

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE POZO UTILIZANDO EL SOFTWARE
PBORE**

**CÉSAR AUGUSTO GÓMEZ VANEGAS
RAFAEL SANTAMARÍA BOLÍVAR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2004**

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE POZO UTILIZANDO EL SOFTWARE
PBORE**

**CÉSAR AUGUSTO GÓMEZ VANEGAS
RAFAEL SANTAMARÍA BOLÍVAR**

Trabajo de Grado para optar por el título de Geólogo
Trabajo de Grado para optar por el título de Ing. de Petróleos

DIRECTORES

M. Sc. Néstor F. Saavedra T.
Director Investigaciones ICP

Ph. D. Marco Álvarez
Docente UIS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2004**

DEDICATORIA

A Dios todo poderoso, por darme la oportunidad de la vida, con su mensaje de amor y esperanza, siempre me ha acompaña y protegido.

A mis padres, Carmen y Gustavo, por haber entregado toda la vida para enseñarme el significado de las palabras amistad y cariño, por estar siempre a mi lado sin importar las circunstancias acompañando y aconsejando para ser cada día mejor.

A Sylvia Zoraya, mi gran amor, por su apoyo y paciencia durante los tiempos difíciles, se ha convertido en alguien muy importante en mi vida.

A mis hermanos, especialmente a Sara Inés por ser un apoyo incondicional durante mi vida.

César

DEDICATORIA

Dios:

*Organizas tus fichas para facilidad mía,
lo menos que puedo hacer es ofrecerte cada uno de mis triunfos,
nuestros triunfos.*

Madre:

*Fuiste el sol que dio luz a mi brillo,
hoy eres la estrella que me impulsa a seguir este camino,
por ti, para ti,
mi trabajo, mi vida, mi todo.*

Padre, Shonny, Polliz:

*Soy el fruto de su amor,
de su apoyo y comprensión.
Son mi pasado, mi futuro, mi esperanza
y la oportunidad de agradecerle a la vida
sus vidas.*

Mayra:

*Cruzaste, te enredaste y te quedaste,
cuando mi vida descubría nuevos mundos.
Este libro tiene mucho de ti,
aunque sus letras no lo digan...
al igual que yo.*

¡A mis amigos... los del alma!

Rafael

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las siguientes personas:

M. Sc. Néstor Fernando Saavedra, gracias por creer en nuestras capacidades, formarnos como investigadores y brindarnos la oportunidad de presentarnos como personas útiles al país.

Ph. D. Zuly Calderón, por su apoyo total e incondicional durante el desarrollo de este proceso de investigación.

Ph. D. Marco Idelfonso Álvarez, por colaboración en la presentación de este libro.

Ph. D. Gildardo Osorio Gallego, por abrirnos las puertas al extenso campo de la Geomecánica, por sus consejos, su colaboración y apoyo.

Al Grupo de Investigación de Estabilidad de Pozo por haber sido los pioneros en este sueño, por tanto conocimiento compartido, no solo técnico sino personal, por haber afrontado unidos todos los inconvenientes y las dudas que aparecieron en el camino.

A la Universidad Industrial de Santander, por estos años de educación integral.

Ing. Jenny Mabel Carvajal y al Comité Técnico del proyecto “Impacto Geomecánico en la Estabilidad de pozo durante la perforación en el Piedemonte llanero”, por sus orientaciones y dedicación en este trabajo.

Al Instituto Colombiano del Petróleo, ICP, por el soporte técnico de sus funcionarios en el desarrollo de este libro y por habernos facilitado sus instalaciones.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	22
1. ASPECTOS GENERALES DE LA GEOMECÁNICA EN LA ESTABILIDAD DE POZO	24
1.1 GEOMECÁNICA	24
1.2 TEORÍA DE LA ELASTICIDAD	24
1.2.1 Elasticidad lineal	25
1.2.1.1 Esfuerzos	25
1.2.1.2 Esfuerzos invariantes	28
1.2.1.3 Esfuerzos deviatoricos	29
1.2.1.4 Esfuerzos principales	29
1.2.1.5 Circulo de Mohr	30
1.2.1.6 Deformación	31
1.2.1.7 Deformaciones principales	34
1.2.1.8 Modulo elástico (relaciones esfuerzo-deformación)	35
1.2.1.9 Anisotropía	39
1.3 POROELASTICIDAD	44
1.3.1 Teoría de la poroelasticidad de Biot para propiedades estáticas	45
1.3.1.1 Concepto de esfuerzo efectivo	49
1.4 EFECTOS DEPENDIENTES DEL TIEMPO	51
1.4.1 Consolidación	51
1.4.2 Creep	51
2. ESTABILIDAD DURANTE LA PERFORACIÓN	54
2.1 PRINCIPIO DEL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD.	55

2.1.1	Esfuerzos alrededor del pozo.	56
2.1.2	Esfuerzos principales alrededor del Pozo	60
2.1.3	Mecanismos y modos de falla.....	60
2.1.4.	Criterios de Falla por Cizalladura.....	65
2.1.4.1.	Criterio de Falla de Mohr – Coulomb	65
2.1.4.2.	Criterio de Falla de Drucker–Prager.....	70
2.1.4.3.	Criterio Modificado de Lade	72
2.1.5.	Ventana Segura de Lodo	75
2.1.5.1.	Calculo del Peso mínimo de Lodo para prevenir el colapso de pozo..	75
2.1.5.2	Cálculo del máximo peso de Lodo antes del fracturamiento.....	77
2.2	ASPECTOS DE IMPORTANCIA PRÁCTICA.....	81
2.2.1	Litología de la formación.....	82
2.2.2	Propiedades del lodo	83
2.2.3	Los efectos dependientes del tiempo.....	84
2.2.4	Los efectos de la temperatura.....	85
2.3	ASPECTOS OPERACIONALES	86
2.3.1	Surgencia y suaveo	86
2.3.2	Limpieza del pozo	86
3.	MARCO GEOLÓGICO	87
3.1	LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	87
3.2	EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ...	89
3.3	MODELO ESTRATIGRÁFICO	90
3.3.1	Formación Guadalupe.....	93
3.3.1.1	Posición estratigráfica y edad.	93
3.3.1.2	Descripción Litológica.	93
3.3.1.3	Ambiente de depositación.....	93
3.3.2	Formación Barco.....	94

3.3.2.1	Posición Estratigráfica y edad.....	94
3.3.2.2	Descripción Litológica.....	94
3.3.2.3	Ambiente Depositional.....	95
3.3.3	Formación Los Cuervos.....	95
3.3.3.1	Posición estratigráfica y edad.....	95
3.3.3.2	Descripción Litológica.....	96
3.3.3.3	Ambiente deposicional.....	96
3.3.4	Formación Mirador.....	97
3.3.4.1	Posición estratigráfica y edad.....	97
3.3.4.2	Descripción litológica.....	97
3.3.4.3	Ambiente deposicional.....	98
3.3.5	Formación Carbonera.....	98
3.3.5.1	Posición estratigráfica y edad.....	98
3.3.5.2	Descripción litológica.....	98
3.3.5.3	Ambiente Depositional.....	100
3.3.6	Formación León.....	101
3.3.6.1	Posición estratigráfica y edad.....	101
3.3.6.2	Descripción litológica.....	101
3.3.6.3	Ambiente de depositacion.....	101
3.3.7	Formación Guayabo.....	102
3.3.7.1	Posición estratigráfica y edad.....	102
3.3.7.2	Descripción litológica.....	102
3.4	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	103
3.4.1	Falla de Guaicáramo.....	106
3.4.2	Falla de Yopal.....	106
3.4.3	Falla del Borde llanero.....	106
3.4.4	Sinclinal de Nunchía.....	108
3.4.5	Dominio estructural.....	108
3.4.5.1	El Bloque Cusiana.....	108

4.	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD USANDO EL SOFTWARE POBRE 3D..	111
4.1	DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE	111
4.1.1	Propiedades del pozo	112
4.1.1.1	Sistema de Unidades	112
4.1.1.2	Orientación de la perforación	112
4.1.1.4	Los Datos de la perforación	114
4.1.1.5	Criterios de falla de corte	114
4.1.1.6	Análisis de la tensión de la Falla	114
4.1.1.7	Teorías para realizar el análisis	114
4.1.2.1	Parámetros elásticos.....	115
4.1.2.2	Parámetros Químicos	116
4.1.2.3	Intervalos de Tiempo.....	116
4.1.3.	Cálculos realizados por el Software	116
4.2.	MÉTODO PARA VALIDAR EL SOFTWARE PBORE 3D.....	117
4.3.	ANÁLISIS DEL POZO BUCA 1 Y BUCA 2.....	123
4.3.1.	Reporte General Pozo Buca 1	124
4.3.2.	Reporte General del Pozo Buca 2.	125
4.3.3.	Datos Utilizados	125
4.3.4.	Metodología del análisis de estabilidad de pozo.....	129
4.3.5.	Análisis de estabilidad con el software PBORE para las Formaciones Carbonera C6 y Los Cuervos del pozo Buca 1.....	132
4.3.6.	Análisis de estabilidad con el software PBORE para La Formación Carbonera C7 y Los Cuervos del pozo Buca 2.	149
	CONCLUSIONES	164
	RECOMENDACIONES.....	166
	NOMENCLATURA.....	167

BIBLIOGRAFÍA.....	171
ANEXO 1. ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN COORDENADAS CILÍNDRICAS	175

LISTA DE TABLA

	Pag.
Tabla 1. Relaciones entre las Constantes Elásticas.	38
Tabla 2. Categoría de los criterios de falla.....	70
Tabla 3. Condiciones para falla de corte en pozos verticales con pared impermeable, por el Criterio de Mohr-Coulomb	76
Tabla 4. Datos para un pozo vertical con esfuerzos horizontales iguales.....	79
Tabla 5. Datos obtenidos del reporte de perforación para el pozo Buca 1	127
Tabla 6. Datos Obtenidos de reporte de perforación para el pozo Q6.....	128
Tabla 7. Datos de propiedades mecánicas de la roca utilizados.	129

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1 Esfuerzos sobre un material	25
Figura 2. Descomposición de Fuerzas.....	27
Figura 3. Componentes de Esfuerzos en 2 dimensiones.....	28
Figura 4. Esfuerzos Principales	30
Figura 5. Circulo de Mohr	31
Figura 6. Tipos de Deformación.....	33
Figura 7. Prueba Uniaxial	36
Figura 8. Pruebas a una muestra (a) enchaquetada y (b) sin enchaquetar .	47
Figura 9. Deformación vs. Tiempo para un material en estado de Creep	52
Figura 10. Desarrollo del Creep para diferentes valores de esfuerzos aplicados.....	53
Figura 11. Orientación del pozo respecto a los esfuerzos in situ	57
Figura 12. Sistema coordenado cilíndrico para un pozo desviado.....	58
Figura 13. Prueba Triaxial para una muestra.....	60
Figura 14. Esquema de Esfuerzo vs. Deformación para una prueba de Compresión Uniaxial.....	61
Figura 15. Modo de Falla de Ovalización de Pozo (Breakout).....	62
Figura 16. Modo de Falla Compresiva Tórica	62
Figura 17. Modo de Falla Compresiva de Elongación	63
Figura 18. Modo de Falla Compresiva Helicoidal.....	63
Figura 19. Modo de Falla Tensil (Fracturamiento Hidráulico)	63
Figura 20. Modo de Falla Tensil por Exfoliación	64
Figura 21. Ejemplo de una función de Mohr de la ecuación (94) en el diagrama esfuerzos de corte y normal.....	65
Figura 22. Criterio de Mohr-Coulomb en el espacio. También se muestra el circulo de Mohr correspondiente a un estado de esfuerzos críticos.	66

Figura 23. Inclinación máxima para el plano de falla, de acuerdo al criterio de Mohr-Coulomb.	67
Figura 24. Criterio de Mohr-Coulomb en el plano σ_1 y σ_3	68
Figura 25. Resistencia predicha, σ_1 como función de σ_2 , para $S_o = \text{psi}$, $\phi = 30$ y $\sigma_3 = 866 \text{ psi}$ (los resultados para $\phi = 0$, también son mostrados)	74
Figura 26. Distribución de esfuerzo elástico con dos presiones de pozo.....	76
Figura 27. Ilustración del análisis de la estabilidad de un pozo desviado.	80
Figura 28. Localización del área de estudio.....	88
Figura 29. Carta de Correlación Estratigráfica de la Cuenca de los Llanos Orientales.	91
Figura 30. Columna estratigráfica generalizada del área de estudio	92
Figura 31. Ambientes de depositación de la Formación Guadalupe.....	94
Figura 32. Ambiente depositacional de la formación Barco	95
Figura 33. Ambiente depositacional de la formación Cuervos	96
Figura 34. Ambiente depositacional de la formación Mirador	98
Figura 35. Ambiente depositacional de la formación Carbonera	100
Figura 36. Ambiente depositacional de la formación León	102
Figura 37. Ambiente depositacional de la formación Guayabo	103
Figura 38. Fault-bend-fold.....	104
Figura 39. Fault-propagation-fold.....	104
Figura 40. Zona de Dúplex Clásico.....	104
Figura 41. Zona Triangular	105
Figura 42. Cabeza de Serpiente (Snake Head)	105
Figura 43. Principales rasgos estructurales del área de estudio.....	107
Figura 44. Sección estructural a lo largo del área de estudio	109
Figura 45. Perfil Estructural del Pozo Buca 1	110
Figura 46. Ventana de entrada de las propiedades del pozo.....	112
Figura 47. Geometría de un pozo inclinado	113
Figura 48. Ventana de entrada de las propiedades de la roca	115
Figura 49. Ventana de Presentación.....	117

Figura 50. Ventana de Entrada de Datos.....	118
Figura 51. Diagrama de Flujo del proceso realizado por medio de la Hoja Electrónica.	119
Figura 52. Distribución de esfuerzos alrededor del pozo para un determinado ángulo de pozo.	121
Figura 53. Envoltente de Falla por corte.	122
Figura 54. Pesos de Lodo óptimos para cada modo de falla.	122
Figura 55. Ubicación de los pozos B2 ST y Q6 con respecto a las coordenadas geográficas y a los esfuerzos in situ.	127
Figura 56. Trayectoria óptima de pozo para menor inestabilidad	130
Figura 57. Componentes que actúan sobre un pozo horizontal orientado un ángulo β con respecto al σ_h	131
Figura 58. Esfuerzo efectivo Tangencial alrededor del pozo B2 ST en la F. Carbonera C6	133
Figura 59. Esfuerzo efectivo Tangencial alrededor del pozo B2 ST en la F. Los Cuervos.....	134
Figura 60. Esfuerzo efectivo Radial alrededor del pozo B2 ST en la F. Carbonera C6	134
Figura 61. Esfuerzo efectivo Radial alrededor del pozo B2 ST en la F. Los Cuervos	136
Figura 62. Esfuerzo efectivo Axial alrededor del pozo B2 ST en la F. Carbonera C6	137
Figura 63. Esfuerzo efectivo Axial alrededor del pozo B2 ST en la F. Los cuervos	137
Figura 64. Esfuerzo efectivo de Corte alrededor del pozo B2 ST para Carbonera C6	138
Figura 65. Esfuerzo efectivo de Corte alrededor del pozo B2 ST para Los Cuervos	138
Figura 66. Distribución de esfuerzos tangenciales en 2D alrededor del Pozo B2 ST a un ángulo de 90°. Software PBORE	139

Figura 67. Distribución de esfuerzos radiales en 2D alrededor del Pozo B2 ST a un ángulo de 90°. Software PBORE.....	139
Figura 68. Distribución de esfuerzos axiales en 2D alrededor del Pozo B2 ST a un ángulo de 90°. Software PBORE	140
Figura 69. Distribución de esfuerzos alrededor en 2D del Pozo B2 ST a un ángulo determinado. Programa en Excel.....	140
Figura 70. Peso de Lodo crítico variando el Azimut del pozo B2 ST para la F. Carbonera C6	141
Figura 71. Peso de Lodo crítico variando el Azimut del pozo B2 ST para la F. Los Cuervos.....	142
Figura 72. Peso de Lodo crítico variando el ángulo del pozo B2 ST para la F. Carbonera C6	142
Figura 73. Peso de Lodo crítico variando el ángulo del pozo B2 ST para la F. Los Cuervos.....	143
Figura 74. Criterios de Falla y tensión para el pozo B2 ST a la profundidad de la Formación Carbonera C6.....	144
Figura 75. Criterios de Falla y tensión para el pozo B2 ST a la profundidad de la Formación Los Cuervos.	145
Figura 76. Peso de Lodo crítico para Fractura del pozo B2 ST en la F. Carbonera C6	146
Figura 77. Peso de Lodo crítico para Colapso del pozo B2 ST en la F. Carbonera C6	146
Figura 78. Peso de Lodo crítico para Fractura del pozo B2 ST en la F. Los Cuervos	147
Figura 79. Peso de Lodo crítico para Colapso del pozo B2 ST en la F. Los Cuervos	147
Figura 80. Ventana de Lodo del pozo B2 ST en la Formación Carbonera C6	148
Figura 81. Ventana de Lodo del pozo B2 ST en la F. Los Cuervos	149

Figura 82. Esfuerzo efectivo Tangencial alrededor del pozo Q6 para la F. Carbonera C7	150
Figura 83. Esfuerzo efectivo Tangencial alrededor del pozo Q6 para la F. Los Cuervos	150
Figura 84. Esfuerzo efectivo Radial alrededor del pozo Q6 para la F. Carbonera C7.	151
Figura 85. Esfuerzo efectivo Radial alrededor del pozo Q6 para la F. Los Cuervos	151
Figura 86. Esfuerzo efectivo Axial alrededor del pozo Q6 para la F. Carbonera C7	152
Figura 87. Esfuerzo efectivo Axial alrededor del pozo Q6 para la F. Los Cuervos	152
Figura 88. Esfuerzo efectivo de Corte alrededor del pozo Q6 para la F. Carbonera C7	153
Figura 89. Esfuerzo efectivo de Corte alrededor del pozo Q6 para la F. Los Cuervos	153
Figura 90. Distribución de esfuerzos tangenciales en 2D alrededor del Pozo Q6 a un ángulo de 90°. Software PBORE	154
Figura 91. Distribución de esfuerzos radiales en 2D alrededor del Pozo Q6 a un ángulo de 90°. Software PBORE	155
Figura 92. Distribución de esfuerzos axiales en 2D alrededor del Pozo Q6 a un ángulo de 90°. Software PBORE	155
Figura 93. Distribución de esfuerzos alrededor en 2D del Pozo Q6 a un ángulo determinado. Programa en Excel.....	156
Figura 94. Peso de Lodo crítico variando el Azimut del pozo Q6 para la F. Carbonera C7	157
Figura 95. Peso de Lodo crítico variando el Azimut del pozo Q6 para la F. Los Cuervos	157
Figura 96. Peso de Lodo crítico variando la inclinación para el pozo Q6 en la F. Carbonera C7	158

Figura 97. Peso de Lodo crítico variando la inclinación para el pozo Q6 en la F. Los Cuervos	158
Figura 98. Criterios de Falla para el pozo Q6 en la Formación Carbonera C7	159
Figura 99. Criterios de Falla para el pozo Q6 en la Formación Los Cuervos	160
Figura 100. Peso de Lodo crítico para Fracturar en el pozo Q6 para la F. Carbonera C7	161
Figura 101. Peso de Lodo crítico para Colapso en el pozo Q6 para la F. Carbonera C7	161
Figura 102. Ventana de Lodo del pozo Q6 en la F. Carbonera C7	162
Figura 103. Peso de Lodo crítico para Fracturar en el pozo Q6 para la F. Los Cuervos	162
Figura 104. Peso de Lodo crítico para Colapso para Los Cuervos.....	163
Figura 105. Ventana de Lodo del pozo Q6 en la Fm. Los Cuervos	163

TITULO: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE POZOS UTILIZANDO EL SOFTWARE PBORE.

AUTORES: CESAR AUGUSTO GÓMEZ VANEGAS¹
RAFAEL SANTAMARÍA BOLÍVAR²

PALABRAS CLAVE: Análisis de estabilidad, Geomecánica, Distribución de Esfuerzos, Peso de Lodo, Elasticidad, Pbores, Piedemonte Llanero.

RESUMEN

La gran necesidad que ha surgido de tener un buen análisis de estabilidad de pozo en la etapa de planeación de la perforación ha aumentado debido a las consideraciones económicas y a los requerimientos para llegar al objetivo en zonas complejas. Con un adecuado entendimiento del comportamiento de los esfuerzos se puede llegar a definir un plan que optimice el tiempo de perforación, los costos de inversión y los problemas geomecánicos, siendo este trabajo esencial para los programas de completamiento y evaluación de registros.

En función de lo anteriormente expuesto, se pensó en la viabilidad de usar el software PBORE 3D para dar solución inmediata al problema de inestabilidad de pozos en nuestra región. El software realiza un análisis para pozos en medios porosos, encontrando la distribución de esfuerzos alrededor de las paredes para un peso de lodo determinado. Provee curvas variando el peso de lodo como una función del esfuerzo efectivo de fractura o del esfuerzo efectivo de colapso dependiendo del modelo de falla seleccionado. También obtiene una ventana de peso de lodo crítica para los modelos de falla y colapso

El objetivo de este trabajo es conocer los métodos que utiliza el software para realizar el análisis de estabilidad bajo un modelo elástico general. Y luego aplicarlo a dos casos del Piedemonte Llanero para brindar un posible tratamiento por medio de su manejo a los inconvenientes presentados actualmente.

¹ Escuela de Geología. Facultad de Ingenierías Físico

icas.

² Escuela de Ingeniería de Petróleos. Facultad de Ing

as Físico Químicas.

TITLE: WELLBORE STABILITY ANALYSIS USING THE PBORE SOFTWARE

**AUTHORS: CESAR AUGUSTO GÓMEZ VANEGAS³
RAFAEL SANTAMARÍA BOLIVAR⁴**

KEYWORDS: Stability Analysis, Geomechanics, Stress distribution, Mudweight, Elasticity, Pbores, Piedemonte Llanero.

ABSTRACT

The great necessity that has been arisen of having a good analysis of wellbore stability in the drilling stage, has been increased due to economic considerations and requirements to arrive the target in complex areas. With an appropriate understanding of the stress behavior, it can end up defining a drilling plan which optimizes drilling time, investment costs and geomechanics problems, been this work essential for the completion and logging evaluation programs.

In function of this, it was thought of the viability of using the software PBORE 3D to give immediate solution to the wellbore instability problem in our region. The software carries out an analysis for wells in porous media, finding the stress distribution around the walls for certain mudweight. It provides curves varying the mudweight as a function of the fracture effective stress or of the collapse effective stress depending on the model fail selected. It also obtains a critic mud weight window for the fails models.

The objective of this work is to know the software methods to carry out a stability analysis in a general elastic model. And then to apply it to two cases of the Piedemonte Llanero to offer a possible treatment by means of their handling to the inconveniences presented at the moment.

³ Geology School. Faculty of Physic-Chemical Engineering.

⁴ Petroleum Engineering School. Faculty of Physic-Chemical Engineering.

INTRODUCCIÓN

Una de las mayores dificultades en campos de geología compleja ha sido la mala condición de los pozos, usualmente reflejado en las pegas de tubería y en otros problemas de perforación. Sin embargo en el tiempo de desarrollo de los campos se ha evidenciado que el desempeño mejora cuando se perfora en una dirección específica con respecto al buzamiento de las fallas principales o de las estratificaciones.

Las rocas a profundidad se encuentran bajo un estado de esfuerzos de compresión de una magnitud relativamente grande. Cuando el pozo es perforado, la roca que rodea el pozo se deforma debido a una distribución de esfuerzos inducida por el pozo, si esta distribución es irregular surgen problemas para mantener mecánicamente estable el pozo. Luego de realizar un análisis de estabilidad de pozo, este es usado para evaluar el efecto de la trayectoria del pozo y así, es planteado un modelo que contribuya a la estabilidad del hueco en el momento de la perforación y a través del tiempo.

La inestabilidad de pozo repercute en problemas significativos durante las operaciones de perforación, completamiento, evaluación de registros y cementación de pozo. Dichos problemas se ven reflejados en pérdida de circulación cuando ocurre una falla por tensión y en cierre de pozo cuando ocurre una falla por colapso (o compresión), entre otros problemas.

Algunos de los factores operacionales que más podrían afectar el desempeño de la perforación son⁵:

- ✗ Peso de Lodo
- ✗ Reología del Lodo
- ✗ Perdidas de Fluido (filtrado)
- ✗ Química del Lodo
- ✗ Trayectoria del pozo
- ✗ Parámetros de Perforación (Tasa de Bombeo y ROP)

Cuando se está perforando en una zona donde existe anisotropía en los esfuerzos horizontales, se debe tener sumo cuidado con la inclinación y el azimut del pozo, para orientarlo de manera que los esfuerzos alrededor de este afecten en lo menor posible el trabajo de perforación. La intención de orientar en una dirección específica el pozo, se hace con el objetivo de provocar que los esfuerzos distribuidos alrededor de las paredes sean lo suficientemente uniformes y evitar así que existan problemas de ovalización o en el peor de los casos colapso o fracturas en la formación.

El objetivo del análisis geomecánico de un pozo es investigar el potencial de inestabilidad calculando el estado de redistribución de esfuerzos y comparándolo con un criterio de falla adoptado. Para entender los problemas de falla de pozo, deben ser conocidos los factores mecánicos que lo afectan.

⁵ Last, N.C., Plumb, R.A. Harkness, R., Charlez, P., Alsen, J. and Mc Lean, M.R. An Integrated Approach to Evaluating and Managing Wellbore Instability in the Cusiana Field, Colombia, South America. Artículo SPE 30464. 1995

1. ASPECTOS GENERALES DE LA GEOMECÁNICA EN LA ESTABILIDAD DE POZO

1.1 GEOMECÁNICA

La Geomecánica de yacimientos se define como la aplicación de los principios de ingeniería al estudio de la interacción entre las rocas de yacimiento y el flujo de fluidos a través de ellas (Osorio, 2003). El significado de estos procesos es muy importante, pues así se puede predecir el funcionamiento mecánico de las formaciones a grandes profundidades, lo cual es la clave para evitar la inestabilidad de pozo.

En los primeros estudios de análisis geomecánico se comenzó utilizando la teoría de la elasticidad, la cual trata al material como un sólido continuo, sin embargo esta no tiene en cuenta el efecto del espacio poroso de la roca. Por esta razón los investigadores profundizaron en el análisis del espacio poroso y del efecto de la difusión de la presión de poro a través de éste. Esta teoría es conocida como poroelasticidad e incluye el concepto de esfuerzo efectivo, introducido en sus inicios por Terzaghi (1923).

A continuación se presentan los conceptos básicos de estas teorías.

1.2 TEORÍA DE LA ELASTICIDAD

Muchos materiales tienen la habilidad para resistir y recuperarse de deformaciones producidas por fuerzas. Esta habilidad es llamada *Elasticidad* y es el fundamento para todos los aspectos de la mecánica de rocas⁸. El tipo de respuesta más simple es donde hay una relación lineal entre las fuerzas

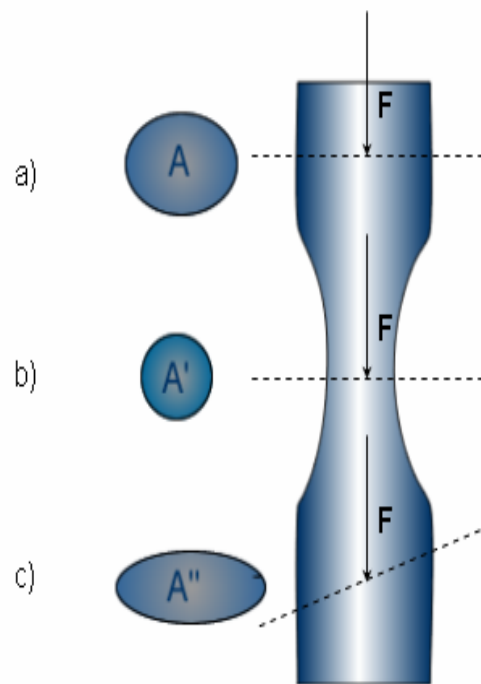
externas y las correspondientes deformaciones. Cuando los cambios en las fuerzas son lo suficientemente pequeños la respuesta es (cercanamente) siempre lineal. Por lo tanto la Teoría de la elasticidad lineal es fundamental para todas las discusiones sobre elasticidad.

1.2.1 Elasticidad lineal

1.2.1.1 Esfuerzos.

Cuando una fuerza F es aplicada sobre un material a través de una sección transversal, A , el material reacciona con una fuerza igual pero en dirección contraria (Figura 1)

Figura 1 Esfuerzos sobre un material



El esfuerzo a través de la sección transversal es definido como¹³:

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

Considerando el área transversal en b) (Figura 1), la fuerza actuando a través de ella es igual a la fuerza actuando a través de a). El área A' de la sección transversal en b), es más pequeña que A , por lo tanto el esfuerzo $\sigma' = F / A'$ en b) es mayor que el esfuerzo en a), es decir, el esfuerzo depende de la posición dentro del material. Si se divide la sección transversal en un número infinito de sub-secciones ΔA , a través de las cuales una pequeña parte infinitesimal ΔF de la fuerza total F está actuando y considerando una sub-sección i la cual contiene un punto P . El esfuerzo en el punto P es definido como:

$$\sigma = \lim_{\Delta A_i \rightarrow 0} \frac{\Delta F_i}{\Delta A_i} \quad (2)$$

La ecuación (2) define el *esfuerzo local* en un punto i dentro de la sección transversal en a) (Figura 1), mientras que la ecuación (1) describe el *esfuerzo promedio* en la misma sección. Cuando se habla de estado de esfuerzos en un punto, implícitamente se está hablando de los *esfuerzos locales principales*.

Considerando la sección transversal en c) (Figura 1) con un área A'' , la fuerza no es normal a la sección transversal. Se debe entonces descomponer la fuerza en una componente F_n que es normal a la sección transversal y una componente F_p que es paralela a la superficie. La cantidad:

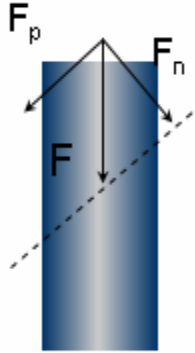
$$\sigma = \frac{F_n}{A''} \quad (3)$$

es llamada *Esfuerzo normal*, mientras que la cantidad:

$$\tau = \frac{F_p}{A''} \quad (4)$$

es llamada esfuerzo de corte. Entonces, hay dos tipos de esfuerzos que actúan a través de la superficie, y la magnitud de cada uno depende de la orientación de la superficie.

Figura 2. Descomposición de Fuerzas



Para dar una completa descripción del estado de esfuerzos en un punto P dentro de una muestra, es necesario identificar los esfuerzos relacionados a las superficies orientadas en las tres direcciones ortogonales:

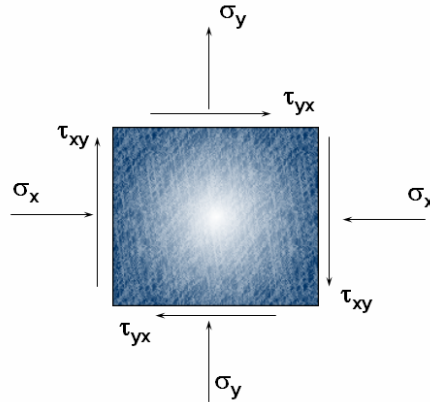
$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (5)$$

Esta expresión es llamada Tensor de esfuerzos y da una completa descripción con las nueve componentes relacionadas al punto P . Sin embargo, no todos los nueve componentes del tensor de esfuerzos son independientes. Considerando un plano cuadrado x - y como el mostrado en la Figura 3, mientras no haya fuerzas de traslación, ni de rotación, se requiere para el equilibrio:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \quad \tau_{xz} = \tau_{zx}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (6)$$

estas relaciones reducen el número de componentes independientes a seis.

Figura 3. Componentes de Esfuerzos en 2 dimensiones



Aunque la notación más usual para el tensor de esfuerzos es:

$$\vec{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Para un esfuerzo σ_{ij} , el sufijo (i) identifica el eje normal a la superficie, mientras que el segundo sufijo (j) identifica la dirección de la fuerza.

