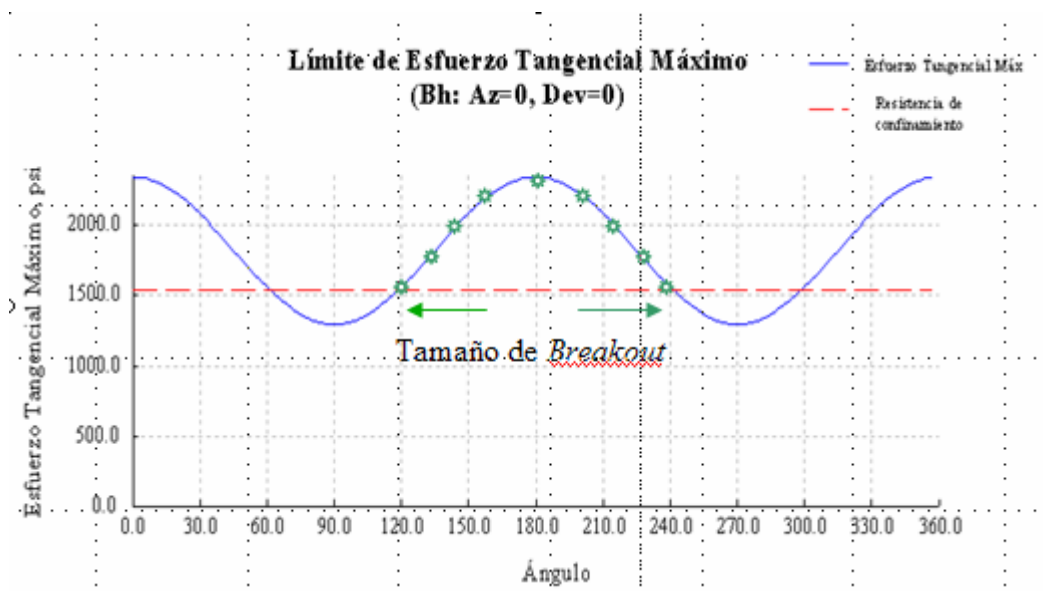


Figura 46. Esfuerzo tangencial máximo del pozo ES-451 a los 1940 pies.

Metodológico

Los ángulos de “breakout” fueron hallados por el programa **BIAS** mediante la intersección de la curva de esfuerzo tangencial máximo con la recta representada por la resistencia de confinamiento. La figura anterior (Figura 46) muestra un tamaño de “breakout” con un ángulo aproximado de 120 grados.

El criterio para la presión de lodo máximo es usado para prevenir la formación de fracturas hidráulicas inducidas en la misma. Este requiere que el esfuerzo tangencial mínimo en el borde o límite del hoyo sea mayor que la resistencia de tensión en dicha formación (Figura 47). La resistencia a la tensión puede considerarse igual a cero (0) o un número negativo aproximadamente entre 1/10 a 1/15 de la resistencia de compresión no confinada. En este estudio, se utilizó 1/12 del valor de UCS. Los valores para los esfuerzos de corte fueron calculados por el programa **BIAS** con la formulación del esfuerzo tangencial mínimo (Ecuación 32).

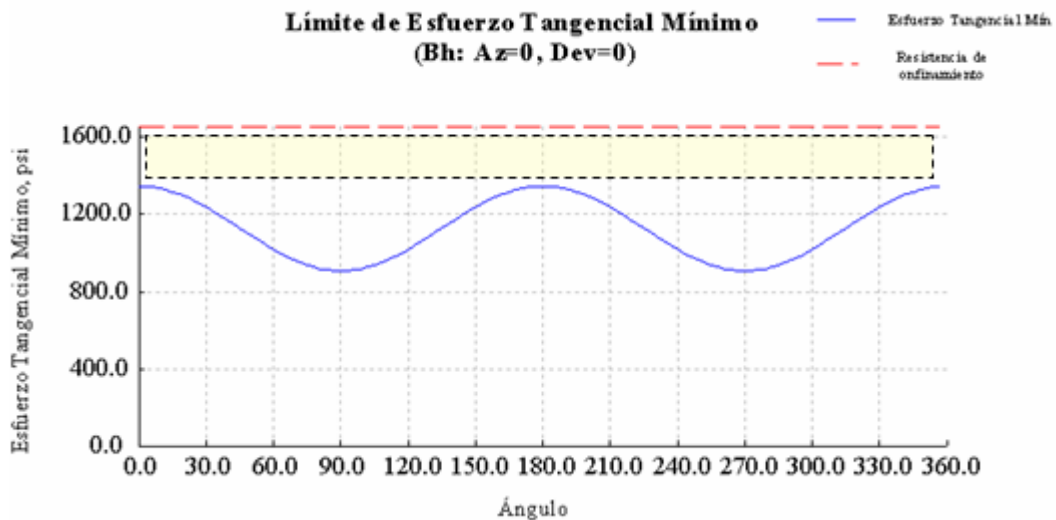


Figura 47. Esfuerzo tangencial mínimo del pozo ES-451 a los 1940 pies.

Metodológico

Al modificarse las magnitudes de los esfuerzos horizontal máximo y mínimo, el programa **BIAS** calculó las magnitudes de las cargas distribuidas en las paredes del hoyo a lo largo de todas las profundidades del pozo: Esfuerzo tangencial mínimo y máximo. Esto fue aplicado para cada uno de los pozos en estudio.

Se vio la necesidad de calibrar las magnitudes de las cargas distribuidas en las paredes del hoyo modificando los esfuerzos horizontales mínimos y máximos iniciales a diversas profundidades (Figura 48), para que la curva de los “breakouts” tuviese un comportamiento similar a la del “caliper”.

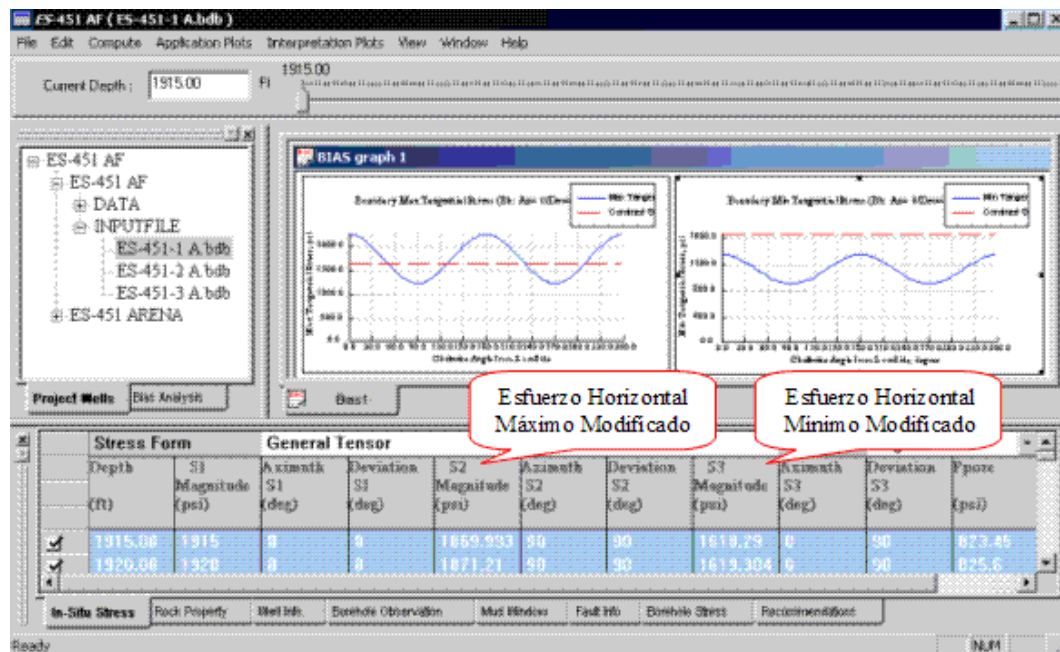


Figura 48. Entrada de **BIAS**. Columnas de valores de esfuerzos horizontales.

Metodológico

La siguiente figura muestra la salida del programa **BIAS** para los valores de los esfuerzos distribuidos en el hoyo, en función de aquellos esfuerzos modificados horizontales máximos y mínimos (figura 49):

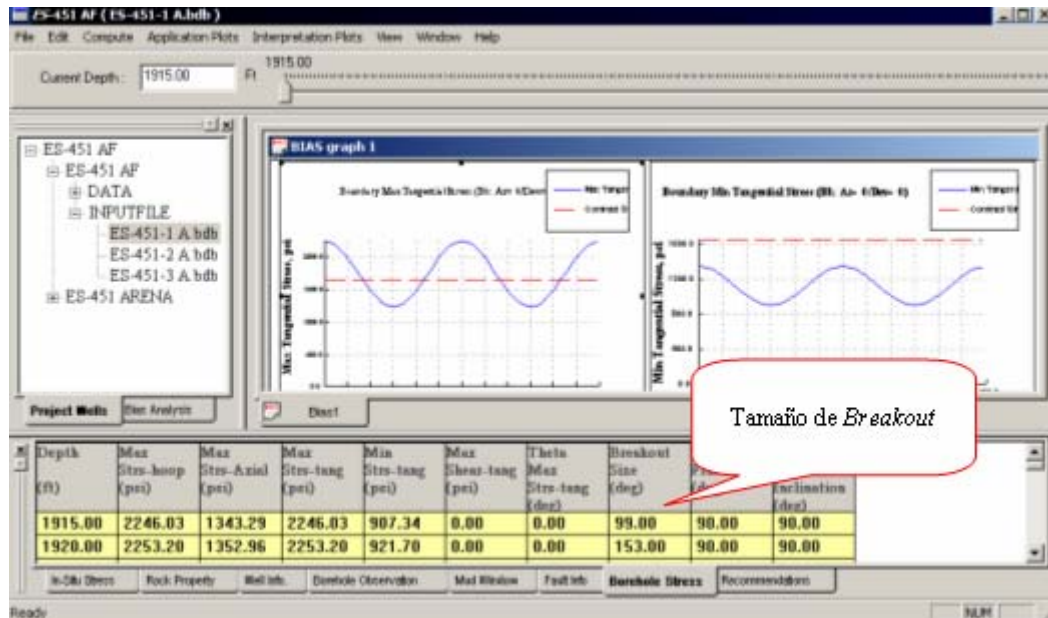


Figura 49. Salida de **BIAS**. Columna de valores de tamaño de “breakout”.

Basándose en dichos cambios, se procedió a construir curvas representativas que permitiesen ajustar las magnitudes de esfuerzos de las otras profundidades a lo largo de la trayectoria del pozo (Figura 50).

Esfuerzo Modificado vs. Esfuerzos

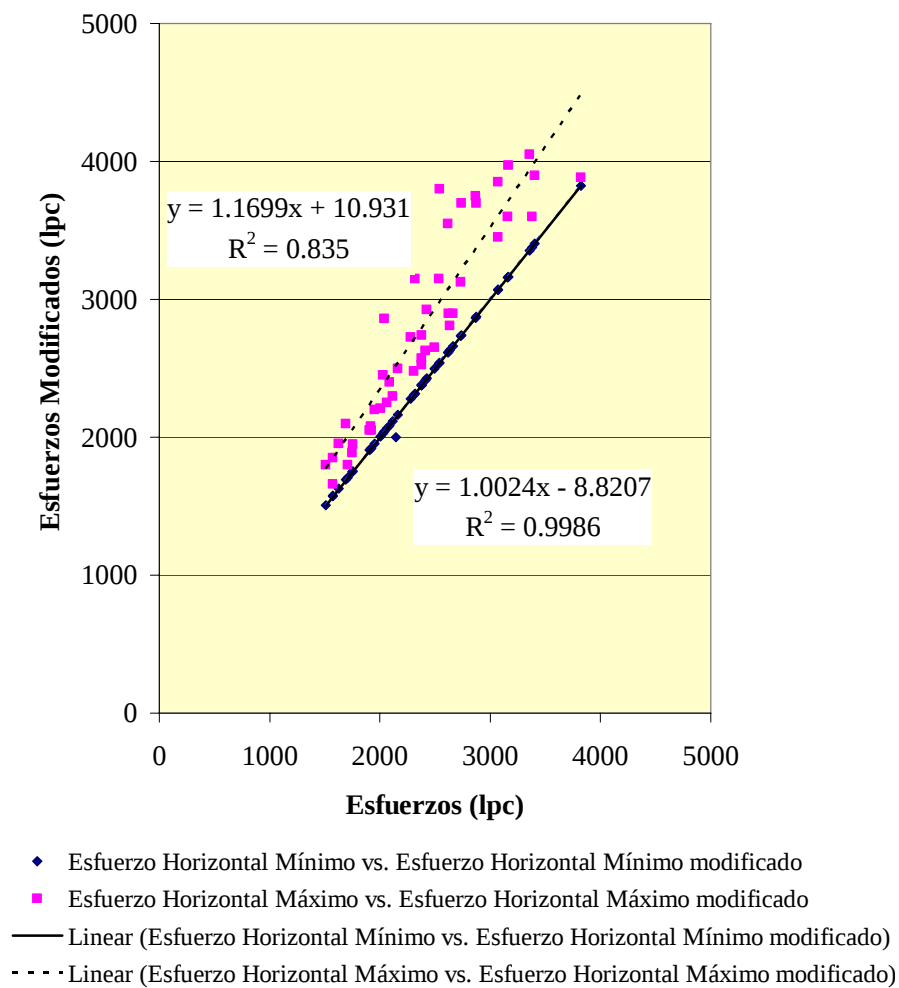


Figura 50. Gráfico de línea de tendencia del pozo ES-451.

Se verificó que los resultados arrojados de las tendencias, tanto del esfuerzo horizontal máximo modificado como del esfuerzo horizontal mínimo modificado fuesen razonables, de tal manera que se pudiese utilizar dichas ecuaciones de ajuste a lo largo de toda la profundidad del pozo. Para aquellos puntos muy alejados del ajuste se modificaron individualmente.

Se graficaron todas las profundidades contra sus respectivas magnitudes de esfuerzos modificados y presión de poro, para comprobar la validez del método de ajuste.

Evaluación de Estabilidad de Hoyos

El estudio de los parámetros y variables para la evaluación de la estabilidad de hoyos se realizó graficando las propiedades mecánicas y resistencia de las rocas de la formación, para todas las profundidades en cada uno de los pozos:

- “Profundidad vs. Esfuerzo vertical”.
- “Profundidad vs. Esfuerzo Horizontal Máximo”.
- “Profundidad vs. Esfuerzo Horizontal Mínimo”.

Ventana Operacional de Presión de Lodo

Tomando en cuenta las magnitudes de los esfuerzos distribuidos en el hoyo, obtenidas de la salida del programa **BIAS**, el mismo usa el criterio de presión de lodo mínima para el caso de que el esfuerzo tangencial menor sea el mínimo (Ecuación 34), y lo resuelve según el valor de la presión de confinamiento en cada punto de la formación. Una vez que el programa resuelve dicha ecuación para cada profundidad se obtienen las presiones críticas, las cuales dan lugar a la formación de fallas compresivas.

Metodológico

La solución para la presión máxima de lodo permitida para prevenir la falla de tensión dada por el programa. **BIAS**, asume que la resistencia a la tensión de la roca puede ser tratada como una constante en general, en vez de ser en función de la presión de confinamiento (Ecuación 36).

Las variables utilizadas para la construcción de la ventana operacional de cada pozo son:

- Peso de lodo máximo.
- Peso de lodo mínimo.
- Peso del lodo utilizado en la perforación del pozo correspondiente.
- Esfuerzo horizontal mínimo expresado en unidades de peso Lpg.
- “Caliper”.

Arenamiento

El diferencial de presión crítico es la diferencia entre la presión promedio o estática del yacimiento y la presión de fondo fluyente, la cual por encima dicho diferencial se espera la movilización de arenas no consolidadas durante la producción.

El diferencial de presión crítico se determinó asumiendo la condición de un hoyo abierto, sin ningún método de control de arena aplicado en sitio para detener la producción de las arenas. Asimismo, se asumió también la presencia de una sola fase de fluido con saturación de agua intersticial, la cual converge en las cavidades de la perforación siguiendo una geometría esférica.

El estudio de arenamiento para los pozos se realizó basándose en el concepto de diferencial de presión crítico en el programa de **BIAS**. Para ello, tomando ya los valores de los esfuerzos horizontales máximo y mínimo de la formación ya calibrados anteriormente, se procedió a modificar los valores de presión de lodo establecidos inicialmente, como datos de entrada al programa para buscar formar “*breakouts*” mínimo de 90 grados, como condición crítica para la producción de arena en cada zona productora. De esta manera, se logró obtener un aumento en los esfuerzos de corte mayores a los de la formación, para que pudiese ocurrir la falla del material con desprendimiento de las arenas y finos de la formación.

Obtención del Comportamiento Geomecánico del Área en General

A fin de establecer un comportamiento geomecánico y obtener una ventana operacional de presión de lodo segura que se ajustase a la mayor área del campo, dentro de la medida de las posibilidades, se procedió a:

- Detectar alguna semejanza entre los campos de esfuerzos de un pozo a otro, pertenecientes al Campo Socororo Este.
- Detectar alguna semejanza entre los campos de esfuerzos de un pozo a otro, pertenecientes al Campo Socororo Oeste.
- Verificar la posibilidad de acoplar los campos de esfuerzos pertenecientes a los campos Socororo Este y Oeste, para determinar una ventana operacional de presión de lodo común, que sirva como base para el diseño de operaciones de perforación y determinación de pozos futuros con menor índice de riesgo.

Metodológico

Para cada uno de los puntos mencionados anteriormente, se construyeron gráficas de profundidad versus parámetros geomecánicos, para mayor visualización del comportamiento mecánico de las rocas de la formación. El cotejo se realizó con las siguientes gráficas.

- “Profundidad vs. Esfuerzo horizontal máximo”.
- “Profundidad vs. Esfuerzo horizontal mínimo”.

La ventana operacional de presión de lodo representativa para el campo se obtuvo, siguiendo el procedimiento anterior.

Las variables utilizadas para la construcción de la ventana operacional son:

- Presión Mínima.
- Presión Máxima.
- Presión de Lodo.
- Esfuerzo Horizontal Mínimo.

CAPÍTULO V

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Análisis de los Problemas Operacionales

Las siguientes tablas contienen sólo la información general y problemas operacionales presentados durante la perforación, necesarios para el análisis geomecánico posterior (Tabla 26 y Tabla 27):

Tabla 26. Características de la perforación para los pozos del Campo Socororo Este.

Características Generales de la Perforación para los Pozos del Campo Socororo Este		
Pozo	ES-439	ES-451
Tiempo de perforación	25 de Abril de 1982 4 Jun de 1982	3 de Nov de 2002 2 de Dic de 2002
Peso del lodo de perforación (Lpg)	8.5	9.6
Diámetro de mecha al cual se tomaron los registros (pulg)	8.5	8.5
Intervalo perfilado (pies)	520-4890	1910-4420
Intervalo procesado (pies)	520-4890	1910-4420
Características de la formación perforada	Sin especificar	Lutíticas, areniscas intercaladas y trazas de arenisca y carbón.
Problemas Operacionales		
Tipo	Profundidad (pies)	
Apoyo	Ninguna	4396
Pérdida de circulación	Ninguna	1780, 2340

Tabla 27. Características de la perforación para los pozos del Campo Socororo Oeste.

Características Generales de la Perforación para los Pozos del Campo Socororo Oeste		
Pozo	ES-452	ES-457
Tiempo de perforación	9 de Dic de 2002 20 Jul de 2003	20 de Jun de 2004 22 de Jul de 2004
Peso del lodo de perforación (Lpg)	9.6	9.6
Diámetro de mecha al cual se tomaron los registros (pulg)	8.5	8.5
Intervalo perfilado (pies)	1200-4490	1200-4600
Intervalo procesado (pies)	1200-4490	1200-4600
Características de la formación perforada	Arcillosa	Lutíticas, areniscas intercaladas y trazas de arenisca y carbón.
Problemas Operacionales		
Tipo	Profundidad (pies)	
Apoyo	1158, 2462, 2865, 2916, 3005, 4326, 4514, 4528, 4531, 4452	Ninguna
Pérdida de Circulación y repaso	Ninguna	1020, 4369

El repaso de hoyos es aplicado por varias razones en el proceso de perforación de pozos; sin embargo, la más común de todas se realiza cuando una sección del hoyo no ha sido perforado con el tamaño requerido. Esto puede ocurrir debido al desgaste que ha sufrido la mecha durante las perforaciones anteriores respecto a su tamaño original, el cual no es fácilmente visible hasta que la misma es extraída de nuevo fuera del hoyo. Otra situación puede darse cuando las

Resultados

formaciones plásticas se expanden lentamente hacia el hoyo provocando pequeños cambios en el diámetro del mismo.

Para el caso del pozo ES-457, la pérdida de circulación fue originada después de un repaso, lo cual motiva a deducir que el debilitamiento de las paredes del hoyo haya sido causado por el repaso a esas mismas profundidades. Al ser así, los esfuerzos y las resistencias en dichos puntos se vieron afectados trayendo como consecuencia la alteración de las propiedades mecánicas en la formación, los cuales no se tomaron en cuenta para el análisis geomecánico puesto que pierden veracidad.

Por otra parte, para aquellas profundidades que presentaron pérdidas de circulación y apoyo, que no se encuentran dentro del intervalo de perfilaje no se consideraron tampoco en el estudio geomecánico.