1.2.1.2 Esfuerzos invariantes.

La ecuación (5) es una representación matricial del tensor de esfuerzos. Cuando se cambia a un eje de coordenadas diferente, la matriz se transforma a una matriz ordinaria, entonces el esfuerzo medio normal es:

$$\bar{\sigma} = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3 \quad (8)$$

este esfuerzo permanece sin alteraciones durante cualquier cambio de sistema coordenado. Por lo tanto, el esfuerzo principal normal es un esfuerzo invariante. Existen otras combinaciones, presentadas a continuación. Cualquier combinación de esfuerzos invariantes producirá un esfuerzo invariante también:

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \\ I_2 &= -(\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \\ I_3 &= \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

1.2.1.3 Esfuerzos deviatóricos

El esfuerzo normal medio, definido en la ecuación (8), esencialmente causa compresión o tensión uniforme. Las distorsiones, por el contrario, son causadas por los llamados esfuerzos deviatóricos²⁶, estos esfuerzos además de distorsionar el cuerpo, cambian su volumen; en cambio, los esfuerzos no deviatóricos, distorsionan el cuerpo, pero no cambian el volumen del mismo. Estos se obtienen de la resta del esfuerzo normal medio a los componentes del esfuerzo normal:

$$\begin{pmatrix} S_x & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_y & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_x - \bar{\sigma} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \bar{\sigma} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \bar{\sigma} \end{pmatrix} \quad (10)$$

Los invariantes de los esfuerzos deviatóricos también pueden ser establecidos similarmente:

$$\begin{aligned} J_1 &= S_x + S_y + S_z \\ J_2 &= -(S_x S_y + S_y S_z + S_z S_x) + S_{xy}^2 + S_{yz}^2 + S_{zx}^2 \\ J_3 &= S_x S_y S_z + 2S_{xy} S_{yz} S_{zx} - S_y S_{zx}^2 - S_z S_{xy}^2 \end{aligned} \quad (11)$$

1.2.1.4 Esfuerzos principales

Para una orientación especial del eje de coordenadas, el tensor de esfuerzos tiene una forma particularmente simple. Considerando que el triángulo de la Figura 4 está en reposo y no hay fuerzas que actúen sobre él. La cancelación de fuerzas implica que:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + \tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ \tau &= \frac{1}{2} (\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \end{aligned} \quad (12)$$

Escogiendo un adecuado valor de θ , es posible obtener un $\tau = 0$. De la ecuación (12) se ve que esto sucede cuando:

$$\tan 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (13)$$

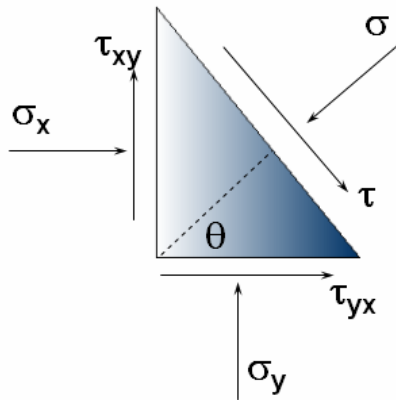
La ecuación (13) tiene dos soluciones, θ_1 y θ_2 . Las dos soluciones corresponden a las dos direcciones para las cuales el esfuerzo de corte (τ) desaparece. Estas dos direcciones son llamadas ejes principales de esfuerzo¹³.

Los correspondientes esfuerzos normales σ_1 y σ_2 son llamados esfuerzos principales, y son hallados introduciendo los valores de θ_1 y θ_2 , respectivamente dentro de la ecuación (12):

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{\tau_{xy}^2 + \frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2} \\ \sigma_2 &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \sqrt{\tau_{xy}^2 + \frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2} \end{aligned} \quad (14)$$

Es conveniente escoger una notación tal que $\sigma_1 > \sigma_2$

Figura 4. Esfuerzos Principales



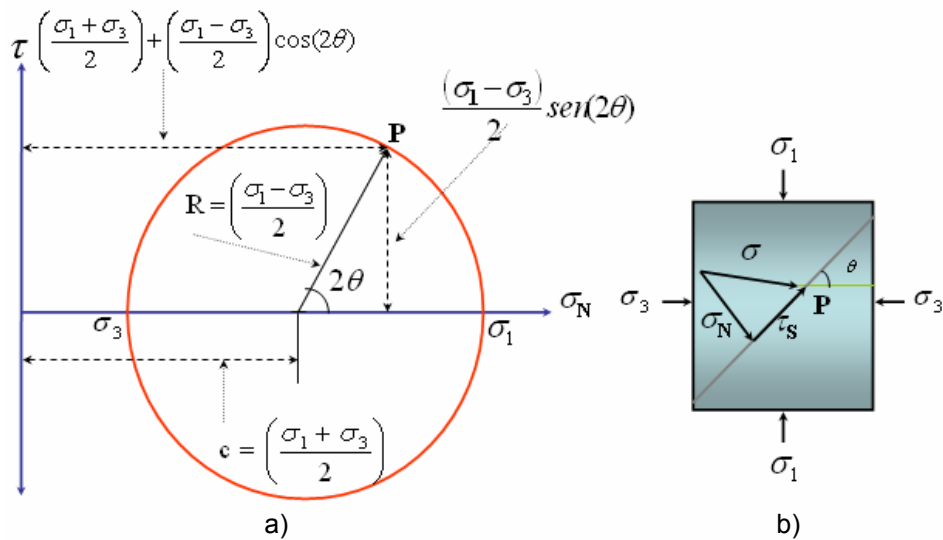
1.2.1.5 Circulo de Mohr.

Es usualmente conveniente re-orientar el sistema de coordenadas tal que el eje x sea paralelo al primer eje principal y el eje y paralelo al otro. Entonces los esfuerzos normal (σ) y de corte (τ) en la dirección θ relativa al eje x se convierten²⁶:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\theta \\ \tau &= -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\sin 2\theta\end{aligned}\quad (15)$$

Graficando los correspondientes valores de σ y τ en cualquier dirección θ (Figura 5) corresponden a un punto sobre el Círculo de Mohr. Se puede ver de a) (Figura 5) que el mayor valor absoluto del esfuerzo de corte es $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ y ocurre para $\theta = \pi/4$ ($=45^\circ$) y $\theta = 3\pi/4$ ($=135^\circ$). El Círculo de Mohr es una herramienta muy útil en el análisis de las condiciones para la fractura de la roca.

Figura 5. Círculo de Mohr



1.2.1.6 Deformación.

Considerando que la posición inicial de una partícula específica dentro de una muestra es x, y, z , y que después de la acción de una fuerza externa, la posición de esta partícula cambia. Denotando el cambio en la dirección x por u , el cambio en la dirección y por v y el cambio en la dirección z por w . Las

cantidades u , v , y w son llamadas los desplazamientos de la partícula. La nueva posición de la partícula inicialmente en x , y , y z se convierte en:

$$\begin{aligned}x' &= x - u \\y' &= y - v \\z' &= z - w\end{aligned}\tag{16}$$

Si los desplazamientos u , v , y w , son constantes, es decir, son los mismos para todas las partículas en el mismo plano, entonces el desplazamiento del cuerpo fue exclusivamente una translación. Otra forma simple de desplazamiento es la rotación de un cuerpo rígido. Para una pequeña rotación denotada por $\vec{w}$, donde la magnitud $|\vec{w}|$, da el ángulo de rotación mientras la dirección de $\vec{w}$ da el eje de rotación, la nueva posición para la partícula será:

$$\vec{r}' = \vec{r} + \vec{w} \times (\vec{r} - \vec{r}_o)\tag{17}$$

donde $\vec{r} = (x, y, z)$ y $\vec{r}' = (x', y', z')$. El vector $\vec{r}_o$ es el centro de rotación, a través del cual el eje de rotación gira. Si la posición relativa de las partículas dentro de la muestra son cambiadas, tal que la nueva posición no puede ser obtenida simplemente por traslación rígida o rotación de la muestra, se dice que ocurrió deformación.

La deformación⁸ es definida como la compresión (positiva) o extensión (negativa) resultado de la aplicación de fuerzas externas, divididas por la dimensión original. Dos tipos de deformación pueden ser reconocidas: homogéneas y heterogéneas. Cuando toda parte de un cuerpo es expuesta a una deformación del mismo tipo y magnitud en alguna dirección del desplazamiento, la deformación es considerada homogénea. La deformación es heterogénea si no es igual en todo el cuerpo. La deformación resultante de aplicaciones extendidas de grandes esfuerzos y altas temperaturas es descrita como finita. Sin embargo, si la deformación resulta de la aplicación de un incremento de esfuerzos puede ser tratada matemáticamente, por lo

tanto esta es definida como una deformación infinitesimal. La deformación es responsable en el cuerpo por el desplazamiento y la rotación.

La deformación de corte (Γ), se define como el cambio angular en un ángulo recto en un punto en un cuerpo y es relacionado al desplazamiento en las direcciones x , y , y z . En la Figura 6, se observa un ejemplo de una muestra deformada. El desplazamiento relacionado al punto O y P no es igual y está definido por²⁸:

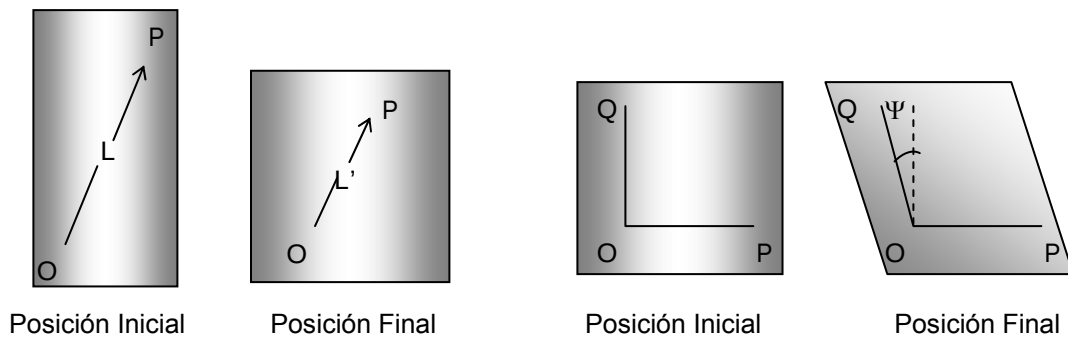
$$\varepsilon = \frac{L - L'}{L} \quad (18)$$

el cual es llamado la elongación correspondiente al punto O en la dirección OP. Otro tipo de deformación que puede ocurrir puede ser expresado por el cambio (Γ) del ángulo entre las dos direcciones ortogonales principales. La cantidad:

$$\Gamma = \frac{1}{2} \tan \Psi \quad (19)$$

es llamada la *deformación de corte* correspondiente al punto O en la dirección OP.

Figura 6. Tipos de Deformación



Para deformaciones en dos dimensiones, la elongación en x , en la dirección x , está dada por:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (20)$$

Si las deformaciones son pequeñas, encontramos que la deformación de corte correspondiente a la dirección x :

$$\Gamma_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (21)$$

Para dar una completa descripción del estado de deformación en un punto dentro de un cuerpo tridimensional, se debe especificar la elongación y la deformación de corte correspondiente a los tres ejes:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x & \Gamma_{xy} & \Gamma_{xz} \\ \Gamma_{yx} & \varepsilon_y & \Gamma_{yz} \\ \Gamma_{zx} & \Gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad (22)$$

Además se puede definir la *deformación volumétrica*:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (23)$$

que simboliza la disminución relativa en volumen. Esta deformación volumétrica es independiente del eje coordenado escogido y por lo tanto es una deformación invariante. Similarmente a los esfuerzos invariantes de la ecuación (9), para las deformaciones se tiene:

$$\begin{aligned} J_2 &= -(\varepsilon_x \varepsilon_y + \varepsilon_y \varepsilon_z + \varepsilon_z \varepsilon_x) + \Gamma_{xy}^2 + \Gamma_{yz}^2 + \Gamma_{zx}^2 \\ J_3 &= \varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z + 2\Gamma_{xy}\Gamma_{yz}\Gamma_{zx} - \varepsilon_y \Gamma_{zx}^2 - \varepsilon_z \Gamma_{xy}^2 \end{aligned} \quad (24)$$

también llamados *deformaciones invariantes*.

1.2.1.7 Deformaciones principales

Al igual que en los esfuerzos, las deformaciones de corte desaparecen para una dirección específica, tal orientación del sistema de coordenadas (con los ejes paralelos a las direcciones de las deformaciones principales) En dos

dimensiones los esfuerzos de corte desaparecen en una dirección θ relacionada al eje x, la cual cumpla con la ecuación:

$$\tan 2\theta = \frac{2\Gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \quad (25)$$

La deformación principal, en tres dimensiones, es encontrada por la solución del siguiente determinante:

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_x - \varepsilon & \Gamma_{xy} & \Gamma_{xz} \\ \Gamma_{yx} & \varepsilon_y - \varepsilon & \Gamma_{yz} \\ \Gamma_{zx} & \Gamma_{zy} & \varepsilon_z - \varepsilon \end{vmatrix} = 0 \quad (26)$$

Las tres soluciones resultantes son ε_1 , ε_2 y ε_3 . La dirección de los cosenos l_{1x} , l_{1y} , y l_{1z} que identifican el eje principal correspondiente a ε_1 son hallados por la solución del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} I_{1x}(\varepsilon_x - \varepsilon_1) + I_{1y}\Gamma_{yx} + I_{1z}\Gamma_{zx} &= 0 \\ I_{1x}\Gamma_{xy} + I_{1y}(\varepsilon_y - \varepsilon_1) + I_{1z}\Gamma_{zx} &= 0 \\ I_{1x}\Gamma_{xy} + I_{1y}\Gamma_{yx} + I_{1z}(\varepsilon_z - \varepsilon_1) &= 0 \end{aligned} \quad (27)$$

Los ejes correspondientes a ε_2 y ε_3 son encontrados de manera similar.

1.2.1.8 Modulo elástico (relaciones esfuerzo-deformación).

La teoría de la elasticidad lineal trata con situaciones donde hay relaciones lineales entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones resultantes. Mientras la mayoría de rocas tienen un comportamiento no lineal cuando son sujetas a grandes esfuerzos, su comportamiento puede ser descrito por relaciones lineales para cambios suficientemente pequeños en esfuerzo.

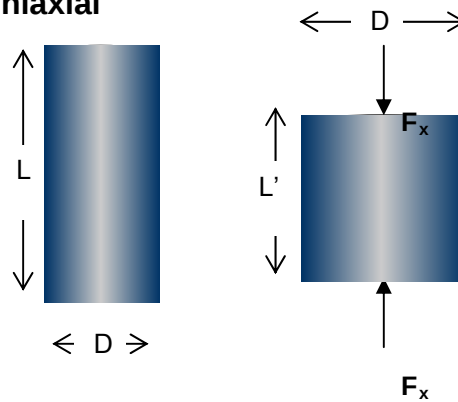
Considerando una muestra de longitud L y área transversal $A = D^2$ (Figura 7), al aplicar una fuerza F en los extremos, la longitud de la muestra se reduce a

L' . El esfuerzo aplicado es $\sigma_x = F / A$ y la correspondiente elongación es $\varepsilon_x = (L - L') / L$. Si la muestra tiene un comportamiento lineal, la relación entre cada una será:

$$\sigma_x = E \varepsilon_x \quad (28)$$

La ecuación (28) es conocida como la *Ley de Hooke*. El coeficiente E es llamado *Módulo de Young*. Este módulo pertenece al grupo conocido como Módulos elásticos, y es una medida de la rigidez de la muestra, es decir, es la resistencia de la muestra a dejarse comprimir en una prueba uniaxial.

Figura 7. Prueba Uniaxial



Otra consecuencia del esfuerzo aplicado σ_x (Figura 7) es el incremento en el diámetro de la muestra. La elongación lateral es $\varepsilon_y = \varepsilon_z = (D - D') / D$. En general $D' > D$, por lo tanto ε_y y ε_z serán negativas. La relación definida como:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (29)$$

es otro parámetro elástico, conocido como la Relación de Poisson y es una medida de la expansión lateral relativa a la contracción longitudinal. Otra importante constante elástica es el Módulo de Rigidez, G , el cual expresa la medida de la resistencia de un cuerpo al cambio de forma, y es expresado como:

$$G = \frac{\text{Esfuerzo de corte}}{\text{Deformación de corte}} = \frac{\tau}{\gamma} \quad (30)$$

También existe el Módulo Volumétrico, K, el cual es definido como la relación del cambio de presión hidrostática (esfuerzo) a la correspondiente deformación volumétrica:

$$K = \frac{\Delta p}{\Delta V / V_o} = \frac{\sigma_p}{\varepsilon_v} = \lambda + \frac{2}{3} G \quad (31)$$

donde Δp es el cambio en la presión hidrostática, ΔV es el cambio en volumen y V_o es el volumen original. El Módulo Volumétrico es el recíproco de la compresibilidad de la matriz:

$$K = \frac{1}{c_r} \quad (32)$$

Las ecuaciones (28) y (29), que relacionan un componente del esfuerzo o la deformación con el otro, están definidas por un estado específico de esfuerzos, donde $\sigma_x \neq 0, \sigma_y = \sigma_z = 0$. En general, cada componente de la deformación es una función lineal de todas las componentes del esfuerzo.

Para los materiales isotrópicos, aquellos cuya respuesta es independiente de la orientación del esfuerzo aplicado, coinciden en sus ejes principales de esfuerzos y sus ejes principales de deformaciones, además, las relaciones generales entre los esfuerzos y las deformaciones pueden ser escritas como¹³:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= (\lambda + 2G)\varepsilon_x + \lambda\varepsilon_y + \lambda\varepsilon_z \\ \sigma_y &= \lambda\varepsilon_x + (\lambda + 2G)\varepsilon_y + \lambda\varepsilon_z \\ \sigma_z &= \lambda\varepsilon_x + \lambda\varepsilon_y + (\lambda + 2G)\varepsilon_z \\ \tau_{xy} &= 2G\Gamma_{xy} \\ \tau_{xz} &= 2G\Gamma_{xz} \\ \tau_{yz} &= 2G\Gamma_{yz} \end{aligned} \quad (33)$$

Donde λ es un parámetro matemático conocido como el parámetro de Lamé. El Módulo de Young y la Relación de Poisson se definen para una prueba uniaxial, donde $\sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$. De la ecuación (33) se puede encontrar que:

$$E = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} = G \frac{3\lambda + 2G}{\lambda + G}$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} = \frac{\lambda}{2(\lambda + G)} \quad (34)$$

Cuando dos de los Módulos elásticos son definidos, los otros dos pueden ser encontrados de relaciones como los de la ecuación (34). Las más útiles combinaciones se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1. Relaciones entre las Constantes Elásticas.

$E = 3K(1 - 2\nu)$	$K = \frac{1 + \nu}{3\nu} \lambda$	$\frac{\lambda}{\lambda + G} = 2\nu$
$E = 2G(1 + \nu)$	$K = \frac{2}{3} G \frac{1 + \nu}{1 - 2\nu}$	$\frac{G}{\lambda + G} = 1 - 2\nu$
$E = \frac{9KG}{3K + G}$	$K = \lambda + \frac{2}{3} G$	$\frac{\lambda + 2G}{\lambda + G} = 2(1 - \nu)$
$E = \frac{3\lambda + 2G}{\lambda + G} G$	$\nu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)}$	$\frac{3\lambda + 2G}{\lambda + G} = 2(1 + \nu)$
$E = \frac{\lambda}{\nu} (1 + \nu)(1 - 2\nu)$	$\frac{\lambda}{G} = \frac{2\nu}{1 - 2\nu}$	$\frac{3\lambda + 4G}{\lambda + G} = 2(2 - \nu)$

Tomado de “Petroleum related Rock Mechanics”. FJÆR, E. et al.

Las relaciones esfuerzo-deformación, ecuación (33), son las ecuaciones fundamentales para la descripción de materiales linealmente elásticos e isotrópicos. En muchos casos, sin embargo, es conveniente tener estas ecuaciones en una forma alternativa, expresando las deformaciones como

función de los esfuerzos. Introduciendo las expresiones de la ecuación (34) para E y ν , esta forma alternativa es:

$$\begin{aligned}
 E \varepsilon_x &= \sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z) \\
 E \varepsilon_y &= \sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z) \\
 E \varepsilon_z &= \sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y) \\
 G \Gamma_{xy} &= \frac{1}{2} \tau_{xy} \\
 G \Gamma_{xz} &= \frac{1}{2} \tau_{xz} \\
 G \Gamma_{yz} &= \frac{1}{2} \tau_{yz}
 \end{aligned} \tag{35}$$

1.2.1.9 Anisotropía.

Si la respuesta elástica de la roca no es independiente de la orientación de la misma para una configuración de esfuerzos dado, entonces se dice que la roca es anisotrópica. La mayoría de las rocas son anisotrópicas hasta cierto punto. El módulo elástico de un material anisotrópico es diferente para varias direcciones dentro del material.

El origen de la anisotropía¹³ siempre son heterogeneidades a pequeña escala, yendo de secuencias de diferentes tipos de roca hasta diferente configuración molecular. En el caso de las rocas sedimentarias, estas se crean durante el proceso de depositación donde los granos normalmente no son depositados al azar, por ejemplo: en un ambiente de río hay una dirección predominante (la dirección de la corriente) a lo largo de la cual los granos tendrán la tendencia a orientarse. Las variaciones estacionales en las tasas de flujo de agua pueden resultar en micro-capas con una distribución de grano fino a grueso. El módulo elástico de la roca, creado bajo estas condiciones dependerá de la orientación del material, es decir, será anisotrópico. Debido a este origen, la anisotropía de este tipo es llamada *litológica* o *intrínseca*. Otro importante tipo de anisotropía es

normalmente causada por micro-fracturas, generadas por un esfuerzo *deviatorico* y predominantemente orientado normal al esfuerzo mínimo principal.

En los cálculos de elasticidad de la roca, algunas veces la anisotropía es despreciada. Esta simplificación puede ser necesaria mas que cómoda, porque una descripción anisotrópica requiere mucha más información acerca del material –información que puede no estar disponible-. Sin embargo, al despreciar la anisotropía, se puede caer en grandes errores que arruinarán los cálculos.

Para un material anisotrópico general cada componente de esfuerzos está relacionado linealmente a cada componente de la deformación por coeficientes independientes. La notación matemática usada es expresada como:

$$\sigma_{ij} = \sum_{kl} C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (36)$$

Donde C_{ijkl} son constantes elásticas. Los índices i, j, k y l pueden tomar el valor de 1, 2 o 3, formando 81 constantes C_{ijkl} . Muchas de ellas desaparecen y otras son iguales por simetría, sin embargo el número de constantes independientes es considerablemente pequeño. Se puede demostrar que:

$$C_{ijkl} = C_{jikl} = C_{ijlk} = C_{jilk} \quad (37)$$

Es decir, el intercambio del primer índice con el segundo, o el tercero con el cuarto, no cambia el valor de la constante. Más allá, el cumplimiento de algunos tipos de ecuaciones, requieren que:

$$C_{ijkl} = C_{klij} \quad (38)$$

Las relaciones (37) y (38) reducen el número de constantes independientes a 21.

Las rocas normalmente poseen al menos simetría ortorrómbica, la cual implica que el material tiene tres planos perpendiculares de simetría. Asumiendo que estos planos de simetría son perpendiculares al eje de coordenadas definido por $x' = x$, $y' = y$, $z' = -z$. En este nuevo sistema de

coordenadas, dos de los componentes de la deformación han cambiado de signo, $\varepsilon'_{13} = -\varepsilon_{13}$ y $\varepsilon'_{23} = -\varepsilon_{23}$. Esto implica que:

$$C_{1133} = C_{1123} = 0 \quad (39)$$

Aplicando los mismos argumentos a los componentes del esfuerzo restantes, y sobre otras orientaciones del sistema coordenado prima, el número de constantes independientes C_{ijkl} es reducido a 9, estos son C_{1111} , C_{2222} , C_{3333} , C_{1122} , C_{1133} , C_{2233} , C_{3323} , C_{1313} , y C_{1212} . En la notación compacta, donde σ_x es usado en lugar de σ_{11} , las constantes C_{ijkl} tienen solo dos índices, i y j . Esta es también llamada Notación Voigt, los índices ij están relacionados a i como sigue: $11 \rightarrow 1$, $22 \rightarrow 2$, $33 \rightarrow 3$, $23 \rightarrow 4$, $13 \rightarrow 5$, $12 \rightarrow 6$. Las constantes pueden ser escritas como:

$$\begin{array}{cccccc} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{array} \quad (40)$$

Los ceros representan las constantes que desaparecen por los argumentos de simetría del tipo de la ecuación (39). Estos se incluyen para dar énfasis a la naturaleza de la matriz de constantes y también como recordatorio de que existen: para un material con simetría ortorrómbica ellos solo desaparecen cuando el plano de simetría es perpendicular a los ejes coordenados. Denotando la matriz 6 x 6 (ecuación 40) como $\vec{\sigma} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}]$ y $\vec{\varepsilon} = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \Gamma_{yz}, \Gamma_{xz}, \Gamma_{xy}]$, las ecuaciones de tipo (1) pueden ser escritos como el producto:

$$\vec{\sigma} = \vec{C} * \vec{\varepsilon} \quad (41)$$

La ecuación (41) es en realidad 6 ecuaciones. Escritas en una forma explícita, en la notación Voigt, estas ecuaciones son:

$$\sigma_x = C_{11} \varepsilon_x + C_{12} \varepsilon_y + C_{13} \varepsilon_z$$

$$\begin{aligned}
\sigma_y &= C_{12} \varepsilon_x + C_{22} \varepsilon_y + C_{23} \varepsilon_z \\
\sigma_z &= C_{13} \varepsilon_x + C_{32} \varepsilon_y + C_{33} \varepsilon_z \\
\tau_{yz} &= 2C_{44} \Gamma_{yz} \\
\tau_{xz} &= 2C_{55} \Gamma_{xz} \\
\tau_{xy} &= 2C_{66} \Gamma_{xy} \\
\tau_{yz} &= 2C_{44} \Gamma_{yz}
\end{aligned} \tag{42}$$

Estas relaciones esfuerzo-deformación generalmente describen más tipos de rocas. La matriz C es llamada *matriz de rigidez* y sus componentes C_{IJ} son llamados constantes elásticas. El inverso de la matriz de rigidez $\vec{S} = \vec{C}^{-1}$, es llamado *matriz de cumplimiento*.

Seguido de la ecuación (41), la matriz de cumplimiento relaciona las deformaciones y los esfuerzos de la siguiente manera:

$$\vec{\varepsilon} = \vec{S} * \vec{\sigma} \tag{43}$$

Las constantes en la ecuación (40) describen las propiedades elásticas de un material elástico lineal con simetría ortorrómbica o mayor. Entonces, ellas pueden describir una roca isotrópica. Para un material isotrópico:

$$\begin{aligned}
C_{11} &= C_{22} = C_{33} = \lambda + 2G \\
C_{12} &= C_{13} = C_{23} = \lambda \\
C_{44} &= C_{55} = C_{66} = G
\end{aligned} \tag{44}$$

Para un material isotrópico, las propiedades elásticas lineales son completamente descritas cuando dos de los módulos elásticos: Parámetro de Lamé λ , Módulo de corte G , Relación de Poisson ν , Módulo de Young E o Módulo Volumétrico K son identificados. Sin embargo, esto no se logra fácilmente en situaciones prácticas.

El módulo elástico no tiene únicos valores para materiales anisotrópicos. Las propiedades elásticas son diferentes en direcciones diferentes, los valores para E y ν pueden obviamente variar de acuerdo a la dirección del esfuerzo aplicado. El módulo volumétrico K es una excepción. Como la presión

hidrostática y el esfuerzo volumétrico son invariantes a la orientación del material, el módulo volumétrico K también será invariante.

Como un ejemplo, considérese un estado de esfuerzos uniaxial conocidos el Módulo de Young y la Relación de Poisson, y $\sigma_y = \sigma_z = 0$ y $\tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$. Las relaciones de esfuerzo-deformación son:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= C_{11} \varepsilon_x + C_{12} \varepsilon_y + C_{13} \varepsilon_z \\
 0 &= C_{12} \varepsilon_x + C_{22} \varepsilon_y + C_{23} \varepsilon_z \\
 0 &= C_{13} \varepsilon_x + C_{32} \varepsilon_y + C_{33} \varepsilon_z \\
 0 &= 2 C_{44} \Gamma_{yz} \\
 0 &= 2 C_{55} \Gamma_{xz} \\
 0 &= 2 C_{66} \Gamma_{xy} \\
 0 &= 2 C_{44} \Gamma_{yz}
 \end{aligned} \tag{45}$$

Resolviendo la ecuación (45) para $\nu = -\varepsilon_y / \varepsilon_x$, tenemos:

$$\nu = \frac{-\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = \frac{C_{12}C_{33} - C_{13}C_{23}}{C_{22}C_{33} - C_{23}^2} \tag{46}$$

mientras que para $\nu = -\varepsilon_z / \varepsilon_x$ tenemos (intercambiando los índices 2 y 3):

$$\nu = \frac{-\varepsilon_z}{\varepsilon_x} = \frac{C_{13}C_{22} - C_{12}C_{23}}{C_{22}C_{33} - C_{23}^2} \tag{47}$$

Entonces el valor de la Relación de Poisson depende no sólo de la dirección del esfuerzo aplicado sino también de la dirección en la cual la expansión lateral es medida.

Un tipo especial de simetría, el cual es importante para varios tipos de roca, es la simetría rotacional completa alrededor de un eje. Las rocas que poseen tal simetría son llamadas *transversalmente isotrópicas*. Esto implica que las propiedades elásticas son iguales para todas las direcciones dentro de un plano, pero diferentes en otras direcciones. Este elemento extra de simetría reduce el número de constantes elásticas independientes a 5.

Asumiendo que las direcciones x y y son equivalentes mientras que la dirección z es diferente, se puede rotar el sistema de coordenadas un ángulo alrededor del eje z sin alterar las constantes elásticas. Para que esto sea posible se requiere que $C_{11} = C_{22}$, $C_{13} = C_{23}$, $C_{12} = C_{11} - 2C_{66}$, y $C_{44} = C_{55}$. Entonces la matriz de rigidez para un material transversalmente isotrópico teniendo el eje z como único eje es:

$$\begin{matrix}
 C_{11} & C_{11} - 2C_{66} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\
 C_{11} - 2C_{66} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\
 C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66}
 \end{matrix} \quad (48)$$

La isotropía transversal es normalmente considerada una simetría representativa para rocas sedimentarias estratificadas horizontalmente. Los esfuerzos que inducen anisotropía usualmente también pueden ser descritos por la isotropía transversal. Para los geofísicos, la isotropía transversal es probablemente el más importante tipo de simetría después de la isotropía, en el software PBORE, se manejan la isotropía y la isotropía transversal.

1.3 POROELASTICIDAD

Las rocas son generalmente compuestas por materiales diferentes y de ahí su no homogeneidad a nivel microscópico. El comportamiento de la roca, su respuesta elástica, su esfuerzo de falla etc., depende en gran parte del material no sólido en la roca. Para el estudio de la poroelasticidad, primero se considera una descripción macroscópica de poro y un medio permeable, el cual permita estudiar las propiedades mecánicas dinámicas y estáticas, basados en la teoría de Biot (1946).

1.3.1 Teoría de la poroelasticidad de Biot para propiedades estáticas

Considerando un medio isotrópico, poroso y permeable, compuesto de una parte sólida y otra de fluido. El desplazamiento del sólido es: $\vec{u}_s$, mientras el fluido es descrito como $\vec{u}_f$. Para un elemento de volumen adjunto a un sólido, la deformación estará dada por la derivada de las componentes de $\vec{u}_s$, el esfuerzo volumétrico será:

$$\varepsilon_v = \nabla \cdot \vec{u}_s \quad (49)$$

Para la parte del fluido se define un parámetro de deformación ζ , que describe la deformación volumétrica del fluido con relación al sólido.

$$\zeta = \phi \nabla \cdot (\vec{u}_s - \vec{u}_f) \quad (50)$$

El tensor de esfuerzos σ representa los esfuerzos externos totales en un elemento de volumen adjunto al armazón del sólido, y en parte por una presión hidrostática en el fluido, presión de poro P_f ²⁶.

La presencia de fluido de poro añade términos extras a la energía de deformación del material. Por lo tanto, la relación esfuerzo-deformación, también será modificada. Biot (1962) mostró como la relación lineal esfuerzo-deformación para un sistema de dos fases puede ser expresada en términos de los parámetros de deformación ε_v y ζ , los elementos del tensor de esfuerzo y la presión de poro P_f :

$$\sigma_x = \lambda \varepsilon_v + 2G \varepsilon_x - C \zeta \quad (51)$$

$$\sigma_y = \lambda \varepsilon_v + 2G \varepsilon_y - C \zeta \quad (52)$$

$$\sigma_z = \lambda \varepsilon_v + 2G \varepsilon_z - C \zeta \quad (53)$$

$$\tau_{yz} = 2G \Gamma_{yz} \quad (54)$$

$$\tau_{xy} = 2G \Gamma_{xy} \quad (55)$$

$$Pf = C\varepsilon_v - M\zeta \quad (56)$$

λ y G son los parámetros de Lamé del material poroso, mientras C y M son parámetros definidos para describir un medio de dos fases. Como se observa en las ecuaciones (51) a la (53) y (56), C juega un papel de acoplamiento en la deformación del sólido y fluido, mientras M indica las características de las propiedades elásticas del fluido de poro. Si se suman las ecuaciones (51) al (53) tenemos:

$$\bar{\sigma} = K\varepsilon_v - C\zeta \quad (57)$$

Donde $\bar{\sigma}$ es definido por la ecuación (8), el módulo volumétrico es: $K = \lambda + 2G/3$ de la roca porosa en condiciones sin drenar. Es decir, en una condición donde el fluido de poro no se puede escapar.

Analizando cómo el módulo elástico C , M y K se relacionan con el módulo de los constituyentes de la roca, primero se toma una muestra “enchauquetada” (Figura 8.a): un medio poroso es confinado dentro de una “chaqueta” impermeable, y es sometido a una presión hidrostática externa σ_p . Se le permite al fluido de poro escapar durante la carga, entonces la presión de poro se conserva constante, y de ahí, el esfuerzo es por completo conservado por el armazón del sólido. De la ecuación (63) y (64), se obtiene que:

$$\frac{\sigma_p}{\varepsilon_v} = K - \frac{C^2}{M} \equiv Kfr \quad (58)$$

Puesto que esta prueba caracteriza la rigidez de la parte sólida de la roca, Kfr , es llamado el módulo volumétrico del armazón. Ya que no hay fuerzas de corte asociadas con el fluido, se puede identificar directamente el módulo de corte del sistema poroso como el módulo de corte del esqueleto, es decir:

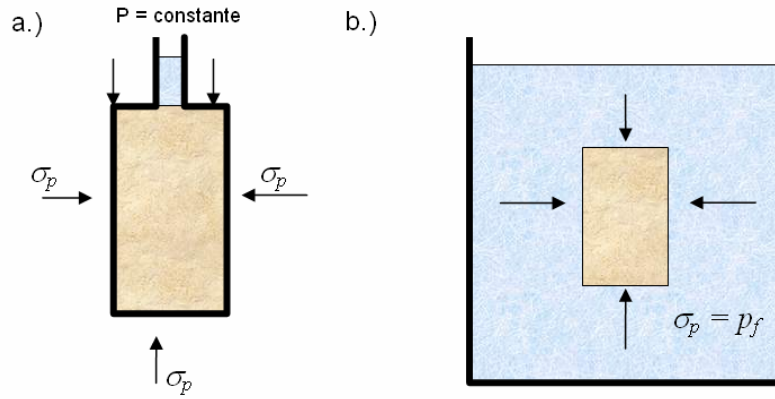
$$G = Gfr \quad (59)$$

Ahora, se analiza una prueba “sin enchaquetar”, como se observa en la Figura 8.b. La roca es sumergida en un fluido tal que la presión hidrostática sobre la muestra es balanceada por la presión en los poro, es decir $P_f = \sigma_p$.

Combinando la ecuación (63) y (64) se obtiene²⁶:

$$\frac{\sigma_p}{\varepsilon_v} = \frac{Kfr}{1 - \frac{C}{M}} \quad (60)$$

Figura 8. Pruebas a una muestra (a) enchaquetada y (b) sin enchaquetar



En este caso la respuesta esfuerzo-deformación del sólido es completamente dada por las propiedades intrínsecas del material sólido, es decir, $\sigma_p = K_s \varepsilon_v$ donde K_s es el modulo volumétrico del sólido. Comparando con la ecuación anterior, esto implica que:

$$K_s = \frac{Kfr}{1 - \frac{C}{M}} \quad (61)$$

El parámetro de deformación ζ de acuerdo a las ecuaciones (50), (49) y (31) es dado por:

$$\zeta = \phi \left(\frac{1}{K_s} - \frac{1}{K_f} \right) P_f \quad (62)$$

Donde K es el modulo volumétrico del fluido de poro. La combinación de las ecuaciones (56) y (57) da:

$$\zeta = \frac{C - K}{KfrM} Pf \quad (63)$$

Por combinación de las ecuación (62) y (63) se obtiene la relación:

$$\phi \left(\frac{1}{Ks} - \frac{1}{Kf} \right) = \frac{C - K}{KfrM} \quad (64)$$

Combinar las ecuaciones (61) y (64) con el termino Kfr (ecuación 58), permite escribir la constante de elasticidad K , C y M en términos del modulo de elasticidad de los componentes de la roca (Ks y Kf) más la porosidad ϕ y el modulo del esqueleto sólido. Los resultados son:

$$K = Kfr + \frac{Kf}{\phi} \cdot \frac{\left(1 - \frac{Kfr}{Ks}\right)}{1 + \frac{Kf}{\phi Ks} \left(1 - \phi - \frac{Kfr}{Ks}\right)} \quad (65)$$

$$C = \frac{Kf}{\phi} \frac{1 - \frac{Kfr}{Ks}}{1 + \frac{Kf}{\phi Ks} \left(1 + \frac{Kf}{\phi Ks} \left(1 - \phi - \frac{Kfr}{Ks}\right)\right)} \quad (66)$$

$$M = \frac{CKs}{Ks - Kfr} \quad (67)$$

Las relaciones (65) al (67) no dan un claro significado físico a cada parámetro.

En el caso de una roca “dura” donde la matriz es incompresible comparada con el fluido. En general $Ks \gg Kf$, se tiene para este caso de “matriz dura”:

$$Kfr, Gfr, Ks \gg Kf \quad (68)$$

Para porosidades finitas esto se reduce a:

$$\text{Esqueleto Rígido} \begin{cases} K \approx K_{fr} \\ C \approx \frac{K_f}{\phi} \left(1 - \frac{K_{fr}}{K_s} \right) \\ M \approx \frac{K_f}{\phi} \end{cases} \quad (69)$$

Se ve que el módulo volumétrico, K , es identificado como el módulo volumétrico del esqueleto de la roca, mientras M es dada por las propiedades del fluido de poro del sistema poroso.

En el caso contrario de un esqueleto débil, se asume:

$$K_{fr}, G_{fr}, K_f \ll K_s \quad (70)$$

Para porosidades $\phi \gg K_f / K_s$ las ecuaciones (65) al (67) se reducen a:

$$\text{Esqueleto Débil} \begin{cases} K \approx K_{fr} + \frac{K_f}{\phi} \\ C \approx M \approx \frac{K_f}{\phi} \end{cases} \quad (71)$$

1.3.1.1 Concepto de esfuerzo efectivo.

En la sección 1.3.1, se discutió un experimento donde la muestra de la roca fue enchaquetada con presión de fluido libre para escapar, Figura (8.a). La respuesta esfuerzo-deformación de esta prueba es dada por la ecuación (58) es decir:

$$K_{fr} = \frac{\sigma_p}{\varepsilon_v} \quad (72)$$

Ahora se toma una prueba similar pero con el fluido de poro cerrado. Esta situación es conocida como “sin drenar”. La compresión de la muestra, incluyendo el espacio de poro, debido a una carga hidrostática externa, causará un incremento en la presión de poro. La presión de poro está dada por la ecuación (56):

$$Pf = C\varepsilon_v \quad (73)$$

Mientras las características esfuerzo-deformación están dadas por la ecuación (57):

$$\phi_p = K.\varepsilon_v \quad (74)$$

Usando las ecuaciones (58) al (73) se puede escribir $K = K_{fr} + C^2/M = K_{fr} + (C/M)(Pf/E_v)$. Introduciendo la expresión K dentro de la ecuación (74) y reorganizando se obtiene:

$$\frac{\left(\sigma_p - \frac{C}{M}Pf\right)}{\varepsilon_v} = K_{fr} \quad (75)$$

La ecuación (75) y usando el esfuerzo efectivo σ_p'' , es definido como:

$$\sigma_p^l = \sigma_p - \alpha Pf \quad (76)$$

Físicamente, esto significa que el esqueleto del sólido soporta la parte σ_p'' del esfuerzo total externo σ_p , mientras la parte αPf es soportada por el fluido.

La presión de poro restante, $(1-\alpha)p_f$, es contrarrestada por los esfuerzos internos en el sólido. El parámetro α es llamado la constante de Biot:

$$\alpha = \frac{C}{M} = 1 - \frac{K_{fr}}{K_s} \quad (77)$$

El concepto de esfuerzo efectivo¹⁴ fue introducido por Terzaghi en 1923 para mecánica de suelos, Terzaghi argumentó que:

- i. Incrementar la presión hidrostática externa produce el mismo cambio de volumen del material que reduciendo la presión de poro con la misma cantidad.
- ii. La resistencia de corte depende sólo de la diferencia entre el esfuerzo normal y la presión de poro.

Estos argumentos conducen a una ley de esfuerzo efectivo^{9, 10} con $\alpha = 1$.

1.4 EFECTOS DEPENDIENTES DEL TIEMPO

Los efectos que dependen del tiempo⁸ pueden ser tratados dentro de dos grupos: *consolidación* y *Creep* (Deformación de lento avance). La consolidación es debida al gradiente de presión de poro inducido por el cambio en el estado de esfuerzos y el tiempo que se toma para restablecer la presión de poro al equilibrio. El *Creep* es relacionado al comportamiento viscoelástico del sólido.

1.4.1 Consolidación

La teoría de la consolidación describe el proceso transitorio, donde el equilibrio de la presión de poro es restablecido después de un cambio en el estado de esfuerzos. Este proceso involucra un flujo del fluido de poro a lo largo del poro de la roca.

1.4.2 Creep

El *Creep* es una deformación que puede ocurrir en materiales, bajo esfuerzos constantes. Este se origina por los efectos visco-elásticos en el esqueleto del sólido, de esta manera puede ocurrir tanto en rocas saturadas como en rocas secas.

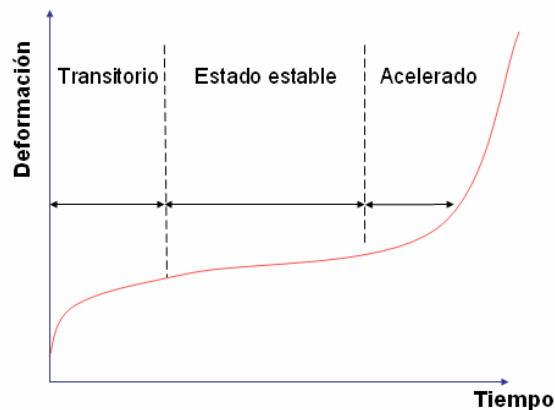
Hay tres etapas de *Creep* siguiendo un cambio en el estado de esfuerzos. Primero, hay una región donde la tasa de deformación decrece con el tiempo, Figura 9. Esta región es llamada *Creep Primario* o *Transitorio*, este proceso puede ser asociado a una menor propagación (tasa de decrecimiento) de microfracturas estables. Si el esfuerzo aplicado es reducido a cero durante el estado de *Creep Primario*, la deformación eventualmente, también decrecería a cero.

En la siguiente etapa, la tasa de deformación es constante. Esta etapa es llamada *Creep de Estado Estable* (o *Secundario*). Si el esfuerzo aplicado es

reducido a cero durante este estado, la deformación no desaparece completamente. Este estado implica una deformación constante del material. Finalmente, la tasa de deformación se incrementa con el tiempo. Esta etapa es llamada *Creep Acelerado*, (o *Terciario*). El proceso puede ser asociado con una rápida propagación de las fracturas inestables.

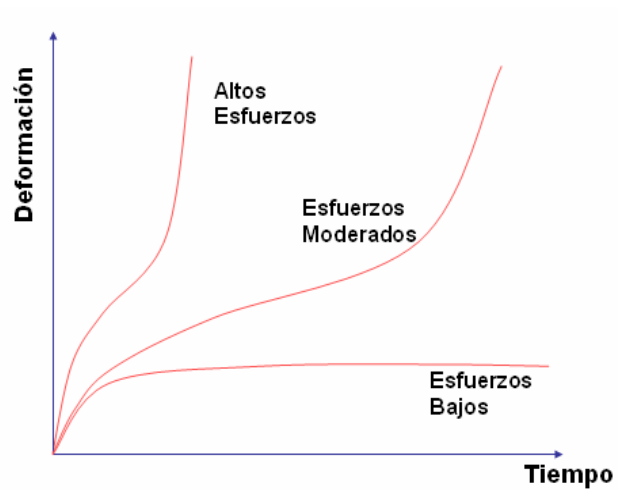
El comportamiento actual del *Creep* de una roca depende de la magnitud de los esfuerzos aplicados. Para esfuerzos moderados o bajos, el material puede virtualmente estabilizarse después un periodo de *Creep Transitorio*. Para altos esfuerzos, el material rápidamente correría los tres estados de creep y después fallaría.

Figura 9. Deformación vs. Tiempo para un material en estado de *Creep*



El régimen de esfuerzo intermedio, donde el material desarrolla completamente cada etapa de *Creep*, puede ser difícil de encontrar en la práctica, Figura 10. La escala de tiempo de una etapa de *Creep* puede variar en un amplio rango, en algunos casos pocos minutos, en otros casos por años. El *Creep* es un proceso molecular, y la escala de tiempo depende de la temperatura; el proceso generalmente se acelera cuando se aumenta la temperatura.

Figura 10. Desarrollo del *Creep* para diferentes valores de esfuerzos aplicados



2. ESTABILIDAD DURANTE LA PERFORACIÓN

Una gran parte del dinero que conlleva desarrollar un campo es gastado en la perforación de pozos¹⁴, lo cual indica la importancia de disminuir los costos tanto en operaciones de perforación así como en el número de pozos perforados. Los problemas de estabilidad durante la perforación causan dificultades sustanciales en todo el mundo. Estos se encuentran casi siempre en las capas rocosas de arcilla por encima del yacimiento, dando como resultado pérdidas de tiempo y algunas veces en pérdidas del equipo.

En zonas tectónicamente activas, las operaciones empeoran si el pozo es direccional, por lo tanto, es necesario entender el comportamiento de las rocas para minimizar los problemas durante la perforación.

La evaluación de la estabilidad de pozo representa un problema clásico de la mecánica de rocas: la predicción de la respuesta de una roca a una carga mecánica. Algunas circunstancias espaciales que hacen la evaluación de la estabilidad un problema particular son:

- Grandes variaciones en los esfuerzos de las formaciones, y mediciones de los esfuerzos in-situ no sistemáticas.
- Grandes variaciones en las propiedades del material de la formación. Altos costos de corazonamientos y cantidades limitadas de material para pruebas de mecánica de rocas.
- Muchas fuerzas actuando sobre la formación alrededor del pozo: química del lodo, redistribución de esfuerzos, cambios en temperatura, etc.

Esto ilustra que la realidad no puede ser descrita exactamente por un modelo, sin preocuparse que tan complicado sea este modelo. Entonces, si se utilizan algunas consideraciones ideales, un análisis de estabilidad, puede proporcionar algunas guías, las cuales posteriormente pueden ser asociadas a algunas condiciones prácticas.

2.1 PRINCIPIO DEL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD.

Idealmente un modelo teórico debería cubrir todos los aspectos que podría afectar la estabilidad, tal como la presión del pozo, la temperatura, el tiempo, la química del lodo, etc. Tal modelo, sin embargo, no está disponible hoy día, y no aparecerá en un futuro cercano hasta que todos los mecanismos no sean lo suficientemente conocidos. El modelo requeriría grandes investigaciones y sería muy difícil conseguir los datos necesarios de entrada, ya que la disponibilidad de los corazones es un factor limitante.

El objetivo del análisis de la estabilidad de pozo es investigar el potencial de inestabilidad del pozo calculando el estado de redistribución de esfuerzos y comparándolo con un criterio de falla adoptado. Para entender los problemas de falla de pozo, deben ser conocidos los factores mecánicos que afectan la estabilidad del pozo.

Los datos principalmente requeridos son:

- Los esfuerzos in-situ
- La presión de poro
- Criterio de falla de la roca

Tales datos no están siempre disponibles con gran exactitud, por lo que es necesario una evaluación crítica de los datos.

2.1.1 Esfuerzos alrededor del pozo.

Las formaciones a ciertas profundidades están sujetas a esfuerzos compresivos, verticales y horizontales. De acuerdo a las magnitudes relativas entre σ_v , σ_H , y σ_h , Anderson (1951), describió los regímenes del campo de los esfuerzos in situ así: *Extensional* o *Falla Normal* cuando el régimen de esfuerzos tenía la siguiente distribución $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$, *Falla Inversa* o de *compresión* cuando $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ y *Falla de Rumbo* o *Strike-Slip* cuando $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$.

Los problemas de estabilidad pueden aparecer en pozos verticales y pozos desviados². Estos problemas son generalmente más grandes en pozos desviados, cuando la distribución de esfuerzos es menos favorable. El esfuerzo vertical, va a tener una componente que aumenta normal al pozo cuando la inclinación aumenta y cuando la ventana segura del lodo disminuye. Estos efectos de desviación se aplican a zonas de gradientes de esfuerzos normales. Si el componente tectónico está presente, la situación debe de ser lo contrario, es decir, el aumento de la desviación es más favorable por lo menos a una dirección dada de azimut.

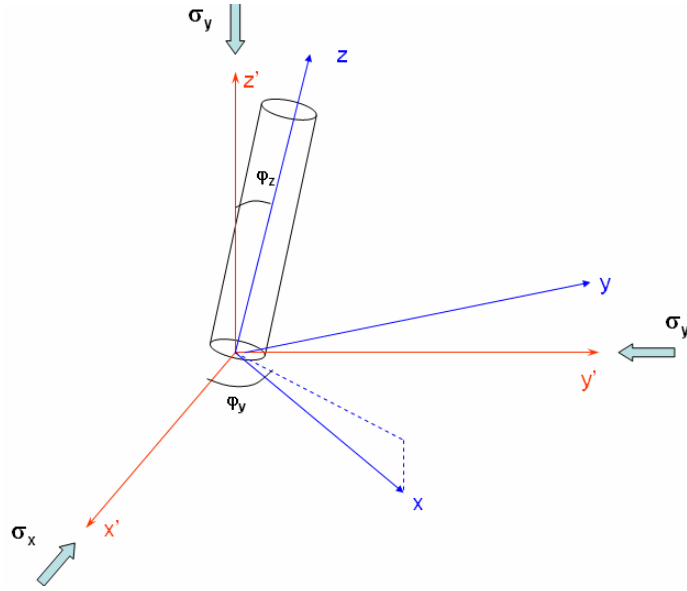
La trayectoria de pozo más favorable será aquella donde la redistribución de esfuerzos en el pozo sea lo más uniforme posible, de ahí la importancia de conocer la distribución de los esfuerzos alrededor del pozo.

El modelo de la distribución de esfuerzos para un pozo inclinado asume que el pozo es desviado con respecto a las direcciones de los esfuerzos in-situ σ'_x , σ'_y , y σ'_z . Para esta parte se asume un comportamiento lineal elástico.

La orientación del pozo está definida por dos ángulos: la inclinación del pozo, φ_z , y el azimut, φ_y . Teniendo los esfuerzos σ'_x , σ'_y , y σ'_z , en un sistema

coordenado x' , y' , y z' , se define un nuevo sistema coordenado x , y , y z , donde z coincide con el eje del pozo, Figura 11.

Figura 11. Orientación del pozo respecto a los esfuerzos in situ



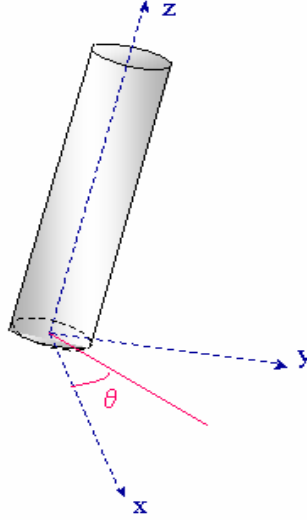
Los esfuerzos σ_x , σ_y , y σ_z , son obtenidos de un sistema de coordenadas local en una transformación de esfuerzos, realizado de la siguiente manera:

$$(78) \quad \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx'}^2 & I_{xy'}^2 & I_{xz'}^2 \\ I_{yx'}^2 & I_{yy'}^2 & I_{yz'}^2 \\ I_{zx'}^2 & I_{zy'}^2 & I_{zz'}^2 \\ I_{xx'}, I_{yx'} & I_{xy'}, I_{yy'} & I_{xz'}, I_{yz'} \\ I_{yx'}, I_{zx'} & I_{yy'}, I_{zy'} & I_{yz'}, I_{zz'} \\ I_{zx'}, I_{xx'} & I_{zy'}, I_{xy'} & I_{zz'}, I_{xz'} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \sigma_{z'} \end{Bmatrix}$$

donde:

$$\begin{bmatrix} I_{xx'} & I_{xy'} & I_{xz'} \\ I_{yx'} & I_{yy'} & I_{yz'} \\ I_{zx'} & I_{zy'} & I_{zz'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_z \cos\varphi_y & \sin\varphi_z \cos\varphi_y & \sin\varphi_y \\ -\sin\varphi_z & \cos\varphi_z & 0 \\ \cos\varphi_z \sin\varphi_y & \sin\varphi_z \sin\varphi_y & \cos\varphi_y \end{bmatrix} \quad (79)$$

Figura 12. Sistema coordenado cilíndrico para un pozo desviado



Para poder examinar los esfuerzos en la roca que rodea el pozo, es conveniente expresar los esfuerzos en coordenadas cilíndricas (Anexo 1), Figura 12. Los esfuerzos en un punto P, identificados por las coordenadas cilíndricas r , θ y z están denotados como σ_r , σ_θ , σ_z , $\tau_{r\theta}$, τ_{rz} y $\tau_{\theta z}$. El término σ_r es llamado el esfuerzo radial, σ_θ es llamado el esfuerzo tangencial y σ_z es el esfuerzo axial. Teniendo los esfuerzos en el sistema de coordenadas local, se pueden transformar a coordenadas cilíndricas utilizando la solución general elástica lineal, donde se supone una roca isotrópica en todas las direcciones y un comportamiento elástico lineal a través del tiempo (Aadnov, 1987):

$$\sigma_r = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4} - 4\frac{R^2}{r^2} \right) \cos 2\theta + \tau_{xy} \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4} - 4\frac{R^2}{r^2} \right) \sin 2\theta + p_w \frac{R^2}{r^2} \quad (80)$$

$$\sigma_{\theta} = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta - \tau_{xy} \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \sin 2\theta - p_w \frac{R^2}{r^2} \quad (81)$$

$$\sigma_z = \sigma_z - \nu \left(2(\sigma_x - \sigma_y) \frac{R^2}{r^2} \cos 2\theta + 4\tau_{xy} \frac{R^2}{r^2} \sin 2\theta \right) \quad (82)$$

$$\tau_{r\theta} = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4} - 4 \frac{R^2}{r^2} \right) \sin 2\theta + \tau_{xy} \left(1 - 3 \frac{R^4}{r^4} + 2 \frac{R^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \quad (84)$$

$$\tau_{\theta z} = \left(-\tau_{xy} \sin \theta + \tau_{yz} \cos \theta \right) \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \quad (85)$$

$$\tau_{rz} = \left(\tau_{xy} \cos \theta + \tau_{yz} \sin \theta \right) \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \quad (86)$$

Donde R es el radio del pozo en pies y r es la distancia a partir del pozo en dirección radial.

Haciendo $r = R$, la distribución de esfuerzos en la pared del pozo, se reduce a la siguiente expresión¹⁹:

$$\sigma_r = p_w \quad (87)$$

$$\sigma_{\theta} = (\sigma_x + \sigma_y - p_w) - 2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - 4\tau_{xy} \sin 2\theta \quad (88)$$

$$\sigma_z = \sigma_{zz} - 2\nu(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - 4\nu\tau_{xy} \sin 2\theta \quad (89)$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{rz} = 0 \quad (90)$$

$$\tau_{\theta z} = 2(-\tau_{xy} \sin \theta + \tau_{yz} \cos \theta) \quad (91)$$

2.1.2 Esfuerzos principales alrededor del Pozo

Recordando el concepto de esfuerzos principales¹³, explicado en el capítulo anterior, se pueden hallar las siguientes expresiones en la cara del pozo a partir de las ecuaciones (87) a la (91):

$$\sigma_1 = p_w \quad (92)$$

$$\sigma_{2,3} = \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_z) \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau_{\theta z}^2} \quad (93)$$

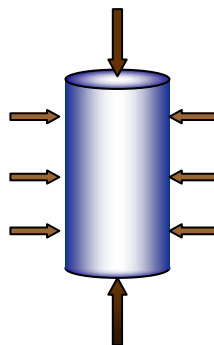
Con estas expresiones, se puede aplicar un criterio de falla para encontrar el punto donde la roca, que rodea la pared del pozo, presentará algún tipo de inestabilidad.

2.1.3 Mecanismos y modos de falla

Cuando una muestra de un sólido es expuesta a grandes esfuerzos, algún tipo de falla puede ocurrir³¹. Cuando el esfuerzo es mitigado el sólido retorna a su estado original. El modo de la falla depende del estado de esfuerzos, el tipo de material y la geometría de la muestra. También es de importancia la historia de esfuerzo sobre el material.

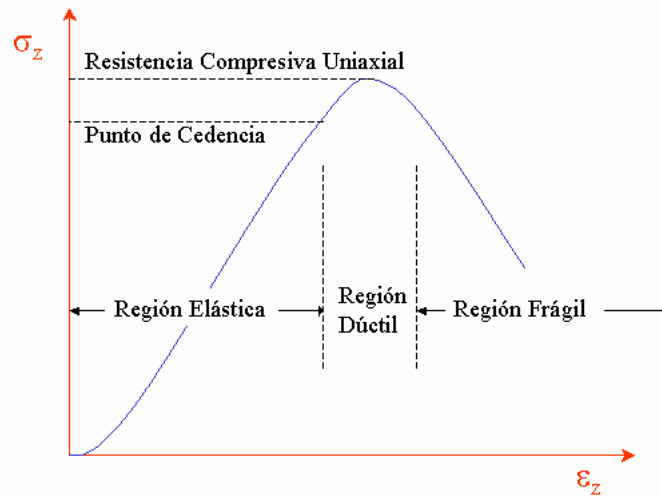
En la figura 13 se observa una muestra con una relación longitud - diámetro de 2:1. Un esfuerzo en la dirección axial y otro esfuerzo, de diferente magnitud, es aplicado en la circunferencia del cilindro. Si el esfuerzo radial es cero se tiene una prueba de esfuerzo uniaxial; cuando la prueba es realizada con una presión de confinamiento diferente a cero, se obtiene una prueba triaxial.

Figura 13. Prueba Triaxial para una muestra



La figura 14 muestra un resultado típico de una prueba uniaxial. Teniendo trazado el esfuerzo aplicado como una función de la deformación axial de la muestra, varios conceptos pueden ser definidos²⁸:

Figura 14. Esquema de Esfuerzo vs. Deformación para una prueba de Compresión Uniaxial.



- ✓ Región Elástica: Región en la cual, si el esfuerzo es suspendido la muestra retorna a su estado original.
- ✓ Punto de Cedencia (*Yield Point*): Punto en el cual la muestra no retorna a su estado original, alcanzando la región plástica.
- ✓ Resistencia a la Compresión Uniaxial: Es el máximo esfuerzo antes de que ocurra falla.
- ✓ Región Dúctil: En esta región, la muestra experimenta deformación permanente sin perder la capacidad de soportar carga.
- ✓ Región Frágil: Región en la cual la habilidad de la muestra para resistir carga disminuye y la deformación aumenta.

Los modos de falla son una respuesta de la roca a las nuevas condiciones inducidas durante el proceso de perforación. Existen mecanismos de falla compresiva y de tensión, correspondientes al régimen de esfuerzos

resultante de esa alteración. Los modos de falla compresivos más importantes son la ovalización del pozo (*breakout*), *falla tórica*, *falla de elongación*, y *falla helicoidal*. Dentro de los modos de falla de tensión, se destacan la *falla de exfoliación* y el *fracturamiento hidráulico*.

A continuación se presentan gráficamente los modos de falla y el régimen de esfuerzos que los provoca³¹.

Figura 15. Modo de Falla de Ovalización de Pozo (Breakout).

Ocurre cuando $\sigma_{\theta} > \sigma_r > \sigma_z$

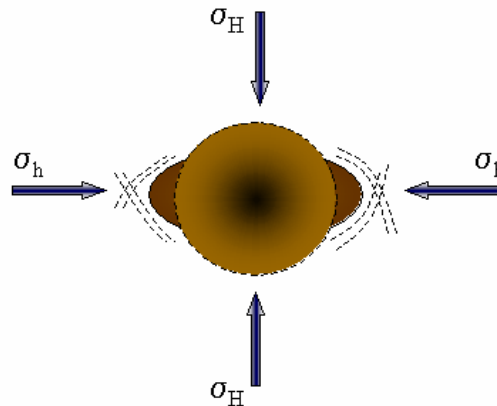


Figura 16. Modo de Falla Compresiva Tórica

Ocurre cuando $\sigma_z > \sigma_{\theta} > \sigma_r$

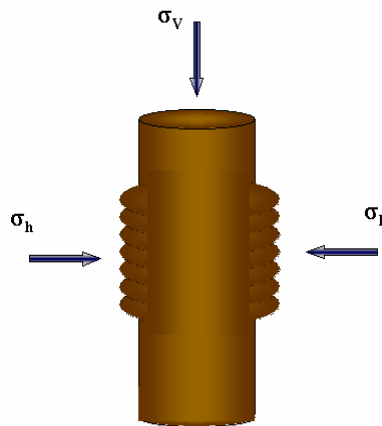


Figura 17. Modo de Falla Compresiva de Elongación

Ocorre cuando $\sigma_r > \sigma_z > \sigma_\theta$

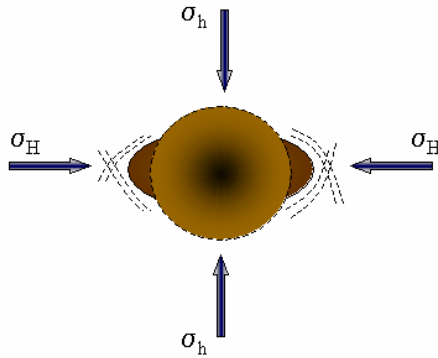


Figura 18. Modo de Falla Compresiva Helicoidal

Ocorre cuando $\sigma_z > \sigma_r > \sigma_\theta$

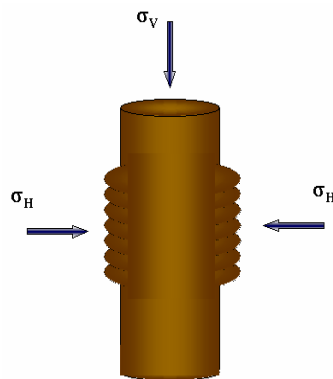


Figura 19. Modo de Falla Tensil (Fracturamiento Hidráulico)

Ocorre cuando $\sigma_r > \sigma_\theta$ y $\sigma_\theta > T_o$

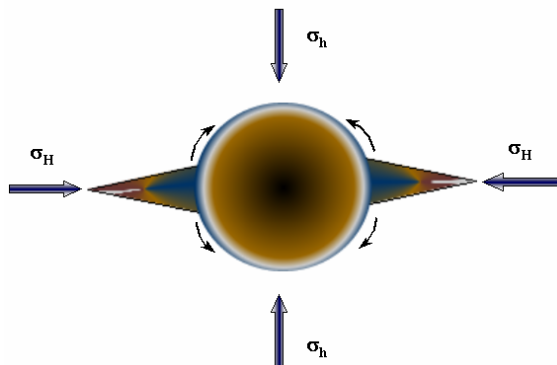
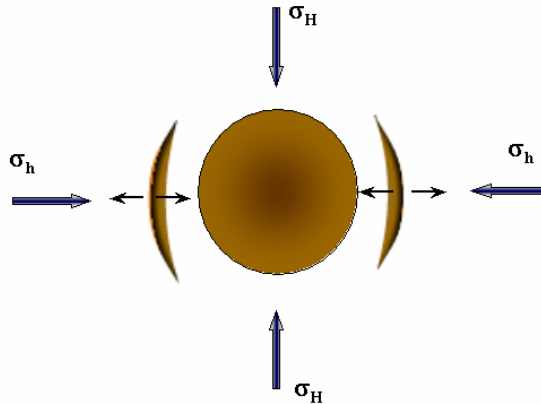


Figura 20. Modo de Falla Tensil por Exfoliación

Ocurre cuando $\sigma_\theta > \sigma_r$ y $\sigma_\theta > T_o$



Las fallas compresivas generalmente producen los siguientes problemas¹⁴:

Aumento del diámetro del pozo causada por fallas quebradizas y derrumbes de la pared del pozo. Esto ocasiona problemas en la cementación y dificultades en la lectura e interpretación de los registros. Esto normalmente ocurre en rocas quebradizas, y el aumento en el diámetro del pozo es debido a la erosión (hidráulica o mecánica) en rocas pobremente cementadas (débiles).