Evaluación Petrofísica de las Formaciones

Para facilitar la evaluación petrofísica, se presentarán los resultados obtenidos (con las correcciones por arcillosidad e hidrocarburo liviano) de los cuatro pozos de forma estadística. Para cada uno de ellos se obtuvo los valores mínimo (*Min*) y máximo (*Max*), promedio (*Average*) y desviación estándar (*Std. Dev.*) de las curvas de rayos gamma (GR), volumen de lutita (SND_{SH}), porosidad (SND_{POR}), saturación de agua (SND_{SW}) y resistividad (LLD, M2RX o ATH90 según sea la compañía que tomó el registro petrofísico).

Los promedios resultantes sólo dan una idea de los valores que conforman cada curva a las diversas profundidades mas no una lectura que precise tipo de litología o volúmenes de lutita ni magnitudes de porosidad, saturación y porosidad de la formación. La desviación estándar generada por el programa de análisis indica la dispersión del conjunto de datos: mientras mayor es la desviación, mayor es el grado de dispersión o variabilidad.

Resultados

La ventana de curvas estadísticas para el pozo ES-439 muestra una lectura de rayos gamma promedio de aproximadamente 76 gAPI, un volumen de lutita de 46%, una porosidad de 12%, una saturación de agua de 72% y una resistividad de 4 ohm/m; desde una profundidad de 520 pies hasta 4890 pies (Figura 51).

XTF Curve Statistics									
File:	ES-439.xtf	(	482.00-	4942.00)	Print	Graphic			
Start:	520.00	End:	4890.00	Top/Bot Live	Apply	Compute	Cancel		
Curve	Levels	Empty	Missed	Top Live	Bottom Live	Min	Max	Average	Std.Dev.
GR	8741	0	0	520.000	4890.000	16.923	148.072	76.4980	19.8109
SNDSh	8741	0	0	520.000	4890.000	0.000	100.000	46.0530	22.3259
SNDPOR	8741	0	0	520.000	4890.000	0.000	43.197	12.1493	9.8830
SNDSh	8741	0	0	520.000	4890.000	14.042	100.000	71.5320	21.8947
LLD	8741	0	0	520.000	4890.000	0.205	39.634	3.9138	2.1481

Figura 51. Resultado estadístico obtenido del programa *SANDTM* para el pozo ES-439.

Del pozo ES-451 se observa una lectura de rayos gamma promedio de aproximadamente 86 gAPI, un volumen de lutita de 74%, una porosidad de 5%, una saturación de agua de 94% y una resistividad de 5 ohm/m; desde una profundidad de 1910 pies hasta 4420 pies (Figura 52).

XTF Curve Statistics									
File:	ES-451.xtf	(	1900.00-	4422.00)	Print	Graphic			
Start:	1910.00	End:	4420.00	Top/Bot Live	Apply	Compute	Cancel		
Curve	Levels	Empty	Missed	Top Live	Bottom Live	Min	Max	Average	Std.Dev.
GR	10041	0	0	1910.000	4420.000	18.886	183.815	85.7093	18.3805
SNDSh	10041	0	0	1910.000	4420.000	0.000	100.000	73.9913	31.5324
SNDPOR	10041	0	0	1910.000	4420.000	0.000	37.918	5.4808	9.9937
SNDSh	10041	0	0	1910.000	4420.000	0.177	100.000	94.1355	15.1625
M2RX	10041	0	0	1910.000	4420.000	0.768	1929.324	5.0934	60.5156

Figura 52. Resultado estadístico obtenido del programa *SANDTM* para el pozo ES-451.

Resultados

La lectura de rayos gamma promedio para el pozo ES-452 es de aproximadamente 83 gAPI, un volumen de lutita de 73%, una porosidad de 5%, una saturación de agua de 94% y una resistividad de 5 ohm/m; desde una profundidad de 1200 pies hasta 4490 pies (Figura 53).

XTF Curve Statistics									
File:	ES-452.xtf	(	1088.75-	4531.00)	Print	Graphic			
Start:	1200.00	End:	4490.00	Top/Bot Live	Apply	Compute	Cancel		
Curve	Levels	Empty	Missed	Top Live	Bottom Live	Min	Max	Average	Std.Dev.
GR	6581	0	0	1200.000	4490.000	14.999	134.080	82.9154	18.9851
SND SH	6581	0	0	1200.000	4490.000	0.000	100.000	72.8666	27.5596
SND POR	6581	0	0	1200.000	4490.000	0.000	39.196	5.3529	9.4283
SND SW	6581	0	0	1200.000	4490.000	0.167	100.000	93.6379	18.5172
M2RX	13161	0	0	1200.000	4490.000	0.971	1951.195	4.7562	26.0043

Figura 53. Resultado estadístico obtenido del programa *SANDTM* para el pozo ES-452.

Para el pozo ES-457 se obtuvo una lectura de rayos gamma promedio de aproximadamente 90 gAPI, un volumen de lutita de 77%, una porosidad de 5%, una saturación de agua de 94% y una resistividad de 3 ohm/m; desde una profundidad de 1200 pies hasta 4600 pies (Figura 54).

XTF Curve Statistics									
File:	ES-457.xtf	(	1102.00-	4685.00)	Print	Graphic			
Start:	1200.00	End:	4600.00	Top/Bot Live	Apply	Compute	Cancel		
Curve	Levels	Empty	Missed	Top Live	Bottom Live	Min	Max	Average	Std.Dev.
GR	6801	0	0	1200.000	4600.000	24.928	157.440	89.8068	19.0631
SND SH	6801	0	0	1200.000	4600.000	0.000	100.000	76.8064	28.1879
SND POR	6801	0	0	1200.000	4600.000	0.000	33.333	5.0247	8.3015
SND SW	6801	0	0	1200.000	4600.000	10.316	100.000	93.6675	13.9069
AHT90	6801	0	0	1200.000	4600.000	0.921	90.900	3.0324	4.0161

Figura 54. Resultado estadístico obtenido del programa *SANDTM* para el pozo ES-457.

Resultados

La siguiente tabla muestra las curvas que se encuentran en los registros petrofísicos obtenidos (Tabla 28):

Tabla 28. Curvas petrofísica.

Pista	Nombre de la Pista	Curvas
1	Mecha y calibre	Calibre (6-16 pulg) Broca (6-16 pulg) GR (0-150 API)
2	Resistividad de la formación	Resistividad a 120, 90, 60, 30, 20 y 10 pulgadas de profundidad de investigación en escala logarítmica (0.2-2000 ohm/m)
3	Porosidad de la formación	Densidad (1.65-2.65 gr/cc) Neutrón (0-60% en unidades de porosidad)
4	Saturación de agua	Saturación de agua (0-100%) DTS (Escala invertida: 540-40 μ s/pie) DTC (escala invertida: 540-40 μ s/pie)
5	Fluidos	Fluidos (0-50%): agua e hidrocarburos
6	Litología y porosidad	Litología (0-100%): lutita, arena, lignito y porosidad

A continuación se muestran las curvas de los registros petrofísicos con profundidades en los topes N1, N2 y O1 de la formación. Estos topes fueron seleccionados sólo con fines visuales para que el lector tenga un mejor entendimiento del grado de dispersión que puede tener cada una de las curvas que describen la petrofísica de los pozos respecto a los valores promedios.

Resultados

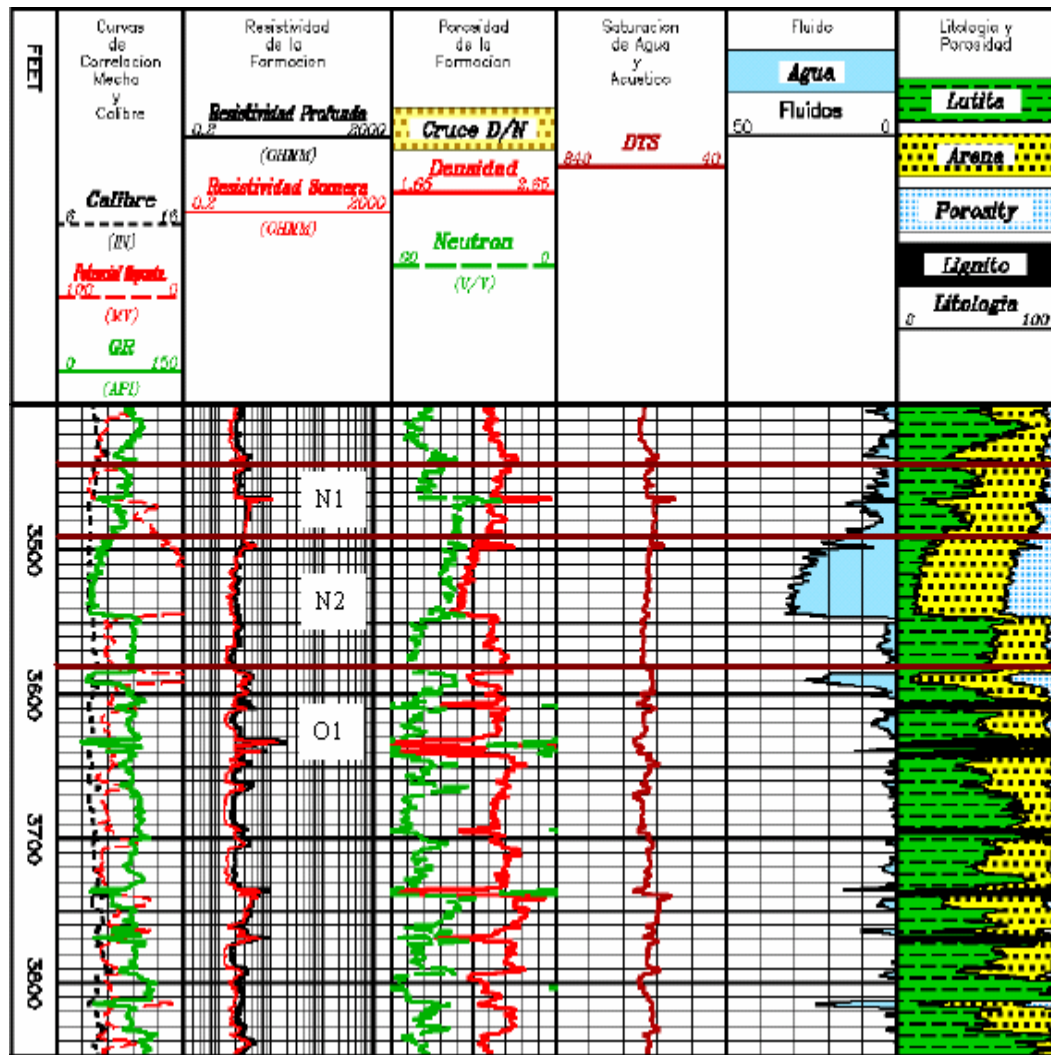


Figura 55. Registro petrofísico obtenido del programa SANDTM para el pozo ES-439

El pozo ES-439 atraviesa una formación de areniscas arcillosas con intercalaciones de lignitos y pocos cuerpos de arenas limpias definidas (Figura 55). Presenta una resistividad bastante baja, la cual infiere ausencia de hidrocarburos. Su porosidad se mantiene casi constante a lo largo de toda la profundidad. La saturación de agua es baja para aquellas arenas con alto contenido lutítico, estando por el orden del 14%.

Resultados

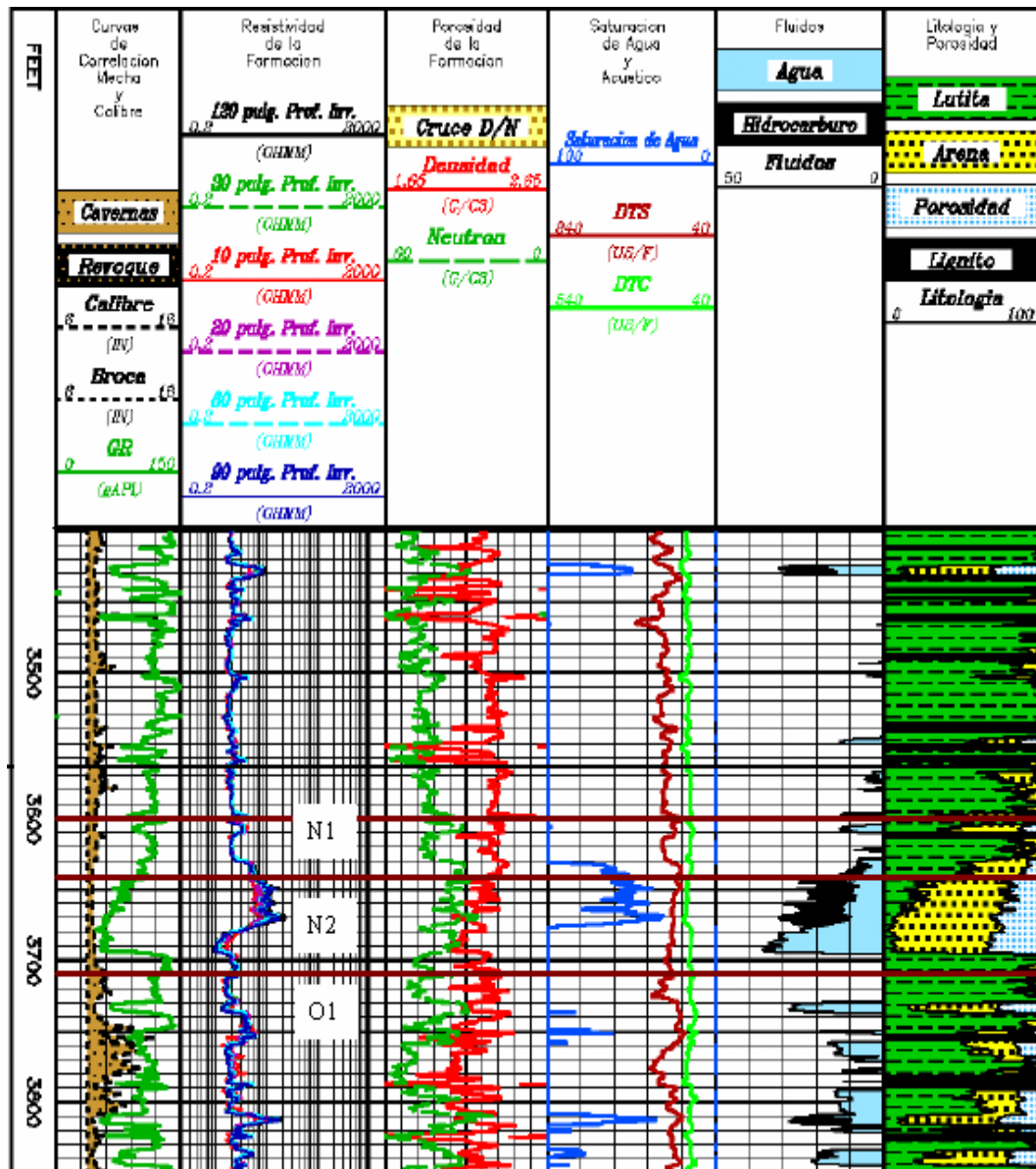


Figura 56. Registro petrofísico obtenido del programa SANDTM para el pozo ES-451

El pozo ES-451 atraviesa formaciones altas en arcillosidad y contenido lutítico con presencia de intercalaciones de lignitos (Figura 56). Su porosidad promedio es muy baja (5%). Posee zonas de gas, las cuales se identificaron por el entrecruce de las curvas de porosidad, aproximadamente a los 2960 y 4100 pies de profundidad, además de zonas de petróleo contenidos en los pocos cuerpos de arenas limpias. Su resistividad toma valores más altos ante la presencia de hidrocarburos, alcanzando los 60 ohm/m en los 2840 pies de profundidad.

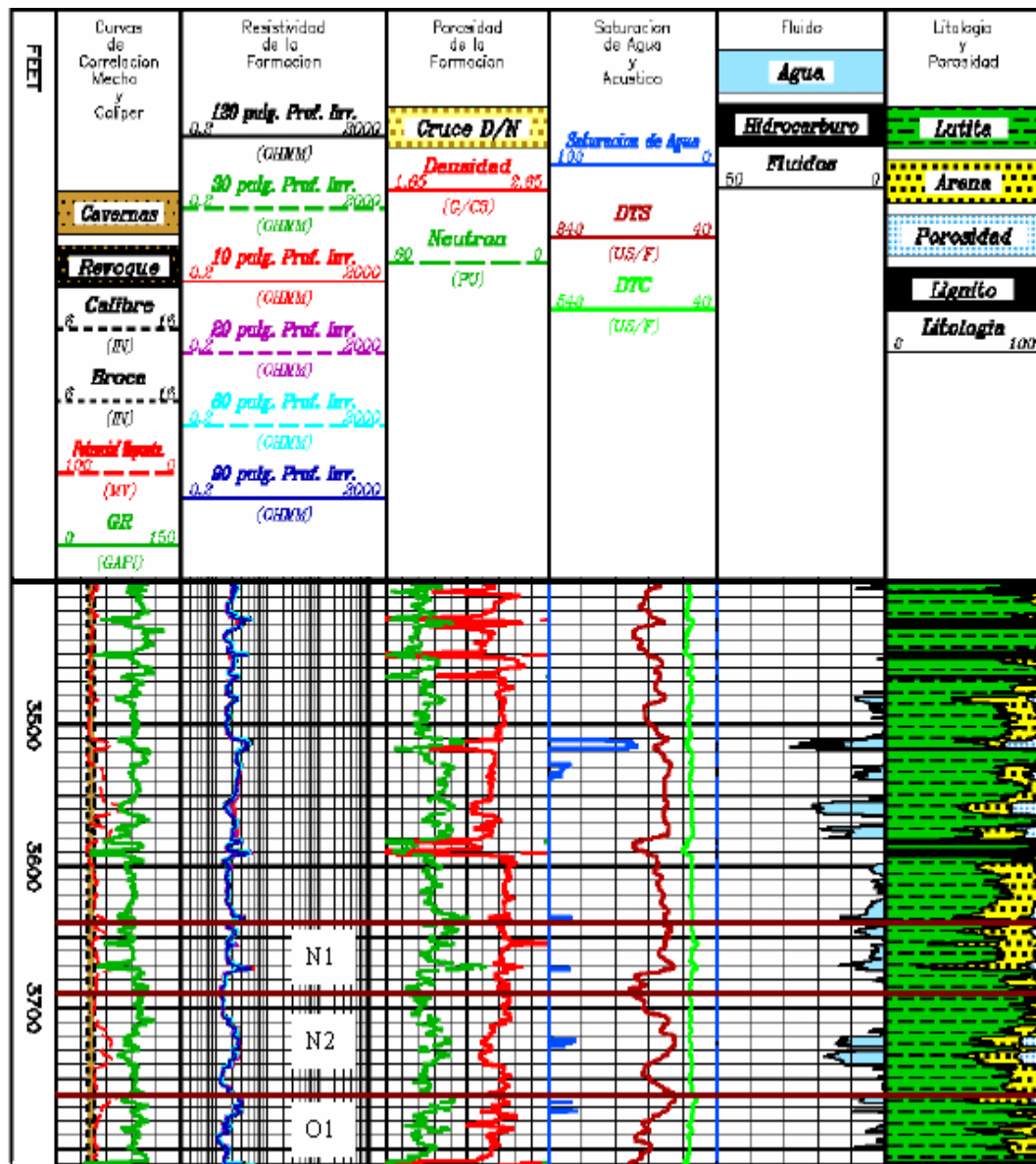


Figura 57. Registro petrofísico obtenido del programa SANDTM para el pozo ES-452

El pozo ES-452 atraviesa, igualmente, formaciones altas en arcillosidad y contenido lutítico con presencia de intercalaciones de lignitos (Figura 57). Su porosidad promedio es muy baja (5%). Posee zonas de gas a los 2250, 2500, 2570, 3000 y 3100 pies de profundidad, además de petróleo contenidos en los pocos cuerpos de arenas limpias. Su resistividad toma valores más altos ante la presencia de hidrocarburos, alcanzando los 200 ohm/m a los 3100 pies de profundidad.