Reducción del diámetro del pozo ocurre en shales débiles (plástico), areniscas y/o salinos. Algunas formaciones de yeso pueden también presentar este tipo de comportamiento. Este fenómeno requiere de un *reaming* (operación de restauración del diámetro del pozo), o se tendrá como resultado una pega de tubería.

Las fallas de tensión o fracturamiento hidráulico se pueden reconocer por las perdidas de circulación. Esta puede reducir la presión hidráulica en el pozo y causar el influjo de los fluidos de la formación. En el peor de los casos resulta en un reventón.

2.1.4. Criterios de Falla por Cizalladura.

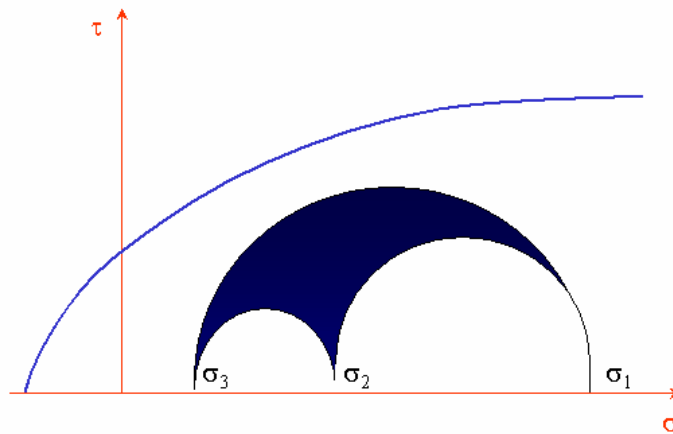
2.1.4.1. Criterio de Falla de Mohr – Coulomb

La falla de corte ocurre cuando el esfuerzo de corte a lo largo de algún plano en la muestra es demasiado grande. Mohr asume que la falla puede ser descrita por:

$$|\tau| = f(\sigma) \quad (94)$$

Donde σ es el esfuerzo normal a través de un plano y τ es el esfuerzo de corte a lo largo del plano. En el plano $\tau - \sigma$, la ecuación (94), describe alguna curva que separa la región a salvo de una región de “falla”. Un ejemplo se muestra en la Figura 21, donde también se tienen indicados los tres esfuerzos principales y el círculo de Mohr conectándolos. Además todos los posibles estados de esfuerzos estarán dentro de la parte sombreada.

Figura 21. Ejemplo de una función de Mohr de la ecuación (94) en el diagrama esfuerzos de corte y normal.



Si se asume ahora que σ_1 se incrementa, el círculo que conecta σ_1 y σ_3 se expande y eventualmente tocaría la envolvente de falla y la falla ocurriría. Puede observarse que el valor del esfuerzo intermedio no tiene influencia en este proceso. Por lo tanto, la falla por cizalladura, definida por Mohr,

depende solamente de los esfuerzos mínimo y el máximo principales y no del esfuerzo intermedio.

El criterio de Mohr-Coulomb asume una función lineal línea:

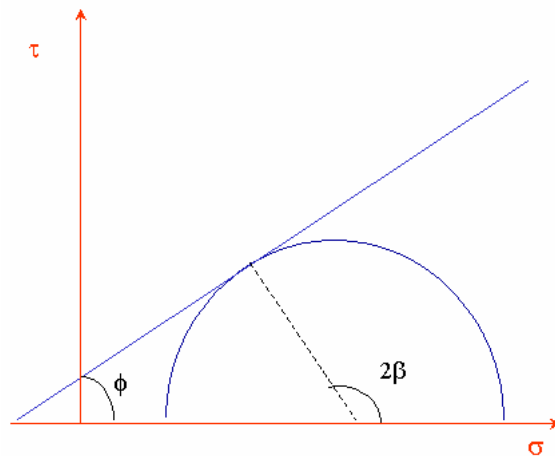
$$|\tau| = S_0 + \mu\sigma \quad (95)$$

Donde S_0 es la cohesión del material y μ es el coeficiente de fricción interna. El ultimo termino es claramente elegido por la analogía con un deslizamiento ordinaria de un cuerpo sobre una superficie, la cual tuvo como primera aproximación (Ley de Amonton)

$$\tau = \sigma\mu \quad (96)$$

Donde σ es la fuerza normal sobre el cuerpo y μ es el coeficiente de fricción.

Figura 22. Criterio de Mohr-Coulomb en el espacio. También se muestra el circulo de Mohr correspondiente a un estado de esfuerzos críticos.



En la figura 22, se traza el criterio de Mohr-Coulomb y el círculo de Mohr que toca la envolvente de falla. En la figura se define el ángulo de fricción interna, relacionado al coeficiente de fricción interna μ por:

$$\tan\phi = \mu \quad (97)$$

También se muestra el ángulo 2β , que da en el punto de coincidencia del círculo de Mohr y la línea de falla. En la figura se observa que los esfuerzos normal y de corte en el punto de contacto son:

$$|\tau| = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta \quad (98)$$

Y que β y ϕ están relacionados por:

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta \quad (99)$$

$$\phi + \frac{\pi}{2} = 2\beta \quad (100)$$

Donde σ y τ están dados por la ecuación (98) y (99), y son el esfuerzo normal y de corte de un plano. De la ecuación (199) se tiene:

$$\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \quad (101)$$

Por lo tanto la máxima variación posible de ϕ es de 0 a 90° (en la practica el rango es menor y se centra aproximadamente a 30°) El ángulo β varía entre 45° y 90° , puesto que es el ángulo para que el criterio de falla se cumpla, β da la orientación del plano de falla y se puede concluir que este plano de falla es inclinado un ángulo menor de 45° para la dirección σ_1 . La figura 23 muestra la posible variación del plano de falla para una roca descrita por el criterio de Mohr-Coulomb.

Figura 23. Inclinación máxima para el plano de falla, de acuerdo al criterio de Mohr-Coulomb.

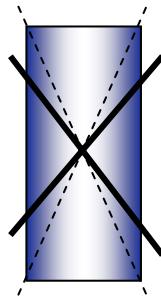
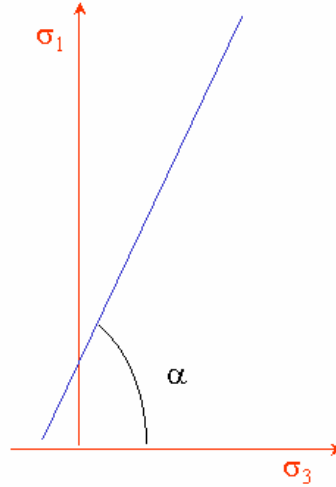


Figura 24. Criterio de Mohr-Coulomb en el plano σ_1 y σ_3 .



Es importante notar que β es dado exclusivamente por ϕ , tal que la orientación del plano de falla es independiente del esfuerzo de confinamiento. Introduciendo las expresiones para σ y τ , ecuaciones (98) y (99), dentro del criterio de falla, ecuación (95), se obtiene:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta = S_0 + \mu \left\{ \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \right\} + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta \quad (102)$$

Remplazando β y μ por ϕ esto es;

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos \phi = S_0 + \frac{1}{2} \tan \phi (\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2} \tan \phi \sin \phi (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (103)$$

Multiplicamos por $2 \cos \phi$ y se reemplaza:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)(\cos^2 \phi + \sin^2 \phi) = 2S_0 \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi \quad (104)$$

$$\sigma_1(1 - \sin \phi) = 2S_0 \cos \phi + \sigma_3(1 + \sin \phi) \quad (105)$$

$$\sigma_1 = 2S_0 \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} + \sigma_3 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (106)$$

En la figura 24, se traza esta relación en el plano (σ_1, σ_3) . De nuevo se tiene una relación lineal con intercepto positivo sobre el eje σ_1 , bastante similar al dibujo en la figura 22, sin embargo el ángulo α en el plano $\sigma_1 - \sigma_3$ no es igual a ϕ pero relacionado por:

$$\tan \alpha = \frac{1 + \sen \phi}{1 - \sen \phi} \quad (107)$$

ó

$$\sen \phi = \frac{\tan \alpha - 1}{\tan \alpha + 1} \quad (108)$$

Finalmente se puede observar que la ecuación (106) se puede escribir en términos del ángulo de falla β en la siguiente forma:

$$\sigma_1 = S_0 \tan \beta + \sigma_3 \tan^2 \beta \quad (109)$$

Efecto del Esfuerzo Intermedio

La duda de si el esfuerzo principal intermedio²⁰ debe o no ser incorporado dentro del criterio de falla es antigua, y está todavía sin resolver como es demostrado por la continua investigación sobre el tema.

El esfuerzo principal intermedio parecería tener algún efecto sobre la resistencia de la roca como se ve en una prueba triaxial. La variación de la resistencia con el esfuerzo principal intermedio encontrada por Takahashi y Koide fue investigada para varios de tipos de roca. Es razonable esperar que la resistencia de compresión de una roca probada biaxialmente (donde $\sigma_1 = \sigma_2$ y $\sigma_3 = 0$) sea, probablemente, más de dos veces la resistencia uniaxial (es decir; $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 0$).

Tabla 2. Categoría de los criterios de falla.

		Función de σ_1 , σ_2 y σ_3	Función de σ_1 y σ_2 únicamente
Criterio Lineal		<i>Categoría A</i> Drucker – Prager	<i>Categoría B</i> Mohr – Coulomb
Criterio No lineal		<i>Categoría C</i> Pariseau	<i>Categoría D</i> Hoek – Brown

Es útil observar varios criterios de resistencia contra los dos esfuerzos (es decir; uniaxial y biaxial). Para los criterios de resistencia que están dentro de las categoría B y D, Tabla 2, la resistencia uniaxial y biaxial es igual. Para los criterios que están dentro de la categoría A y C la diferencia es a menudo extrema.

El mayor problema con muchos de los criterios que están dentro de la categoría A y C, Tabla 2, es que ellos dan demasiada importancia a la influencia de σ_2 sobre el esfuerzo de materiales friccionales como es indicado por una prueba triaxial verdadera.

Se puede concluir que un criterio de resistencia expresada en términos de σ_1 y σ_3 es adecuado para el propósito de la estabilidad de pozo. Aunque el esfuerzo principal intermedio pueda influenciar de alguna manera, el efecto es relativamente pequeño para la exactitud a la resistencia hueco abajo y para determinar los esfuerzos in-situ.

2.1.4.2. Criterio de Falla de Drucker–Prager

El criterio de falla de Drucker–Prager¹⁹, también conocido como el criterio de falla de Von Mises Modificado, da al esfuerzo intermedio tanta importancia como lo hace con los esfuerzos máximo y mínimo principales. A diferencia del criterio de falla de Mohr–Coulomb, el cual considera que el esfuerzo

intermedio no tiene ninguna influencia sobre la forma en que falla la roca, el criterio de Drucker – Prager considera que el esfuerzo intermedio influye no solo en la forma en que falla la roca sino también en la magnitud de deformación de la roca.

Estudios realizados por varios investigadores del mundo han demostrado que el esfuerzo intermedio tiene un efecto de fortalecimiento de la roca, el cual es ignorado por el criterio de falla de Mohr–Coulomb, aunque tampoco es tan profundo como lo predice el criterio de falla de Drucker – Prager. Por consiguiente, el criterio de falla de Mohr-Coulomb subestima la resistencia de la roca para situaciones de esfuerzos en escenarios generales ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$), mientras que el criterio de Drucker–Prager sobrestima la resistencia de la roca para el estado de esfuerzos mencionado anteriormente.

Aplicando estas características del criterio a situaciones de pozo, se encuentra que el criterio de falla de Mohr – Coulomb es muy conservativo debido a que no considera el efecto de fortalecimiento del esfuerzo intermedio. Por otra parte, el criterio de Drucker – Prager puede ser no conservativo y puede dar predicciones de estabilidad de pozo un poco absurdas debido a que sobrestima el efecto del esfuerzo intermedio.

Existen muchos criterios de falla propuestos para predecir la falla de la roca en compresión. Algunos autores se han tomado el trabajo de clasificarlos de tal manera que se pueda utilizar un criterio de falla teniendo en cuenta el tipo de análisis, es decir, teniendo en cuenta la forma en que falla la roca.

El criterio de falla de Drucker – Prager se expresa en términos de los esfuerzos principales de la siguiente manera:

$$\sqrt{J_2} = m \cdot I_1 + \tau \quad (110)$$

donde,

$$I_1 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (111)$$

$$\sqrt{J_2} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{6}} \quad (112)$$

La ecuación (110) es el esfuerzo promedio efectivo y la ecuación (112) es el parámetro equivalente de esfuerzo de corte. Además, los parámetros m y τ_o dependen del material. Si se expresa en términos de cohesión y ángulo de fricción interna, se tiene:

$$m = \frac{2\sqrt{2} \cdot \text{Sen}(\phi)}{3 - \text{Sen}(\phi)} \quad y \quad \tau_o = \frac{2\sqrt{2} \cdot S_o \cdot \text{Cos}(\phi)}{3 - \text{Sen}(\phi)} \quad (113)$$

Es decir, igual a la relación trigonométrica entre el círculo externo de Drucker–Prager y el criterio de Mohr – Coulomb.

2.1.4.3. Criterio Modificado de Lade

Es usualmente difícil en la práctica aplicar un criterio complejo a problemas de estabilidad de pozo (más aún cuando no está alineado con algún eje de esfuerzo principal) y se busca el “peso crítico de lodo” para prevenir tal inestabilidad. A pesar de esto el Criterio Modificado de Lade, tiene las siguientes cualidades: 1) describe correctamente la influencia del esfuerzo principal intermedio sobre la resistencia de la roca y por lo tanto sobre la estabilidad del pozo, 2) puede ser reacomodado para dar solución al peso crítico de lodo, para cualquier orientación de pozo y 3) sólo se requieren dos parámetros, como lo son la cohesión y el ángulo de fricción.

El Criterio de Lade Modificado¹³ para fallas de materiales está dada por:

$$\frac{(I_1'')^3}{I_3''} = 27 + \eta \quad (114)$$

donde:

$$I_1'' = (\sigma_1 + S_1 - p_o) + (\sigma_2 + S_1 - p_o) + (\sigma_3 + S_1 - p_o) \quad (115)$$

$$I_3'' = (\sigma_1)(\sigma_2)(\sigma_3) \quad (116)$$

S_1 y η son constantes del material y p_o es la presión de poro. Los esfuerzos invariables I_1'' y I_3'' pueden ser calculadas usando las siguientes ecuaciones en lugar de las ecuaciones (115) y (116):

$$I_1'' = (\sigma_x + S_1 - p_o) + (\sigma_y + S_1 - p_o) + (\sigma_z + S_1 - p_o) \quad (117)$$

$$\begin{aligned} I_3'' = & (\sigma_x + S_1 - p_o)(\sigma_y + S_1 - p_o)(\sigma_z + S_1 - p_o) \\ & + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - (\sigma_x + S_1 - p_o)\tau_{yz}^2 \\ & - (\sigma_y + S_1 - p_o)\tau_{zx}^2 - (\sigma_z + S_1 - p_o)\tau_{xy}^2 \end{aligned} \quad (118)$$

El parámetro S_1 está relacionado a la cohesión de la roca mientras el parámetro η representa la fricción interna. Los cálculos muestran que estos parámetros pueden ser directamente derivados del término de cohesión de Mohr-Coulomb, S_o y del ángulo de fricción, ϕ , por:

$$S_1 = \frac{S_o}{\tan \phi} \quad (119)$$

$$\eta = 4 \tan^3 \phi (9 - 7 \sin \phi) (1 - \sin \phi) \quad (120)$$

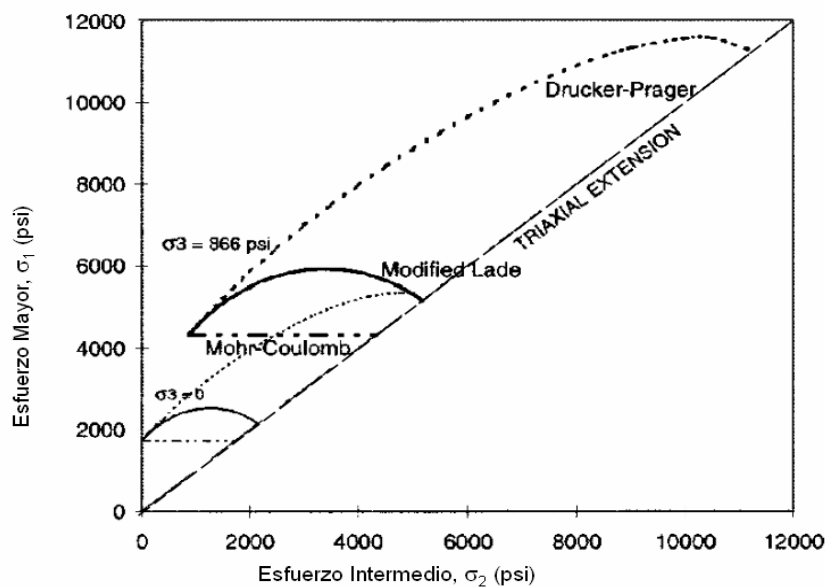
donde S_o y ϕ son determinados de una prueba de compresión triaxial.

Bajo condiciones generales de esfuerzos ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) el criterio Modificado de Lade (también como el criterio original de Lade) tiene una agradable propiedad que primero predice el efecto de fortalecimiento con el incremento del esfuerzo principal intermedio, σ_2 , seguido de una ligera reducción en la fuerza una vez que σ_2 se hace muy alta. Esto es mejor explicado en la

Figura 25, donde se muestra el valor predicho de σ_1 al momento de la falla como función de σ_2 para un valor constante de σ_3 igual a cero. Los valores de S_o y ϕ son 500 psi. y 30° respectivamente.

Los tres criterios predicen una misma fuerza compresiva sin confinamiento de 1732 psi. El criterio de Mohr-Coulomb predice que la roca fallará a $\sigma_1 = 1732$ independiente de la magnitud de σ_2 . El criterio de Drucker-Prager predice que σ_1 al momento de la falla aumentará rápidamente con el incremento de σ_2 , con una fuerza de tensión triaxial de $\sigma_1 = \sigma_2 = 5196$ psi. El criterio modificado de Lade predice σ_1 que al comienzo se incrementa con el aumento de σ_2 , hasta un esfuerzo máximo de $\sigma_1 = 2525$. Con un incremento mayor en σ_2 , sin embargo, predice que σ_1 , al momento de la falla decrece, y predice una fuerza de tensión triaxial de $\sigma_1 = \sigma_2 = 2150$ psi.

Figura 25. Resistencia predicha, σ_1 como función de σ_2 , para $S_o =$ psi, $\phi = 30$ y $\sigma_3 = 866$ psi (los resultados para $= 0$, también son mostrados)



Tomado de SPE 56862

2.1.5. Ventana Segura de Lodo

2.1.5.1. Cálculo del Peso mínimo de Lodo para prevenir el colapso de pozo. Para ilustrar el principio¹⁴, se considera un pozo vertical con esfuerzos horizontales iguales, $\sigma_h = \sigma_H$, y usa el criterio de Mohr-Coulomb como criterio de falla. Además se conoce que los esfuerzos dependen de la presión del pozo de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= p_w \\ \sigma_\theta &= 2\sigma_h - p_w \\ \sigma_z &= \sigma_v\end{aligned}\tag{121}$$

Observando la ecuación (121) no es obvio cual componente del esfuerzo es el mayor y cual es el más pequeño. Deben por lo tanto evaluarse diferentes posibilidades. Una distribución típica de esfuerzos es mostrada en la Figura 26. En un caso (Línea continua) el esfuerzo tangencial es el mayor, mientras el esfuerzo radial es el menor en el pozo. Cuando se aumenta la presión en el pozo, se incrementa el esfuerzo radial, mientras el esfuerzo tangencial disminuye. Una situación con una presión de pozo más alta es ilustrada con las líneas punteadas en la Figura 26.

El esfuerzo vertical se convertirá en el mayor, ya que no es afectado por la presión del pozo. Los dos casos presentados, corresponden a los casos *a* y *b* de la Tabla 3, que generalmente son los casos que se consideran cuando se discute el límite inferior del peso de lodo.

Figura 26. Distribución de esfuerzo elástico con dos presiones de pozo.

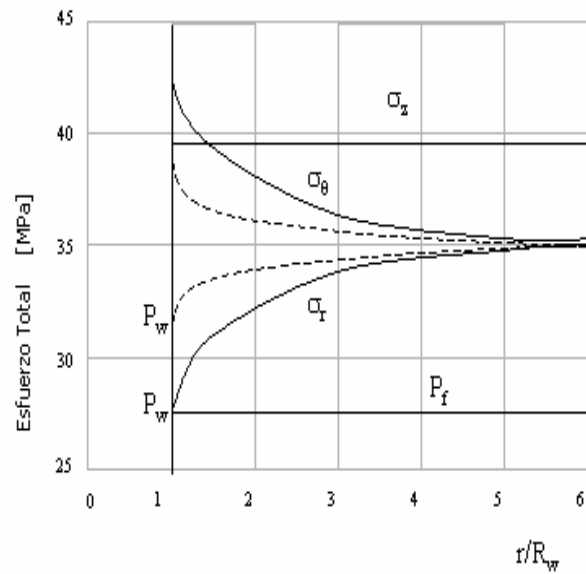


Tabla 3. Condiciones para falla de corte en pozos verticales con pared impermeable, por el Criterio de Mohr-Coulomb

Caso	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	La falla en el pozo ocurre si:
a	$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	$p_w \leq \frac{1}{\tan^2 \beta + 1} [2\sigma_h + \alpha p_f (\tan^2 \beta - 1) - C_o]$
b	$\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$	$p_w \leq \frac{1}{\tan^2 \beta} [\sigma_v - \alpha p_f - C_o] + \alpha p_f$
c	$\sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta$	$p_w \geq 2\sigma_h - \frac{1}{\tan^2 \beta + 1} [\sigma_v + \alpha p_f - C_o] - \alpha p_f$
d	$\sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta$	$p_w \geq \frac{1}{\tan^2 \beta + 1} [2\sigma_h \tan^2 \beta - \alpha p_f (\tan^2 \beta - 1) - C_o]$
e	$\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z$	$p_w \geq \sigma_v \tan^2 \beta - \alpha p_f (\tan^2 \beta - 1) + C_o$
f	$\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$	$p_w \leq 2\sigma_h - \sigma_v \tan^2 \beta + \alpha p_f (\tan^2 \beta - 1) - C_o$

Tomado de “Rock Mechanics Principles and Petroleum Engineering Applications” Da Fontoura, Sergio

La situación requiere la más alta presión de pozo para determinar la presión de pozo necesaria. Esto requiere que en gran magnitud dependa de los esfuerzos in situ. Entonces, se asume que la presión de poro no es afectada por la presión de pozo, es decir, que no hay comunicación de fluido entre el pozo y la formación.

Hay que enfatizar que se está tratando con situaciones ideales. Se puede mencionar además, que si la presión del pozo es considerablemente mayor que la presión de poro, los cambios ocasionarán que la presión de poro comience a aumentar (penetración). Si la presión de poro se incrementa, la presión de pozo requerida para mantener la estabilidad también se incrementará.

Para un pozo desviado, los esfuerzos principales deben ser calculados de los esfuerzos normales y los esfuerzos de corte. Otra alternativa es calcular los invariantes, dependiendo de que criterio de falla esté siendo usado. Esto es más conveniente hacerlo iterativamente por medio de un programa, en el caso de este proyecto se utiliza el PBORE.

2.1.5.2 Cálculo del máximo peso de Lodo antes del fracturamiento.

El límite superior para el peso de lodo¹⁴, es el máximo peso de lodo antes de que ocurra falla por tensión (fracturamiento). El fracturamiento tomará lugar cuando el esfuerzo principal efectivo mínimo se convierta en una tensión igual a la resistencia por tensión de la roca:

$$\sigma_3' + T_o \leq 0 \quad (122)$$

Una buena aproximación normalmente es darle un valor a la resistencia a la tensión, T_o , igual a cero, en el cual siempre habrá fracturas e imperfecciones en las paredes del pozo. Tomando de nuevo un pozo vertical con esfuerzos horizontales iguales, de la ecuación (121) se ve que el fracturamiento depende de la presión del pozo.

Se puede diferenciar dos condiciones extremas:

- ✓ Pared del pozo impermeable, no hay penetración,
- ✓ Pared del pozo permeable, hay penetración.

En el primer caso la presión de poro no es afectada por la presión del pozo. En el otro caso la presión de poro cerca al pozo será aproximadamente igual a la presión del pozo.

En la situación impermeable se da una posibilidad, una fractura vertical cuando:

$$\sigma'_{\theta} = 0 \quad (123)$$

Usando la ecuación (121) esto da que:

$$P_w = 2\sigma_h - Pf \quad (124)$$

La situación permeable tiene dos posibilidades, una fractura vertical o una horizontal:

$$\sigma'_{\theta} = 0 \quad \text{ó} \quad \sigma'_z = 0 \quad (125)$$

Utilizando de nuevo la ecuación (121) se obtiene:

$$P_w = \sigma_h \quad \text{ó} \quad P_w = \sigma_v \quad (126)$$

Como la pared del pozo es permeable, dependerá de la roca y del filtrado de la torta del lodo, que tan rápido se incrementará la presión del pozo, es decir, si hay tiempo para la penetración de la presión antes de la fractura haya iniciado.

Después de haber perforado algunos pozos en un área, una prueba Leak-off dará una base empírica para la predicción de la fractura.

El principio para analizar un pozo desviado es el mismo, pero la ecuación (122), muestra que el esfuerzo mínimo principal debe ser calculado primero, de los componentes de esfuerzos de corte y normal. En un pozo desviado la presión de iniciación de la fractura puede ser menor que en un pozo vertical, con tal de que el esfuerzo horizontal sea más pequeño que el esfuerzo vertical. Una fractura iniciará en una dirección dada, dependiendo de donde

la ecuación (122) se cumpla primero sobre la pared del pozo. Esto depende tanto de los esfuerzos in situ y su dirección como de la desviación del pozo.

▪ **Ejemplo para el cálculo del peso de Lodo**

Pozo vertical

Para un pozo vertical con esfuerzos horizontales iguales, se presentan los datos en la Tabla 4:

Tabla 4. Datos para un pozo vertical con esfuerzos horizontales iguales.

Profundidad	2.000 m	(6.562 ft)
Gradiente de sobrecarga	2.0 g/cm ³	(16.7 lbm/gal)
Gradiente de esfuerzo horizontal	1.8 g/cm ³	(15.0 lbm/gal)
Gradiente de presión de poro	1.4 g/cm ³	(11.7 lbm/gal)
Datos de resistencia a esta profundidad		
Resistencia de compresión uniaxial	4.0 MPa	(580 psi)
Angulo de falla	60 grados	
Otros:		
Esfuerzo vertical total	39.2 MPa	(5.685 psi)
Esfuerzo horizontal total	35.3 MPa	(5.120 psi)
Presión de poro	27.5 MPa	(3.989 psi)

Tomado de “Petroleum related Rock Mechanics”. FJÆR, E. et al

El límite inferior es encontrado usando el caso *a* y *b* de la Tabla 3., con la constante de Biot (α) igual a 1, se obtiene:

$$P_w(\text{min}) = 30.4 \text{ MPa. (Correspondiente a un peso de lodo de } 1.55 \text{ g/cm}^3\text{)}$$

Donde el esfuerzo tangencial es el mayor esfuerzo principal.

El límite superior es encontrado de la ecuación (124) para el caso con pared de pozo impermeable:

$$P_w(\text{max}) = 43.1 \text{ MPa} \text{ (Correspondiente a un peso de lodo de } 2.10 \text{ g/cm}^3\text{)}$$

Para el caso de la pared del pozo permeable

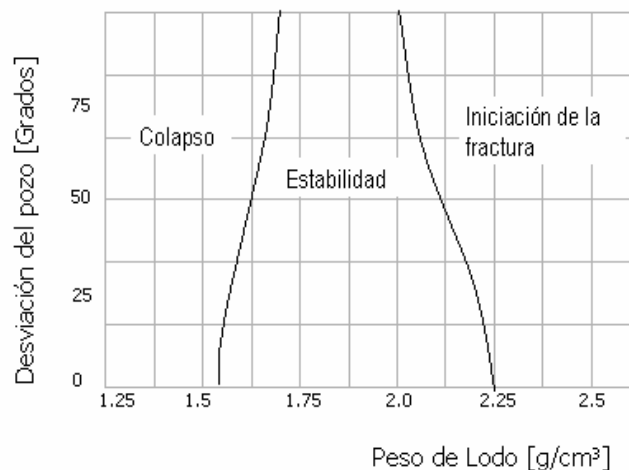
$$P_w(\text{max}) = 35.3 \text{ MPa} \text{ (Correspondiente a un peso de lodo } 1.80 \text{ g/cm}^3\text{)}$$

Entonces el esfuerzo vertical es mayor que el esfuerzo horizontal. Esto implica que la fractura será vertical, en ambos casos (Pared permeable e impermeable)

Pozo desviado

Los cálculos son en principio los mismos pero convenientemente son llevados a cabo por programas debido a al alto grado de complejidad de las ecuaciones. La Figura 27 ilustra un resultado típico para una situación de esfuerzos in-situ normal, usando el ejemplo dado por la Tabla 3. La Figura 27 muestra el peso de lodo requerido como una función de la desviación del pozo, donde el fracturamiento es calculado asumiendo una situación de impermeabilidad.

Figura 27. Ilustración del análisis de la estabilidad de un pozo desviado.



La ventana segura de lodo es restringida a medida que se incrementa la inclinación del pozo. Esto es debido a un componente mayor del esfuerzo vertical normal en el eje del pozo cuando se incrementa la inclinación. Esto incrementará el esfuerzo en una dirección y lo reduce en la dirección normal a éste.

Debe enfatizarse que esto aplica cuando el esfuerzo vertical es el mayor, si el esfuerzo horizontal es el mayor, el rango de estabilidad aumentará con la inclinación. Si los esfuerzos horizontales no son iguales, el rango de estabilidad dependerá tanto de la inclinación como de la dirección del azimut. Dada una roca elástica isotrópica, la dirección más favorable con respecto a la estabilidad del pozo siempre será paralela a la dirección del esfuerzo principal mayor. Esto debería ilustrar la importancia del conocimiento de los esfuerzos in situ como de la información de resistencia.

2.2 ASPECTOS DE IMPORTANCIA PRÁCTICA.

La estabilidad del pozo puede ser afectada por un gran número de efectos y parámetros tales como^{18, 19, 20}:

- La litología de la formación
- Los esfuerzos in-situ y la presión de poro
- Las propiedades de la roca
- Las propiedades del lodo
- Los efectos dependientes del tiempo (consolidación, derrumbes)
- Los efectos de temperatura
- Los aspectos operacionales (surgencia/suaveo, limpieza del pozo etc.)

Estos efectos no son totalmente independientes unos de otros, por ejemplo, un lodo no compatible con la roca puede causar severo debilitamiento de la misma. Las propiedades del fluido de perforación y los procedimientos

operacionales son los únicos parámetros que son directamente controlados por el perforador. Las elecciones estarán siempre relacionadas con otros factores, esto es más complicado por el hecho que gran parte del pozo será abierto simultáneamente, incluyendo las secciones de diferentes resistencias, esfuerzos, presiones de poro, litología, etc.

2.2.1 Litología de la formación.

La experiencia muestra claramente que los problemas de perforación no están igualmente distribuidos a lo largo de las litologías. Las formaciones de arcillas son más propensas a causar problemas. Esto podría esperarse, ya que gran parte de la columna estratigráfica está compuesta por arcillas y la mayoría de las perforaciones toman lugar en estas litologías. Este tipo de formaciones presentan problemas de hinchamiento con lodos base agua, además de provocar en muchas ocasiones pegas de tubería cuando hay cambios de litología. Con un peso de lodo más eficiente, la presión de poro es menos influenciada por la presión del pozo, y al ser mayor el peso del lodo a la presión de poro (*overbalance*), contribuirá mayormente a la estabilidad.

Las arcillas pueden mostrar grandes variaciones en el comportamiento mecánico, ya que existen desde arcillas suaves y dúctiles normalmente consolidadas a arcillas duras y rígidas sobreconsolidadas. Los problemas aparecerán diferentemente para los dos casos, con formación de ovalización de pozo (*breakout*) en rocas quebradizas, hasta grandes deformaciones en rocas dúctiles. Por lo menos, en algunos casos, los errores en detectar la presión de poro, en rocas de baja permeabilidad, serán los responsables de las muchas experiencias con las diferentes litologías, resultando en más casos de perforación *overbalance*.

Otros candidatos para problemas de perforación son las secciones de carbón y sal. Las secciones de sal son bien conocidas como zonas de problemas debido a la naturaleza visco plástica de las rocas de sal, las cuales tienden a

cerrar el pozo. Esto también causa un tipo de falla dúctil, donde la roca no se desintegra pero está fluyendo como un todo.