Resultados

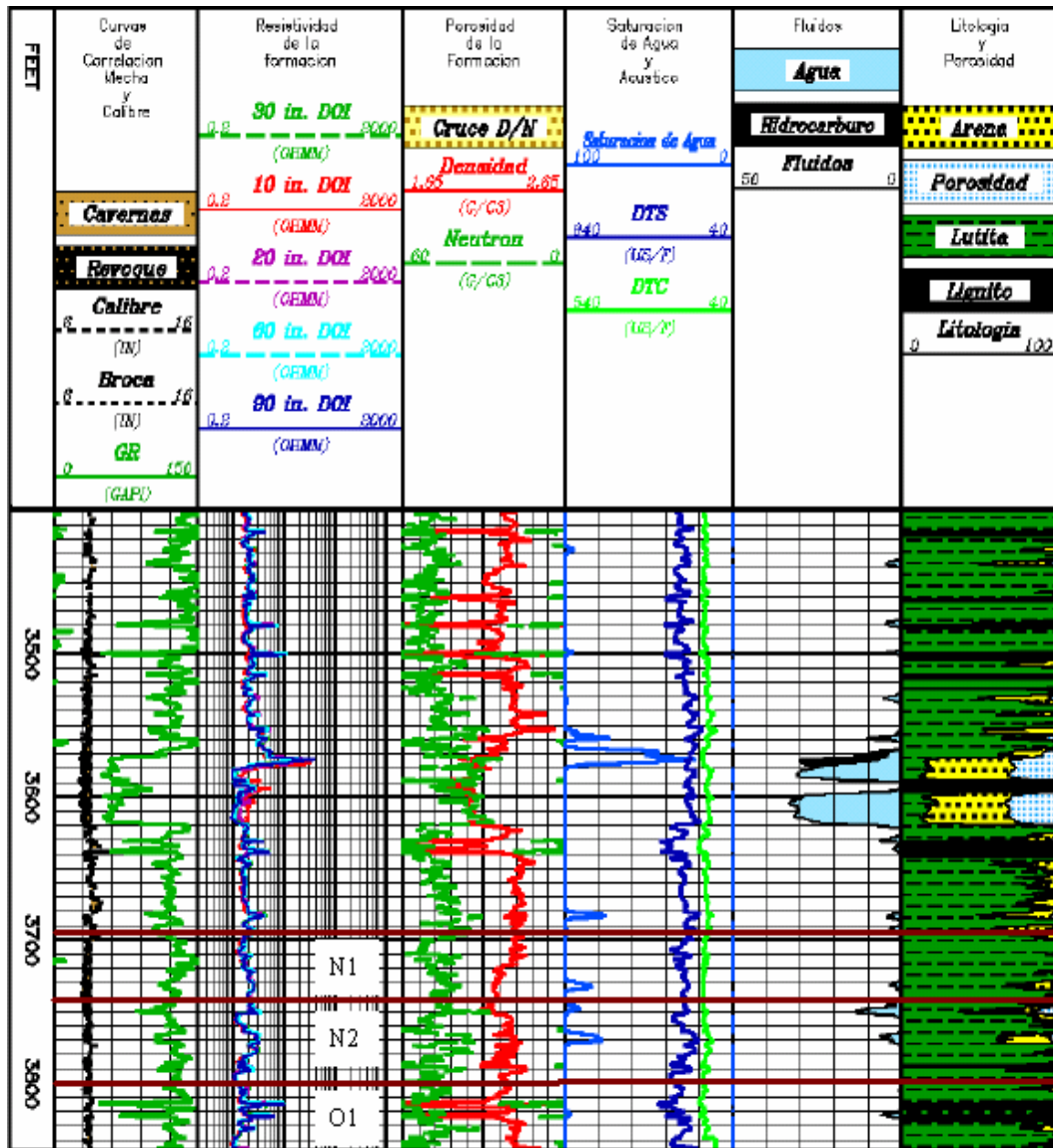


Figura 58. Registro petrofísico obtenido del programa SANDTM para el pozo ES-457

Similar al pozo anterior, el pozo ES-457 atraviesa formaciones altas en arcillosidad y contenido lutítico con presencia de intercalaciones de lignitos (Figura 58). Su porosidad promedio es muy baja (5%). Posee zonas de gas a los 2360, 3200, 3600 pies de profundidad, además de petróleo contenidos en los pocos cuerpos de arenas limpias. Su resistividad para una profundidad de investigación de 90 pulgadas, toma valores más altos ante la presencia de hidrocarburos, alcanzando los 300 ohm/m a los 4325 pies de profundidad.

Resultados

Además se puede observar en la primera pista de cada uno de los pozos “caliper” mayor que tamaño de mecha. Esta diferencia es un indicativo de que ocurrieron derrumbes.

En vista que los resultados obtenidos de la evaluación petrofísica son similares entre cada uno de los pozos, el siguiente análisis es válido tanto para el Campo Socororo Este como el Campo Socororo Oeste:

Cálculo del Volumen de Lutita

Del volumen calculado de lutita, basado en la curva de rayos gamma, se deduce que la presencia de arenas limpias es bastante baja. Son muy pocos los intervalos que se encuentran dentro del rango de 5 a 20 gAPI correspondiente a arenas limpias. De los registros se pueden observar que para todos los pozos las curvas de los rayos gamma reflejan alta radiactividad superando los 75 gAPI.

A pesar de la confiabilidad del registro de los rayos gamma, el volumen de arcilla calculado no es el mejor estimado. La herramienta no sólo detecta las arcillas sino también cualquier elemento radiactivo presente alterando de cierta manera el resultado final.

La cantidad de arcilla representada en porcentaje supera el 70% del total de material sólido existente con excepción del pozo ES-439 que presentó un 46%.

Estimación de la Porosidad

Las curvas de densidad y neutrón muestran tanto la porosidad como las zonas de gas en distintos intervalos de profundidad. La porosidad entre el Campo Socororo Este y Oeste es considerada baja y varía en un rango de 5 a 12 %, indicando baja capacidad de almacenamiento de fluidos de la formación. Las

Resultados

zonas de gas se encuentran al entrecruzarse ambas curvas, es decir, cuando de los registros de densidad y neutrón se leen porosidades aparentes de magnitudes por debajo de los 2.15 g/cc y 30 %, respectivamente

Determinación de la Saturación de Agua

La resistividad se ve afectada por el intercambio de iones como consecuencia de la transición de filtrado de lodo a fluidos de la formación, al mismo tiempo que va cambiando la profundidad de invasión. Al invadir el filtrado del lodo de perforación a la formación porosa y permeable se produce en primera instancia, un reemplazo total de los fluidos originales más próximo al hoyo, detrás del revoque (zona lavada). Gradualmente, dicho filtrado irá alcanzando mayores diámetros de profundidad (zona de transición) hasta que finalmente deja de desplazarse (zona virgen). Para el caso particular del pozo ES-439 la resistividad se mantiene dentro de un rango constante, puesto que sólo detecta agua como fluido de formación. En cambio para los demás pozos, se puede observar cómo la resistividad aumenta al detectar presencia de hidrocarburos.

Identificación de la Litología y Fluidos de la Formación

De los resultados obtenidos del cálculo de arcillosidad, porosidad y saturación de agua se puede decir que existe dominancia de lutitas intercaladas con trazas de areniscas y lignitos. Estas características litológicas son propias de las eras geológicas Cuaternario y Terciario en las formaciones Merecure y Oficina. Además, la formación presenta una porosidad baja y una saturación de agua alta. En algunos intervalos de arena se evidencia presencia de petróleo y gas.

Estimación de la Presión de Poros

La presión de poros estimada para cada uno de los pozos se calculó considerando una serie de gradientes de presión, que varía en función del tipo y volumen de fluidos de la formación. Por ello, la presión de poros es proporcional a la presión hidrostática del fluido alojado (agua, petróleo y gas) en los poros del material rocoso, la cual incrementa con la profundidad al verse sometida a mayores cargas litostáticas.

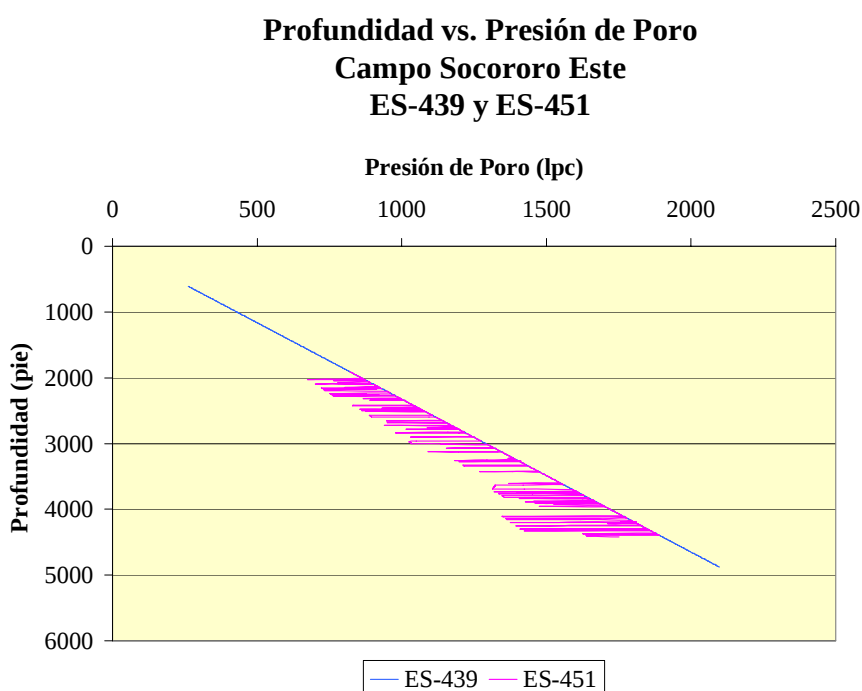


Figura 59. Profundidad vs. Presión de poros para el Campo Socororo Este

La gráfica de “Profundidad vs. Presión de Poros” correspondiente al Campo Socororo Este muestra la presión hidrostática ejercida por los fluidos encontrados de cada uno de los pozos en estudio. La presión para el pozo ES-439 varía según el gradiente del agua. En cambio, el pozo ES-451 presenta una curva de presión de poros con variaciones dadas por un gradiente de presión que cambia según los volúmenes de agua, petróleo y gas en función de la profundidad (Figura 59).

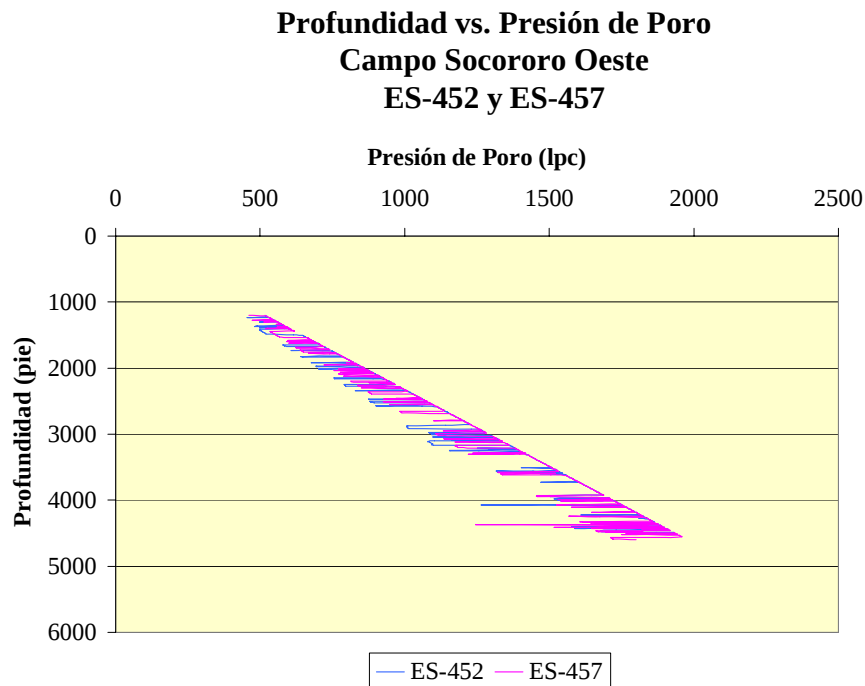


Figura 60. Profundidad vs. Presión de poros para el Campo Socororo Oeste

La gráfica de “Profundidad vs. Presión de Poros” correspondiente al Campo Socororo Oeste muestra la presión hidrostática ejercida por los fluidos encontrados en los pozos ES-452 y ES-457. Ambos pozos, por su cercana ubicación uno respecto al otro, presentan características petrofísicas similares por lo que resulta un comportamiento de presión de poros muy parecido (Figura 60).

Estimación de Propiedades Mecánicas y Resistencia

Del programa de evaluación de las propiedades mecánicas y resistencia de la roca **MECHPROPTM** se obtuvo la curva de la relación de Poisson como requisito de entrada para ejecutar los programas complementarios **PRELMPTM**, **LMPTM** y **LMP_SANDTM**; resultando así, las siguientes curvas de registro (Tabla 29):

Tabla 29. Curvas de módulos elásticos y resistencia

Pista	Curvas
1	Calibre (8-18 pulg) Broca (8-18 pulg) GR (0-150 API)
2	Relación de Poisson (0-0.5 adimensional) Módulo de Corte (0-0.5 MLpc) Módulo de Young (0-0.5 MLpc)
3	Biot Alfa (adimensional) Resistencia a la Compresión (0-10000 KLpc) Cohesión (MLpc)
4	Angulo de Fricción : 40 y 80 MPa de Confinamiento (0-60 grados) Angulo de Fricción FANGCV (0-60 grados)
5	DTC (escala invertida: 500-0 μ s/pie) DTS (escala invertida: 500-0 μ s/pie)
6	Litología (0-100%): lutita, arena, lignito y porosidad. Gradiente de Presión PPGC (0-1 Lpc/pie)

Seguidamente se muestran los registros de los módulos elásticos y resistencia de la roca para los pozos en estudio, los cuales se obtuvieron de las curvas de salida de los programas antes mencionados:

Resultados

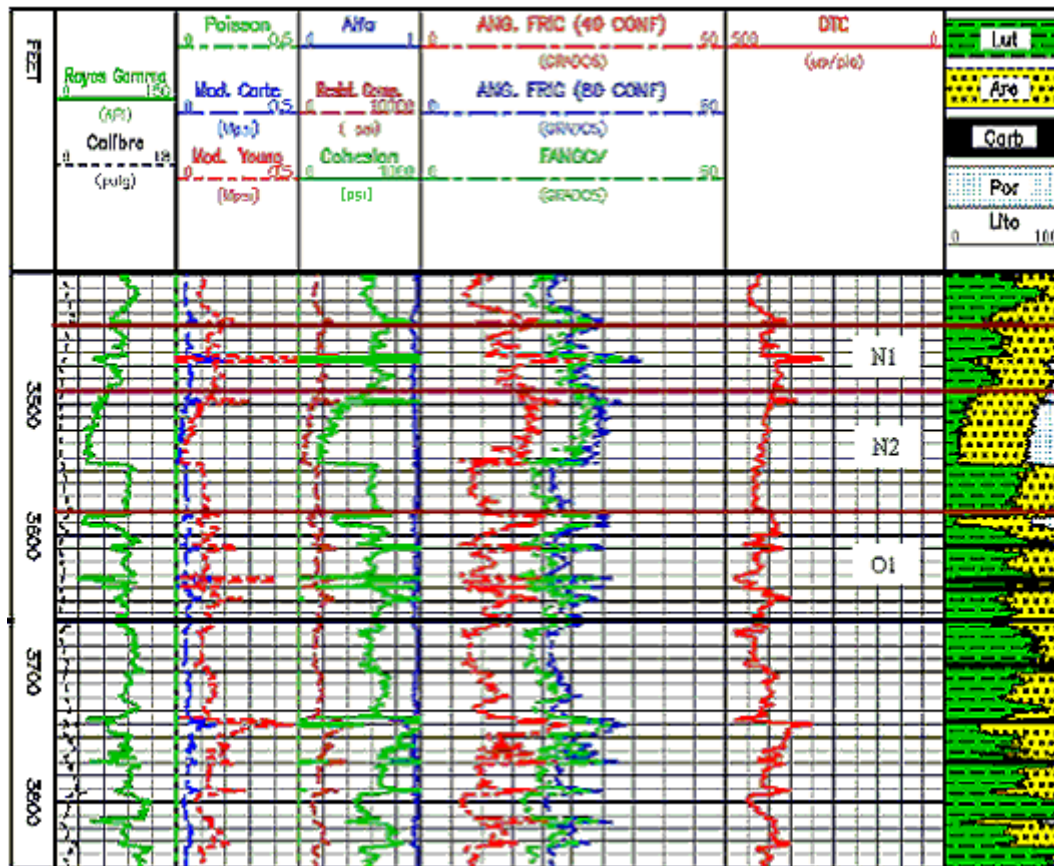


Figura 61. Registro de módulos elásticos y resistencia obtenido del programa *MECHPROP™* para el pozo ES-439.

El pozo ES-439 muestra en su registro de curvas un calibre que se mantiene dentro de las 8 y 10 pulgadas de diámetro, a excepción de los primeros pies de profundidad indicando mayores derrumbes para la zona somera. Debido a la falta de la curva DTS en el registro acústico del pozo, no se obtuvo una curva para el módulo de Poisson y siendo la misma un parámetro de entrada a los programas de esta sección, fue necesario asumir para todo el pozo un valor de 0.4. El promedio del módulo de Young es de 0.11 MLpc, la resistencia a la compresión UCS 1353 Lpc, el ángulo de fricción 25 grados, la fuerza de cohesión 511 Lpc y el coeficiente de Biot 0.94. La curva de PPGC es considera para toda la profundidad 0.433 Lpc/pie (Figura 61).

Resultados

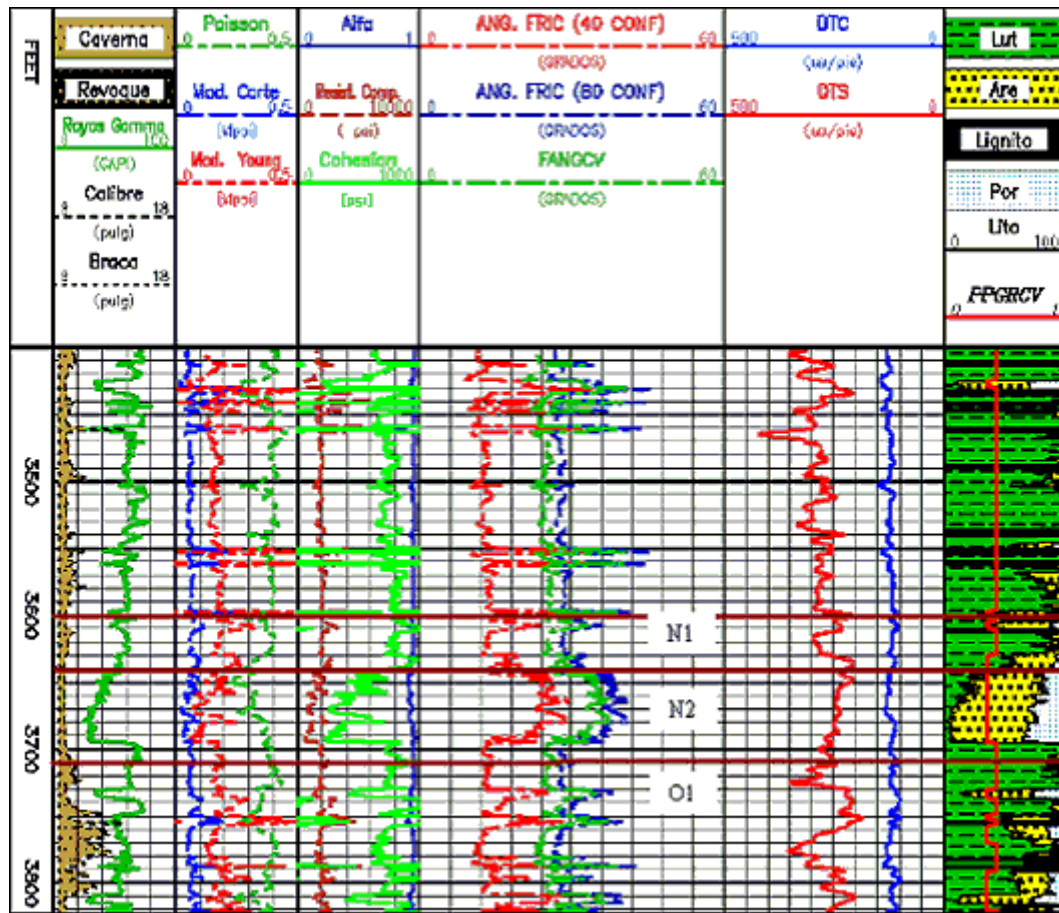


Figura 62. Registro de módulos elásticos y resistencia obtenido del programa *MECHPROP™* para el pozo ES-451.

El pozo ES-451 muestra en su registro de curvas un calibre que se mantiene dentro de las 8 y 10 pulgadas de diámetro, con presencia de un derrumbe apreciable aproximadamente a los 3750 pies y 3800 pies de profundidad. De la data acústica de DTC y DTS resulta una curva para el módulo de Poisson un valor promedio de 0.39. El promedio del módulo de Young es de 0.16 MLpc, la resistencia a la compresión UCS 1847 Lpc, el ángulo de fricción 26 grados, la fuerza de cohesión 700 Lpc y el coeficiente de Biot 0.94 (Figura 62).