2.2.2 Propiedades del lodo

Los problemas de perforación en shales¹⁸ han sido tradicionalmente atribuidos a los efectos químicos, llevando al estudio de la reacción lodo/ripios y que conlleva a su vez a los aditivos del lodo. En muchas situaciones donde la arcilla es altamente reactiva, es de extrema importancia la química del lodo. La interacción entre los efectos químicos y mecánicos tiene un impacto considerable en la estabilidad del pozo.

Dos mecanismos son responsables de los hinchamientos de las arcillas: el hinchamiento cristalino (hidratación en superficie) y el hinchamiento osmótico. El hinchamiento cristalino es exhibido por todas las arcillas. El agua es fuertemente sostenida por la celda de cristal, pero el incremento en el volumen total es relativamente pequeño. El hinchamiento osmótico ocurre solamente en ciertas arcillas del grupo de las esmectitas (notablemente en la montmorillonita sódica), estas causan grandes incrementos en los volúmenes totales, pero el agua es ligeramente mantenida. El hinchamiento sustancial de los minerales de las arcillas podría eventualmente conducir a la dispersión de los finos de la formación en el lodo.

Además de los efectos químicos y la reología del lodo relacionado con la limpieza del hueco, son importantes las pérdidas de las propiedades de los fluidos del lodo y la eficiencia de la torta. Un pozo estable puede requerir que la presión del pozo sea mayor a la presión de poro. Sin embargo si la calidad de la torta es pobre, el *overbalance* será reducido cuando la presión de poro aproxime a la presión del pozo. Luego los efectos establecidos se pierden, a menos que el pozo pueda ser revestido antes que la presión de equilibrio sea alcanzada.

2.2.3 Los efectos dependientes del tiempo.

Cuando se perforan secciones de shale, los problemas de estabilidad algunas veces aparecen tarde. Muchos problemas pueden comenzar a una etapa tardía en el proceso de perforación, en vez de aparecer durante la perforación. Es típico, que una vez han iniciado los problemas de pozo, no sean fáciles de superar. De la misma manera parece ser demasiado tarde si el peso del lodo se aumenta, una vez la inestabilidad ha iniciado. Otro problema que ocurre, es la localización de la zona del problema. La profundidad donde la herramienta se pega no es la misma donde la zona es inestable.

Hay dos mecanismos intrínsecos que controlan el comportamiento tiempo - esfuerzo-deformación de las rocas saturadas. El primero es la consolidación, la cual está descrita por la relación entre los cambios de los esfuerzos efectivos y la deformación resultante. Por esta razón este proceso está relacionado con la migración del fluido de la formación, haciendo de la permeabilidad un parámetro esencial.

La migración del fluido de la formación resultará de la diferencia entre la presión de pozo y la presión de poro. En una arcilla de baja permeabilidad, la migración del fluido de la formación hacia el pozo será un proceso lento. A medida que se incrementa la presión de poro, el esfuerzo efectivo disminuye, haciendo la roca menos estable y más propensa a fallar, resultando en una ruptura retrasada.

La predicción de tales efectos es más complicado por el hecho de que las condiciones límite están lejos de ser constantes alrededor del pozo. La química y reología del lodo también pueden variar y de esta manera cambiar la respuesta mecánica de la roca, además la temperatura de la roca puede ser alterada como resultado de la circulación del lodo. Todas estas operaciones pueden cambiar las propiedades mecánicas de la roca y los

esfuerzos alrededor del pozo lo suficiente para crear inestabilidades en el pozo. Esto hace más difícil encontrar la influencia de los efectos dependientes del tiempo y los efectos de operación en un tiempo dado. Un aspecto importante es cómo la roca puede ser aislada rápidamente con un revestimiento. A medida que se perfora más el pozo, más grande es el riesgo de los problemas de estabilidad.

2.2.4 Los efectos de la temperatura

Cuando el lodo es circulado ocurren cambios en la temperatura de la pared del pozo (enfriamiento), debido a que la formación es contactada con un lodo con una temperatura menor a la de la formación. Las fluctuaciones de temperaturas también ocurrirán cuando la circulación es detenida. Después de una parada en la circulación, la formación cerca del pozo gradualmente se calentará. Maury y Sauzay (1987) encontraron que esto podría explicar las fallas de retardo. Brevemente, después de la perforación, el pozo está estable, sin embargo, cuando la temperatura se incrementa, los esfuerzos tangenciales y verticales en el pozo se incrementan en una cantidad:

$$\Delta\sigma = \frac{E}{1-\nu} \alpha_T (T - T_f)$$

Si el incremento en los esfuerzos es suficientemente grande, la ruptura puede eventualmente ocurrir. El enfriamiento potencial del lodo puede, por esta razón, ser una aproximación práctica en casos donde los esfuerzos inducidos térmicamente pueden causar fallas.

Los cambios de la temperatura no influenciarán solamente la distribución de esfuerzos sino también las propiedades de la roca. Esto puede incrementar o reducir más el peligro de las fallas inducidas térmicamente, dependiendo de los efectos de las propiedades de la roca.

2.3 ASPECTOS OPERACIONALES

2.3.1 Surgencia y suaveo

Cuando la sarta de perforación es sacada o se está metiendo en el pozo, puede causar cargas cíclicas en la roca cercana al pozo¹⁴. La sarta actúa más o menos como un pistón en los pozos a causa de que el lodo no puede fluir sin restricción, y de esta manera la presión del pozo cambia. ¿Qué tan grande será este efecto?, esto depende de la configuración de la sarta, de la velocidad del viaje y de la viscosidad del lodo.

Estas cargas pueden ocasionar dos efectos: las cargas cíclicas pueden causar cambios en las características de la roca, y las fluctuaciones de la presión pueden exceder el límite superior e inferior de la estabilidad.

2.3.2 Limpieza del pozo

En muchos casos, la limpieza del pozo y la estabilidad del pozo son dos aspectos que son difíciles de separar uno de otro. El incremento de los problemas de estabilidad o problemas de la perforación con la inclinación del pozo pueden en muchos casos ser atribuidos a una capacidad del lodo insuficiente para limpiar el pozo.

Los problemas de limpieza del pozo se incrementarán si la formación no está estable, y se pueden producir cantidades apreciables de derrumbes. Los fragmentos de la formación (ripios y derrumbes) tenderán a acumularse en los ensanchamientos del pozo, y pueden caer o migrar de nuevo al pozo, especialmente cuando las bombas están paradas. Esto causará restricciones en el flujo del lodo y puede causar pegas de la sarta de perforación si los fragmentos son demasiado grandes. Una solución es aumentar el peso del lodo lo suficiente para evitar derrumbes y mantener el diámetro del pozo constante, pero en la práctica esto es imposible.

3. MARCO GEOLÓGICO

Con base en la información de ECOPETROL y la información publicada en diversos estudios geológicos, así como en informes detallados de perforación, a continuación se plantea una geología general de la cuenca de los Llanos Orientales. El objetivo a estudiar está restringido al dominio estructural de Cupiagua, en el cual se analizan dos pozos, el pozo Buca 1 y el pozo Buca 2, los cuales experimentaron problemas de inestabilidad con diferentes grados de severidad, en los miembros de lutitas de la Formación Carbonera, las cuales se asocian con complejidad del régimen de esfuerzos in situ, presentes en el área de estudio. Los corazones obtenidos de diferentes pozos demuestran que los problemas de inestabilidad de la formación pueden mas drásticos (ECOPETROL,1995).

3.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio esta localizado en la cuenca de los Llanos (Figura 28), está es una cuenca asimétrica, localizada al este de los Andes y hace parte de las cuencas subandinas de antepais (ECOPETROL, 1995). La cuenca de los Llanos Orientales cubre un área aproximada de 190.000 km² y geográficamente se divide en tres áreas principales; una zona norte, Arauca, una parte central, Casanare y un sector sur, Meta (ROJAS, 2002). La cuenca de los llanos está limitada al oeste por el Piedemonte de la cordillera Oriental, al este por el Escudo Precámbrico de Guyana y al Sur por la serranía de La Macarena y el arco de basamento. Los llanos orientales Colombianos hacen parte del Bloque Autóctono, en el cual se encuentra un amplio registro de la historia evolutiva del planeta (ECOPETROL, 2002).

Las rocas sedimentarias datan desde el periodo Cambro – ordocivico, hasta rocas del Plioceno pleistoceno pertenecientes a la Formación Guayabo, con la presencia de varios hiatos, el más grande de los cuales pertenece al Tríasico – Jurásico seguido por uno relacionado con la discordancia del Eoceno.

La cuenca de los llanos tiene su continuidad hacia el norte en las cuencas venezolanas de Apure Occidental y Barinas, las cuales están separadas de la cuenca de los Llanos Orientales Colombianos, desde el Terciario temprano, por el alto estructural del Arco de Arauca (Rojas, 2002).

Figura 28. Localización del área de estudio.



Tomado de BP., Well Review, 2001. Bogotá.

3.2 EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DE LA CUENCA DE LOS LLANOS

Ecopetrol (1995) propone que la evolución geotectónica de la cuenca se puede dividir en nueve etapas:

- **Cambro –Ordovícico:** culmina con la Orogenia Caledoniana
- **Devónico – Carbonífero – Pérmico:** finaliza con la Orogenia Hercínica
- **Triásico - Jurásico:** que corresponde a una cuenca de tipo *rift* con una subsidencia tectónica, detrás de un arco volcánico localizado en la presente Cordillera Central. Esta cuenca se ubica en los sectores actuales del Magdalena y Cordillera Oriental.
- **Cretáceo temprano:** corresponde a una segunda fase de *rift* (continuación de la secuencia de *rift* anterior).
- **Cretáceo tardío:** ocurre subsidencia térmica y formación de una cuenca detrás del arco volcánico localizado en la Cordillera Central. Durante esta fase se depositaron los intervalos correspondientes a la roca madre principal de la Formación Gacheta, equivalente a la Formación La Luna.
- **Maastrichtiano – Paleoceno:** se presenta la Orogenia pre-Andina durante la cual se produce la colisión del arco volcánico de la Cordillera Occidental con la Cordillera Central y la creación de una cuenca de antepaís ubicada en el Valle de Magdalena, la Cordillera Oriental y los Llanos.
- **Eoceno temprano y medio:** corresponde a un periodo de erosión en el área de los Llanos, el material erodado fue transportado hacia el norte y corresponde a las Formaciones Mirador y Misoa C y B de la Cuenca de Maracaibo.
- **Eoceno tardío – Oligoceno – Mioceno temprano:** Durante este periodo se genera una cuenca de antepaís en el Valle del Magdalena, Cordillera

Oriental y Cuenca Llanos. En este trabajo no se comparte del todo esta apreciación y se considera para esta edad en el sitio actual de la Cordillera Oriental existían elementos positivos que impedían una comunicación directa entre la Cuenca Llanos y la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.

- **Mioceno Medio a Pleistoceno:** ocurre la Orogenia Andina con la colisión de Panamá, el levantamiento de la Cordillera Oriental e individualización de las Cuencas del Valle del Magdalena y Llanos Orientales.

3.3 MODELO ESTRATIGRÁFICO

Para la definición de la evolución estratigráfica de la Cuenca de los Llanos Orientales y parte del Piedemonte Llanero se han realizado diferentes interpretaciones estratigráficas. La siguiente interpretación se integró con diferentes fuentes de información, (ECOPETROL 1995, Rojas 2002, Fajardo 2000, OXY 2002). Finalmente y para el desarrollo de esta tesis se contó con estudios detallados de historias de perforación de pozos del área de estudio.

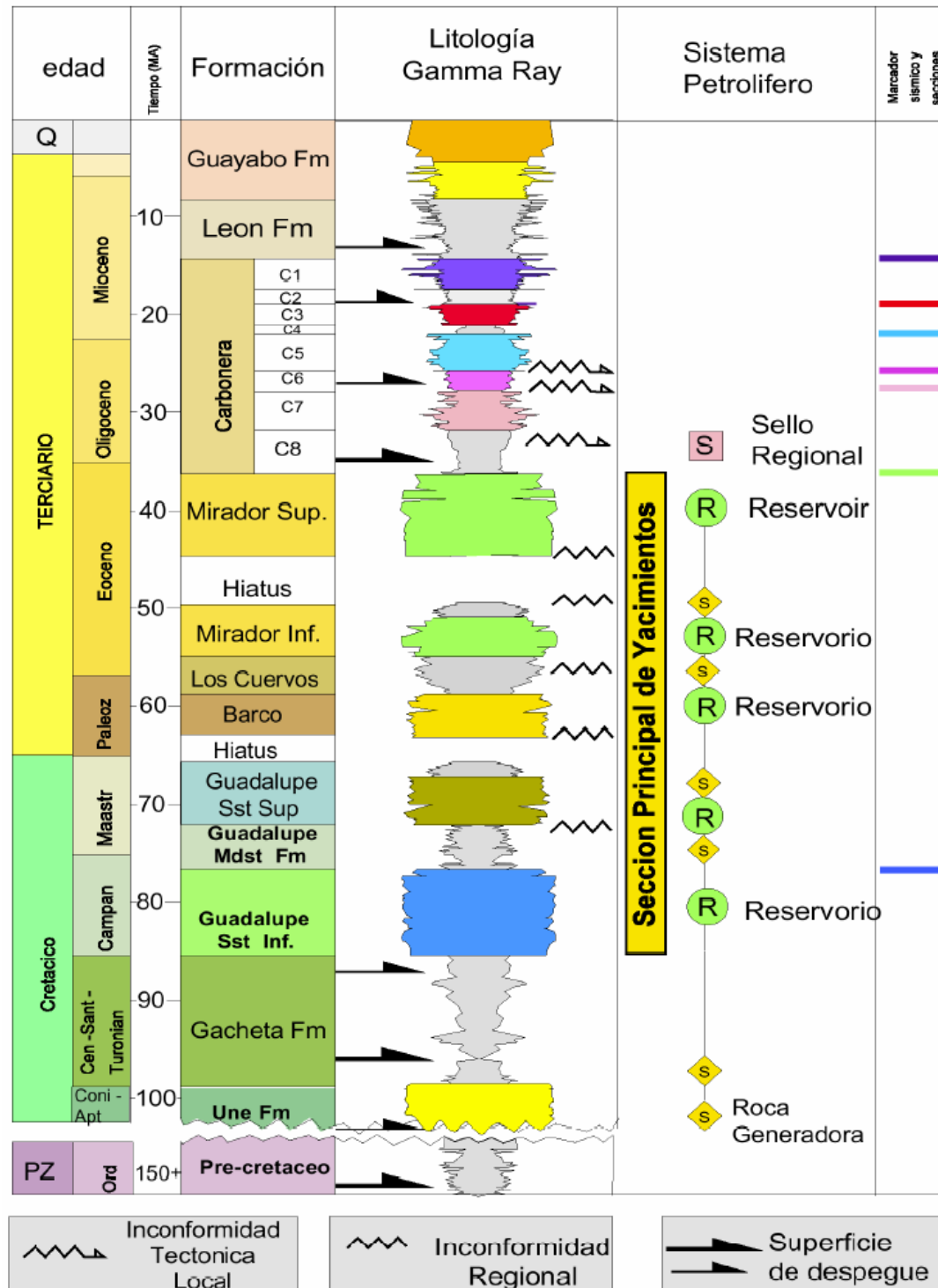
En el área de estudio se encuentran varias nomenclaturas estratigráficas (Figura 29), una introducida por ECOPETROL en los campos de producción de Apiay, Suria, Libertad, etc., otra heredada del área del Casanare y que fue introducida por las compañías operadoras y la empleada por el Ingeominas. En estas nomenclaturas las unidades formacionales y sus diferentes subdivisiones (en el caso de la Formación Carbonera) han sido históricamente definidas con base en su carácter litológico. En la figura 30, se encuentra la columna estratigráfica generalizada empleada en esta tesis.

Figura 29. Carta de Correlación Estratigráfica de la Cuenca de los Llanos Orientales.

ERA	PERIODO	EPOCA	EDAD	Nomenclaturas Estratigráficas					EN ESTE ESTUDIO	
				PIED. LLAN INGEOMINAS	META ECOPETROL	CASANARE EL FAQUITAINE	ARAUCA INTERCOL	ARAUCA OCCIDENTAL		
CENOZOICO	Q	Pleistoceno								
		Plioceno	Tardío	CORNETA	Fm NECESIDAD Fm GUAYABO	Fm GUAYABO	Fm ISNOTU- PALOMAR	Fm GUAYABO	Fm. GUAYABO	
			Mioceno	Tardío	CAJA					Fm. LEON
		Medio								
		Temprano	DIABLO	SHALE LEON	SHALE LEON	SHALE LEON	SHALE LEON	Fm. CARBONERA		
		Oligoceno	Tardío	SAN FERNANDO	CARBONERA	CARBONERA	CARBONERA		CARBONERA	
		Temprano								
		Eoceno	Priaboniano	Fm. MIRADOR	T.2	Fm. MIRADOR	Fm. MIRADOR	Fm. MIRADOR	Fm. MIRADOR	
		Tardío								
		Paleoceno		SOCHA/LOS CUERVOS Areniscas		Fm. LOS CUERVOS	Fm. LOS CUERVOS		Fm. BARCO - LOS CUERVOS	
	SOCHA/BARCO Areniscas			Fm. BARCO	Fm. BARCO					
MESOZOICO	CRETACEO	Tardío	Maastrichtiano	Fm. GUADUAS						
			Campaniano	Fm. GUADALUPE		Fm. GUADALUPE		Fm. GUADALUPE K1	Fm. GUADALUPE	
			Santoniano							
			Coniaciano	Fm. CHIPAUQUE	Fm. GUADALUPE	Fm. GACHETA	Fm. GUADALUPE K1	Fm. CHIPAUQUE K2	Fm. GACHETA	
			Turoniano			Areniscas híbridas			Fm. UNE	
			Cenomaniano							
			Temprano	Albiano	Fm. UNE				Fm. UNE K3	
				Aptiano						
		TRIÁSICO- JURÁSICO								
				Fm. BATA						
PALEOZOICO	CAMBRICO- DEVONICO									
			Fm. FARALLONES					PALEOZOICO NO DIFERENCIADO		
			Fm. GUETAIVE							
PIED. LLAN BRUNO					BASAMENTO CRISTALINO		(ESCUDO GUYANES)			

Tomada de Fajardo et al, 2000

Figura 30. Columna estratigráfica generalizada del área de estudio



Tomada de Martínez, 2003.

La siguiente es una descripción general de las principales unidades estratigráficas en el área de estudio, desde las más antiguas hasta las más recientes, de acuerdo a la descripción e historias de perforación, en los pozos estudiados.

3.3.1 Formación Guadalupe.

3.3.1.1 Posición estratigráfica y edad.

La formación Guadalupe es equivalente a la Formación Colon-Mito Juan en Venezuela. Se les ha asignado una edad Campaniano-Maastrichtiano (Fajardo et al. 2000).

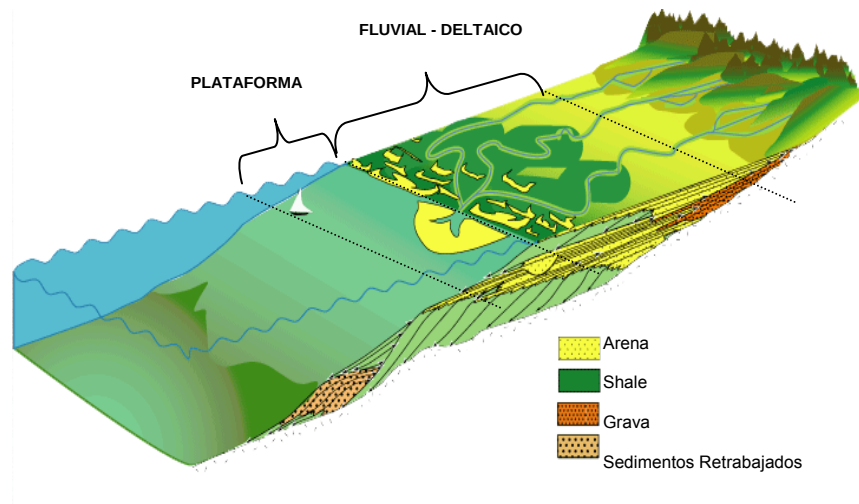
3.3.1.2 Descripción Litológica.

El Grupo Guadalupe se caracteriza por gruesos paquetes de arenitas masivas bioturbadas arenitas con laminación ondulosa bioturbadas, interlaminaciones ligeramente bioturbadas de arena y lodolita, shales gris oscuro y paquetes de interestratificaciones de limolitas silíceas, porcelanitas, shales gris oscuro, ocasionalmente con niveles de fosforita y caliza. Las arenitas en general son de grano muy fino a fino, bien seleccionadas, color blanco amarillento a gris claro y ocurren en capas muy gruesas y gruesas. El Grupo Guadalupe está en contacto inconforme con la suprayacente Formación Barco, El contacto inferior con la formación Chipaque es transicional. El espesor de la Formación Guadalupe varía entre 150 y 300 m (500 a 1000 pies). (Rojas, 2002)

3.3.1.3 Ambiente de depositación.

Para esta unidad Naranjo et al, 2004, interpreta un ambiente de depositación para el sector suroccidental de la zona como de Deltaico a Marino, Fajardo, et al. (2000), manifiesta un ambiente de estuario. (Figura 31).

Figura 31. Bloque diagrama de los ambientes de depositación de la Formación Guadalupe



Modificado Naranjo et al, 2004.

3.3.2 Formación Barco

3.3.2.1 Posición Estratigráfica y edad.

En su localidad tipo, en la Cuenca del Catatumbo, la Formación Barco se encuentra entre las Formaciones Guadalupe y Cuervos, donde se le ha asignado una edad del Paleoceno Inferior (Cooper *et al*, 1994).

3.3.2.2 Descripción Litológica.

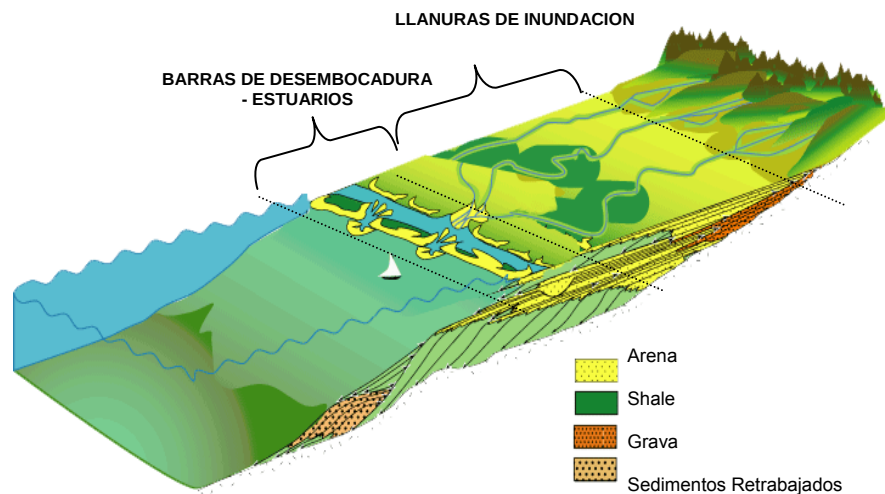
La Formación Barco consiste esencialmente de una sucesión siliciclástica monótona de cuarzoarenitas ligeramente arcillosas color blanco a gris claro, no bioturbadas con estratificación cruzada. Algunas veces, las secuencias basales consisten de arenitas de grano grueso y muy grueso, son conglomeráticas y presentan estratificación cruzada bidireccional (Rojas 2002).

La Formación Barco está en contacto inconforme con la infrayacente Formación Guadalupe. El contacto superior con la Formación Cuervos es aparentemente transicional.

3.3.2.3 Ambiente Depositional.

Para esta unidad Naranjo et al, 2004, interpretan esta sección como depositada en un ambiente de litoral a estuario similar al desarrollado en la parte superior de la formación Guadalupe. En algunos casos, los cuerpos de arenisca pueden ser filos de arena emergentes desarrollados en una ancha cara costera (Figura 32).. La parte superior de esta unidad se interpreta como barras de arena formadas en sistemas pequeños y tortuosos de un plano costero.

Figura 32. Ambiente deposicional de la formación Barco



Modificado de Naranjo et al, 2004.

3.3.3 Formación Los Cuervos

3.3.3.1 Posición estratigráfica y edad.

La Formación Los Cuervos está ubicada entre las Formaciones Barco y Mirador. Se le ha asignado una edad entre Paleoceno Superior y Eoceno (Cooper et al, 1994).

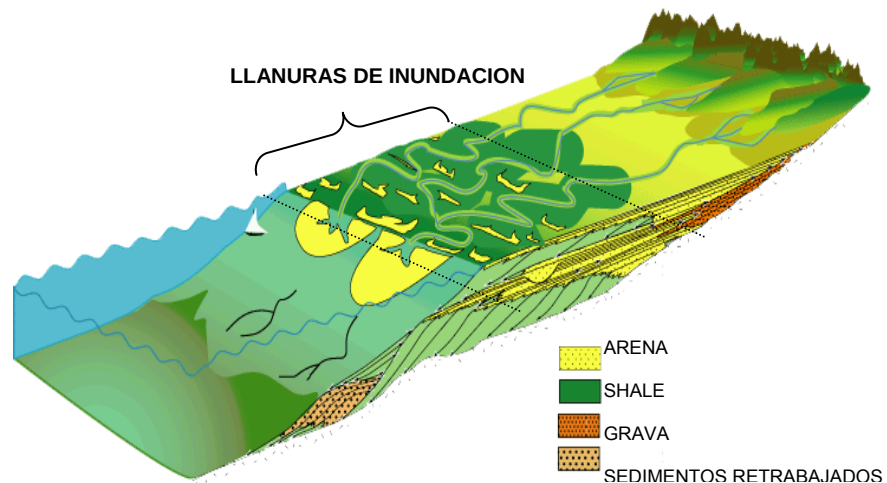
3.3.3.2 Descripción Litológica.

Esta unidad consta principalmente de paquetes intercalados de limolita como litología dominante, y paquetes más delgados de intervalos de arenisca. Se presentan cuatro tipos distintos de litología de grano fino que se distinguen por el color, el contenido orgánico y la presencia o ausencia de carbón. El primer tipo de arenisca es sub-lítica, de grano fino con una alta cementación (baja porosidad). A menudo estas unidades muestran altos niveles de bioturbación. En algunas superficies de la estratigrafía se ven residuos de plantas. El segundo tipo de arenisca es típicamente cuarzo-arenita de grano grueso con buena porosidad (Rojas, 2002).

3.3.3.3 Ambiente deposicional.

Para esta unidad Naranjo et al, 2004, interpretaron el ambiente primordialmente plano costero. Las areniscas pueden ser interpretadas como depositadas en barras de arena de canales fluviales en un ambiente continental. La presencia de espesos niveles de carbón sugiere la presencia de pantanos localizados principalmente en ambiente continental (Figura 33).

Figura 33. Ambiente deposicional de la formación Cuervos



Modificado de Naranjo et al, 2004.

3.3.4 Formación Mirador

3.3.4.1 Posición estratigráfica y edad.

La Formación Mirador se encuentra entre las Formaciones Los Cuervos y Carbonera. La edad asignada a la formación Mirador es Eoceno Superior (Zamora, 2003). La edad asignada a la misma formación en Venezuela es Eoceno

3.3.4.2 Descripción litológica.

La Formación Mirador consta de tres miembros; el inferior y superior areníticos y el intermedio lutítico. Se diferencia de las Formaciones Barco y Guadalupe por la presencia de lentes de conglomerados (tamaño de grano) y arcillas grises con horizontes rojizos (paleo-suelos).

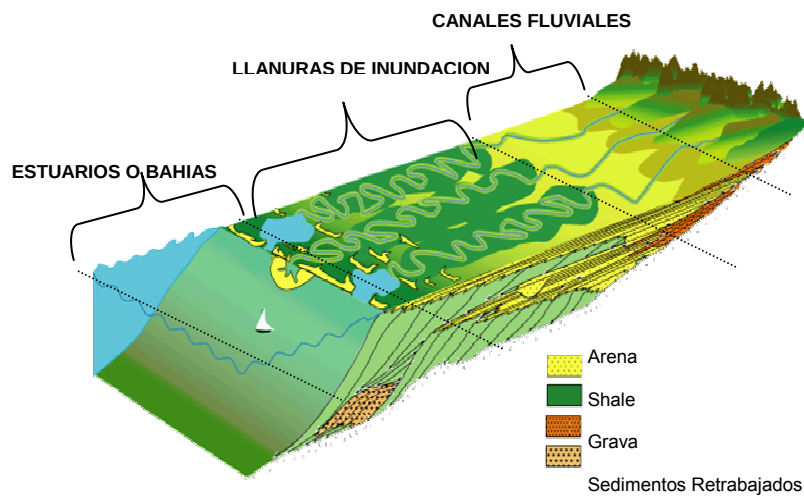
Las areniscas de Mirador son de color claro, de grano grueso a muy grueso, con apariencia muy limpia y caolinita en la matriz. Ocasionalmente presentan capas interestratificadas de conglomerados clastosoportados (tamaño del guijarro). El espesor de los conglomerados va de unos pocos centímetros a decenas de centímetros. Estas capas tienen una morfología lenticular y aparecen en formas de estratificación de diversos tipos y escala (Rojas, 2002). Los contactos con las unidades de arcilla son típicamente irregulares o erosivos.

Los guijos de los conglomerados se componen principalmente de cuarzo lechoso y en menor proporción chert. Las areniscas conforman secuencias grano decrecientes. En el miembro inferior predominan las arcillolitas de color gris claro, parcialmente moteadas en capas lenticulares discontinuas. El miembro intermedio presenta arcillolitas gris oscuras y lutita aparentemente rica en materia orgánica. Ocasionalmente aparecen capas de arenisca de grano fino a muy fino. El contacto entre los miembros basal e intermedio ha sido considerado discordante (Cooper, et al 1994). En algunas localidades el contacto es concordante.

3.3.4.3 Ambiente deposicional.

Para esta unidad Naranjo et al, 2004, interpretaron una secuencias incompletas (parcialmente erosionadas) de rellenos activos de canal fluvial (Figura 34). El contacto transicional con el miembro intermedio sugiere una continua subsidencia de la cuenca que crea un ambiente marino poco profundo.

Figura 34. Ambiente deposicional de la formación Mirador



Modificado de Naranjo et al, 2004.

3.3.5 Formación Carbonera.

3.3.5.1 Posición estratigráfica y edad.

La Formación Carbonera es concordante con la infrayacente Formación Mirador y la sobrepuesta Formación León. En la localidad tipo se le asigna una edad de Eoceno Superior-Oligocene (Zamora, 2003).

3.3.5.2 Descripción litológica.

Esta formación se divide en ocho unidades informales denominados de techo a base C1 a C8; las unidades de número impar son predominantemente

arenosas, mientras las unidades pares son en su mayor parte lutíticas (Rojas, 2002).

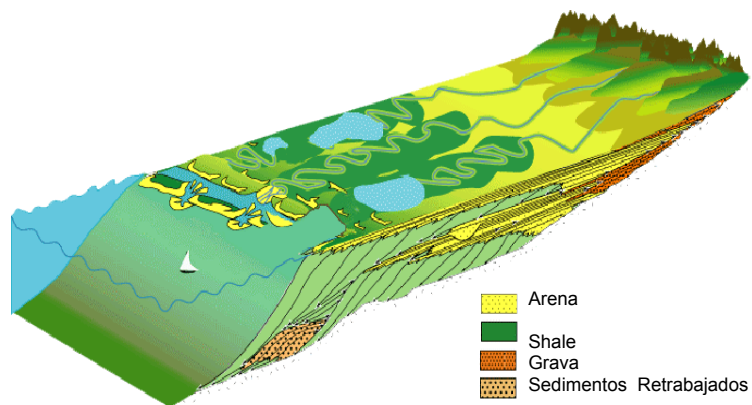
- Miembro C8: Consta principalmente de arcillolitas y lodolitas. Sólo la parte superior aparece con capas gruesas en paquetes métricos de lodolitas de color gris oscuro interpuestos con capas decimétricas de arenitas cuarzosas de grano fino con laminación ondulada.
- Miembro C7: Presenta intervalos métricos de arenitas separados por gruesas paquetes de lodolitas. Las arenitas son cuarzosas de grano medio a fino, ligeramente arcillosas, de arcillosita ricas en fragmentos de plantas. Se encuentran también algunas capas de lodolitas carbonosas.
- Miembro C6: Se caracteriza por paquetes decamétricos de shale arcilloso de color gris verdoso oscuro a oliva claro, entre los cuales se interponen delgadas capas de caliza dolomítica fosilífera. Hay algunos horizontes fosilíferos ricos en gasterópodos. Ocasionalmente, se encuentran finas capas de carbón.
- Miembro C5: En la parte superior presenta un paquete de 10 metros de cuarzo arenita de grano medio en capas gruesas con laminación inclinada planar y en artesa de gran escala. En la parte inferior se presentan arenitas de grano fino en capas delgadas tabulares con laminación ondulada y arenitas de grano medio en capas medianas con laminación inclinada.
- Miembro C4: se compone principalmente de arcillolitas y lodolitas de color gris claro a medio. Hacia la parte media se observa una capa de 1.5 m de arcillolita carbonosa.
- Miembro C3: Se caracteriza por un intervalo de cuarzo-arenitas de grano fino, bien seleccionadas, con laminación inclinada planar, matriz arcillosa, hacia la base de las capas se presentan horizontes de intraclastos arcillosos y fragmentos de plantas. Entre las capas de arenita se encuentran delgadas capas de arcillolita de color gris claro.