Resultados

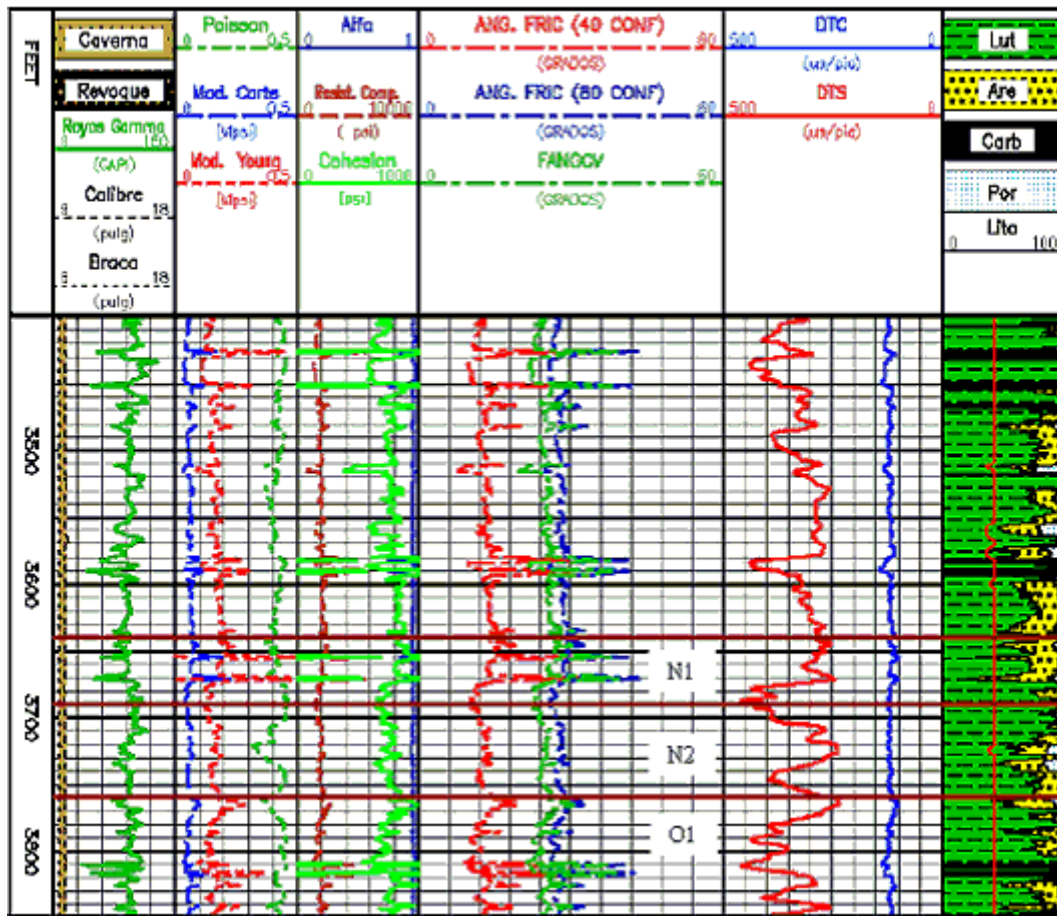


Figura 63. Registro de módulos elásticos y resistencia obtenido del programa *MECHPROP™* para el pozo ES-452.

El pozo ES-452 muestra en su registro de curvas un calibre que se mantiene dentro de las 8 y 10 pulgadas de diámetro, con presencia de un derrumbe apreciable aproximadamente entre los 4250 pies y 4320 pies de profundidad. De la data acústica de DTC y DTS resulta una curva para el módulo de Poisson un valor promedio de 0.43. El promedio del módulo de Young es de 0.14 MLpc, la resistencia a la compresión UCS 1847 Lpc, el ángulo de fricción 24 grados, la fuerza de cohesión 640 Lpc y el coeficiente de Biot 0.95 (Figura 63).

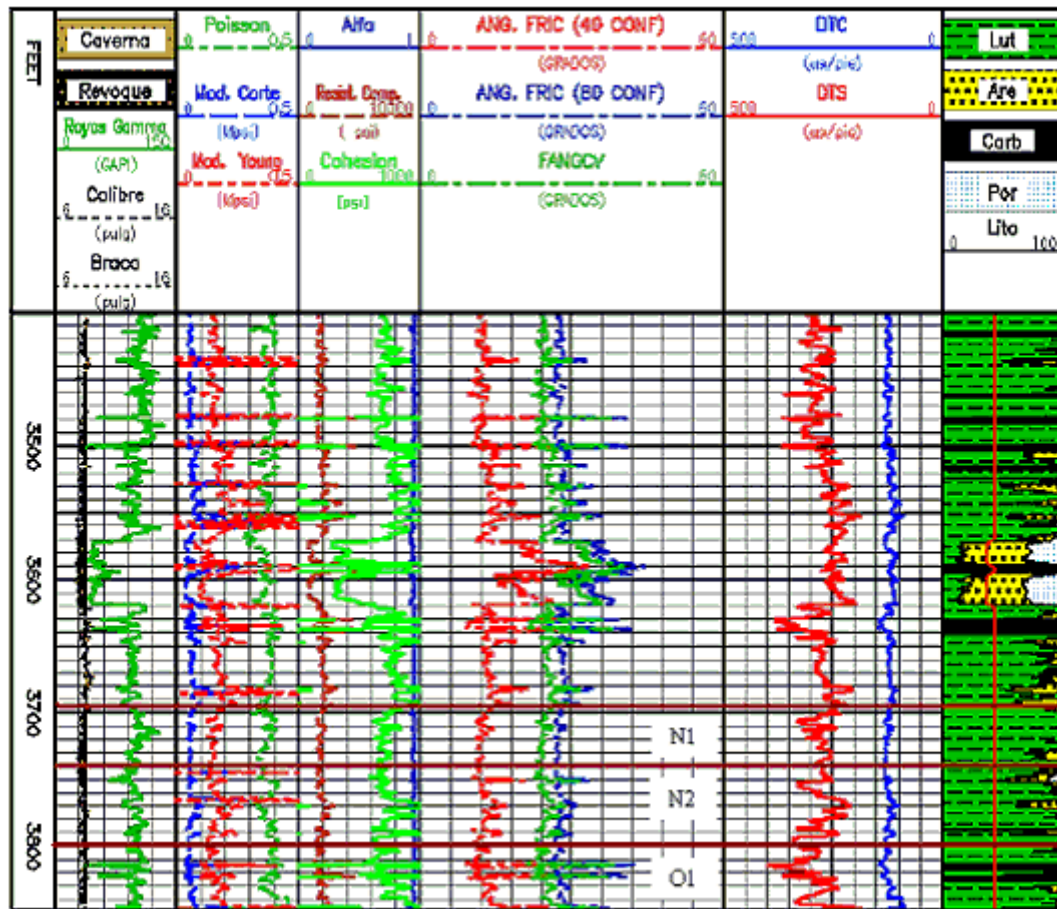


Figura 64. Registro de módulos elásticos y resistencia obtenido del programa *MECHPROP™* para el pozo ES-457.

El pozo ES-457 muestra en su registro de curvas un calibre que no presenta prácticamente cavernas a lo largo de toda su profundidad. De la data acústica de DTC y DTS resulta una curva para el módulo de Poisson un valor promedio de 0.39. El promedio del módulo de Young es de 0.17 MLpc, la resistencia a la compresión UCS 1770 Lpc, el ángulo de fricción 25 grados, la fuerza de cohesión 685 Lpc y el coeficiente de Biot 0,94 (Figura 64).

Resultados

En vista que los resultados estimados de las propiedades mecánicas y resistencia del material rocoso adyacente a cada uno de los pozos son similares el siguiente análisis es válido tanto para el Campo Socororo Este como para el Campo Socororo Oeste:

El módulo de Young presenta un aumento ligero con la profundidad. Este comportamiento evidencia aumento de la resistencia de la roca y la consolidación de la misma con la profundidad.

La relación de Poisson presenta para todos los casos un valor alrededor de 0.4, el cual indica que se está en presencia de una roca conformada por materiales elásticos y considerada no consolidada. En general, la relación de Poisson de una formación tiende disminuir con la profundidad, la cual puede deberse a que el material geológico cerca de la superficie es más joven y más compresible que a mayores profundidades. En estas últimas se evidencia aumento de la resistencia de la roca y consolidación de la misma.

Como el módulo de Young y la relación de Poisson son dependientes de la anisotropía litológica, las fluctuaciones de las magnitudes para ambas curvas se deben a la composición del material de las formaciones.

Los valores promedios obtenidos de la resistencia a la compresión UCS están por debajo de los 4000 Lpc en cada uno de los pozos, indicando que es una formación con muy baja resistencia. Los mismos aumentan con la profundidad debido a la consolidación de la formación.

El ángulo de fricción de la roca depende del tamaño, forma, distribución, densidad y tipos de materiales presentes en la misma y es, por ello, que el ángulo presentado para los pozos en las areniscas es mayor que en las lutitas, y tratándose de saturaciones de fluidos de la formación, dicho ángulo es sensible a las variaciones de la presión de poros. Al igual que las propiedades descritas éste se ve afectado ligeramente por la profundidad como consecuencia del incremento de

Resultados

los esfuerzos normales ejercidos por capas litostáticas superiores. El promedio del ángulo de fricción (25 grados) indica que se está ante la presencia de lutitas (30 grados) y areniscas no consolidadas (15 grados).

La fuerza de cohesión definida para los pozos de ambos campos muestra un aumento con la profundidad. Suponiendo la poca o la ausencia de material cementante entre granos, la poca consolidación de los mismos en las profundidades someras se debe fundamentalmente a que se encuentran en niveles freáticos no sometidos a altos tectonismos.

El coeficiente de Biot depende de las compresibilidades de la matriz y de todo el cuerpo rocoso. El valor promedio para los pozos en estudio de ambos campos es cercano a 1, correspondiente a las rocas no consolidadas.

El comportamiento de las curvas de relación de Poisson, módulo de Young, coeficiente de Biot, resistencia a la compresión y fuerza de cohesión muestran una disminución en presencia de arenas, comparadas con el de las lutitas. En realidad, es difícil deducir qué tipo de roca es más resistente cuando uno se encuentra intercalado con otro, sobre todo, tratándose de rocas no consolidadas.

A continuación se presentan las gráficas de las propiedades mecánicas y resistencia de la roca, explicadas anteriormente, para los campos Socororo Este y Oeste:

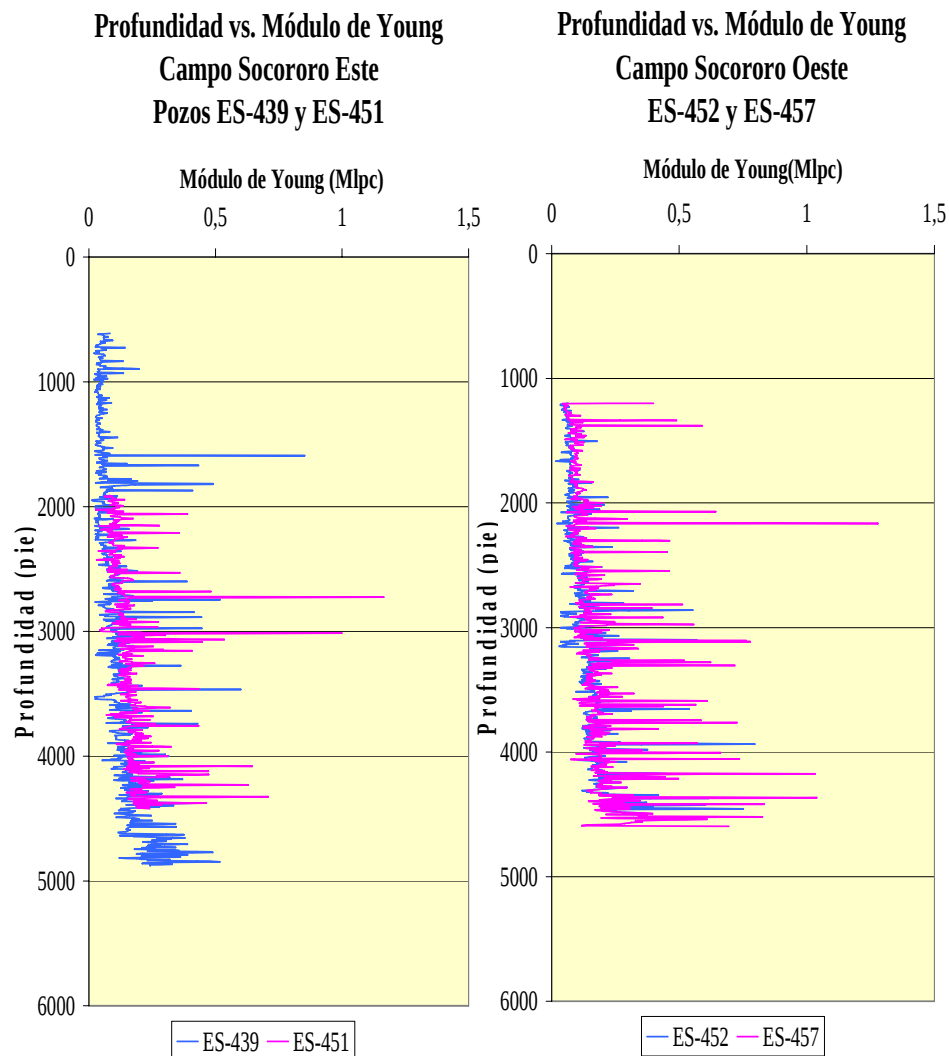


Figura 65. Gráfica de Profundidad vs. Módulo de Young para los Campos Socororo Este y Oeste.

El comportamiento de las gráficas “Profundidad vs. Módulo de Young” para los campos Socororo Este y Oeste presentan la misma tendencia. La gráfica permite la mejor visualización del efecto que causa la consolidación de las capas litostáticas al módulo de Young a medida que aumenta la profundidad (Figura 65).

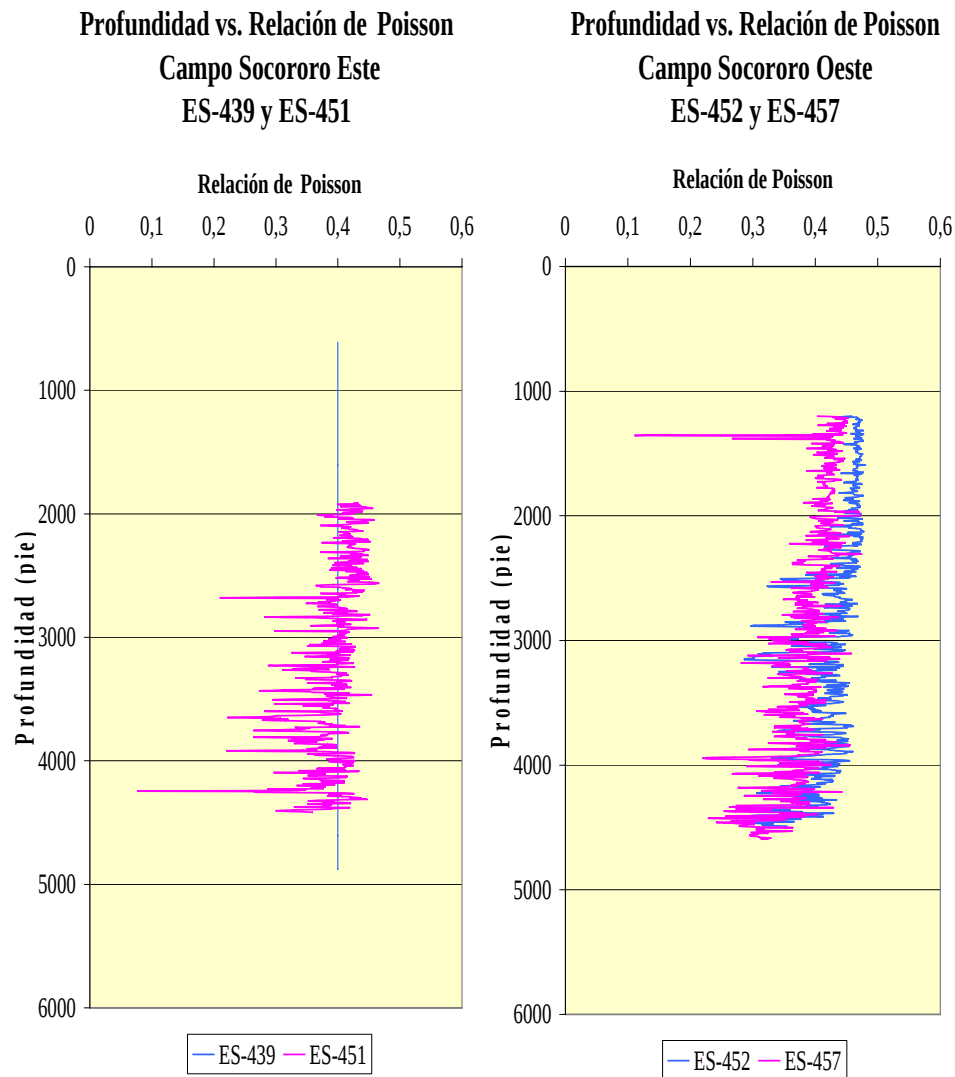


Figura 66. Gráfica de Profundidad vs. Módulo de Poisson para los Campos Socororo Este y Oeste.

El comportamiento de las gráficas “Profundidad vs. Relación de Poisson” para los campos Socororo Este y Oeste son similares, a excepción del pozo ES-439 que permanece constante a lo largo de la profundidad. Como se mencionó anteriormente, la falta de información acústica condujo a que se asumiera un valor que estuviese dentro del promedio de los demás pozos en estudio (0.4) (Figura 66).

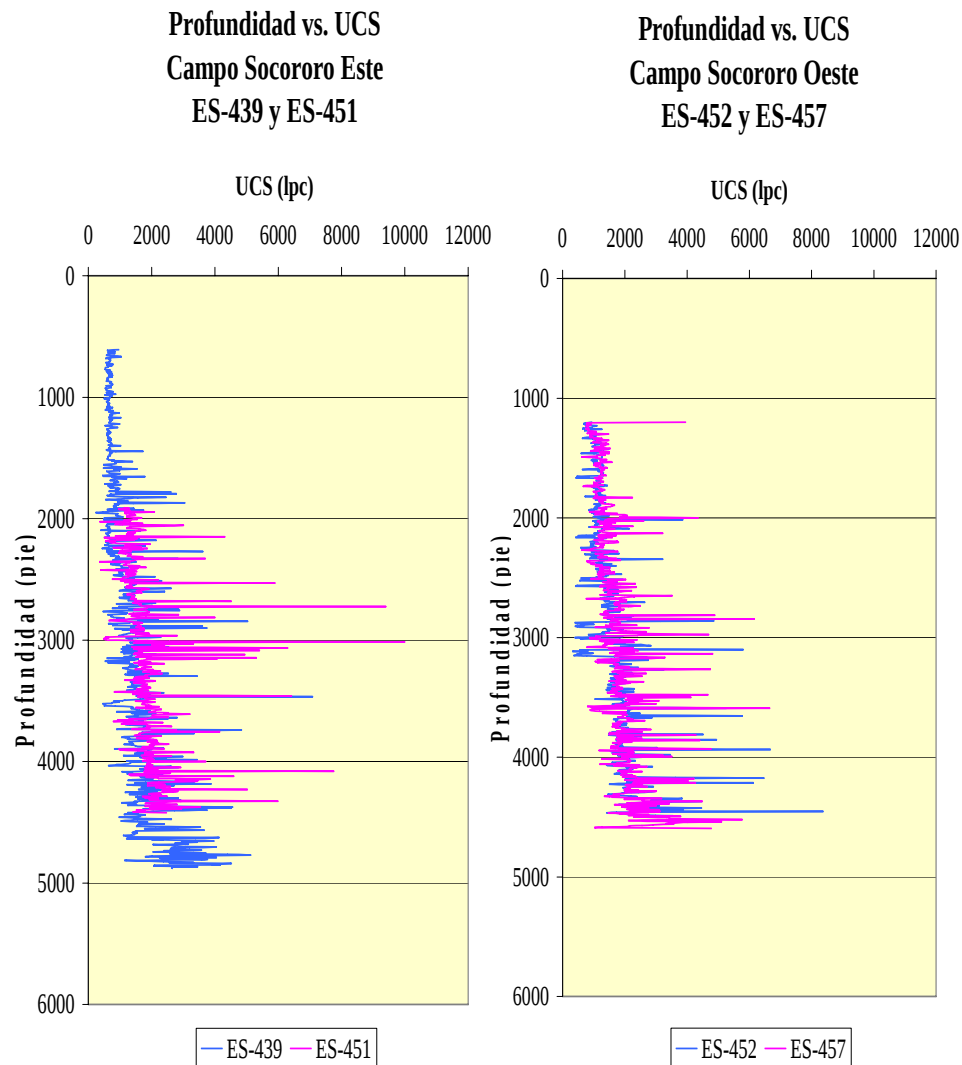


Figura 67. Gráfica de Profundidad vs. UCS para los Campos Socororo Este y Oeste.

El comportamiento de la gráfica “Profundidad vs. UCS” para los campos Socororo Este y Oeste presenta la misma tendencia. Se puede observar para ambos casos el aumento progresivo de la resistencia a la compresión conforme se profundiza en la formación (Figura 67).

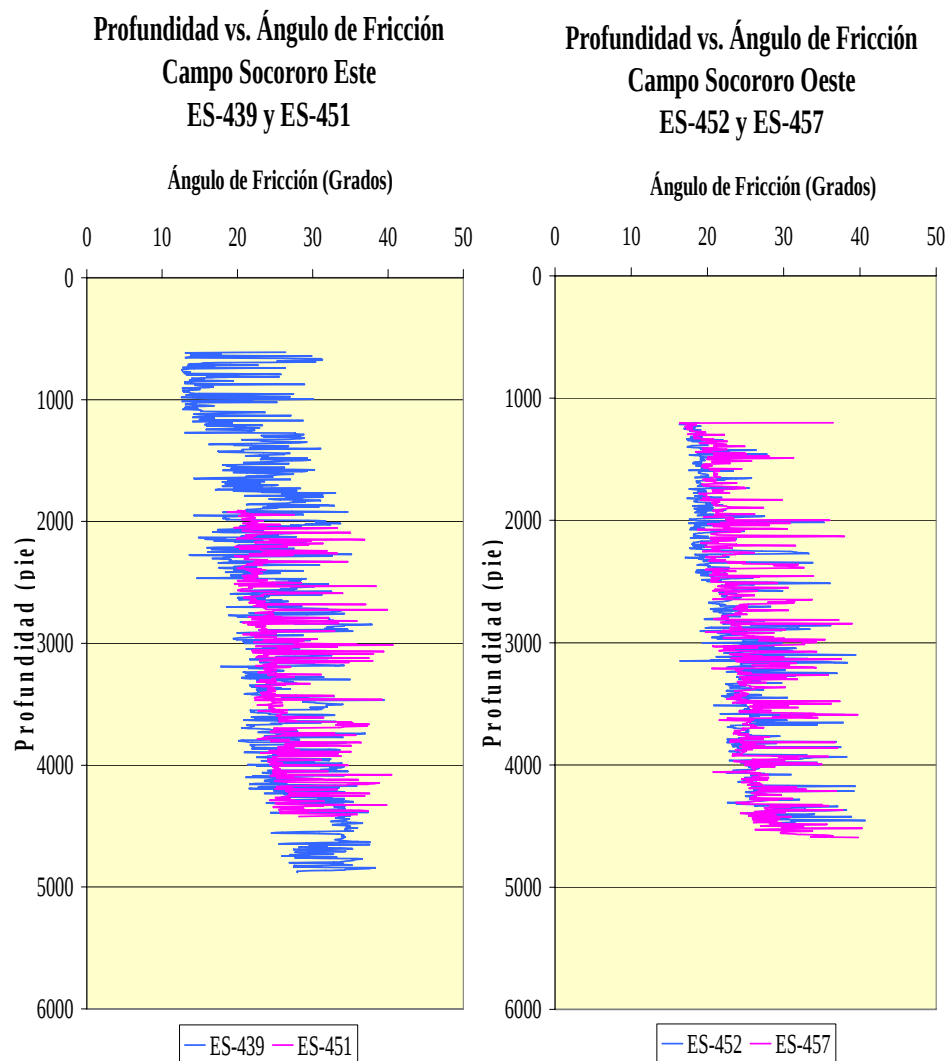


Figura 68. Gráfica de Profundidad vs. Ángulo de Fricción para los Campos Socororo Este y Oeste.

Las gráficas “Profundidad vs. Ángulo de Fricción” para los campos Socororo Este y Oeste muestran una similitud en cuanto a tendencia del comportamiento se refiere. Los cambios se deben a las características de la roca y la sensibilidad que muestre la misma a la presencia de los diversos fluidos de la formación (Figura 68).

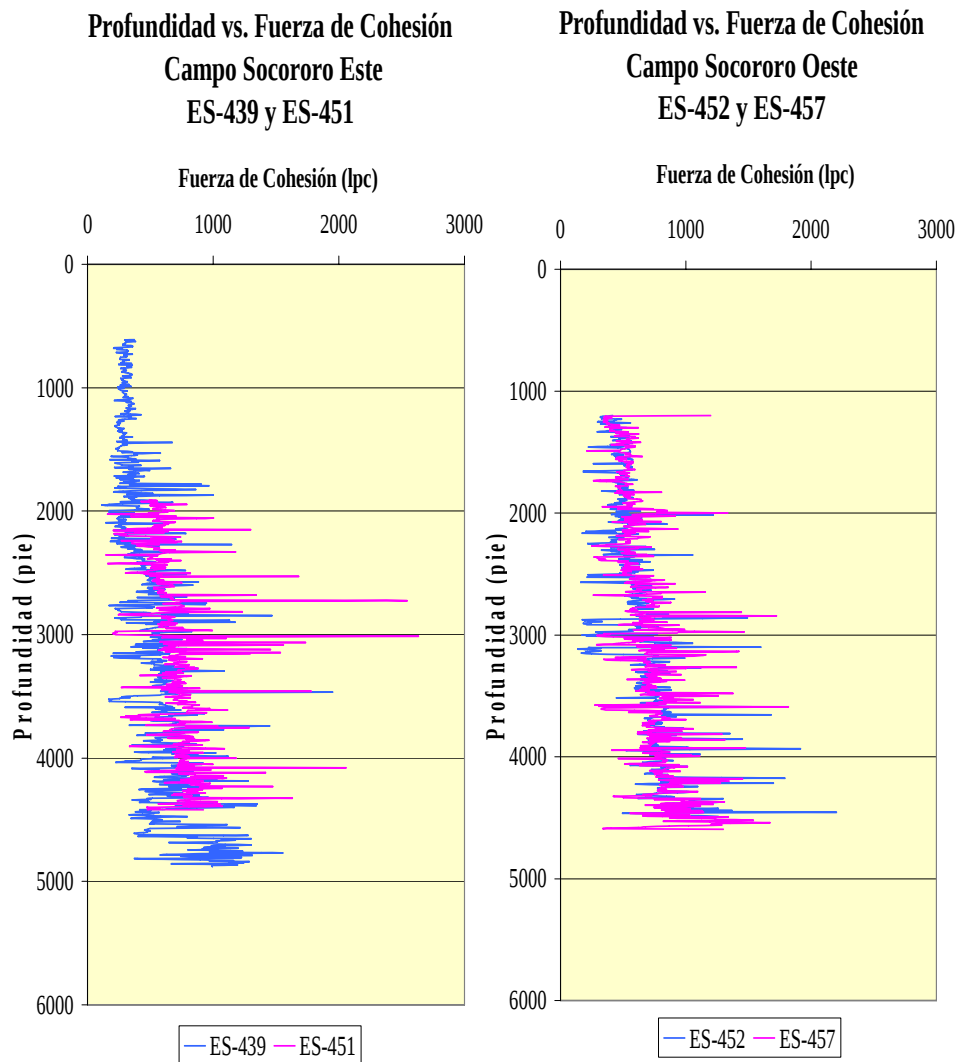


Figura 69. Gráfica de Profundidad vs. Fuerza de Cohesión para los Campos Socororo Este y Oeste.

El comportamiento de las gráficas “Profundidad vs. Fuerza de Cohesión” para los campos Socororo Este y Oeste muestran poca consolidación en las zonas someras y aumentan a mayores profundidades con la compactación de las capas litostáticas (Figura 69).

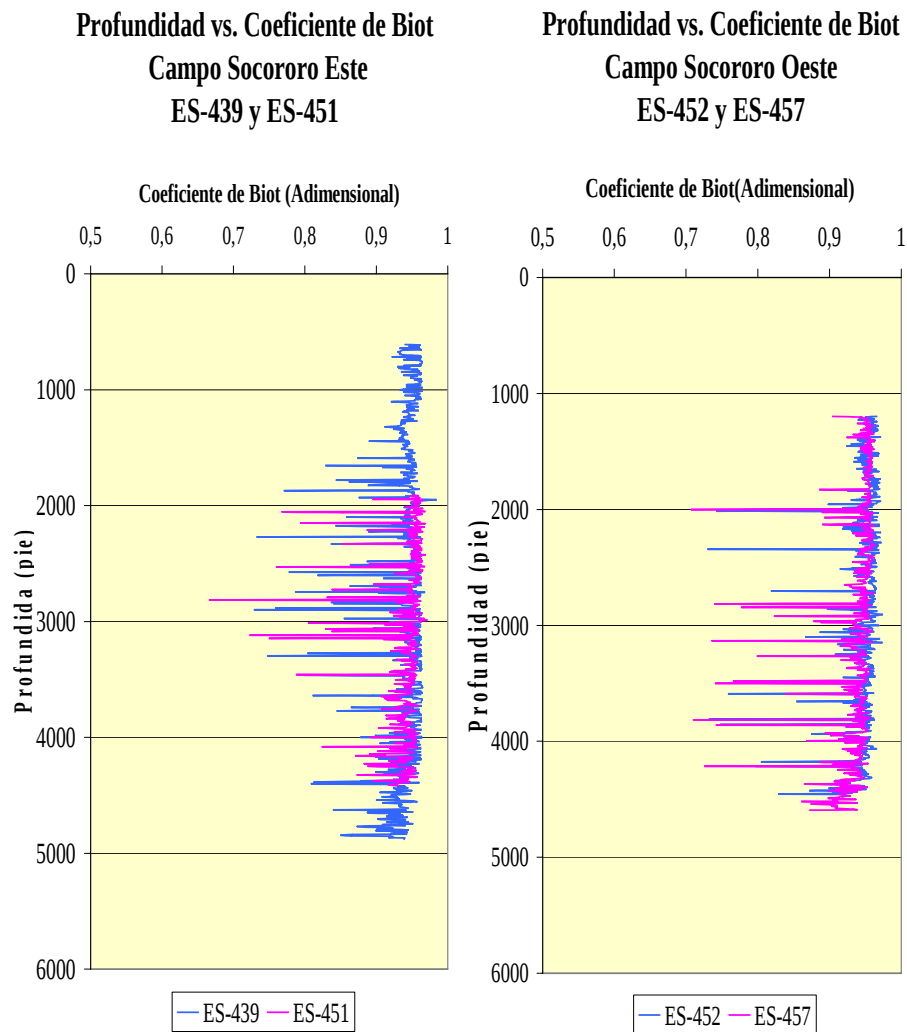


Figura 70. Gráfica de Profundidad vs. Coeficiente de Biot para los Campos Socororo Este y Oeste.

El comportamiento de las gráficas “Profundidad vs. Coeficiente de Biot” para los campos Socororo Este y Oeste presenta en la mayoría de las curvas valores mayores a 0.85, aquellos valores menores a dicha magnitud representan los lignitos (Figura 70).

No es posible tener valores constantes de cada una de las propiedades mecánicas y resistencias de la roca. Como se indicó anteriormente, éstas varían no sólo en función de la profundidad, sino también de las características de los materiales de la formación. Aún perteneciendo a la misma formación es imposible que cada locación tenga la misma cantidad y distribución de dichos materiales.

Los cambios abruptos presentados en cada una de las curvas, tanto de la evaluación petrofísica, como de las propiedades mecánicas y resistencia de la roca, son consecuencia de la cantidad de lignitos intercalada en la columna litostática de la formación. Estos fueron incluidos en los cálculos de los promedios de cada uno de las curvas y parámetros descritos con anterioridad.

Caracterización de los Esfuerzos en Sitio

Densidades Equivalentes de Circulación

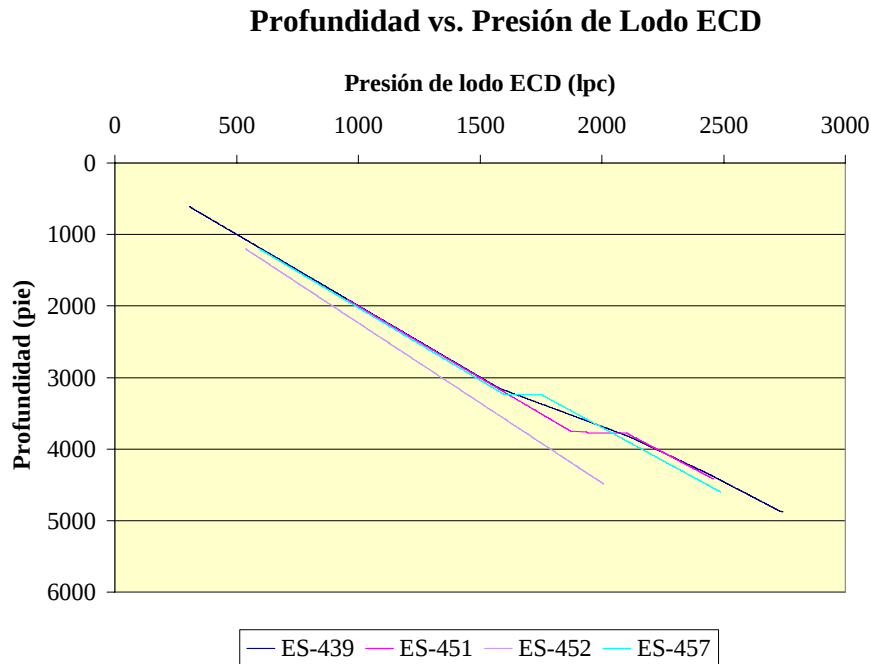


Figura 71. Gráfica de Profundidad vs. Presión de Lodo ECD para los Campos Socororo Este y Oeste.

De la gráfica de “Profundidad vs. Presión de Lodo ECD” se puede deducir cambios en el peso del lodo a medida que éste es puesto en circulación durante la perforación para cada uno de los pozos en estudio. Es normal que la presión presente un incremento, debido a la cantidad de sólidos provenientes de arenas y arcillas disgregadas y de los ripios producto de los cortes de la mecha a la formación a medida que se vaya perforando (Figura 71).

Modo y Orientación de Falla

La orientación de la falla viene dada por la dirección del esfuerzo horizontal máximo. Del mapa estructural (Figura 37), se observó que las fallas cercanas a los pozos tienen un rumbo este-oeste. Asumiendo que estas son las fallas que afectan principalmente al campo de esfuerzos de los pozos; la dirección del esfuerzo horizontal máximo es paralela a dichas fallas, mientras que la del esfuerzo horizontal mínimo se encuentra perpendicular a las mismas.

El estado de esfuerzo en cualquier punto en profundidad está definido por tres componentes perpendiculares y la presión de poro. Para la simplicidad de los cálculos se supuso que las tres componentes principales del tensor de esfuerzo coinciden con la dirección vertical y horizontal.

La orientación de los esfuerzos (acimut y desviación) de la falla normal para los campos Socororo Este y Oeste se indican en (Tabla 30):

Tabla 30. Modo y Orientación de Falla.

Característica de la Falla Normal presente en el Campo Socororo		
Esfuerzo	Acimut (Grados)	Desviación (Grados)
Vertical	0	0
Horizontal máximo	90	90
Horizontal mínimo	0	90

La magnitud de los esfuerzos presentes en las formaciones tiene cierto grado de incertidumbre, puesto que, además de las fallas este-oeste, presentan otras en menor proporción con otras orientaciones. El mapa estructural del campo (Figura 37) marca en color rojo las fallas seleccionadas, por cercanía y cantidad a los pozos en estudio. Las negras inducen a pensar, que también podrían estar afectando los campos de esfuerzos del área.

Condición Cualitativa del Hoyo Después de la Perforación

La falta de registros de imágenes dificulta la orientación de las fallas compresionales y tensionales ocurridas en el pozo, para determinar la estimación de los esfuerzos horizontales máximo y mínimo.

Las curvas de “caliper” se usaron para determinar los cambios de geometría del hoyo, ubicando así, las ovalizaciones ocurridas. Es una manera de indicar cualitativamente la condición del hoyo.

Las curvas procesadas del diámetro de “caliper” en la sección de evaluación petrofísica ayuda a visualizar los derrumbes, que ocurrieron en los cuatro pozos de los campos Socororo Este y Oeste.

Al analizar el registro se puede notar la deformación no uniforme de los pozos. Cada uno de ellos presentó cambios a lo largo de la profundidad entre un rango de 1 a 2 pulgadas respecto al diámetro original de la mecha, el cual fue de 8.5 pulgadas.

Las gráficas de “Profundidad vs. “caliper”” que se presentan a continuación muestran los puntos potenciales de ovalizaciones de las formaciones para cada pozo (Figura 72):

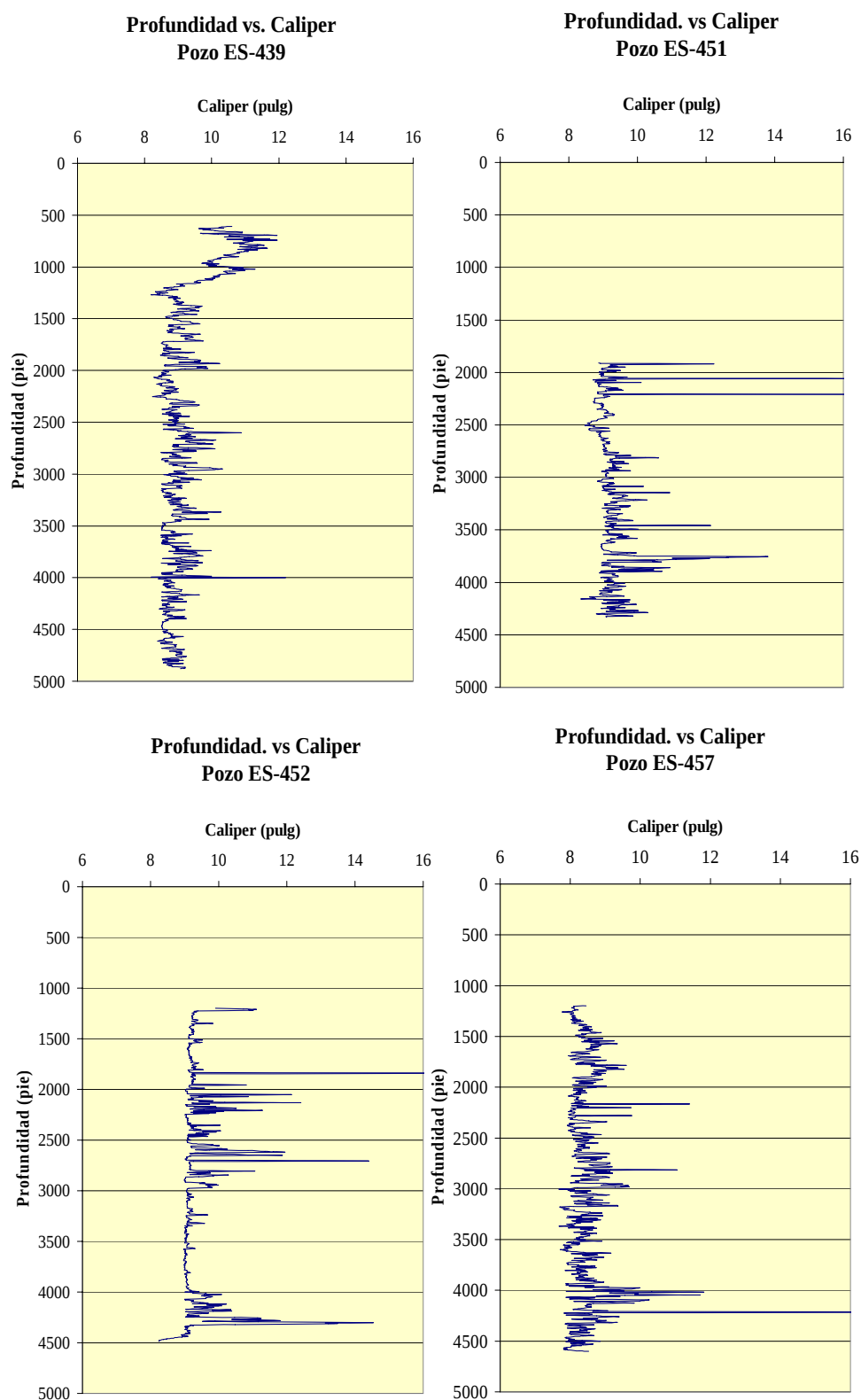


Figura 72. Gráfico Profundidad vs "caliper" para los pozos en estudio de los campos Socororo Este y Oeste.

Evaluación de Estabilidad de Hoyo

La comprensión de los conceptos geomecánicos permite conocer en primera instancia los factores y posibles causas que pueden dar origen a las ovalizaciones y fracturas en la formación.

La presión de lodo mínimo necesario para formar “*breakouts*” depende del esfuerzo tangencial máximo. Cuando el esfuerzo compresivo máximo excede el esfuerzo compresivo de la formación originan los “*breakouts*” o colapso de hoyo.

La presión de lodo máximo es usada para prevenir la formación de fracturas hidráulicas inducidas. Este requiere que el esfuerzo tangencial mínimo en el borde o límite del hoyo sea mayor que la resistencia de tensión en dicha formación.

El criterio usado para determinar la presión mínima y máxima a la que falla la roca es el de Mohr-Coulomb. Es una aproximación lineal sencilla que relaciona los esfuerzos sometidos de la roca con su resistencia.

De los registros de pozos, no es posible obtener suficientes datos para estimar las magnitudes de los esfuerzos horizontales máximo y mínimo. Por ello, la necesidad de asumir un modelo sencillo, el cual parte de un esfuerzo horizontal mínimo determinado en función del esfuerzo vertical, presión de poro, relación de Poisson y coeficiente de Biot, para luego, por un proceso iterativo estimar las magnitudes de los esfuerzos horizontales máximos en cada profundidad.

La calibración de las magnitudes de las cargas distribuidas en las paredes del hoyo (esfuerzos horizontales mínimos y máximos) ajustó la cantidad y los ángulos de “*breakouts*”, que se encontraron con los esfuerzos iniciales al comportamiento del “*caliper*” a lo largo de las profundidades. Esta calibración se realizó considerando las propiedades mecánicas y resistencia de la formación, una condición isotrópica y pozos con trayectorias verticales.