- Miembro C2: presenta diversos tipos de facies entre los cuales se destacan arcillolitas y lodolitas de color gris verdoso y gris castaño y paquetes métricos de arenitas de grano fino a muy fino, arcillosas en capas finas tabulares con laminación ondulosa. También se presentan arcillolitas de color gris claro con moteado rojizo. Intercalaciones de calizas intercaladas entre las lodolitas.
- Miembro C1: Esta unidad presenta en el techo un banco de 26 a 30 m de cuarzo-arenitas de grano medio a grueso, moderadamente seleccionadas, friables, en capas gruesas y muy gruesas con laminación inclinada planar de gran escala, muy similares a las observadas en algunos intervalos de las formaciones Barco y Guadalupe. En la parte inferior se encuentran bancos gruesos de arenitas de grano medio y fino con laminación inclinada de bajo ángulo intercalados con capas de lodolitas.

3.3.5.3 Ambiente Depositional.

Para esta unidad Naranjo et al, 2004, interpretaron como una secuencia progradacional de barras de boca estuarina sobre depósitos arcillosos acumulados en un fondo marino somero, Bahía (figura 35).

Figura 35. Ambiente depositacional de la formación Carbonera



Modificado de Naranjo et al, 2004.

3.3.6 Formación León

3.3.6.1 Posición estratigráfica y edad.

La Formación León es concordante con la Fm Carbonera y la sobrepuesta Formación Guayabo. En la localidad tipo se le asigna una edad de Mioceno medio (de Porta, 1974).

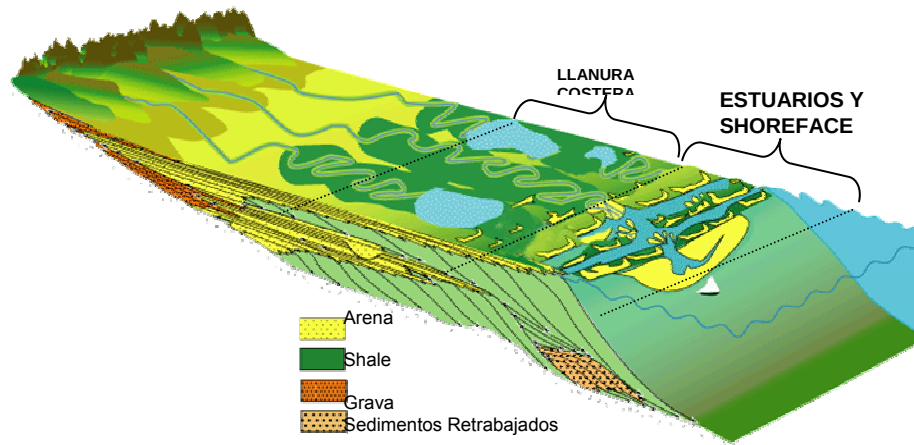
3.3.6.2 Descripción litológica.

La Formación León, es una arcillolita de origen lacustre que se extiende por toda la Cuenca de los Llanos y suprayace a la Formación Carbonera. El espesor disminuye de sur a norte, variando entre 300 y 600 m (1000 a 2000 pies). Se identifica una discordancia dentro de esta unidad, de origen similar a las de la Formación Carbonera, durante el Mioceno Medio. Este evento de deformación es observado con base en información sísmica, principalmente en el sinclinal de Zamaricote, al norte del área de estudio. Esta formación es el nivel de despegue más superior identificado en el Piedemonte (Fajardo 2000)

3.3.6.3 Ambiente de depositacion.

Para esta unidad Naranjo et al, 2004, interpretan un ambiente de depositación fluvial de alta energía para el sector suroccidental (Figura 36). En cuanto a la zona central, Fajardo, et al. (2000), interpretan un ambiente de llanura costera.

Figura 36. Ambiente deposicional de la formación León



Modificado de Naranjo, et al, 2004.

3.3.7 Formación Guayabo

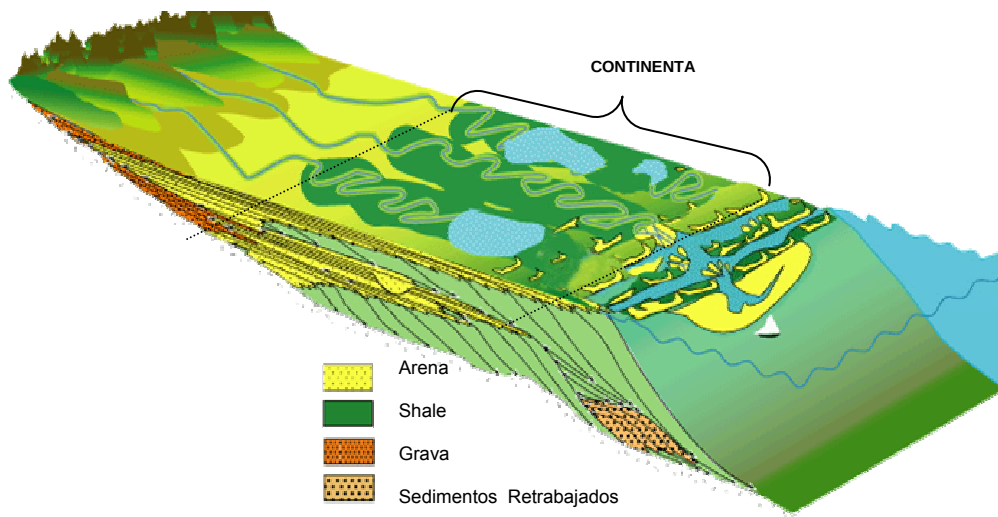
3.3.7.1 Posición estratigráfica y edad.

La Formación Guayabo es concordante con la Formación León. En la localidad tipo se le asigna una edad de Mioceno Superior.

3.3.7.2 Descripción litológica.

Sobre la Formación León está depositada la Formación Guayabo que consta de una serie de conglomerados, arenas y arcillolitas rojas de origen continental. Es un depósito molásico asociado con el levantamiento de la Cordillera Oriental (Fajardo, 2000)

Figura 37. Ambiente depositacional de la formación Guayabo



Modificado de Naranjo et al, 2004.

3.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

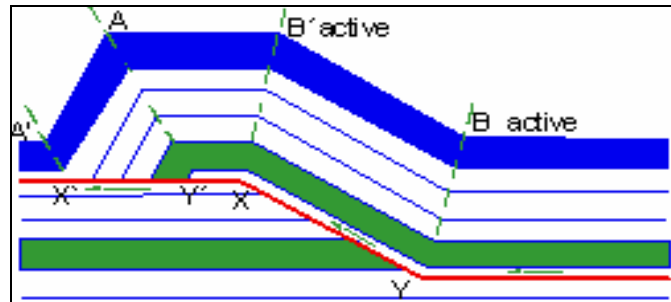
Con base en la información publicada por ECOPETROL y otras compañías se planteará una geología estructural del área de estudio para entender su comportamiento geodinámico, así como los principales eventos tectónicos de la región de estudio.

El Piedemonte llanero es una zona estructuralmente compleja, en la zona más profunda de la cuenca de antepais (*foredeep*) existen fallas normales de basamento reactivadas en fallas de rumbo o inversiones estructurales, así como pequeñas fallas inversas asociadas a pliegues suaves, y pliegues disarmonicos (Linares, 2003).

Los estilos tectónicos existen en todo el Piedemonte, en anticlinales por Flexión (Fault-bend-fold) (figura 38), pliegues de propagación de falla (Fault-

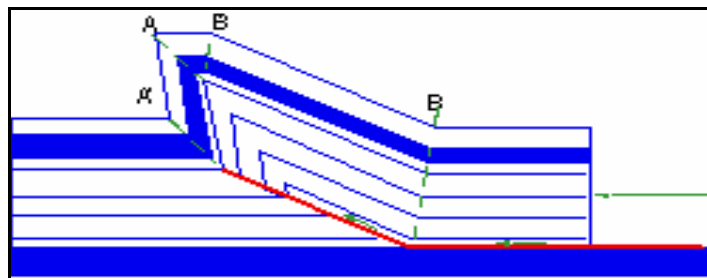
propagation-fold) (figura 39), zonas de duplex (figura 40), zonas triangulares (figura 41), estructura cabeza de serpiente (figura 41), sinclinales pasivos constituyen los elementos estructurales de los estilos tectónicos (Martines, 2002).

Figura 38. *Fault-bend-fold*



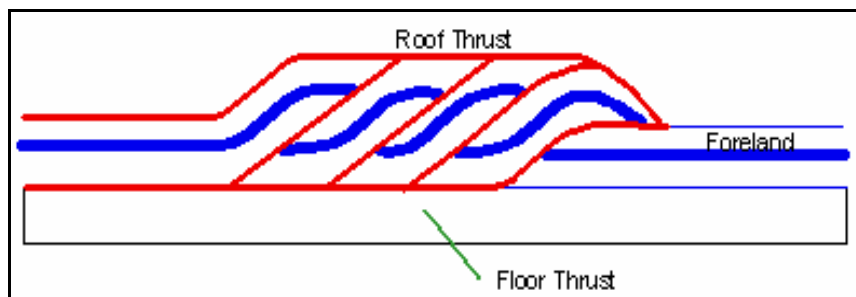
Tomado de Linares, 2003

Figura 39. *Fault-propagation-fold*



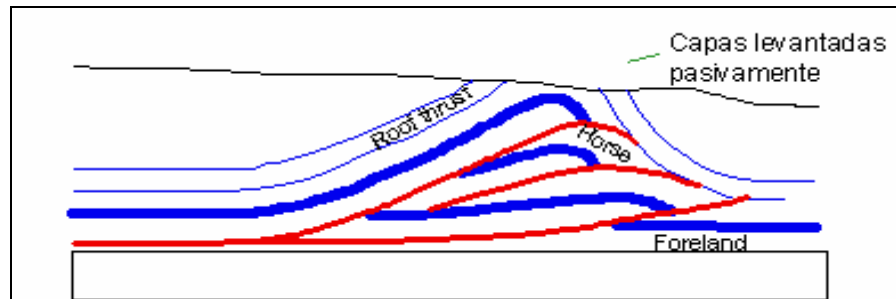
Tomado de Linares, 2003

Figura 40. Zona de Dúplex Clásico



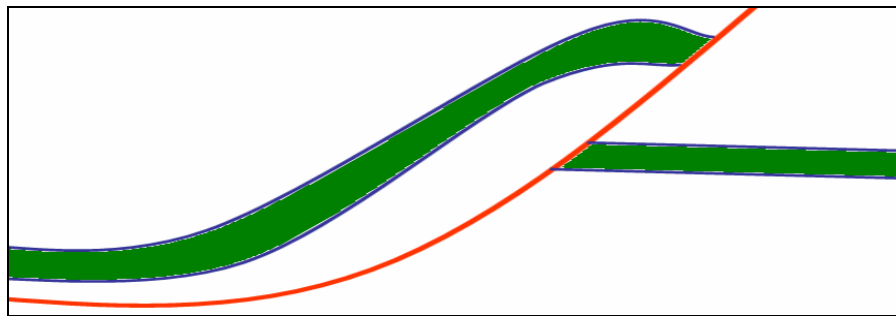
Tomado de Linares, 2003

Figura 41. Zona Triangular



Tomado de Linares, 2003

Figura 42. Cabeza de Serpiente (Snake Head)



Tomado de Linares, 2003

La Cordillera Oriental Colombiana morfoestructuralmente corresponde a un amplio y prominente levantamiento con una dirección general NE-SW, limitado en sus flancos oriental y occidental por fallas inversas que buzan hacia el centro de la cadena montañosa. El estilo tectónico general es un sistema doble de cabalgamientos y plegamientos (Rojas, 2002).

El piedemonte esta caracterizado por la presencia de fallas de cabalgamiento con vergencia al SE. Las fallas principales dan indicios de corresponder a estructuras preexistentes en el basamento, y que posiblemente tuvieron control en la sedimentación durante el Cretácico y Terciario. Estas fallas de acuerdo a los modelos evolutivos de la cordillera, fueron posteriormente

invertidas durante el levantamiento de la Orogenia Andina (Coletta *et. al.*, 1990).

Los elementos estructurales más importantes de la zona de estudio son los mostrados en la Figura 43 y serán enunciados a continuación.

3.4.1 Falla de Guaicáramo

Es una falla de cabalgamiento, con rumbo principal NE, que separa la Cordillera Oriental del Piedemonte de los llanos. En el área de estudio pone en contacto rocas del Cretáceo Inferior (Formación Une) con la Formación Carbonera. Es una estructura fuera de secuencia producida por la inversión de fallas originalmente normales, que limitaban un graben del Cretáceo Inferior (Rojas, 2002).

3.4.2 Falla de Yopal

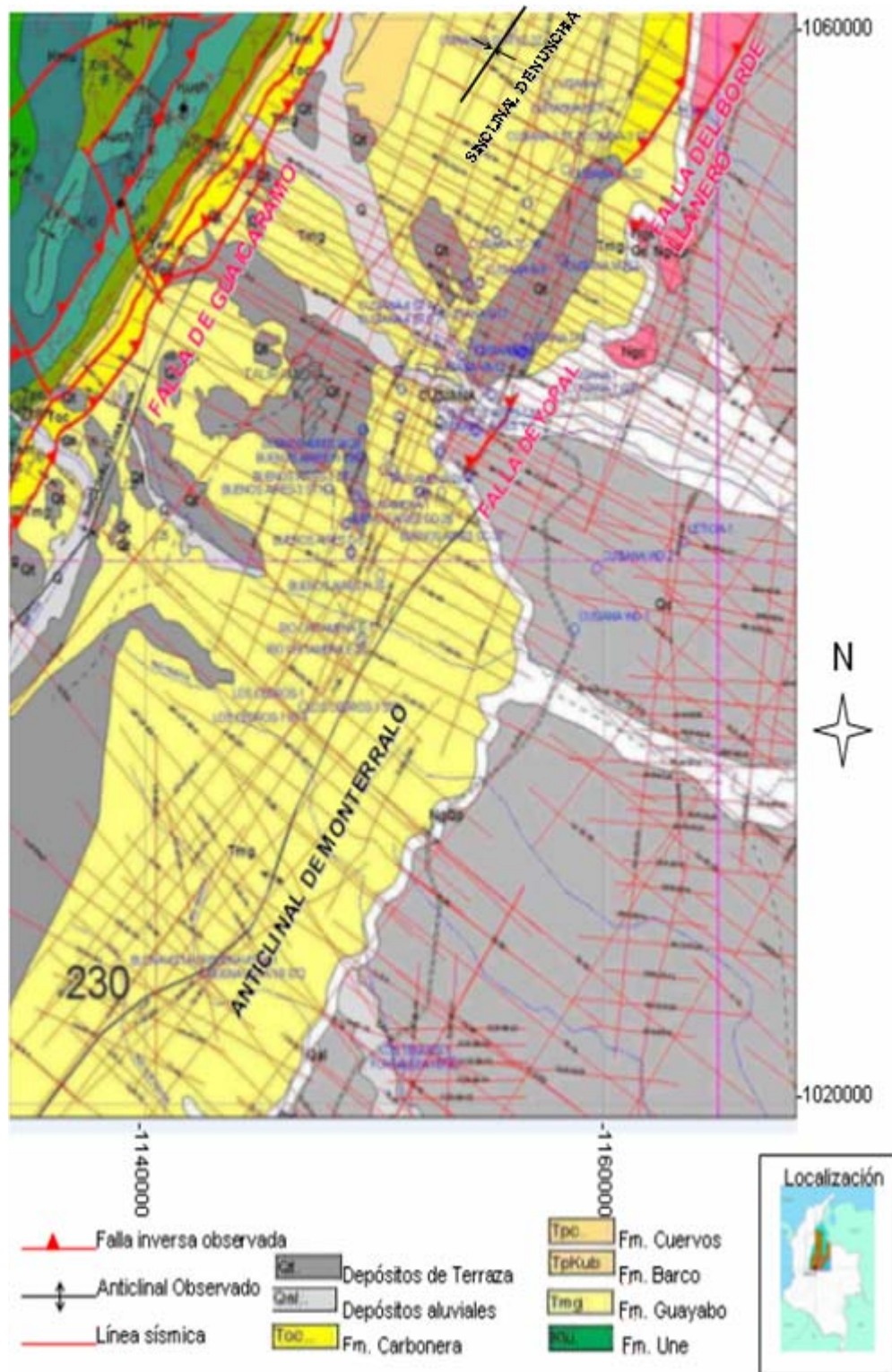
Su trazo en superficie con rumbo NE, pone en contacto a las unidades superiores de la Formación Carbonera contra la Formación Guayabo. Hacia el norte su desplazamiento va disminuyendo paulatinamente hasta ser cortada por la Falla de Ariporo (Hossack, 1997) .

Es una falla de cabalgamiento que emerge a superficie, a ella se unen diferentes fallas de despegue. El principal nivel de despegue que se une a la Falla de Yopal, se localiza estratigráficamente hacia la base de la Formación Carbonera, siendo un problema para la estabilidad del pozo (Rojas, 2002).

3.4.3 Falla del Borde llanero

Es una falla de cabalgamiento que se desarrolla como una ramificación de la Falla de Yopal. Presenta un nivel de despegue inferior en la base de la Formación Carbonera, y uno superior en la Formación León. Se une al norte con la Falla de Ariporo a la que transfiere su acortamiento (Rojas, 2002).

Figura 43. Principales rasgos estructurales del área de estudio



Modificado de Mapa Geológico, ECOPETROL, 2002.

3.4.4 Sinclinal de Nunchía

Es un sinclinal pasivo de techo que se desarrolla entre las fallas de Yopal y Guaicáramo, siendo cortado por ésta última. Involucra a las Formaciones Guayabo, León y la parte superior de Carbonera

3.4.5 Dominio estructural.

A lo largo del frente de deformación oriental de la cordillera, se pueden definir seis dominios tectónicos diferentes con estilos estructurales (ECOPETROL,1995). A continuación se presenta el dominio estructural del área de estudio.

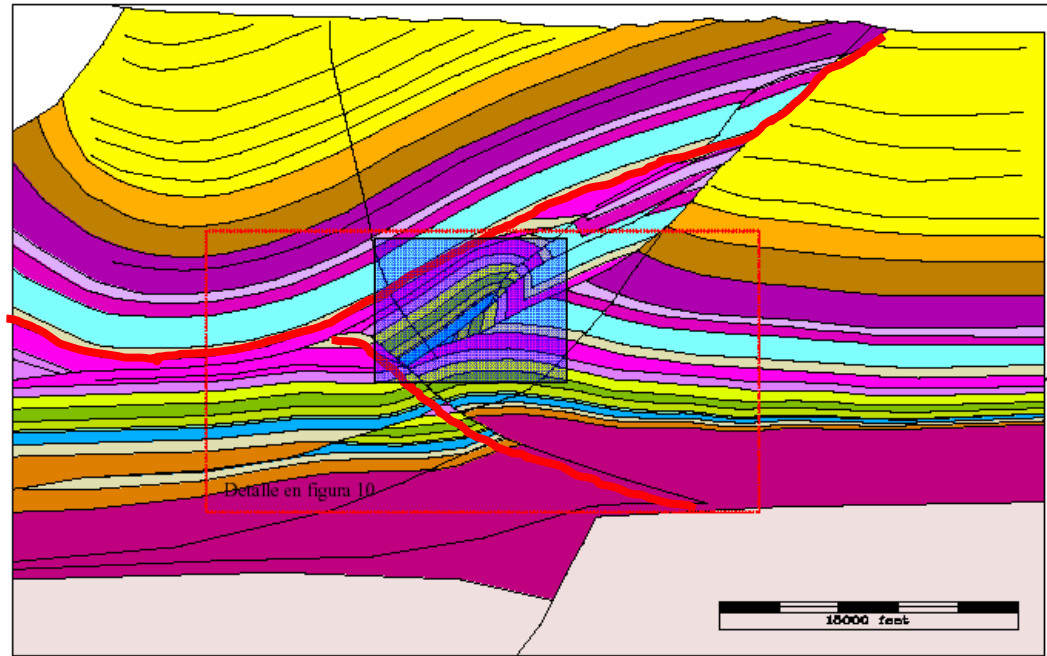
3.4.5.1 El Bloque Cusiana.

Es un estilo estructura se caracteriza por un sinclinal pasivo con nivel de despegue en la formación Carbonera, el sinclinal de Nunchia, una zona triangular compuesta por duplex existen al occidente, finalmente, un abanico imbricado con pliegues de propagación de falla existen en el oriente.

Por debajo de Sinclinal de Nunchia, la estructura de de la zona de estudio corresponde a una estructura cabeza de serpiente, se destaca un pliegue estilo Fold bend fault, con un back thrust asociado.

El área de interés para la producción Petróleo se encuentra en el anticlinal fallado que se encuentra en la zona media de las estructuras mencionadas. (Figura 44). El cabalgamiento de Cusiana es una estructura de cobertura gruesa, resultando de una inversión de falla normal antigua bien evidenciada al sur. También suaves inversiones están presentes en el *Foredeep*. El cabalgamiento de Yopal es una estructura de cobertura delgada que se une a la falla de Guaicaramo (Figura 44).

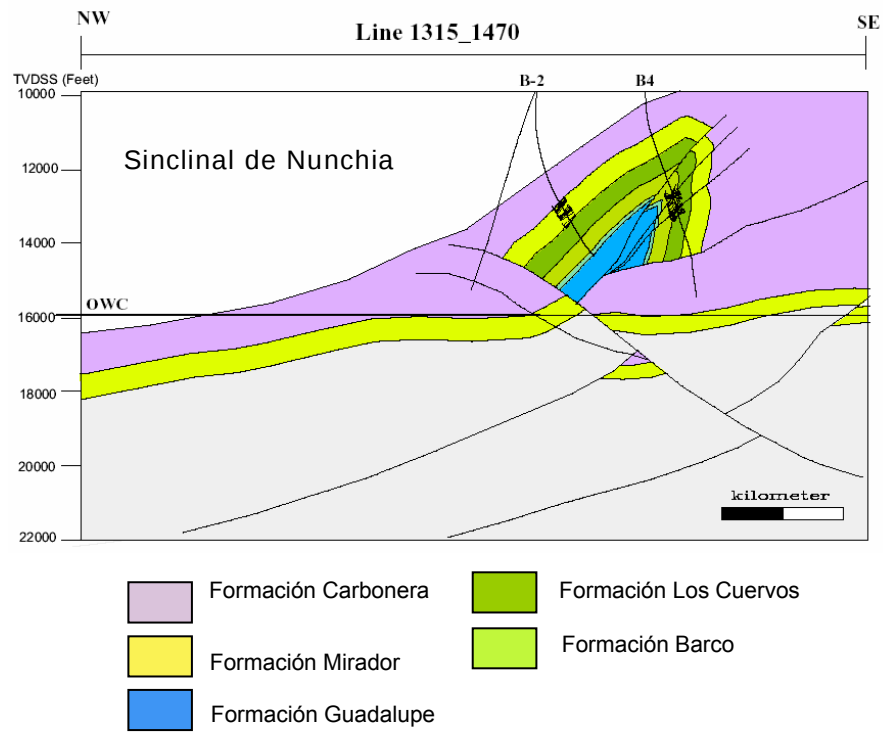
Figura 44. Sección estructural a lo largo de la zona de estudio



Tomado de BP., Well Review, 2001

Para el pozo Buca 1, Figura 45, se atraviesa un plano de despegue regional asociado a los niveles inferiores de la Formación Carbonera y que pone en contacto rocas terciarias con formaciones Cuaternarias. Los problemas asociados con inestabilidad de pozo se presentan en los miembros de Carbonera C5 y C6 debido a la alta anisotropía de esfuerzos horizontales que no permite la perforación de pozos con las condiciones de mínima inclinación como es lo deseado para llegar con la menor distancia recorrida al objetivo.

Figura 45. Perfil Estructural del Pozo Buca 1



Tomado de BP., 2001

4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD USANDO EL SOFTWARE POBRE 3D

El Software PBORE-3D analiza y simula los efectos dependientes del tiempo en la estabilidad del pozo mientras se perfora¹. Además está estructurado para ayudar a geólogos e ingenieros a diseñar un programa de perforación con una ventana de peso de lodo. Presenta una interfase gráfica que incluye rutinas como edición, validación de datos y representación gráfica de resultados. El pozo puede ser simulado por medio de los modelos elásticos y poroelásticos para formaciones isotrópicas así como para formaciones transversalmente isotrópicas con condiciones de pared permeable e impermeable. Para este trabajo de investigación solamente se realizara una inspección al modelo elástico. Los resultados presentados son³⁰:

- ✎ Análisis de falla para evaluar el peso crítico de lodo para condiciones de fractura y colapso.
- ✎ Estimación de las regiones críticas cerca del pozo, bajo un peso de lodo específico.
- ✎ Calculo de la ventana segura de lodo como una función del ángulo de inclinación, azimut y profundidad.
- ✎ Optimización para perforación direccional generando mapas polares para evaluar el peso crítico de lodo en un rango entero de ángulos de inclinación y azimut.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

En la ventana inicial aparecen las siguientes opciones en la parte superior³⁰:

1. Menú File
2. Menú Edit

3. Menú Compute
4. Menú Options

4.1.1 Propiedades del pozo

Figura 46. Ventana de entrada de las propiedades del pozo

The screenshot shows the 'PBORE-3D -- Input Data -- (untitled)' window. It is divided into several sections:

- Wellbore Geometry:**
 - Unit System:** Radio buttons for 'English' (selected) and 'International'.
 - Borehole Orientation:**
 - Hole Angle: 12 deg
 - Azimuth: 28 deg
 - In-situ Stress Gradients:**
 - Vertical Stress: 1.1 PSI/ft
 - Max Hor Stress: 1.5 PSI/ft
 - Min Hor Stress: 0.75 PSI/ft
 - Pore Pressure: 0.489 PSI/ft
 - Borehole Data:**
 - Borehole Radius: 1.021 feet
 - True Vert Depth: 12450 feet
 - Mudweight: 12.8 lb/gal
- Material Properties:**
 - Shear Failure Parameters:**
 - Model: Mohr - Coulomb (MCFC)
 - Cohesion: 6540 PSI
 - Friction Angle: 49 deg
 - Break Out Angle: 0.00 deg
 - Tensile Failure Parameter:**
 - Tensile Strength: 1032 PSI
 - Isotropy Type:**
 - Radio buttons for 'Isotropic' (selected) and 'Transversely Isotropic'.
 - Model Type:**
 - Radio buttons for 'Permeable' (selected) and 'Impermeable'.
- Analysis Type:**
 - Radio buttons for 'Conventional Elastic Approach' and 'Poromechanics Approach' (selected).
 - Dropdown menu for 'Elastic' (selected).
 - Radio buttons for 'Elastoplastic Approach' and 'Elastoplastic' (selected).
 - Dropdown menu for 'Elastoplastic'.

At the bottom, there are buttons for 'Apply', 'OK', 'Cancel', and a link for 'Published Values of Poroelectric Parameters'.

Tomada de Software PBORE 3D versión 6.20

4.1.1.1 Sistema de Unidades

PBORE-3D puede trabajar con dos sistemas de unidades. Éstos son:

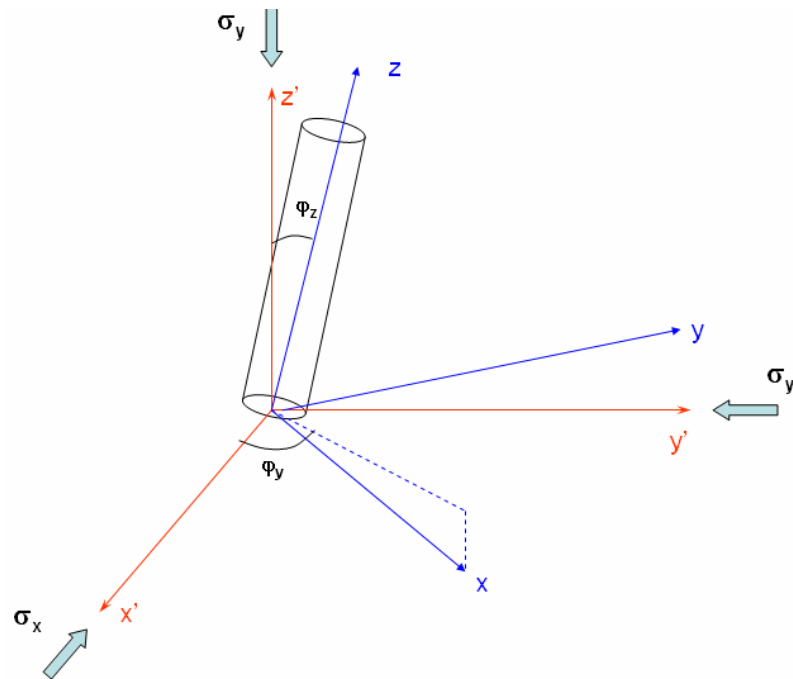
- ✎ El sistema Internacional de Unidades (SI)
- ✎ El sistema inglés de unidades

4.1.1.2 Orientación de la perforación

La orientación de la perforación^{27, 30} se define por el ángulo de inclinación y el azimut, Figura 45. Se asume que el esfuerzo horizontal máximo coincide con el eje-x, el esfuerzo horizontal mínimo con el eje-y y el esfuerzo vertical con

el eje-z. El ángulo de inclinación se define como el ángulo entre el eje de la perforación y el eje-z. El azimut se define como el ángulo entre la proyección del eje de la perforación en el plano horizontal y la dirección del esfuerzo in situ horizontal máximo. Deben suministrarse el ángulo de inclinación y el azimut de la perforación. La unidad para ambos ángulos es grados.

Figura 47. Geometría de un pozo inclinado



Modificada de Software PBORE 3D versión 6.20

4.1.1.3 Los esfuerzos in-situ

Deben suministrarse los gradientes de esfuerzo in situ, es decir, el gradiente de esfuerzo vertical, el gradiente de esfuerzo horizontal máximo, el gradiente de esfuerzo horizontal mínimo y el gradiente de la presión de poro.

- ✎ Gradiente de Esfuerzo vertical (S_v)
- ✎ Gradiente de Esfuerzo Horizontal máximo (Sh_{max})
- ✎ Gradiente de Esfuerzo Horizontal mínimo (Sh_{min})
- ✎ Gradiente de Presión de poro.

4.1.1.4 Los Datos de la perforación

Los datos de la perforación son esenciales para el análisis, además de la orientación, deben suministrarse: El radio de la perforación, la profundidad vertical y el peso del lodo de perforación.

Debe notarse que el peso del lodo de perforación especificado no se usa en el cómputo del peso del lodo crítico. El peso del lodo específico sólo se usa en el cálculo de las curvas de esfuerzo a dicho valor de peso del lodo. Este peso del lodo tampoco se usa en el cálculo de fractura efectiva o en el esfuerzo de colapso como una función de peso del lodo.

4.1.1.5 Criterios de falla de corte

El análisis de falla en PBORE-3D usa tres criterios: El Criterio de Falla Mohr-Coulomb (MCFC), el Criterio de falla de Drucker-Prager (DPFC) y el Criterio de Falla Modificado de Lade (MLFC), explicados en el capítulo 2. La ventana para los parámetros de falla de corte permite seleccionar el tipo del criterio a ser usado en el cálculo y especificar los parámetros correspondientes, cohesión de la roca y ángulo de fricción.

4.1.1.6 Análisis de la tensión de la Falla

El análisis de la falla por tensión usa la resistencia máxima a la tensión de la roca como criterio de comparación para encontrar el límite máximo de la ventana de lodo.

4.1.1.7 Teorías para realizar el análisis

PBORE-3D puede ser usado para realizar el análisis por medio de la teoría elástica, termoelástica, viscoelástica, poroelástica, poroviscoelástica, porotermoelástica y poroquímicoelástica. Sin embargo, como se dijo inicialmente el análisis desarrollado para este trabajo solamente se va a basar en el Modelo Elástico.

4.1.2 Propiedades de la roca

Figura 48. Ventana de entrada de las propiedades de la roca

The screenshot shows the 'PBORE-3D -- Input Data -- (untitled)' window. It is divided into three main sections: 'Wellbore Geometry', 'Material Properties', and 'Chemical Properties'. The 'Material Properties' section is further divided into 'Elastic Properties', 'Poroelectric Properties', 'Thermoelastic Properties', 'Formation Properties', 'Drilling Fluid Properties', 'Solute Transport', and 'Chemical Properties'. The 'Elastic Properties' section includes fields for Young's Modulus (1.5e6 PSI) and Poisson's Ratio (0.285). The 'Poroelectric Properties' section includes fields for Biot's Eff Stress Coefficient (0.52), Undrained Poisson's Ratio (0.35), Formation Permeability (1.5E-03 md), and Fluid Viscosity (0.001 poise). The 'Thermoelastic Properties' section includes fields for Temperature of the Formation (0.00 deg C), Coeff of Vol. Exp. for Formation in Isotropic plane (0.000E+00 per deg C), Coeff of Vol. Exp. for Formation in Transverse direction (0.00E+00 per deg C), Specific Heat of the Formation (0.000E+00 btu/lb/C), Thermal Conductivity (0.000E+00 hp/ft/C), Bulk Density (0.000E+00 lb/gal), and Porosity (0.00 %). The 'Formation Properties' section includes fields for Temperature of the Formation (0.00 deg C), Coeff of Vol. Exp. for Formation in Isotropic plane (0.000E+00 per deg C), Coeff of Vol. Exp. for Formation in Transverse direction (0.00E+00 per deg C), Specific Heat of the Formation (0.000E+00 btu/lb/C), Thermal Conductivity (0.000E+00 hp/ft/C), Bulk Density (0.000E+00 lb/gal), and Porosity (0.00 %). The 'Drilling Fluid Properties' section includes fields for Temperature of the Drilling Fluid (0.00 deg C) and Coeff of Vol. Exp. for Fluid (0.000E+00 per deg C). The 'Solute Transport' section includes fields for Formation Temperature (0.00 deg C), Solute Molar Fraction in Wellbore Fluid (0.0000), Solute Molar Fraction in Formation Fluid (0.0000), and Chemo-Mechanical Coupling Coefficient (0.0000 PSI). The 'Chemical Properties' section includes fields for Mud Activity (0.0000), Formation Activity (0.0000), and Membrane Efficiency (Reflection Coefficient) (0.00). There is also a 'Time Intervals' section with four time intervals (Time Intvl 1 to Time Intvl 4) and their corresponding units (min/s, hour, day). At the bottom, there are buttons for 'Apply', 'OK', 'Cancel', and a checkbox for 'Published Values of Poroelectric Parameters'.

Tomada de Software PBORE 3D versión 6.20

4.1.2.1 Parámetros elásticos

La ventana de Parámetros Elásticos³ de la roca necesita que sean suministrados: Módulo de Young y la relación de Poisson. Las constantes elásticas restantes pueden ser calculadas a partir de estos dos parámetros.

Para el caso de poroelasticidad se necesita incluir además: La relación de Poisson sin drenar, el coeficiente de Biot, la permeabilidad y la viscosidad de fluido. Estos datos son igualmente requeridos para el análisis poroelástico, porotermoelástico, poroviscoelástico y el poroquimicoelástico. El análisis poroviscoelástico y el porotermoelástico requieren algunos parámetros adicionales:

- La temperatura de Formación

- La temperatura del Fluido de perforación
- El coeficiente de Expansión Volumétrica de la roca
- El coeficiente de Expansión Volumétrica para el Fluido
- El Calor específico de la roca
- La Conductibilidad térmica de la roca
- La porosidad de la roca

Para un análisis viscoelástico se requerirá también los parámetros basados en el modelo de Kelvin Generalizado. Se asume que el módulo de corte así como el módulo volumétrico muestran una naturaleza viscosa.

4.1.2.2 Parámetros Químicos

En la ventana de Parámetros Químicos se debe suministrar la actividad del lodo, la actividad de la formación, el coeficiente de la reflexión (eficiencia de la torta de lodo) y temperatura de la formación.

4.1.2.3 Intervalos de Tiempo

Los esfuerzos poroelásticos, porotermoelásticos, poroviscoelásticos y poroquímicoelásticos, la presión de poro y el análisis de la falla, son efectos que dependen del tiempo¹ y deben entrarse los valores de los intervalos de tiempo a los cuales se desea el análisis. Estos se usan en los cálculos de las curvas de esfuerzo a un peso del lodo especificado y en el cálculo del esfuerzo efectivo de fractura o del colapso efectivo como una función del peso del lodo y el intervalo de tiempo.

4.1.3. Cálculos realizados por el Software

La opción "Compute" se usa para realizar los cálculos de varios casos. Estos casos son³: las curvas de esfuerzo para un peso del lodo dado, los rangos críticos de peso del lodo dependiente del tiempo para modelos de fractura o colapso como también el análisis de peso del lodo variando otros parámetros.

El menú "Compute" muestra las siguientes opciones:

- ✗ Curvas de esfuerzo alrededor del pozo
- ✗ Análisis de la falla alrededor del pozo
- ✗ Análisis de peso del lodo variando diferentes parámetros

4.2. MÉTODO PARA VALIDAR EL SOFTWARE PBORE 3D.

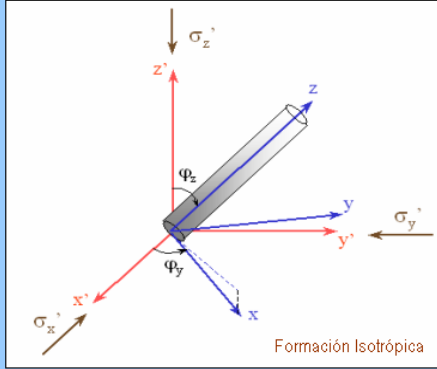
Para apreciar el proceso realizado por el software PBORE y poder así evaluar los resultados que arroja, se decidió construir un programa con Hojas Electrónicas en Microsoft Excel por medio de la herramienta Macros, en lenguaje de programación Visual Basic. El objetivo primordial de este programa es plasmar la teoría recopilada en un esquema, con el cual se obtengan los mismos resultados que en el software PBORE y poder así validar los datos arrojados por este último. Las ventanas de Presentación y Entrada de datos son mostradas en las Figuras 49 y 50, respectivamente.

Figura 49. Ventana de Presentación.



Figura 50. Ventana de Entrada de Datos.

Datos de Entrada



Método de Solución

☒ Análisis Elástico Lineal
☐ Análisis Poroelástico Lineal

Orientación del Pozo

Ángulo de Inclinación [Grados]
 Azimut [Grados]

Información del Pozo

Radio de pozo [ft]
 Profundidad [ft]
 Peso de Lodo [ppg]

Criterio de Falla por Cizalladura

☒ Mohr-Coulomb
☐ Drucker-Prager Cohesión [psi]
☐ Lade Modificado Áng. Fricción [Grados]

Propiedades Poroelásticas

Módulo de Young [psi]
 Relación de Poisson [Adimensional]
 Coeficiente de Biot [Adimensional]

Condición Límite en la Pared del Pozo

☒ Permeable
☐ Impermeable

Esfuerzos In Situ

Grad. Esf. Vertical [psi/ft]
 Grad. Esf Horizont Max. [psi/ft]
 Grad. Esf Horizont Mín. [psi/ft]
 Grad. Presión de Poro [psi/ft]

Falla por Tensión

Resistencia max. a la Tensión [psi]

Portada

Aplicar

Oprima "Aplicar" para ingresar los datos

Distribución de Esfuerzos

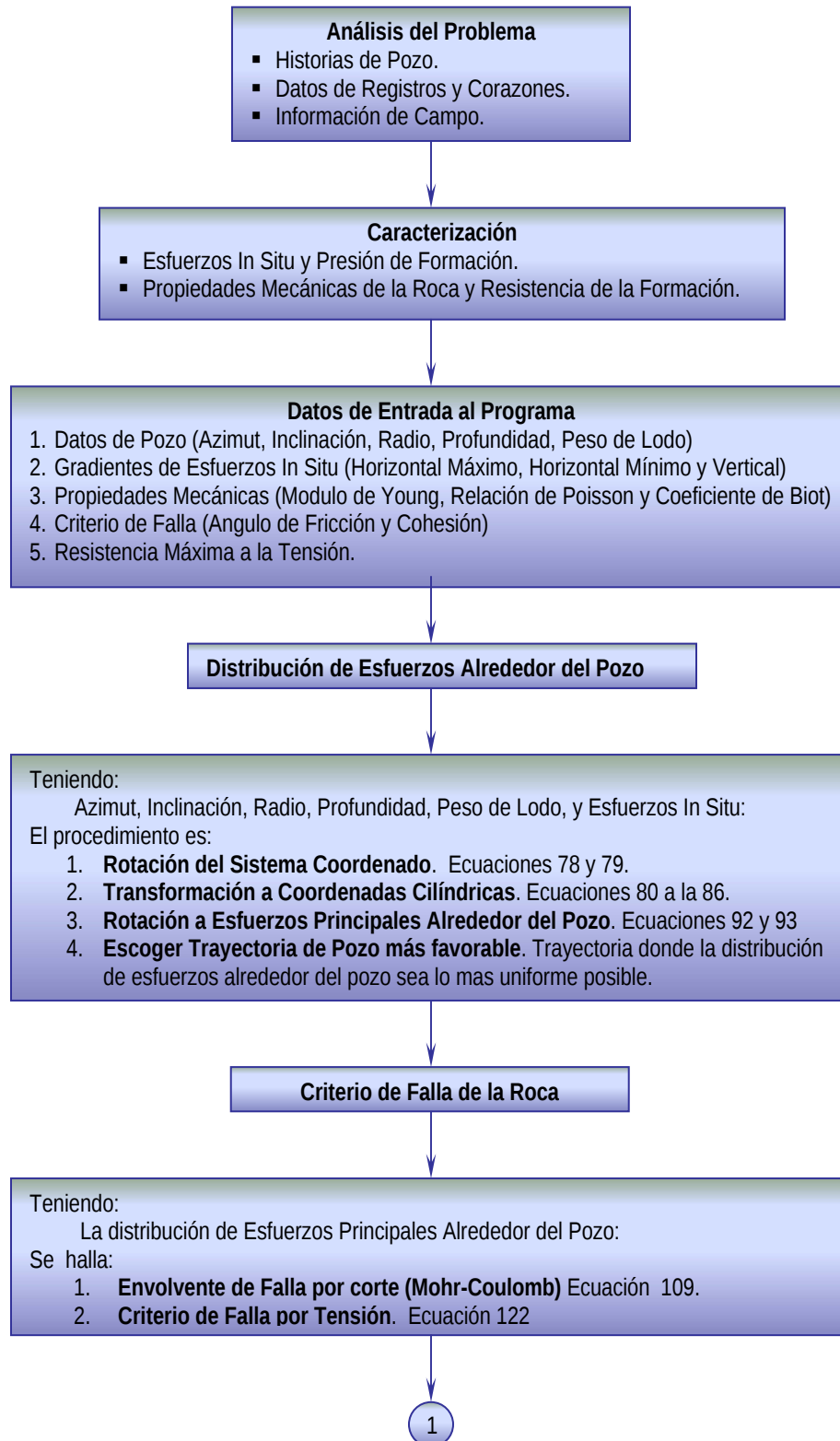
Distribución de Esfuerzos alrededor del pozo

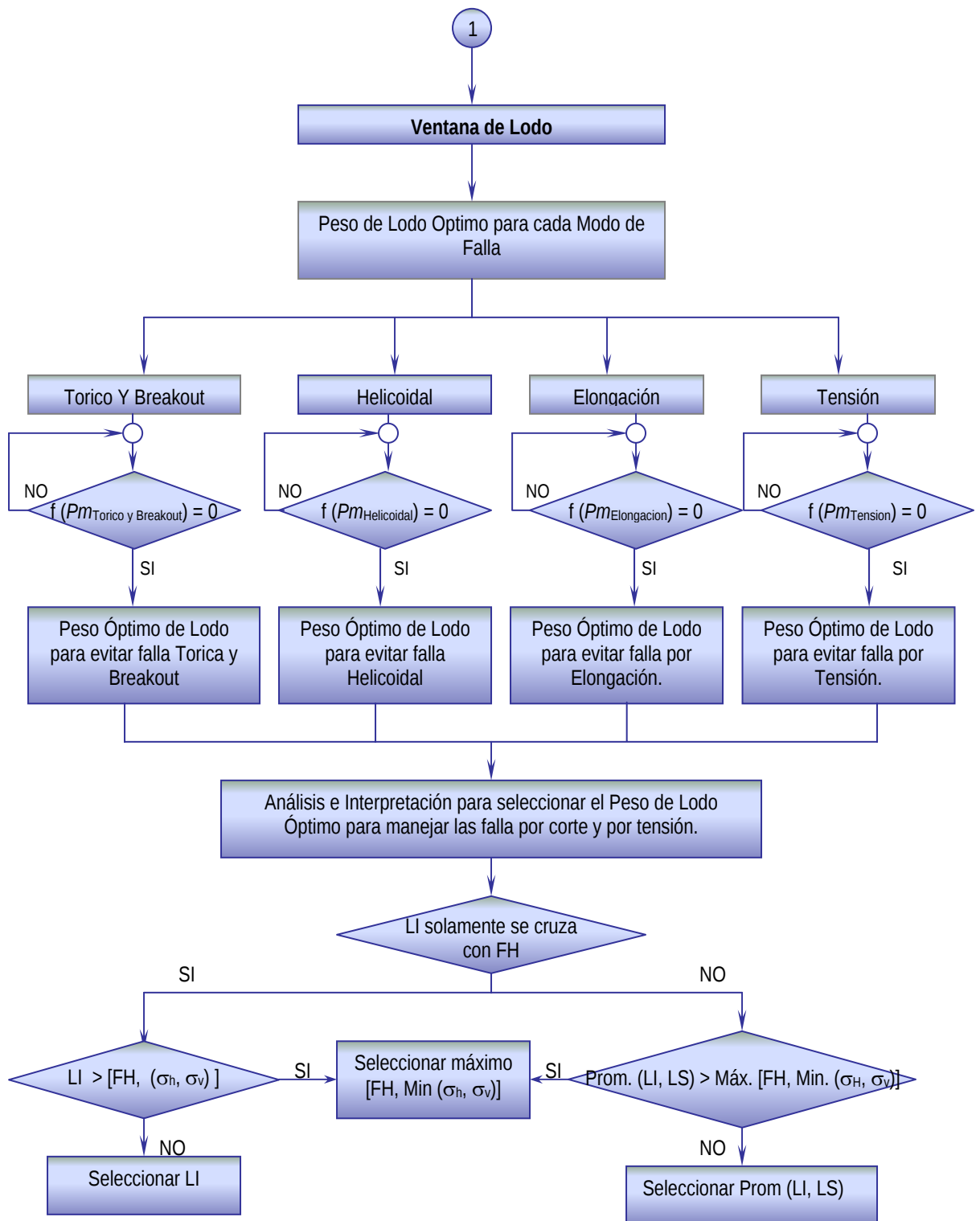
Criterio de Falla

Ventana de Lodo

El proceso llevado a cabo, para realizar un análisis de estabilidad por medio del programa es ilustrado en el siguiente diagrama de flujo:

Figura 51. Diagrama de Flujo del proceso realizado por medio de la Hoja Electrónica.





Donde:

LI - Limite Inferior de peso de lodo para evitar la falla por corte (Falla Torica y de Breakout)
LS - Limite Superior de peso de lodo para evitar falla por corte (Falla Helicoidal y de Elongación)
FH - Limite máximo de peso de lodo para evitar la fractura hidráulica
Min. - Mínimo
Máx. - Máximo
Prom. - Promedio

Los resultados obtenidos son:

- ✓ Distribución de Esfuerzos alrededor del pozo para diferentes distancias radiales, en ángulos de pozo de 0° a 180° (Figura 52)
- ✓ Envolvente de Falla por Corte para el Criterio de Mohr Coulomb (Figura 53)
- ✓ Criterio de Falla por tensión.
- ✓ Pesos de Lodo óptimos para cada modo de falla⁷ (Figura 54).

Figura 52. Distribución de esfuerzos alrededor del pozo para un determinado ángulo de pozo.

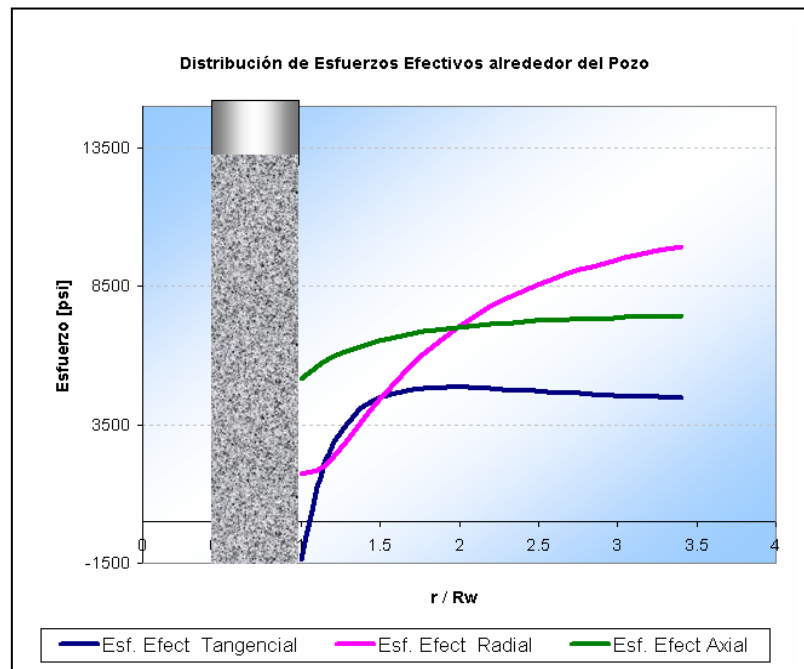


Figura 53. Envolvente de Falla por corte.

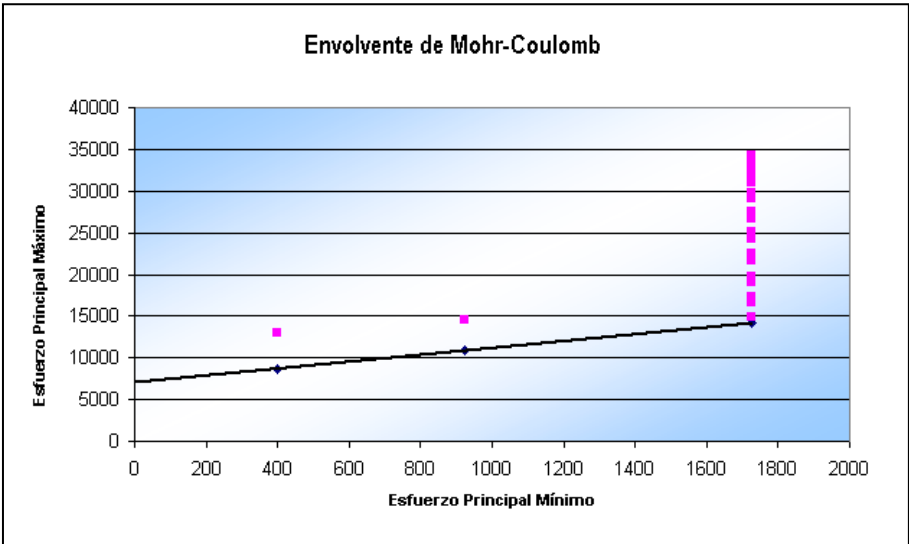
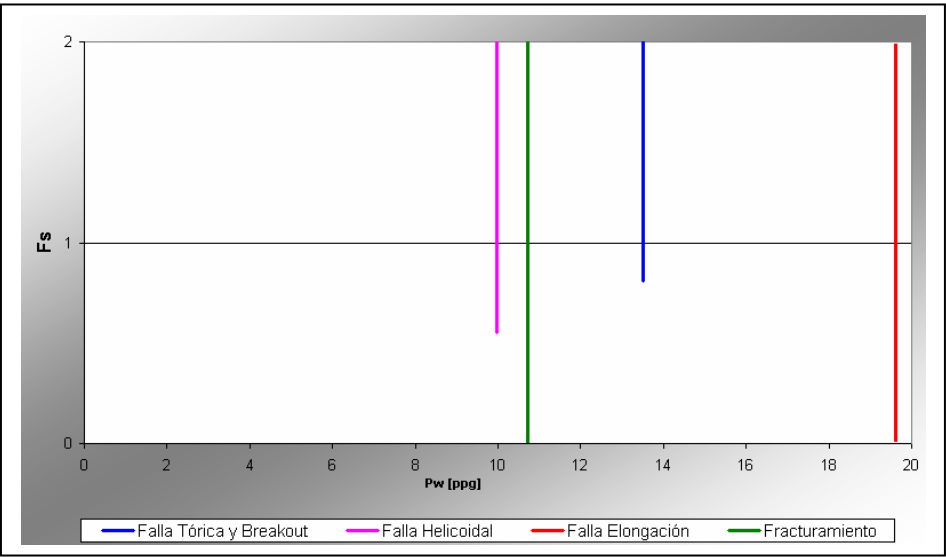


Figura 54. Pesos de Lodo óptimos para cada modo de falla.



4.3. ANÁLISIS DEL POZO BUCA 1 Y BUCA 2

Luego de efectuar el estudio teórico general del análisis de estabilidad se decidió realizar una aplicación para dos pozos del Piedemonte Llanero colombiano asumiendo un comportamiento elástico lineal.

Los análisis teóricos desarrollados por las compañías operadoras sobre el Piedemonte Llanero⁶ indican que se puede minimizar la falla de las rocas alrededor del hueco si se aumenta la presión hidrostática para balancear el efecto de la concentración de esfuerzos alrededor del pozo. Esto se logra usando pesos de lodo sobre balanceados ($p_w > p_p$) dependiendo esta magnitud de sobre balance de los esfuerzos compresivos en la formación y de la orientación del pozo.

A partir de la experiencia obtenida de los pozos perforados con altos pesos de lodo, la inestabilidad de la formación no se pudo prevenir totalmente aún con pesos de lodo altos (14,5 ppg). Los pesos de lodo necesarios para estabilizar las altas tensiones tectónicas que actúan en una dirección sobre el hueco, pueden ser mayores al peso de lodo necesario para que la roca se fracture en la dirección del menor esfuerzo horizontal. Es decir, el límite mínimo de peso de lodo para evitar la inestabilidad de pozo se cruza con el límite máximo para que existan pérdidas de lodo (fractura hidráulica). Desafortunadamente, la frecuencia y la tasa de pérdidas de lodo, especialmente a los intervalos de areniscas fracturadas, crece al aumentar el peso de lodo hasta el punto en que el peso de lodo necesario para evitar la inestabilidad de la formación es mayor de lo que resulta económicamente viable por las grandes pérdidas de lodo resultantes.

Los corazones obtenidos en otros pozos del mismo campo han demostrado que las arenas de la estructura son altamente fracturadas y la inestabilidad de la formación puede ser un factor más crítico aún.

Los intervalos más problemáticos son los miembros de lutitas de las formaciones Carbonera y los Cuervos. Además, se han observado presiones de formación anormales en Carbonera C7 de hasta 16 ppg en los pozos B2, Q6 y U9, aumentando así el riesgo de inestabilidad de pozo.

4.3.1. Reporte General Pozo Buca 1.

El objetivo del pozo Buca 1⁴ fue el de evaluar la estructura sur del Campo. El pozo fue planeado de tal manera que se llegara al tope de la Formación Mirador con un radio de 12 ¼". (+/- 14.800 ft.), con un casing de 13 3/8" desde el tope de la Formación Carbonera C1. El pozo atraviesa un plano de despegue regional asociado a los niveles inferiores de la Formación Carbonera y pone en contacto rocas terciarias con formaciones cuaternarias.

Los huecos de 36" y 26" fueron perforados de acuerdo al programa y se colocó un casing de 20" en la Formación Guayabos a 534 ft. Luego, en la sección de 17 ½", el pozo fue orientado de una perforación perpendicular a los planos de estratificación a una dirección paralela a los mismos, con una inclinación de aproximadamente 19° para poder alcanzar el objetivo. Se colocó el casing de 13 3/8" desde 550 ft hasta 5881 ft.

El mayor control direccional se necesitó en la sección de 12 ¼". Los problemas se presentaron especialmente en las formaciones Carbonera C5 y C6, concluyendo finalmente con dos operaciones de *sidetrack*. Sin embargo los problemas de pozo continuaron ocasionando daños en el casing de 13 3/8", para lo cual se decidió colocar un casing de 9 5/8" en la Formación Carbonera C6.

La inestabilidad continuó en Carbonera C6, provocando un incidente de pega de tubería, lo que conllevó al primer *sidetrack*. Mientras se estaba

perforando Carbonera C7 a 15.410 ft se atravesó una zona de sobrepresión, en la cual se utilizó un lodo de 15.4 ppg para controlar el pozo. La sección de 8 ½" fue perforada con un muy bajo ROP en la Formación Carbonera C8 (17.359 ft).

Debido a la incertidumbre geológica, a los problemas de pozo y al daño en el casing de 9 5/8" se decidió utilizar un Liner de 7" en el tope de la Formación Mirador (16.798 ft)

En general, los problemas asociados con la inestabilidad de pozo se presentaron en los miembros de Carbonera C6 y C7 debido a la alta anisotropía de esfuerzos horizontales, la cual no permite la perforación de pozos con las condiciones de mínima inclinación como es lo deseado para llegar con la menor distancia recorrida al objetivo.

4.3.2. Reporte General del Pozo Buca 2.

El pozo Buca 2⁵ fue un pozo perforado en la etapa de desarrollo del campo, con este pozo se intentaba precisar el contacto agua-petróleo para las secciones productoras, además de utilizarlo como pozo productor.

Luego de cumplir con los objetivos iniciales, se bajó revestimiento de fondo, *Liner* de 7", y se decidió seguir perforando con 6" para probar el modelo geológico del campo. El objetivo no se cumplió, ya que los problemas de inestabilidad no pudieron ser manejados y el pozo debió ser abandonado después de realizar un *sidetrack*. El costo de la sección adicional fue de 2.8 millones de dólares.

El pozo se completó, se corrieron registros en las secciones productoras y se corazonaron las formaciones Mirador, Barco y Guadalupe.

4.3.3. Datos Utilizados

Para el análisis de la estabilidad de pozo se seleccionaron las profundidades de 12294', 13416', 14062', 15068' de TVD para el pozo CUP B2 ST y para el pozo Q6 las profundidades de 12481', 13389' y 14480' igualmente de TVD.

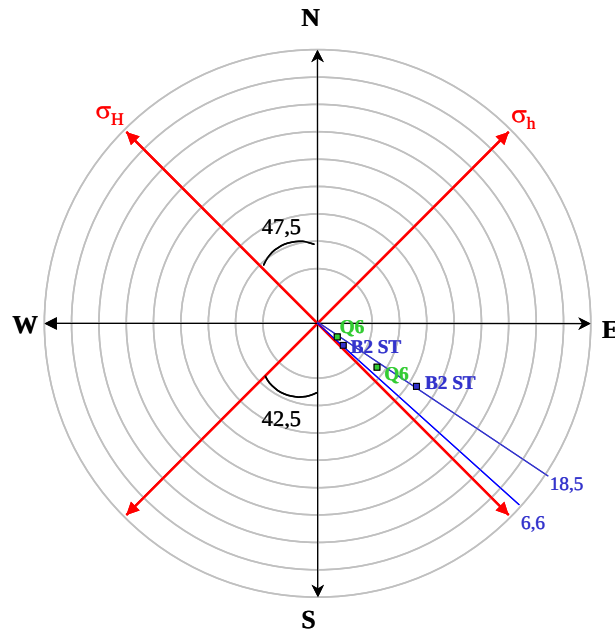
Sin embargo, se encontró una alta similitud de los resultados obtenidos, esto debido en principio, a que la falta de datos en las profundidades analizadas conllevó a utilizar las mismas propiedades de resistencia de la roca para las formaciones analizadas (Carbonera y Los Cuervos) Por lo tanto, solamente se presenta en este trabajo el análisis a ciertas profundidades por pozo.

Para el análisis de la estabilidad del pozo Buca 1, se seleccionaron dos profundidades, la primera a un TVD de 12294' correspondiente a una profundidad MD de 12650' ubicada en la formación Carbonera C6, y la segunda a una profundidad TVD de 15068' correspondiente a un MD de 15665', ubicada en la formación Los Cuervos.

Para el análisis de estabilidad del pozo Buca 2, se seleccionaron dos profundidades, una profundidad TVD de 12481' correspondiente a un MD de 12625', ubicada en la formación Carbonera C7, y otra profundidad TVD de 14480' correspondiente a un MD de 14725', ubicada en la formación Los Cuervos.

Los ángulos de inclinación y azimut de los pozos se encuentran resumidos en las Tablas 5 y 6, y son representados en la Figura 55. Estos datos fueron obtenidos de la trayectoria de perforación reportada por la compañía perforadora.

Figura 55. Ubicación de los pozos B2 ST y Q6 con respecto a las coordenadas geográficas y a los esfuerzos in situ.



En la Figura 55, los círculos concéntricos representan la inclinación del pozo y el ángulo con respecto a los ejes representa el azimut. Los ejes de color rojo representan la dirección de los esfuerzos horizontales in situ con respecto a los ejes geográficos.

Tabla 5. Datos obtenidos del reporte de perforación para el pozo Buca 1⁴.

	Carbonera C6	Los Cuervos
TVD	12294 ft, (12650 MD)	15068 ft, (15665 MD)
Peso del lodo	12.8 ppg	10 ppg
Azimut (respecto al Norte)	116°	114°
Azimut (respecto al σ_H)	16,5°	18,5°

Inclinación del pozo	6,6°	33°
Presión de Poro	9.5 ppg, 6073.23 psi	8.9 ppg, 6974 psi
Radio de Pozo	0.708 ft	0.708 ft

Tabla 6. Datos Obtenidos de reporte de perforación para el pozo Q6⁵

	Carbonera C7	Los Cuervos
TVD	12481 ft (12625 MD)	14480 ft (14725 MD)
Peso del lodo	12,5 ppg	10 ppg
Azimut (respecto al Norte)	128°	119°
Azimut (respecto al σ_H)	4,5°	13,5°
Inclinación del pozo	18°	17°
Presión de Poro	9 ppg, 6735 psi	8,9 ppg, 6974 psi
Radio de Pozo	0,708 ft	0,708 ft

El régimen de esfuerzos utilizado se encuentra dentro del rango de esfuerzos regionales reportados en el artículo SPE 81074, tomándose los gradientes que tienden a mostrar mayor diferencia relativa, como una forma de realizar un cálculo más conservador:

- $\nabla\sigma_v = 1.1$ psi/ft
- $\nabla\sigma_h = 0.75$ psi/ft
- $\nabla\sigma_H = 1.5$ psi/ft

De acuerdo a la distribución Andersoniana, en la profundidad mencionada, el régimen dominante es rumbo deslizante ($\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$).

Las propiedades mecánicas de las formaciones se tomaron de datos publicados en la literatura sobre arcillas (mudstone - siltstone). Según el reporte de perforación para las zonas de C6, C7 y Los Cuervos, éste es el tipo de roca predominante. Las demás propiedades fueron calculadas a partir de relaciones. Los datos están registrados en la Tabla 7.

Los datos de presión de poro, litología, pérdidas de circulación, ángulos de inclinación de pozo, azimut, profundidad y problemas comunes de inestabilidad fueron extraídos del Well Review de Cupiagua 2001 y del reporte de perforación los pozos analizados así como de pozos cercanos.

Tabla 7. Datos de propiedades mecánicas de la roca utilizados.

Propiedad	Roca intacta	Plano de estratificación
Cohesión (C)	2900 psi 20 Mpa (*)	2321 psi 16 MPa (de Mohr-Coulomb)(*)
UCS	10000 psi 69 Mpa (*)	7542 psi 52MPa
Angulo de Fricción (ϕ)	30° (SPE 81074)	26.6° (SPE 53940)
Resistencia a la tensión (σ_t)	188 psi (SPE 36972) 1,3 MPa	179,12 psi (SPE 36972) 1,235 MPa
Propiedades Elásticas		
	<i>Up dip</i>	<i>Down dip</i>
Modulo de Young (E)	1'624.423 psi (*) 11,2 GPa	1.385.111 psi 9,55 GPa
Poisson (ν)	0,16 (SPE 36972)	0,19 (SPE 36972)

(*) Rock Mechanics Technology

4.3.4. Metodología del análisis de estabilidad de pozo

El análisis de estabilidad se realizó estableciendo el régimen de esfuerzos al cual se encuentra sometido el pozo a la profundidad específica. Para este propósito se calculó la relación entre el esfuerzo horizontal mínimo y el esfuerzo vertical, así como entre el esfuerzo máximo horizontal y el esfuerzo mínimo horizontal.