A continuación se presentan las gráficas de profundidad contra los esfuerzos verticales, horizontales máximo y mínimo calibrados para evaluaciones más confiables de las condiciones geomecánicas de cada pozo en estudio:

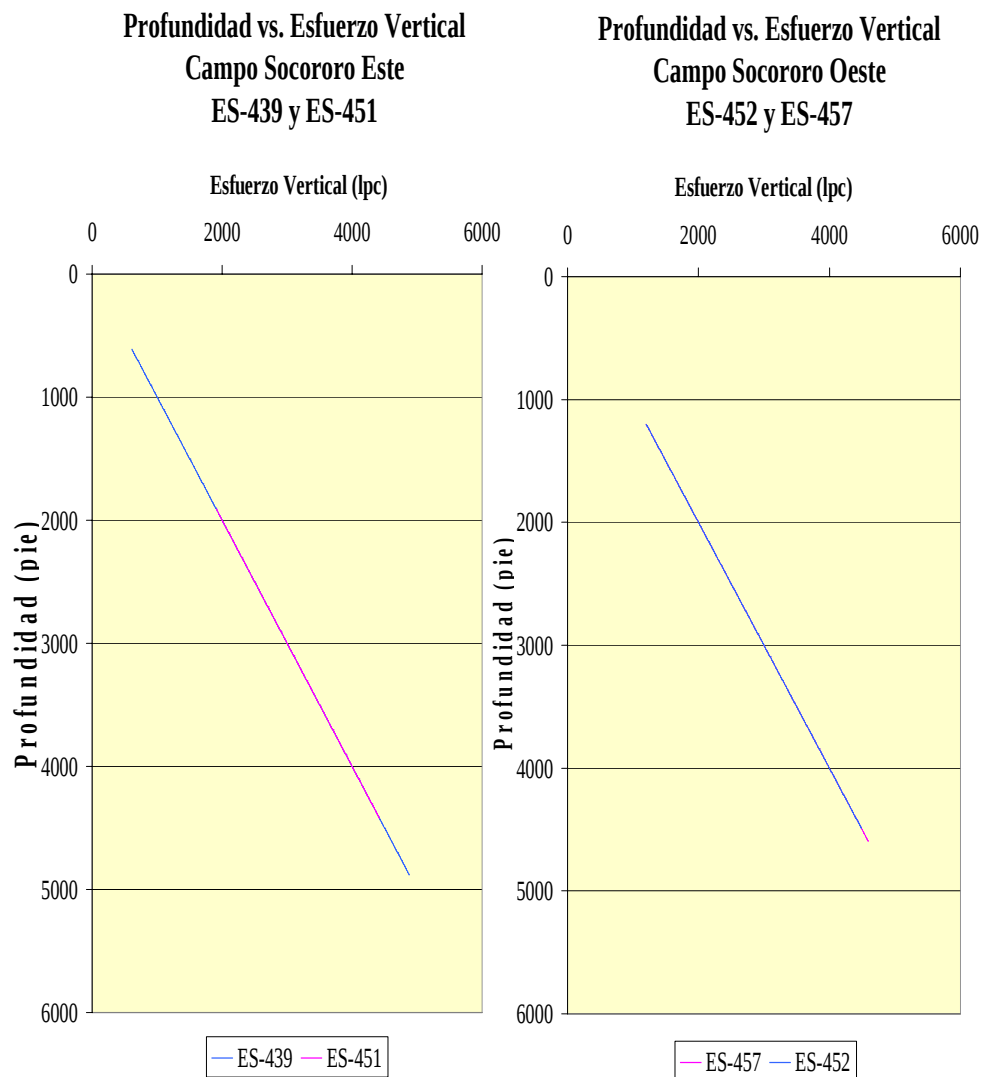


Figura 73. Gráfica de Profundidad vs. Esfuerzo Vertical para los Campos Socororo Este y Oeste.

El comportamiento de la gráfica “Profundidad vs. Esfuerzo vertical” muestra para los campos Socororo Este y Oeste magnitudes muy similares en un pozo respecto al otro. El aumento del esfuerzo vertical es proporcional a la profundidad por efecto natural de la carga litostática de la formación (Figura 73).

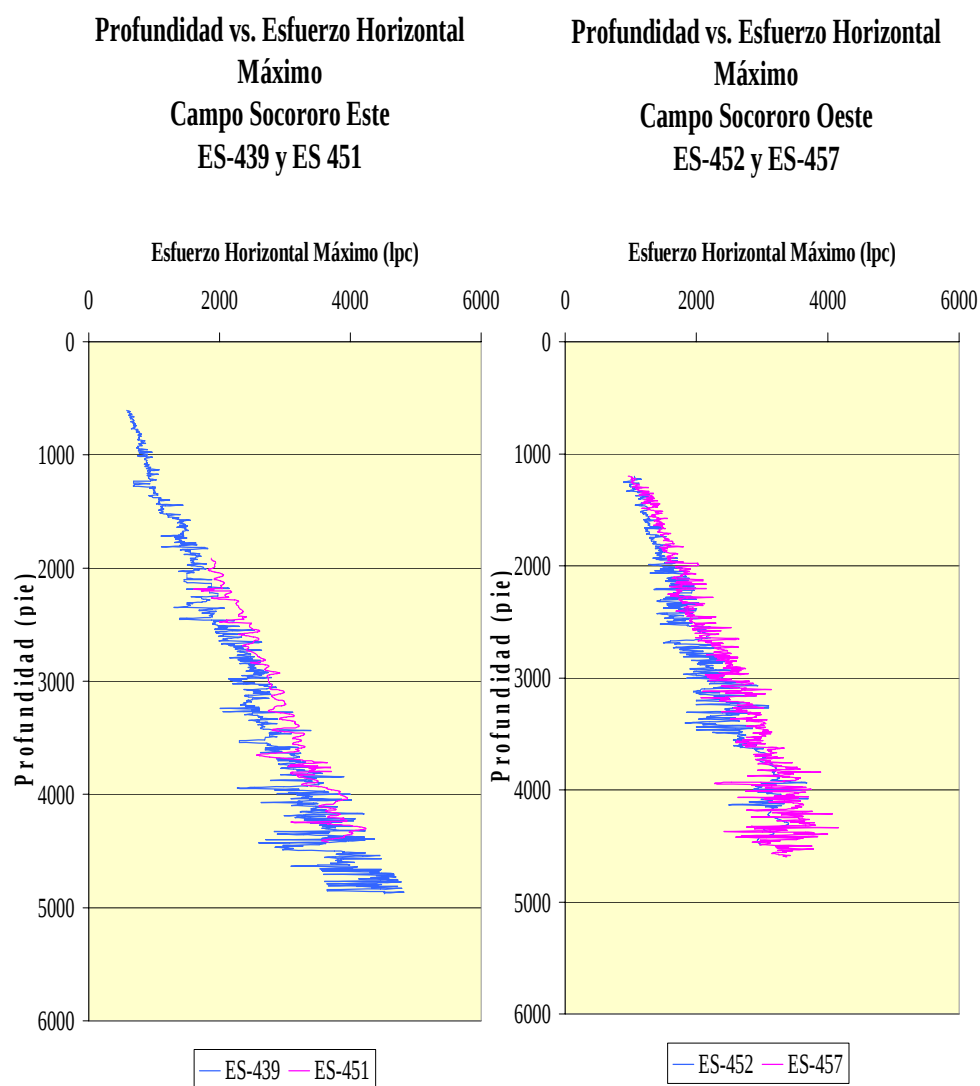


Figura 74. Gráfica de Profundidad vs. Esfuerzo Horizontal Máximo para los Campos Socororo Este y Oeste.

El comportamiento de la gráfica “Profundidad vs. Esfuerzo Horizontal Máximo” muestra para los campos Socororo Este y Oeste variaciones similares en la mayoría de sus profundidades. Las diferencias son debido a causas como características petrofísicas, condiciones mecánicas y resistencias de la formación adyacente a los pozos (Figura 74).

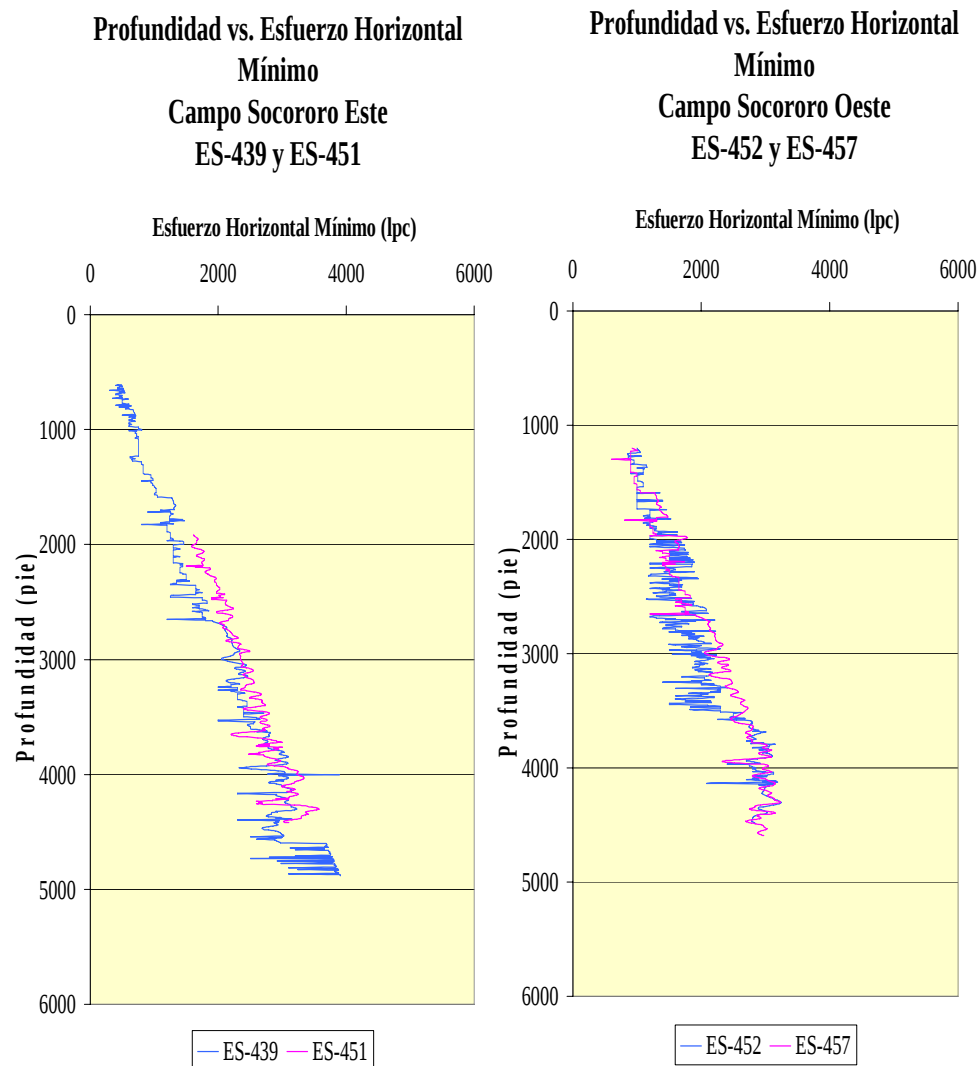


Figura 75. Gráfica de Profundidad vs. Coeficiente de Biot para los Campos Socororo Este y Oeste.

Al igual que las tendencias anteriores las gráficas “Profundidad vs. Esfuerzo Horizontal mínimo” para cada uno de los campos siguen la misma tendencia, aunque para este caso si muestra diferencias más apreciables entre ellos. Siendo el esfuerzo horizontal mínimo una condición crítica para la formación de fallas tensionales, motiva que las ventanas operacionales se estudien por pozo (Figura 75).

Ventana Operacional de Presión de Lodo

Las curvas de esfuerzos expuestas anteriormente inducen a pensar que los esfuerzos y la presión necesaria para colapsar el pozo aumentan con la profundidad.

Básicamente en el diseño de una ventana operacional se debe procurar mantener el peso del lodo por encima del peso mínimo del lodo, de no ser así, se corre el riesgo de presentar influjos de los fluidos de la formación en el momento de la perforación, además de otros problemas operacionales, como es la formación de ovalizaciones y conforme a la gravedad de las mismas, generar atascamiento de las herramientas y equipos operacionales.

Por otra parte, el peso de lodo utilizado no debe llegar a ser mayor que el peso máximo, ya que se corre el riesgo de fracturar la formación. Este efecto puede traer como consecuencia una seria pérdida de fluido de perforación, si la fractura se lleva a cabo en la zona de interés o productora, dañando así a la formación.

Debido a los factores antes expuestos, para obtener una ventana operacional segura, debe mantenerse el peso del lodo de perforación en un rango mayor que el peso mínimo y menor que el esfuerzo horizontal mínimo.

Este lodo se haya representado en una ventana operacional de presión. Se construye partiendo de las magnitudes de los esfuerzos distribuidos en el hoyo a través del criterio de Falla de Mohr-Coulomb. Las siguientes gráficas representan las ventanas obtenidas por pozo:

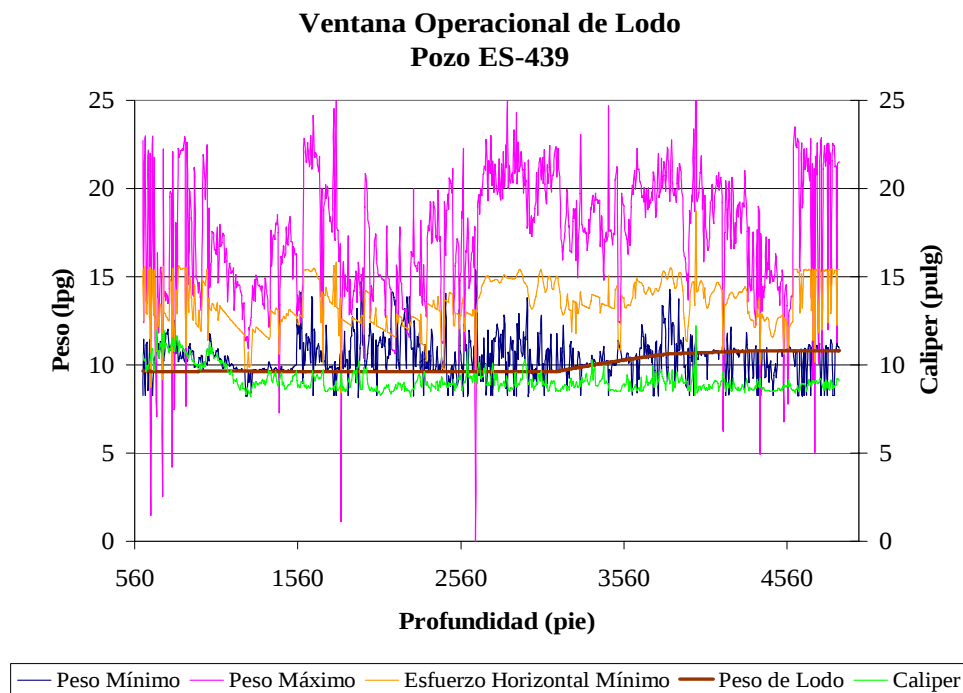


Figura 76. Ventana operacional de lodo para el pozo ES-439.

La ventana operacional de lodo para el pozo ES-439 indica mayores cambios, en la medición tomada por el “caliper”, en las zonas someras y en aquellos puntos en los cuales el peso de lodo está por debajo del peso mínimo requerido para evitar derrumbamientos. Debido a que el peso de lodo se encuentra por debajo del peso calculado a partir del esfuerzo horizontal mínimo, la curva del “caliper” no muestra señales de fracturas (Figura 76).

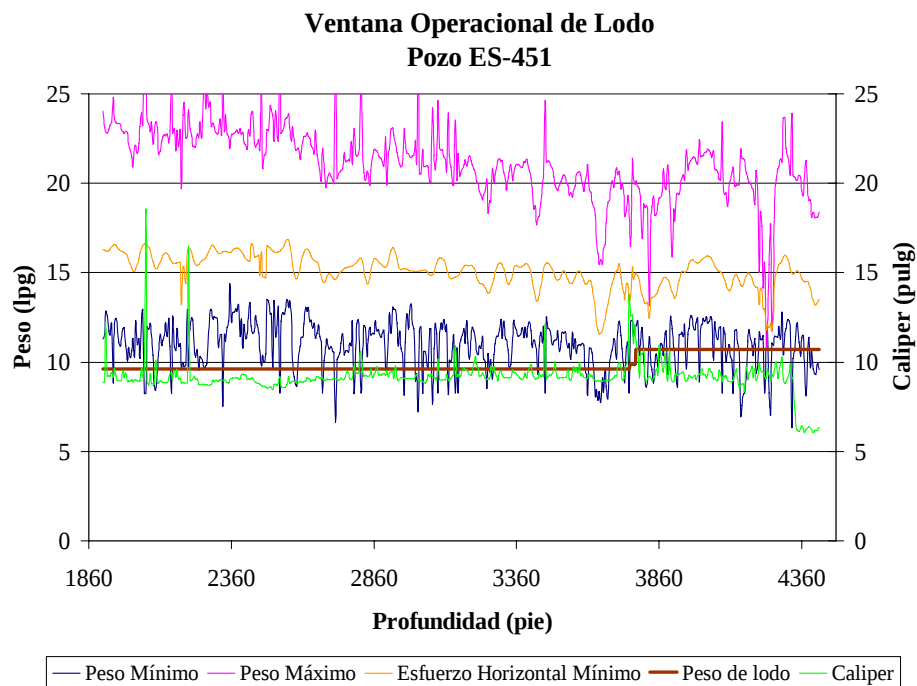


Figura 77. Ventana operacional de lodo para el pozo ES-451.

La ventana operacional de lodo para el pozo ES-451 indica derrumbamientos severos a lo largo de toda la profundidad del pozo, esto según la medición tomada por el “caliper”. El peso de lodo, prácticamente, utilizado para la perforación se encuentra por debajo del peso de lodo mínimo determinado con los estudios de esfuerzos en las paredes del hoyo. Debido a que el peso de lodo se encuentra por debajo del peso calculado a partir del esfuerzo horizontal mínimo, la curva del “caliper” no muestra señales de fracturas (Figura 77).

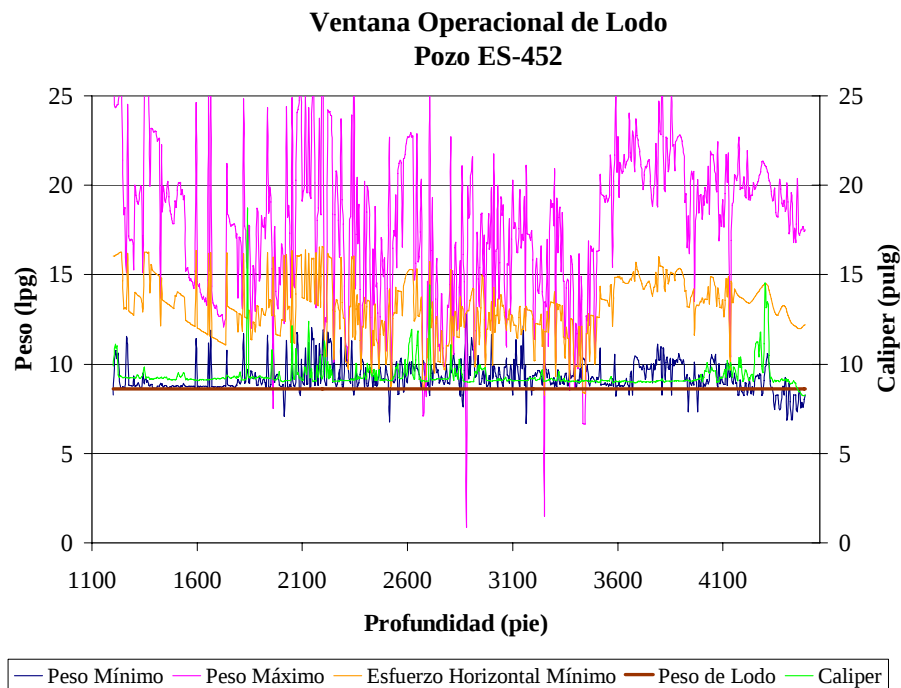


Figura 78. Ventana operacional de lodo para el pozo ES-452.

La ventana operacional de lodo para el pozo ES-452 muestra cambios en la medición del “caliper” respecto al tamaño de la mecha, a lo largo de toda su profundidad. Sin embargo, el cambio presentado es menor respecto al observado para el pozo ES-451, puesto que, el peso de lodo mínimo no difiere tanto del peso de lodo utilizado para la perforación, teniendo así un mejor soporte de los esfuerzos ejercidos por las paredes del hoyo. Debido a que el peso de lodo se encuentra por debajo del peso calculado a partir del esfuerzo horizontal mínimo, la curva del “caliper” no muestra señales de fracturas (Figura 78).

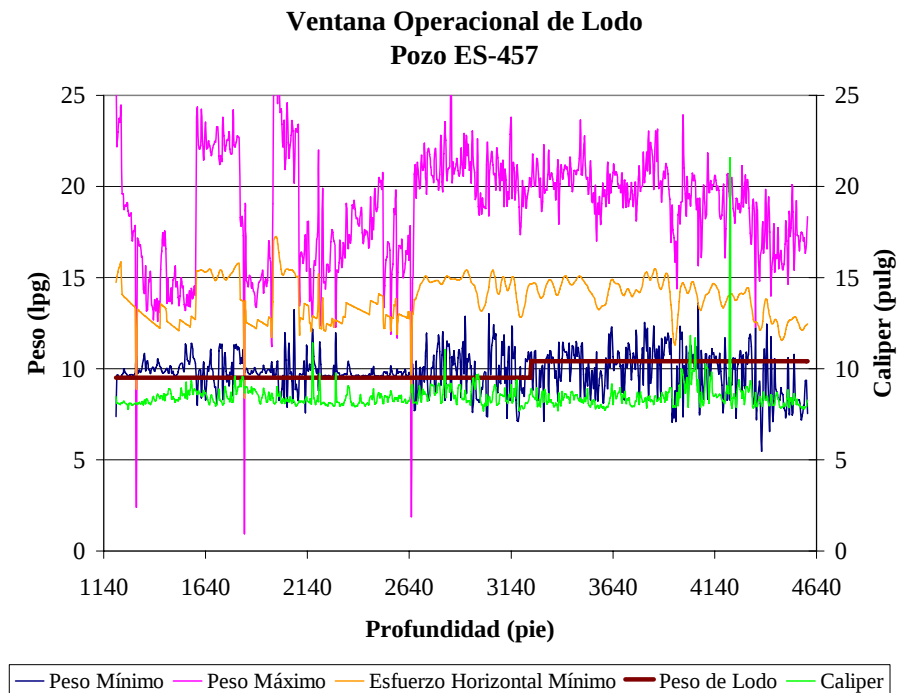


Figura 79. Ventana operacional de lodo para el pozo ES-457.

La ventana operacional de lodo para el pozo ES-457 muestra menos cambios en la medición del “caliper” respecto al tamaño de la mecha, a lo largo de toda su profundidad. La curva que representa el peso de lodo utilizado en la perforación se asemeja a la curva que representa el peso de lodo mínimo calculado, por ello, no indica derrumbes tan apreciables. Debido a que el peso de lodo se encuentra por debajo del aquel calculado a partir del esfuerzo horizontal mínimo, la curva del “caliper” no muestra señales de fracturas (Figura 79).

En general, las ventanas operacionales de cada pozo muestran, mediante la curva que representa el “caliper”, formaciones de “breakouts” y derrumbes asociados a muchos de los puntos, en los cuales el peso del lodo utilizado es menor que el peso mínimo establecido. Tratándose de una roca no consolidada, como se determinó anteriormente, la misma es muy sensible a la formación de fallas compresivas ante cualquier esfuerzo tangencial proveniente de la presión ejercida por el lodo de perforación.

Resultados

Muchas veces, la ventana operacional resultante es muy pequeña o inexistente y es aquí, donde se destaca la importancia del conocimiento de las condiciones de la formación por parte de los perforadores para evitar problemas operativos.

A continuación se muestran los valores de peso obtenidos para los pozos en estudio:

Tabla 31. Pesos de lodos resultantes de las ventanas operacionales recomendables.

Pozo	Peso del Lodo utilizado (Lpg)	Rango de Peso de Lodo (Lpg)	Profundidad (pies)
ES-439	8.5	11 a 12	610-4680
ES-451	9.6	11.5 a 13	1910-4420
ES-452	9.6	10 a 11.5	1200-4490
ES-457	9.6	10.5 a 12	1200-4595

Los pesos de lodo utilizados para la perforación de los pozos en estudio de los campos Socororo Este y Oeste se encuentran por debajo del rango obtenido para cada uno, según la respuesta a los esfuerzos presente en las paredes del hoyo (Tabla 31). Esta diferencia en el peso explica la ausencia de una adecuada presión hidrostática capaz de soportar la columna litológica y fluidos extraídos en el proceso de perforación, trayendo como consecuencia, los derrumbes observados en los registros “caliper” presentados anteriormente.

Los pesos de lodo entre los pozos de cada campo se encuentran aproximadamente bajo el mismo rango de magnitudes. Desde la evaluación petrofísica, pasando por el estudio de los parámetros mecánicos, resistencia y esfuerzos de las formaciones, los pozos de cada campo ya venían mostrando comportamientos similares. Por ello, las ventanas operacionales indicadas a continuación vienen representadas por campo (Figura 80 y Figura 81):

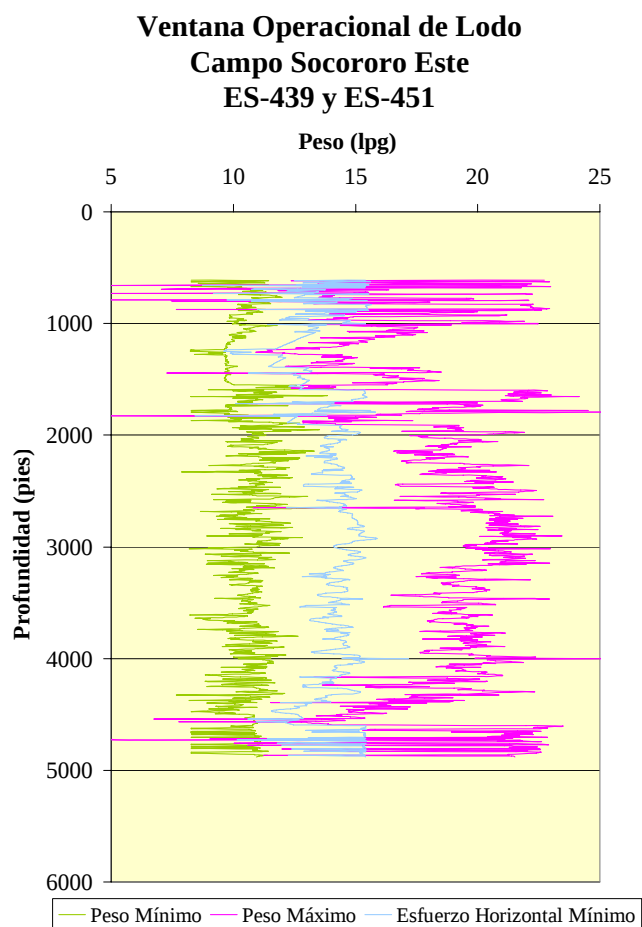


Figura 80. Ventana operacional para el Campo Socororo Este.

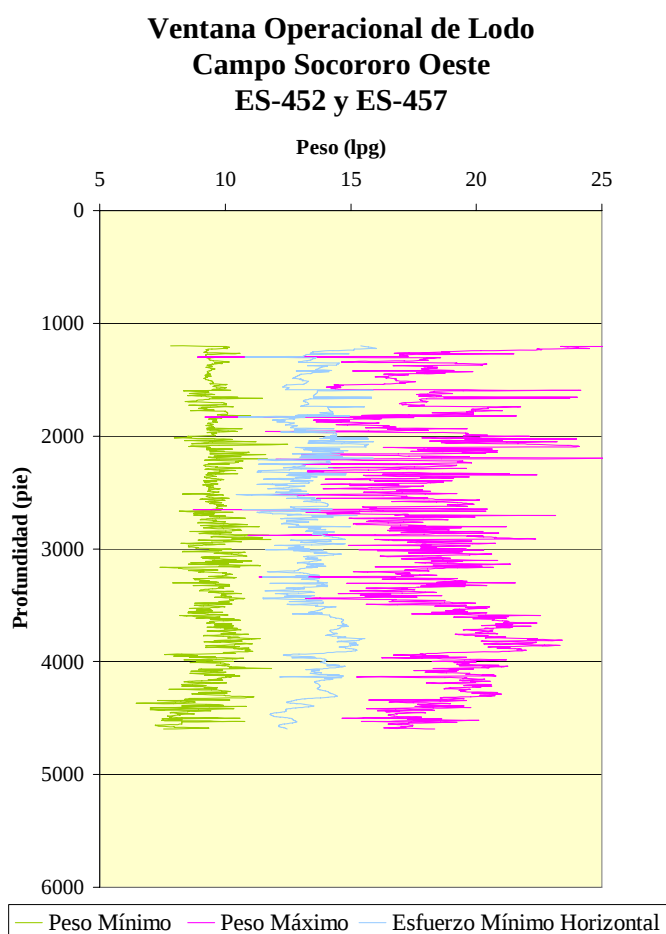


Figura 81. Ventana operacional para el Campo Socororo Oeste.

Estimación de un Diferencial Crítico de Presión

La diferencia entre la presión promedio o estática del yacimiento y la presión de fondo fluyente definido como diferencial de presión crítico, determina la movilización de arenas no consolidadas.

Una vez iniciada la formación de “*breakouts*”, se espera que cuando éstos alcancen los 90 grados empiecen a disgregar arenas, sobre todo en aquellas zonas productoras que fueron cañoneadas para la producción de hidrocarburos.

El cañoneo puede dañar considerablemente la formación y alterar los estados de esfuerzos en donde se es aplicada la operación. Si sumado a ello, la

Resultados

presión del yacimiento es mayor que la presión de fondo fluyente, los esfuerzos de corte superan a los de la formación, pudiendo traer como consecuencia, la falla del material con desprendimiento de las arenas y finos de la formación.

Mediante el programa *BIASTM*, asumiendo la condición de un hoyo abierto sin ningún método de control de arena aplicado en sitio para detener la producción de las arenas bajo la presencia de una sola fase de fluido, se determinó para el pozo ES-439 un diferencial de presión de 150 Lpc, mientras que para el pozo ES-451 se obtuvo un diferencial de presión de 160 Lpc. Ambos pozos presentaron indicios de producción de arena al mínimo diferencial de presión aplicado, esto es debido a su condición de arenas poco consolidada, sobre todo a profundidades someras, las cuales presentaron desde sus inicios de perforación grado de “*breakouts*” muy elevados.

De las siguientes gráficas de “Profundidad vs Ángulo de “*breakouts*” para los pozos del Campo Socororo Este: ES-439 (Figura 82) y ES-451 (Figura 83), se pueden observar los cambios abruptos de los ángulos de “*breakouts*”, al suponer un diferencial de presión crítico de 150 y 160 Lpc, respectivamente. Los “*breakouts*” originales son aquellos resultantes de los esfuerzos calibrados, en los cuales el diferencial de presión varía en cada punto en función de las presiones del lodo y de poro presentes. Estas gráficas son acumulativas, es decir, para hallar los ángulos de “*breakouts*” formados con el diferencial crítico de presión, es necesario realizar una diferencia entre este mismo y aquel obtenido para los “*breakouts*” originales.

Profundidad vs. Ángulo de "Breakouts"
Pozo ES-439

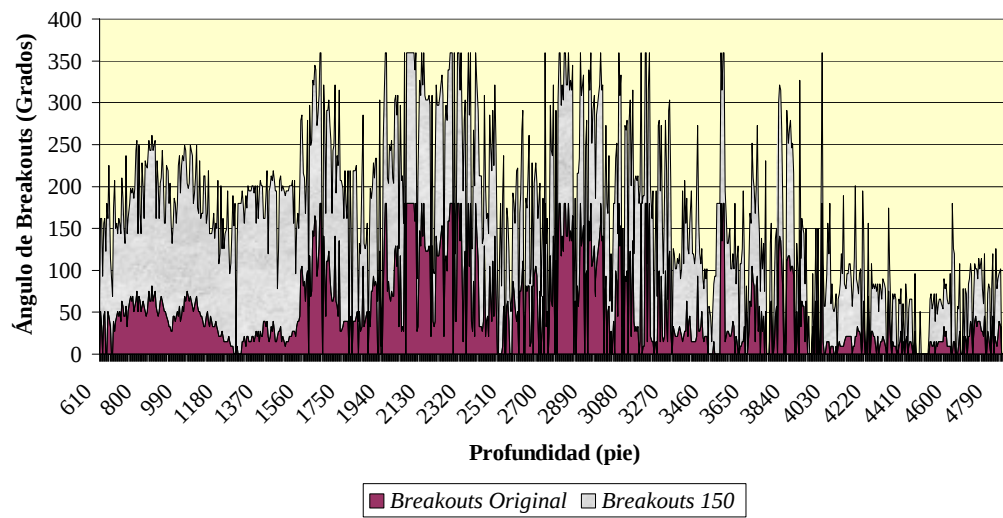


Figura 82. Gráfica de Profundidad vs. Ángulo de "breakouts" para el pozo ES-439.

Profundidad vs. Ángulo de "Breakouts"
Pozo ES-451

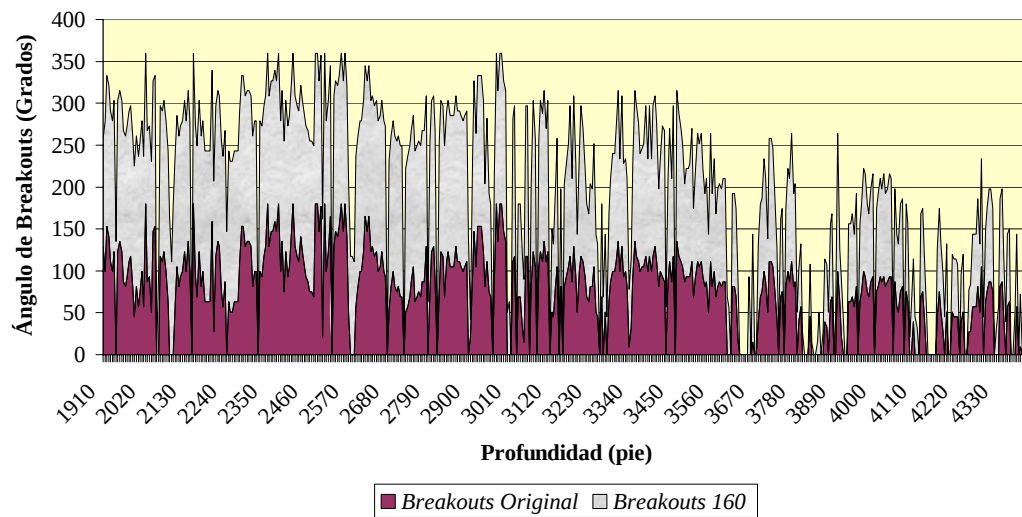


Figura 83. Gráfica de Profundidad vs. Ángulo de "breakouts" para el pozo ES-451.

Resultados

Asumiendo las mismas condiciones que en el Campo Socororo Este, para el pozo ES-452 y ES-457 se obtuvo un diferencial de presión crítico 140 Lpc y 160 Lpc, respectivamente. Ambos con el mismo comportamiento de inestabilidad de los pozos anteriores. A continuación se presentan las gráficas de “Profundidad vs. Ángulo de *breakouts*” obtenidas para los pozos del Campo Socororo Oeste (Figura 84 y Figura 85):

Profundidad vs Ángulo de *Breakouts*
Pozo ES-452

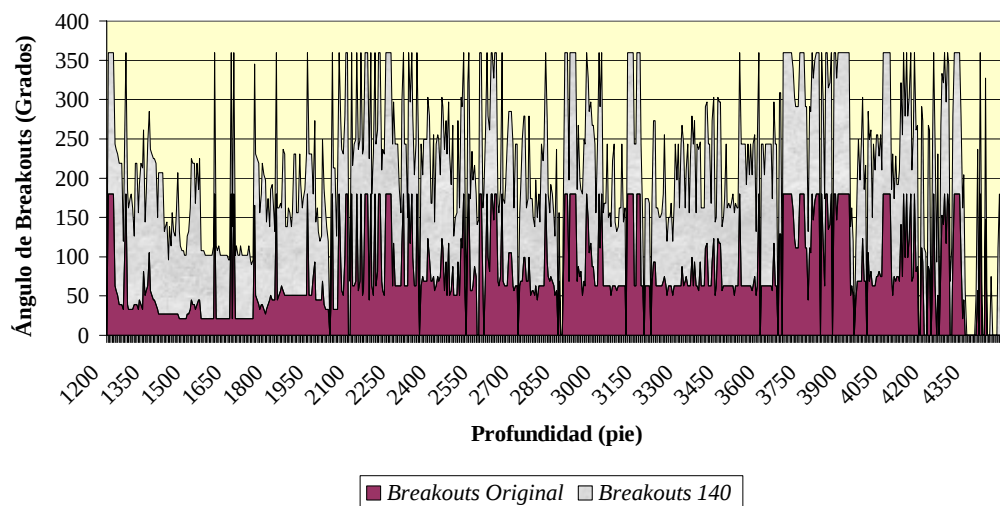


Figura 84. Gráfica de Profundidad vs. Ángulo de *breakouts* para el pozo ES-452.

Profundidad vs. Ángulo de "Breakouts"
Pozo ES-457

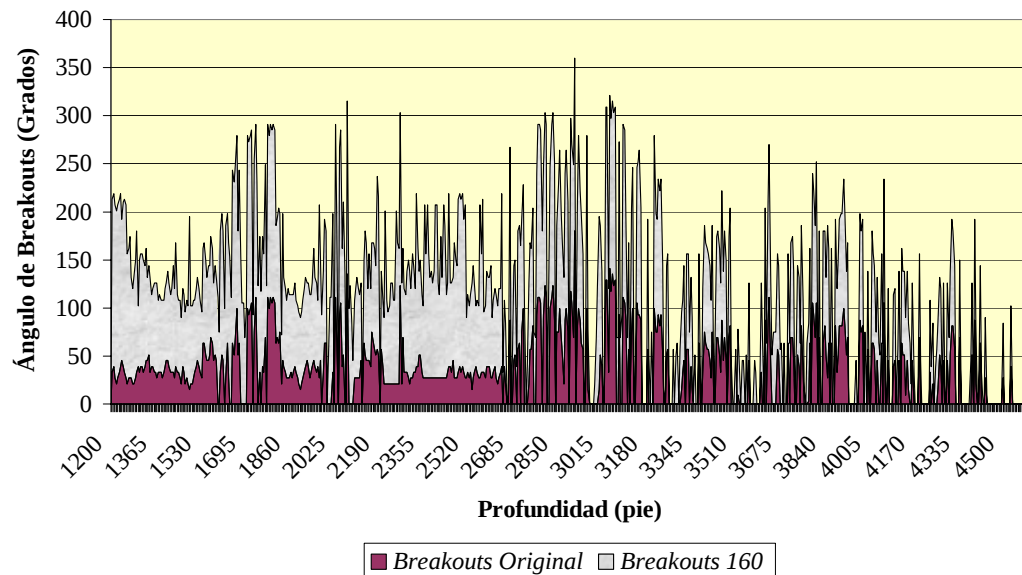


Figura 85. Gráfica de Profundidad vs. Ángulo de "breakouts" para el pozo ES-457.

El estudio del diferencial crítico se extendió, considerando las arenas productoras en cada pozo en estudio. Se descartó el pozo ES-439, por no ser un pozo productor de hidrocarburos. Para los pozos restantes se presentarán los ángulos de "breakouts" obtenidos según el diferencial de presión aplicado a cada uno de ellos.

Resultados

Tabla 32. Formación de “breakouts” en el pozo ES-451 con un diferencial de presión de 160 Lpc.

ES-451			
Arena	Profundidad (pies)	“Breakouts” Original (Grados)	“Breakouts” 160 (Grados)
N2	3641	0	0
	3645	0	0
	3650	0	0
	3655	0	0
	3660	0	93
	3665	0	0
	3670	15	129
	3675	0	0
	3680	0	0
	3685	39	93
	3690	69	111
	3695	75	111
P1	3700	99	135
	3705	87	123
	3708	51	87
P2	3807	0	27
	3810	0	0
	3815	0	0
	3822	0	0
R4L	3825	45	63
	3830	0	15
	3835	0	0
	3840	0	0
	3845	0	15
	3850	0	51
	4100	0	57
	4105	39	75
	4110	0	45

Resultados

	4115	0	33
	4120	0	0
	4125	69	99
	4130	75	99
	4135	45	75
	4138	0	57
U1U	4360	57	87
	4365	63	87
	4370	0	0
	4375	0	0
	4380	0	51
	4385	57	87
	4390	0	0
	4395	9	63
U1M	4400	0	0
	4405	0	0
	4410	0	0
	4415	0	0
	4420	0	0

Como se aprecia en la tabla mostrada anteriormente, la base de los yacimientos N2 y R4L para un diferencial de presión de 160 Lpc, se evidencia producción de arena (Tabla 32).

Tabla 33. Formación de “breakouts” en el pozo ES-452 con un diferencial de presión de 140 Lpc.

ES-452			
Arena	Profundidad (pies)	“Breakouts” Original (Grados)	“Breakouts” 140 (Grados)
H4,5,6	2867	0	0
	2870	63	93

Resultados

	2875	180	180
	2880	180	180
	2885	180	180
	2890	69	129
	2895	180	180
	2900	180	180
	2905	180	180
	2910	180	180
	2915	180	180
	2920	69	117
I3	2968	105	180
	2970	117	180
	2975	87	180
	2980	87	180
	2985	63	180
	2990	63	93
	2995	63	180
	3000	180	180
	3005	111	180
	3010	180	180
	3015	63	93
	3020	63	105
	3023	63	105
M2	3553	63	141
	3555	63	180
	3560	57	147
	3565	63	180
	3570	75	180
	3575	51	81
	3580	63	180
	3583	180	180
S2	4210	81	180
	4215	0	0

Resultados

	4220	63	180
	4225	180	180
	4230	63	180
	4233	0	93
TU	4335	45	159
	4340	0	57
	4345	0	0
	4350	0	0
	4355	0	0
	4360	0	0
	4365	0	0
TM	4370	0	0
	4375	0	0
	4380	0	51
	4385	57	180
	4390	0	0
	4395	180	180
	4400	0	69
U1U	4420	0	0
	4425	0	0
	4430	0	0
	4435	0	75
	4440	0	0
	4445	0	0
U1M,L	4450	0	0
	4455	0	0
	4460	0	111
	4465	0	180
	4470	0	0
	4475	0	0
	4480	0	0
	4485	0	0
	4490	0	0

Resultados

Para el pozo ES-452; las arenas H4.5.6, I3, M2 y S2 presentan producción de arena para el diferencial de presión establecido. Con el mínimo diferencial de presión se lograban altos grados de “breakouts” (Tabla 33).

Tabla 34. Formación de “breakouts” en el pozo ES-457 con un diferencial de presión de 160 Lpc.

ES-457			
Arena	Profundidad (pies)	“Breakouts” Original (Grados)	“Breakouts” 160 (Grados)
S5	4295	45	81
	4300	0	69
	4305	51	87
	4310	81	111
	4315	81	99
	4320	57	87
	4325	0	0
	4330	0	0
	4335	0	0
	4340	69	81
TU	4345	0	0
	4350	0	0
	4355	0	0
	4360	0	0
	4365	0	0
U1U	4415	63	81
	4420	0	33
	4425	0	0
	4430	0	0
	4435	27	63
	4440	0	0
	4445	0	0
	4450	0	0

Resultados

U1M,L	4455	0	0
	4460	0	0
	4465	0	0
	4470	0	0
	4475	0	0
	4480	0	0
	4485	0	0
	4490	0	0
	4495	0	0
	4500	27	57
U2U	4505	0	0
	4510	0	0
	4515	0	0
	4520	0	0
	4525	0	0
	4530	39	63
U2M,L	4535	0	0
	4540	0	0
	4545	0	0
	4550	0	0
	4555	0	0
	4560	0	0
	4565	0	0
	4570	0	0
	4575	0	0
	4580	0	0
	4585	0	0
	4590	0	0
	4595	0	0

Para el pozo ES-457, la producción de arena para un diferencial de presión de 160 Lpc sucede en la arena S5. Es de hacer notar que, para diferencias de presión aún más bajas que la mencionada, la condición de producción de arena en el pozo igualmente aumenta de forma considerada para la arena S5.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

- La evaluación petrofísica reafirma que los campos Socororo Este y Oeste pertenecientes a las formaciones Oficina y Merecure están constituidas por una columna litológica básicamente arcillosa, con intercalaciones de areniscas y lignitos.
- El área evaluada del Campo Socororo presenta saturaciones altas de agua mayores a 70%, con poca presencia de hidrocarburos contenidos en una porosidad baja, que varía entre 5% y 12%.
- La arcillosidad, porosidad y saturación de los fluidos presentes en la formación influyen de manera directa en el cálculo de la resistencia de la roca. Por lo tanto, considerar la litología y los fluidos permiten una evaluación más consistente de la estabilidad mecánica del hoyo.
- La estimación de las propiedades mecánicas y las resistencias de las formaciones elementales como son el módulo de Young, relación de Poisson, resistencia a la compresión UCS, ángulo de fricción, fuerza de cohesión y coeficiente de Biot; clasifican las formaciones del Campo Socororo como una roca no consolidación.
- La magnitud y orientación de los esfuerzos en sitio están definidas bajo un modo de falla normal con dirección este-oeste para los Campos Socororo Este y Oeste. La dirección del esfuerzo horizontal máximo es paralela a la falla, mientras que la del horizontal mínimo es perpendicular a la misma.
- La magnitud de los esfuerzos presentes en las formaciones tiene cierto grado de incertidumbre, puesto que, además de las fallas este-oeste, presentan otras en menor proporción con otras orientaciones.

- Las presiones de poro presentes, junto a la magnitud y orientación de los esfuerzos en sitio e inducidos a la formación, definen el proceso de generación de las ovalizaciones de las formaciones.
- La perforación de los pozos con una presión de lodo menor a la presión mínima obtenida en la ventana operacional indica, en conjunto con el tipo de formaciones no consolidadas, el derrumbamiento de la pared en la gran mayoría de la profundidad del hoyo.
- Gran parte de la estabilidad de hoyo se logra con el peso de lodo aplicado, el cual debe ser capaz de proveer una presión suficiente como para soportar los esfuerzos de las paredes del mismo. Los pesos de lodo propuestos, según la ventana operacional obtenida para cada uno de los pozos en estudio, se encuentran en los siguientes rangos:
 - Pozo ES-439: 11-12 Lpg.
 - Pozo ES-451: 11.5-13 Lpg.
 - Pozo ES-452: 10-11.5 Lpg.
 - Pozo ES-457: 10.5-12 Lpg.
- El peso de lodo recomendado para prevenir, en lo posible, la formación de derrumbes y fracturas en los futuros pozos del Campo Socororo Este, se encuentra entre 11.5 y 12 Lpg; mientras que para el Campo Socororo Oeste se halla entre 10.5 y 11.5 Lpg.
- El peso de lodo recomendado para mantener, en gran parte, la estabilidad de hoyo dentro del área en estudio, perteneciente al Campo Socororo Este y Oeste, para próximos diseños de perforación y programas de lodos, es de aproximadamente 11.5 Lpg.

- Las ovalizaciones o “*breakouts*” pueden ser controlados con el peso del lodo.
- El diferencial crítico de presión para prevenir la producción futura de arena y finos a hoyo abierto, en formaciones no consolidadas en el Campo Socororo se encuentra alrededor de los 160 Lpc.
- La predicción anticipada de la producción de arena y migración de finos permite establecer a tiempo la aplicación de técnicas de control de arena, disminuyéndose de esta forma, los costos asociados a las actividades de perforación y el daño a las formaciones, para que a su vez prolongue la vida productiva del yacimiento.
- Los resultados se basaron en las condiciones de esfuerzos para el momento de la perforación de los pozos. El agotamiento debido a la producción de los pozos en el tiempo reduce, teóricamente, la presión de poros y modifica los esfuerzos efectivos. Tales cambios sugieren la reevaluación del campo de esfuerzos considerando el uso de datos actualizados.

RECOMENDACIONES

- Obtener toda información posible de esfuerzos en sitio a partir de parámetros geológicos, información de yacimientos, núcleos y análisis de registro de imagen.
- El comportamiento de los materiales geológicos depende no sólo de la presión, también se ve afectado por el tiempo y las altas temperaturas en las profundidades de la formación. Por lo tanto, se recomienda evaluar para próximos análisis geomecánicos estos factores.
- Correr un registro de imagen que permita visualizar las condiciones de las paredes del hoyo, con la cual se puede determinar la presencia del ensanchamiento elíptico del hoyo o “*breakouts*” y fracturas inducidas.
- Realizar ensayos “*microfrac*” o pruebas extendidas de integridad de presión que contribuyan a calibrar los esfuerzos en sitio y obtener resultados que se acoplen más a la realidad.
- La actualización de los datos durante la perforación es vital para reducir las incertidumbres, lograr el control correcto del proceso de perforación y obtener resultados superiores. Puede actualizarse utilizando información recién adquirida, incluyendo datos de registros geofísicos y datos de mediciones adquiridos para mejorar en definitiva el conocimiento geomecánico del campo.
- Considerar que las causas que alteran las condiciones de rotura y resistencia de la roca no sólo son mecánicas, ya que pueden deberse también a efectos químicos.

Recomendaciones

- Combinar un estudio con métodos y “software” para obtener las magnitudes de los esfuerzos horizontales máximo y mínimo a partir de registros de imagen del pozo, que permita obtener resultados mecánicos de la roca de manera más precisa.
- Se recomienda realizar los ensayos geomecánicos de laboratorio a los núcleos obtenidos de los pozos ES-451 y ES-452, con la finalidad de calibrar los resultados presentados en este trabajo.
- Implementar sistemas de control de arena según el análisis geomecánico del campo.

CAPÍTULO VII

APÉNDICE

CÁLCULOS TIPO

- Gradiente de Temperatura:

$$\left(\frac{\partial t}{\partial z}\right) = \left(\frac{T_{fondo} - T_{Sup}}{Pr of_{fondo} - Pr of_{sup}}\right) * 100$$

$$\left(\frac{\partial t}{\partial z}\right) = \left(\frac{150\text{ }^{\circ}F - 80\text{ }^{\circ}F}{4440\text{ pies} - 0\text{ pies}}\right) * 100$$

$$\left(\frac{\partial t}{\partial z}\right) = 1.576\text{ }^{\circ}F / \text{pies}$$

- Estimación de Poro:

$$p_f = G \cdot h$$

$$p_f = 0.376 \left(\frac{lpc}{pies}\right) \cdot 3251.3(pies)$$

$$p_f = 1222.3\text{ lpc}$$

- Densidad de Circulación Equivalente (ECD):

- Velocidad interna de fluido

$$V_i = \left(\frac{q}{2.448 \cdot d^2} \right)$$

$$V_i = \left(\frac{346 \text{ gpm}}{2.448 \cdot (13.75 \text{ pulg} - 6.5 \text{ pulg})^2} \right)$$

$$V_i = 0.963 \left(\frac{\text{pies}}{\text{seg}} \right)$$

- Velocidad Anular

$$V_a = \left(\frac{q}{2.448 \cdot (d_2 - d_1)^2} \right)$$

$$V_a = \left(\frac{346 \text{ gpm}}{2.448 \cdot (13.75 \text{ pulg} - 4.5 \text{ pulg})^2} \right)$$

$$V_{aBP} = 0.837 \left(\frac{\text{pies}}{\text{seg}} \right)$$

$$V_{aBP} = 0.837 \left(\frac{\text{pies}}{\text{seg}} \right)$$

$$V_{aPM1} = 0.923 \left(\frac{\text{pies}}{\text{seg}} \right)$$

$$V_{aPM2} = 1.009 \left(\frac{\text{pies}}{\text{seg}} \right)$$

- Cálculo del Número de Reynolds en el Anular

$$N_{RE} = 757 \cdot \left(\frac{\rho \cdot V \cdot d}{\mu} \right)$$

$$N_{RE} = 757 \cdot \left(\frac{9.6 \text{ lpg} \cdot 0.963 \frac{\text{pies}}{\text{seg}} \cdot (13.75 \text{ pulg} - 6.5 \text{ pulg})}{12 \text{ cps}} \right)$$

$$N_{RE TP} = 4237.94$$

$$N_{RE BP} = 4702.37$$

$$N_{RE PM1} = 4345.23$$

$$N_{RE PM2} = 4135.82$$

$$N_{RE} = N_{RE TP} + N_{RE BP} + N_{RE PM1} + N_{RE PM2}$$

$$N_{RE} = 17421.36$$

Flujo Turbulento

$$N_{Re} > 2100$$

- Factor de fricción de Fanning

$$f = \frac{0.0791}{N_{RE}^{0.25}}$$

$$f = \frac{0.0791}{(4237.94)^{0.25}}$$

$$f_{TP} = 0.009804$$

$$f_{BP} = 0.009552$$

$$f_{PM1} = 0.009743$$

$$f_{PM2} = 0.009864$$

- Pérdida de Presión en el Sistema de Circulación (Modelo Newtoniano)

$$\left(\frac{\Delta p}{L} \right) = \frac{\rho^{0.95} \cdot V^{1.75} \cdot \mu^{0.25}}{1396 \cdot (d_2 - d_1)^{1.25}}$$

$$\left(\frac{\Delta p}{L} \right) = \frac{(9.7 \text{ lpg})^{0.95} \cdot (0.963 \text{ cps})^{1.75} \cdot (12 \text{ cps})^{0.25}}{1396 \cdot (13.75 \text{ pulg} - 6.5 \text{ pulg})^{1.25}}$$

$$\left(\frac{\Delta p}{L}\right)_{TP} = 0.00057 \text{ lpc/pies}$$

$$\left(\frac{\Delta p}{L}\right)_{BP} = 0.00033 \text{ lpc/pies}$$

$$\left(\frac{\Delta p}{L}\right)_{PM1} = 0.00049 \text{ lpc/pies}$$

$$\left(\frac{\Delta p}{L}\right)_{PM2} = 0.00068 \text{ lpc/pies}$$

- Pérdida de de Presión por fricción en el Anular

$$\Delta p = \left(\frac{\Delta p}{L}\right) * \text{Longitud de Tubería}$$

$$\Delta p_{TP} = 0.00057 \text{ lpc/pies} * 2429 \text{ pies}$$

$$\Delta p_{TP} = 1.39 \text{ lpc}$$

$$\Delta p_{BP} = 0.03 \text{ lpc}$$

$$\Delta p_{PM1} = 0.26 \text{ lpc}$$

$$\Delta p_{PM2} = 0.06 \text{ lpc}$$

$$\Delta p = \Delta p_{TP} + \Delta p_{BP} + \Delta p_{PM1} + \Delta p_{PM2}$$

$$\Delta p = 1.75 \text{ lpc}$$

- Densidad Equivalente de Circulación

$$ECD = \rho_L + \frac{\Delta p}{0.052 \cdot h}$$

$$ECD = 9.6 \text{ lpg} + \frac{1.75 \text{ lpc}}{0.052 \cdot 3149 \text{ pies}}$$

$$ECD = 9.64 \text{ lpg}$$

- Presión de Lodo

$$P_{mud} = 0.052 \cdot ECD \cdot h$$

$$P_{mud} = 0.052 \cdot 9.64 \text{ lpg} \cdot 3149 \text{ pies}$$

$$ECD = 1578 \text{ lpc}$$

- Esfuerzo Horizontal Mínimo

$$\sigma_h = S3 = \left(\frac{\nu}{1-\nu} \right) (\sigma_v - \alpha \cdot P_f) + \alpha \cdot P_f$$

$$\sigma_h = S3 = \left(\frac{0.426}{1 - 0.426} \right) (1910 \text{ lpc} - 0.954 \cdot 821.3 \text{ lpc}) + 0.954 \cdot 821.3 \text{ lpc}$$

$$\sigma_h = 1619.549 \text{ lpc}$$

FUENTES CONSULTADAS

- [1] Brown, T. y otros (2003) Observación del Cambio Mecánico de las Rocas: Modelado Mecánico del Subsuelo. Oilfield Review, Volumen 15 (1): 22-41.

- [2] Díaz, C. y Díaz, Y. (2002). Diagnóstico del Problema de Producción de Arena y Desarrollo de una Metodología para la Selección del Método más Adecuado para su Control en el Área Mayor de Socororo. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- [3] González De Vallejo, L. (2002) Ingeniería Geológica. Madrid: Prentice Hall. 744 p.

- [4] Lazarde, H. y Perozo, A. Interpretación de Perfiles de Pozos. Maracaibo: Universidad del Zulia, Escuela de Ingeniería de Petróleo, Maracaibo.

- [5] Maya D., Diego A. (2003). Análisis de Estabilidad de Hoyo y Predicción de Arenamiento en Pozos Verticales y Direccionales en el Campo Santa Rosa, Área Mayor de Anaco. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- [6] Pateti H., Pablo H. (2005). Determinación de los Esfuerzos Inducidos en la Pared del Hoyo Durante el Proceso de Perforación de Pozos en el Campo Quiriquire Somero, Estado Monagas. Trabajo Especial de Grado. Universidad de Oriente, Puerto la Cruz.

- [7] Principios/Aplicaciones de la Interpretación de Registros. Caracas: Schlumberger. 198 p.

Consultadas

- [8] Rodríguez, J. y Martínez, M. y Sánchez, M. (2004). Determinación de los Parámetros Mecánicos Básicos en Lutitas, Formación Carapita, Oriente de Venezuela, Mediante el uso del Sistema TSI (Terratek Strength Index). [En línea]. IMME. Disponible: <http://www2.bvs.org.ve> [Consulta: 2005, junio 10]
- [9] Torrealba B., Frank C. (2002). Estudio Geomecánico de Estabilidad de Hoyo en Condiciones Bajo Balance para Campos del Área de Anaco. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [10] Universidad Salamanca. Departamento de Geología (2001). Geología Estructural y Dinámica Global. Salamanca: José Martínez.
- [11] Universidad Simón Bolívar (2002). Estudio de la Estabilidad de Hoyo y Cálculo de la Ventana de Lodo de Perforación a Partir de la Evaluación Geomecánica y Petrofísica con Registros de Pozo. Caracas: Johanna Jusmell.
- [12] Vasquéz, A. y Sánchez, M. (1999) Introducción a la Geomecánica Petrolera, 3ra ed. Caracas: V.V.A. Consultores, C.A.
- [13] Vásquez, J. y Martínez, P. (2002). Estudio y Diseño de Cementación Primaria de Pozos en el Área Mayor de Sococoro. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [14] www.bakerhughes.com. [Consulta: 2006, Enero 20].
- [15] www.bibliotecnica.upc.es [Consulta: 2006, Enero 10].

GLOSARIO

Acimut: Ángulo que con el meridiano forma el círculo vertical que pasa por un punto de la esfera celeste o del globo terráqueo.

Cizallamiento: Desplazamiento de partículas de los estratos rocosos los cuales causan deslizamientos de tierras.

Consolidación: El efecto es causado por el gradiente de presión de poro de la formación rocosa, inducido por un cambio en el estado de esfuerzo. El equilibrio de la presión de poros toma una cierta cantidad de tiempo para reestabilizarse.

“Creep” o fluencia: Pueden ser debido a mecanismos de microfisuración o por flujo, bajo condiciones de presión y/o temperatura elevadas mantenidas a largo plazo en la formación rocosa.

Densidad equivalente de circulación (ECD, por sus siglas en inglés “*Equivalent circulating density*”): Es aquella densidad del lodo más una densidad adicional debido a una adición de presión ejercida sobre la formación cuando el lodo se circula.

Ecuación de Archie: Ecuación petrofísica fundamental la cual relaciona la saturación de agua, con la porosidad, resistividad del agua y resistividad de la formación.

Efecto Compton: Fenómeno que ocurre cuando los rayos gamma son emitidas y experimentan colisiones sucesivas con los átomos del material de la formación perdiendo energía en cada colisión. En consecuencia las energías emitidas por los rayos gamma se van reduciendo progresivamente al pasar a través de la formación hasta llegar un momento en el cual un átomo de la formación lo absorbe completamente por medio del efecto fotoeléctrico.

Ley de Hooke: La deformación de un cuerpo es directamente proporcional al esfuerzo aplicado sobre él.

Módulos elásticos: Se conoce como módulos elásticos al grupo de coeficientes que describen el comportamiento de los materiales, como son: Módulo de Young, relación Poisson, módulo de rigidez, módulo volumétrico y parámetro de Lamé.

Módulo de corte G : Se define como la relación entre los esfuerzos de corte y deformación angular. Es considerado una medida de la resistencia de muestra a ser deformada debido a esfuerzos de corte:

$$E = 2(1 + \nu)G$$

Presión confinante: Presión causada por la carga de las rocas adyacentes.

Subsidencia: Se entiende por subsidencia al descenso paulatino del suelo.

NOMENCLATURAS

- a : Constante de la ecuación de Archie.
- C : Cohesión para presiones efectivas.
- c_b : Compresibilidad de todo el cuerpo rocoso.
- c_{ma} : Compresibilidad de la matriz.
- E : Módulo de Young.
- ECD : Densidad equivalente de circulación (Lpg).
- G : Gradiente de presión (Lpc/pies).
- GR : Valor de rayos gamma leído del registro (unidades gAPI).
- GR_{cl} : Valor mínimo de rayos gamma asignado a arenas limpias (unidades gAPI).
- GR_{sh} : Valor máximo de rayos gamma asignado a las lutitas (unidades gAPI).
- h : Profundidad (pies).
- I_{GR} : Índice de radioactividad (adimensional).
- m : Constante de la ecuación de Archie. Exponente de cementación (adimensional).
- n : Constante de la ecuación de Archie. Exponente de Saturación (adimensional).
- p_f : Presión de poros (Lpc).
- P_{MUD} : Presión calculada para una densidad ECD (Lpc).
- R_{sh} : Resistividad de las arcillas (ohm/m).
- R_t : Resistividad de la formación (ohm/m).
- R_w : Resistividad del agua de formación (ohm/m).
- S_w : Saturación de agua (fracción).
- S_{xo} : Saturación del filtrado en la zona invadida, igual a $(1 - S_{hr})$ (fracción).
- V_{sh} : Volumen de arcillas (fracción).
- x, y, z : Ejes de Coordenadas de un sistema cartesiano.
- α : Coeficiente de Biot o constante de poroelasticidad.
- β : Ángulo de cizalla.
- ε : Deformación.

- ε_{ax} : Deformación axial.
- ε_t : Deformación transversal.
- ν : Relación de Poisson (adimensional).
- ρ_b : Densidad total (gr/cc).
- ρ_f : Densidad de los fluidos (gr/cc).
- ρ_h : Densidad de los hidrocarburos a las condiciones de la formación (gr/cc).
- ρ_{ma} : Densidad de la matriz (gr/cc).
- ρ_{mf} : Densidad del filtrado de lodo (gr/cc).
- σ : Esfuerzo.
- σ_1 : Tensión mayor de los esfuerzos.
- σ_2 : Tensión intermedia de los esfuerzos.
- σ_3 : Tensión menor de los esfuerzos.
- σ_h : Esfuerzo horizontal mínimo (Lpc).
- σ_H : Esfuerzo horizontal máximo (Lpc).
- σ_n : Componente normal del esfuerzo.
- σ_v : Esfuerzo vertical (Lpc).
- σ_y : Límite de elasticidad.
- σ' : Esfuerzo efectivo.
- σ'_{rr} : Esfuerzo radial efectivo.
- σ'_{zz} : Esfuerzo axial efectivo.
- $\sigma'_{\theta\theta}$: Esfuerzo tangencial efectivo.
- τ : Componente tangencial del esfuerzo.
- φ : Porosidad (fracción).
- ϕ : Ángulo de fricción para presiones efectivas.