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{0.75}{1.1} = 0.68$$

$$\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = \frac{1.5}{0.75} = 2$$

Luego se calcula la trayectoria óptima del pozo. Para este régimen de esfuerzos se obtiene que la mejor trayectoria debe presentar una alta inclinación y el pozo debe ser orientado en la dirección de un esfuerzo horizontal. Mediante la relación de esfuerzos se obtienen dos posibles trayectorias:

✕ En la dirección del σ_H y,

✕ En la dirección del σ_h .

Para solucionar esta inconveniente se analizaron las diferencias entre los esfuerzos horizontales con el esfuerzo vertical:

$$\sigma_h - \sigma_H = 0.75$$

$$\sigma_H - \sigma_v = 0.4$$

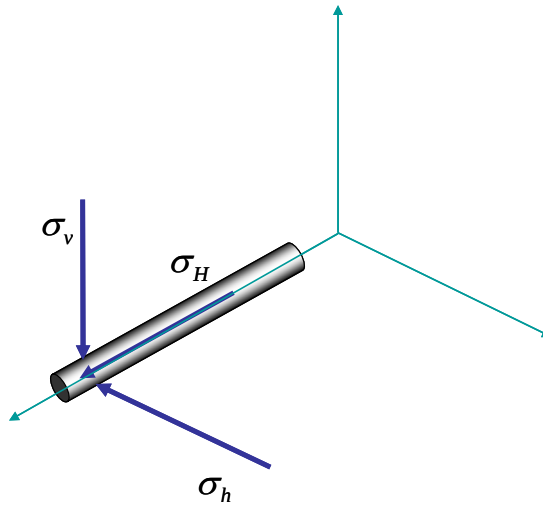
$$\sigma_h - \sigma_v = 0.35$$

Se puede observar que:

$$\sigma_h - \sigma_H > \sigma_H - \sigma_v > \sigma_h - \sigma_v.$$

Por lo tanto se deduce que la mejor trayectoria es en la dirección del esfuerzo máximo horizontal al ser menor la diferencia entre los esfuerzos.

Figura 56. Trayectoria óptima de pozo para menor inestabilidad



También se realizó el análisis de la trayectoria a 45° del esfuerzo mínimo horizontal obteniendo los siguientes resultados:

En la Figura 57 se ilustran los esfuerzos que actúan sobre la pared del pozo cuando éste se orienta con una dirección de 45° desde mínimo esfuerzo horizontal. Las magnitudes de los gradientes se calcularon trasladando el eje de coordenadas X paralelo a la dirección del pozo.

$$\sigma_{Hx} = \sigma_H \cos 45^\circ = 1.06$$

$$\sigma_{hx} = \sigma_h \cos 45^\circ = 0.57$$

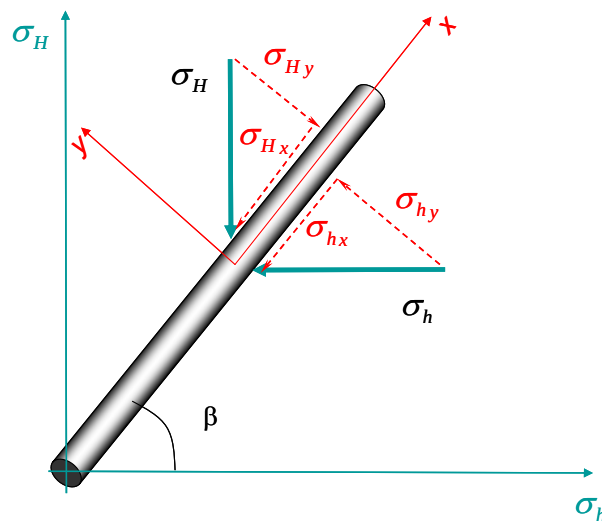
Comparando la diferencia de componentes que actúan sobre el pozo a 45° .

$$\Delta(\sigma_{Hy} - \sigma_{hx}) = 0.52$$

$$\Delta(\sigma_v - \sigma_{Hy}) = 0.4$$

$$\Delta(\sigma_v - \sigma_{hx}) = 0.57$$

Figura 57. Componentes que actúan sobre un pozo horizontal orientado un ángulo β con respecto al σ_h



Con las componentes que actúan orientando el pozo paralelo a cada uno de los esfuerzos horizontales, se concluye que la trayectoria óptima es en la dirección de σ_H , ya que estarán actuando sobre las paredes del pozo σ_h y σ_v con una diferencia de 0.35.

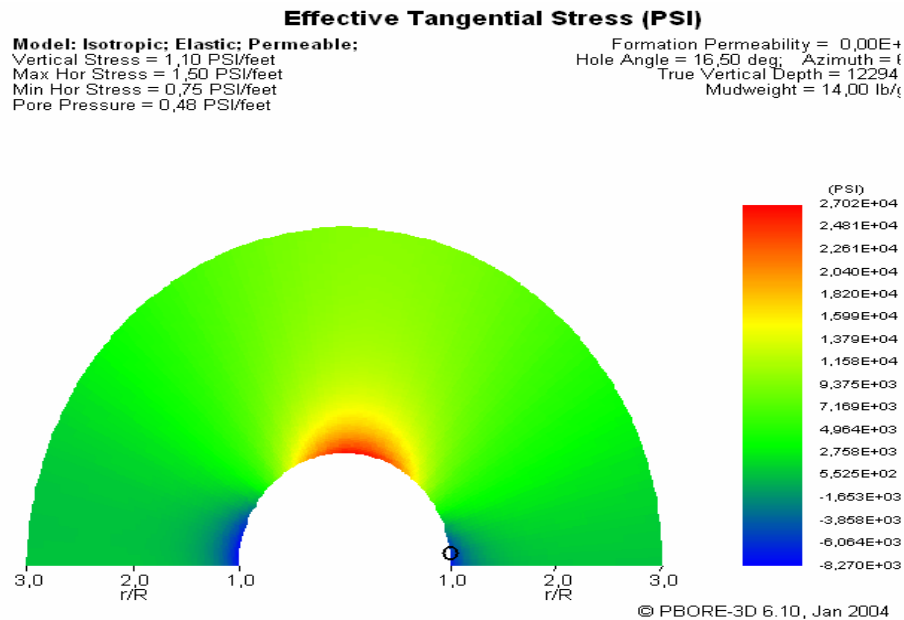
4.3.5. Análisis de estabilidad con el software PBORE para las Formaciones Carbonera C6 y Los Cuervos del pozo Buca 1.

Los resultados obtenidos utilizando el software PBORE son graficados en las Figuras 58 al 80, para el pozo Buca 1, en las Formaciones Carbonera C6 y Los Cuervos.

En las gráficas 58 al 69, se observa la distribución de esfuerzos alrededor del pozo en coordenadas cilíndricas para la Formación Carbonera, utilizando el peso de lodo con el cual se perforó. Con estas gráficas se puede proponer una trayectoria de pozo para la cual la distribución de esfuerzos efectivos alrededor de las paredes del pozo sea lo más uniforme posible, es decir, para todos los ángulos alrededor de la cara del pozo halla la misma carga, ya sea compresional o tensional. En la mayoría de los casos esto no se puede cumplir, pues existe una inclinación predeterminada para llegar al objetivo de la manera más rápida posible; para estos casos se debe escoger la

trayectoria menos desfavorable, desde el punto de vista de la estabilidad mecánica, para perforar. En el caso de los pozos B2 ST y Q6, la mejor trayectoria es con una inclinación de 90° en la dirección del esfuerzo máximo horizontal, sin embargo al estar aún en la Formación Carbonera, no se puede tomar tal inclinación y pero se puede alterar un poco la trayectoria inicial del plan de perforación original, para hacer el pozo menos inestable, o realizar nuevos planes de perforación para los pozos siguientes a perforar.

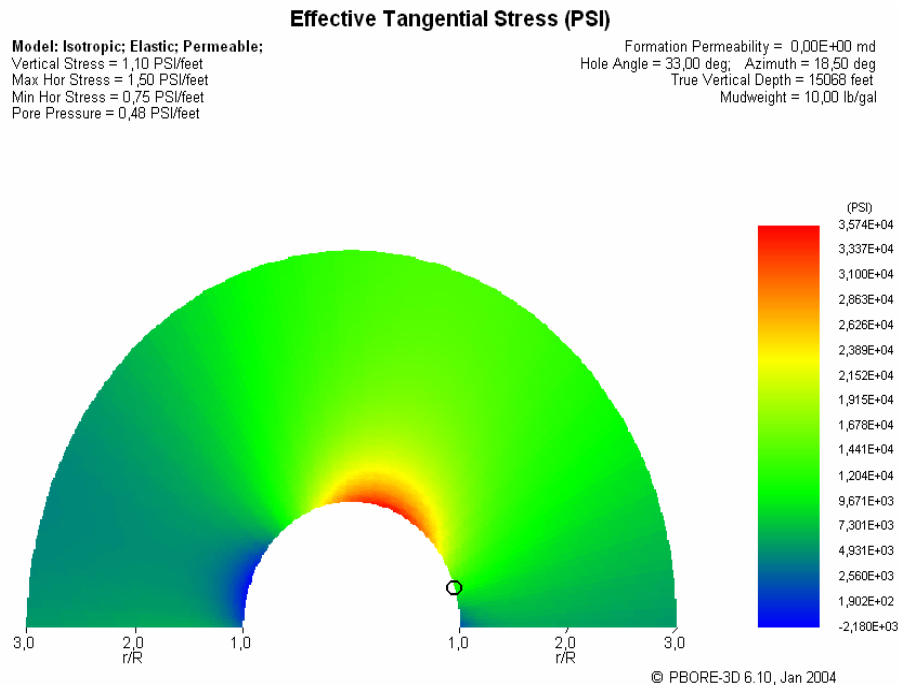
Figura 58. Esfuerzo efectivo Tangencial alrededor del pozo B2 ST en la F. Carbonera C6



En la gráfica anterior se observa que en la cara del pozo para ángulos entre 70° y 100° aproximadamente, aparece la mayor concentración de esfuerzos tangenciales efectivos, a diferencia de lo que sucede a ángulos de aprox. 0° y 180°. Esta distribución no uniforme podría repercutir directamente en las fallas por tensión sobre la cara del pozo dependiendo de la magnitud de las

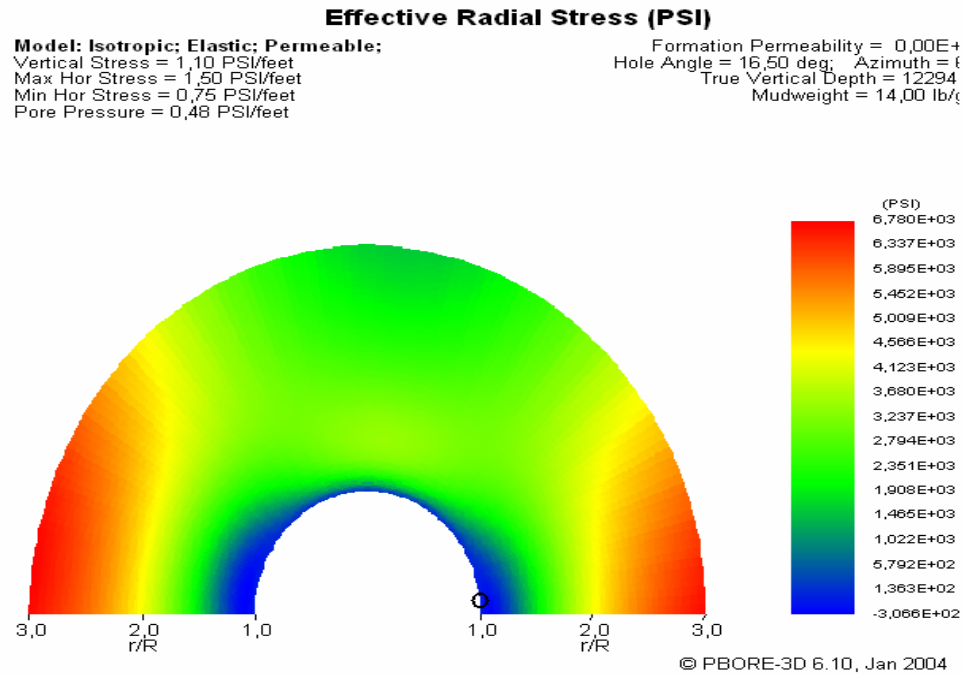
propiedades de resistencia de la roca. Esto se analizará más adelante con las gráficas de esfuerzos críticos para colapso y tensión, aplicando ya, en ese caso, los criterios de falla.

Figura 59. Esfuerzo efectivo Tangencial alrededor del pozo B2 ST en la F. Los Cuervos



De la misma manera que sucedió en la Formación Carbonera, para la Formación Los Cuervos la situación no cambia mucho. La distribución de los esfuerzos tangenciales presenta una anisotropía marcada casi en la misma dirección del caso anterior.

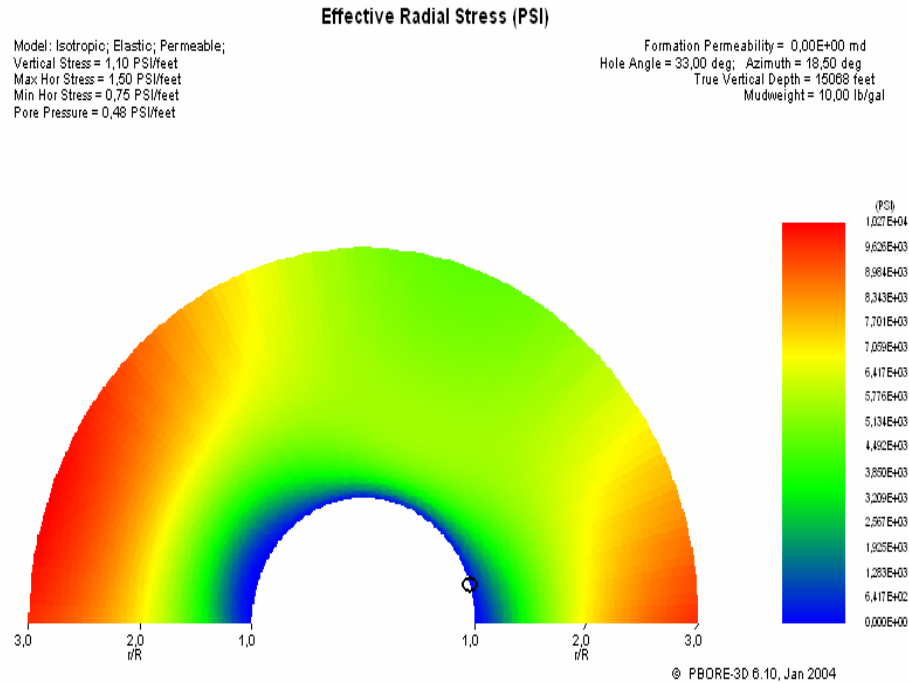
Figura 60. Esfuerzo efectivo Radial alrededor del pozo B2 ST en la F. Carbonera C6



Para la gráfica anterior, la distribución de esfuerzos efectivos radiales alrededor de la cara del pozo se presenta uniforme, sin embargo para cada ángulo, la distribución varía con la distancia radial a partir del pozo. El esfuerzo radial en la cara del pozo está dado por el valor del peso del lodo. Para ángulos cercanos a 90° se observa que al aumentar la distancia radial desde la cara del pozo, el esfuerzo radial, en principio aumenta en mayor proporción comparado con el aumento de los esfuerzos radiales para ángulos en las cercanías de 0° y 180°, pero no alcanza a tener valores más altos que para estos últimos ángulos. Esto podría ser muy relevante para el caso de colapso de la formación. A ángulos de 90° el esfuerzo radial aumentaría rápidamente y mantendría la pared del pozo estable en caso de colapso a diferencia de los otros ángulos. Aunque este es un ejemplo ilustrativo pues estos fenómenos dependen de muchos otros factores como

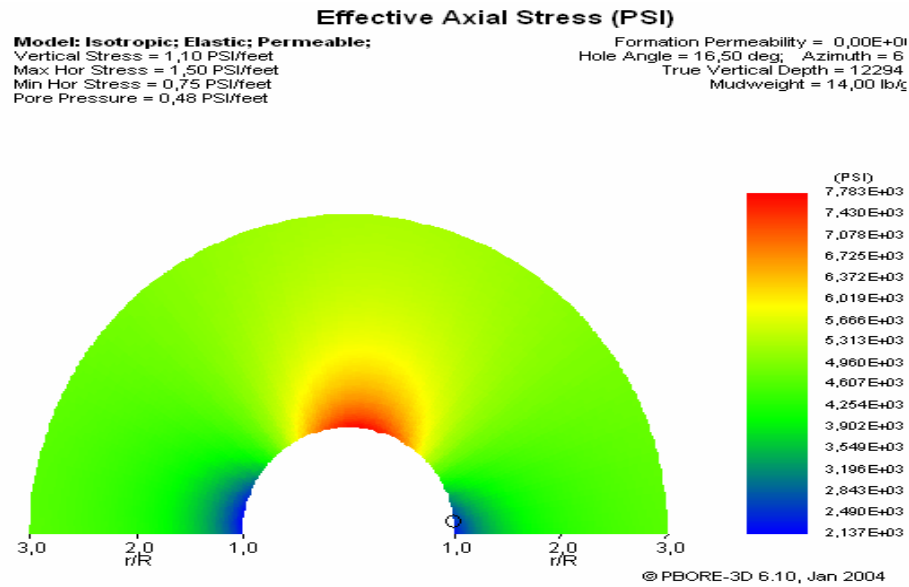
lo son los esfuerzos restantes (tangencial, axial, de corte), la resistencia de la roca entre otros.

Figura 61. Esfuerzo efectivo Radial alrededor del pozo B2 ST en la F. Los Cuervos



Al igual que en la distribución de esfuerzos tangenciales, para el caso de los esfuerzos radiales, las gráficas entre las formaciones Carbonera y Los Cuervos son bastantes parecidas. Por lo tanto el análisis tiende a ser muy similar que para el caso inmediatamente anterior.

Figura 62. Esfuerzo efectivo Axial alrededor del pozo B2 ST en la F. Carbonera C6



El esfuerzo axial es el esfuerzo en la dirección paralela al eje axial del pozo y la interpretación de la gráfica es la misma que para los casos anteriores.

Figura 63. Esfuerzo efectivo Axial alrededor del pozo B2 ST en la F. Los cuervos

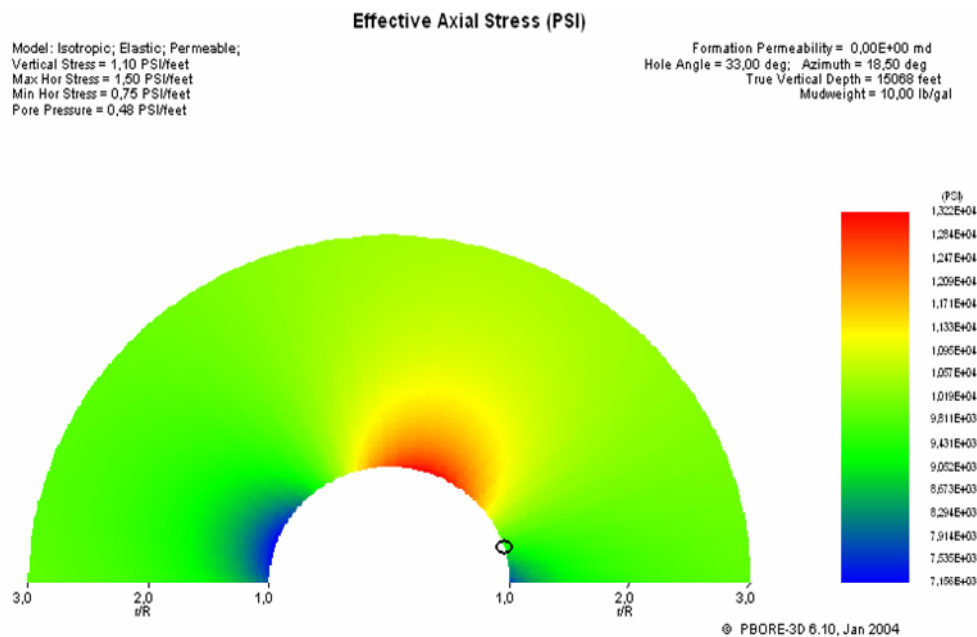
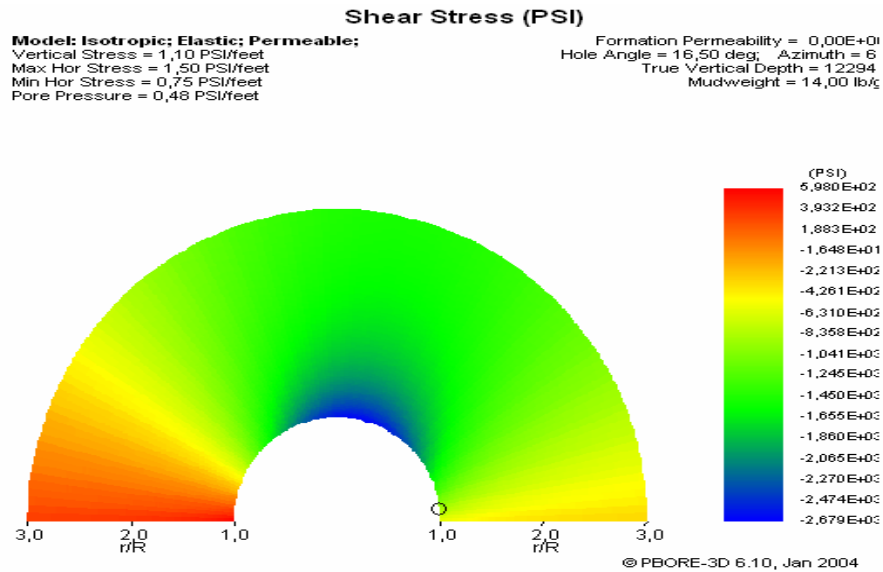
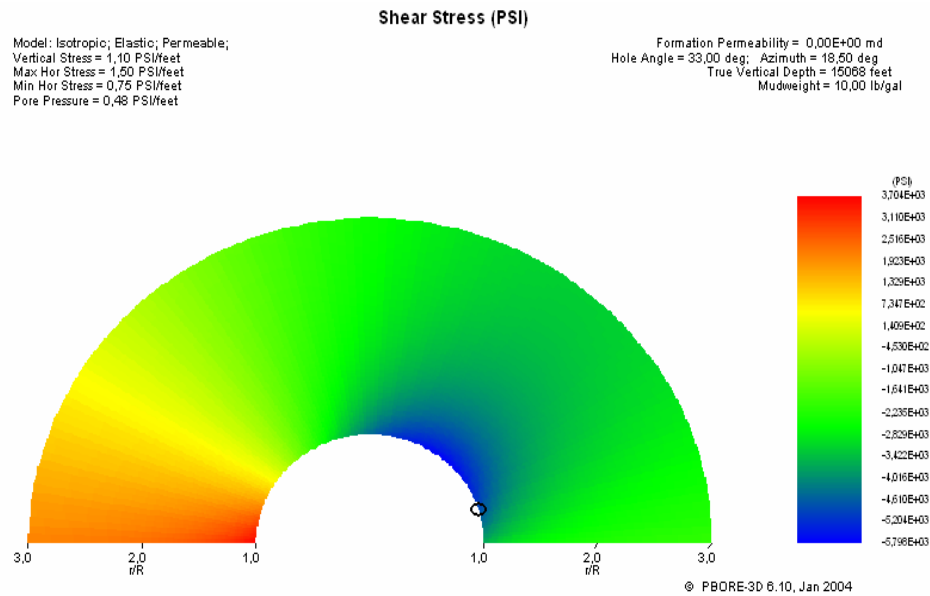


Figura 64. Esfuerzo efectivo de Corte alrededor del pozo B2 ST para Carbonera C6



La distribución los esfuerzos de corte es de suma importancia, pues su ubicación y su relación con el valor de la resistencia máxima de la roca puede indicar los lugares propensos a fallas por colapso.

Figura 65. Esfuerzo efectivo de Corte alrededor del pozo B2 ST para Los Cuervos



Teniendo la distribución de esfuerzos alrededor del pozo presentada por el software PBORE se procede a validar las gráficas con el programa en Excel, herramienta Macros, desarrollado en este trabajo de tesis. Para esto se realizan las gráficas de PBORE de la distribución de los esfuerzos en 2D y se comparan con las gráficas del programa.

Figura 66. Distribución de esfuerzos tangenciales en 2D alrededor del Pozo B2 ST a un ángulo de 90°. Software PBORE

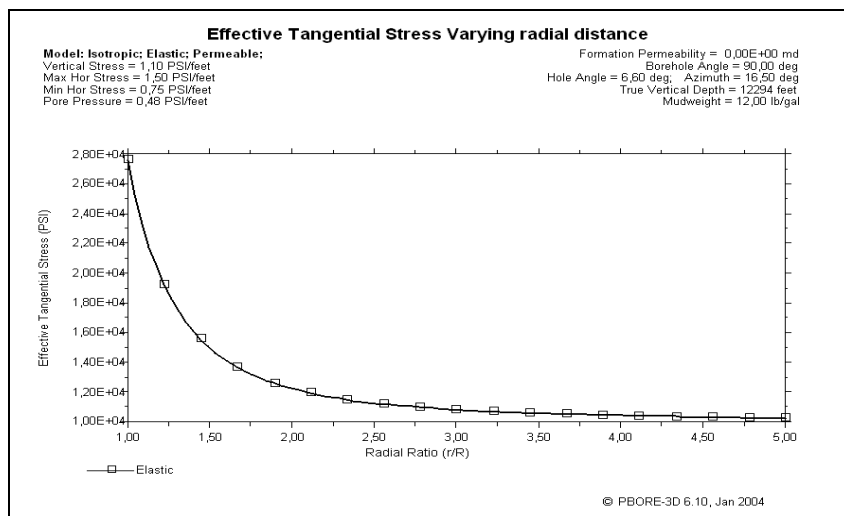


Figura 67. Distribución de esfuerzos radiales en 2D alrededor del Pozo B2 ST a un ángulo de 90°. Software PBORE

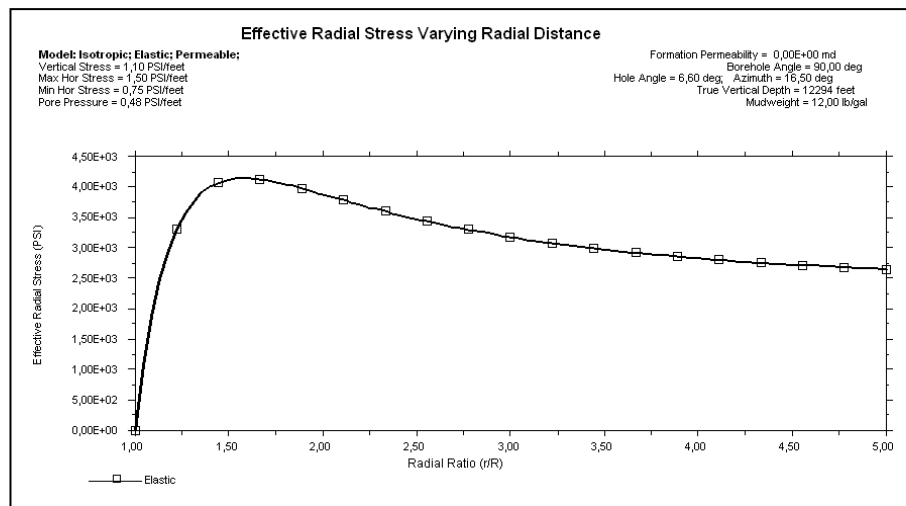


Figura 68. Distribución de esfuerzos axiales en 2D alrededor del Pozo B2 ST a un ángulo de 90°. Software PBORE

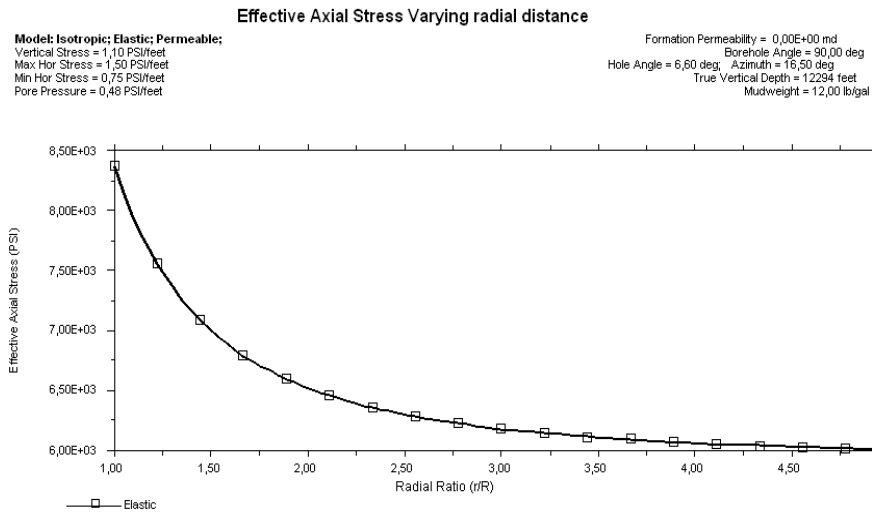
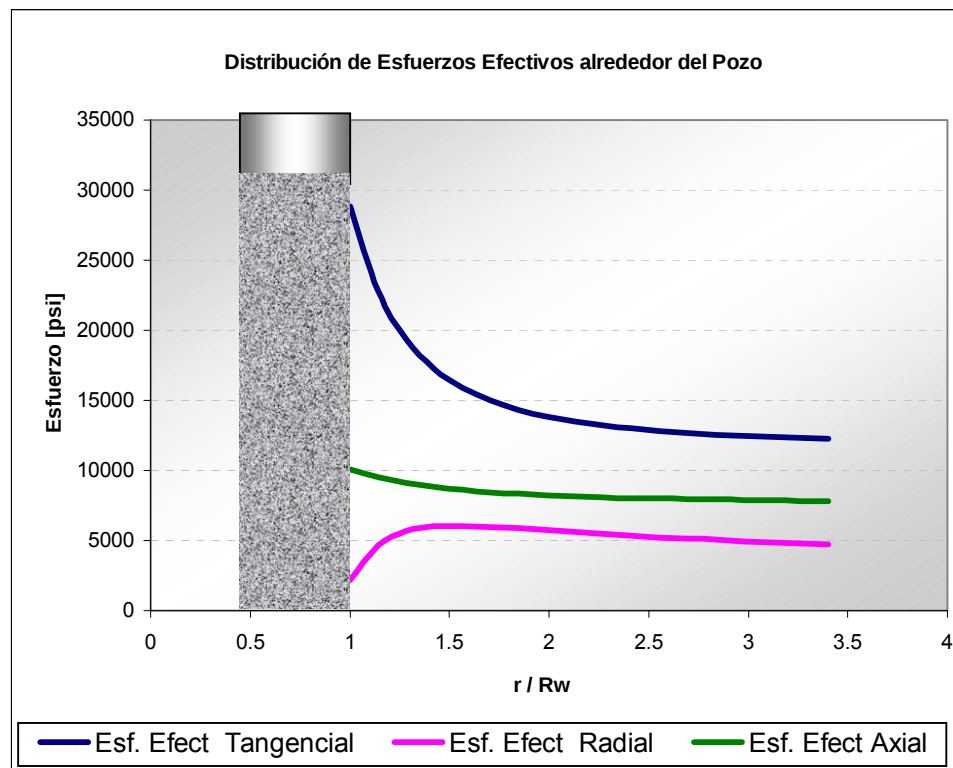


Figura 69. Distribución de esfuerzos alrededor en 2D del Pozo B2 ST a un ángulo determinado. Programa en Excel



Comparando las Figuras 66 al 69, realizadas para la Formación Carbonera sección C6, se observa que presentan la misma tendencia y los valores puntuales son aproximadamente iguales. Uniendo todas las Graficas 2D para cada ángulo se obtiene cada se obtiene una de las gráficas presentadas en las Figuras 58 a 65. Este trabajo no se presenta aquí pero con las Figuras 66 al 69 queda validado los resultados del software PBORE para su parte de distribución de esfuerzos alrededor del pozo B2 ST.

Teniendo la distribución de esfuerzos alrededor del pozo, se puede comenzar a aplicar el Criterio de Falla por colapso y el Criterio de Falla por tensión. En las Figura 70 al 73 se muestra el peso de lodo crítico variando algunos parámetros utilizando el software PBORE.

Figura 70. Peso de Lodo crítico variando el Azimut del pozo B2 ST para la F. Carbonera C6

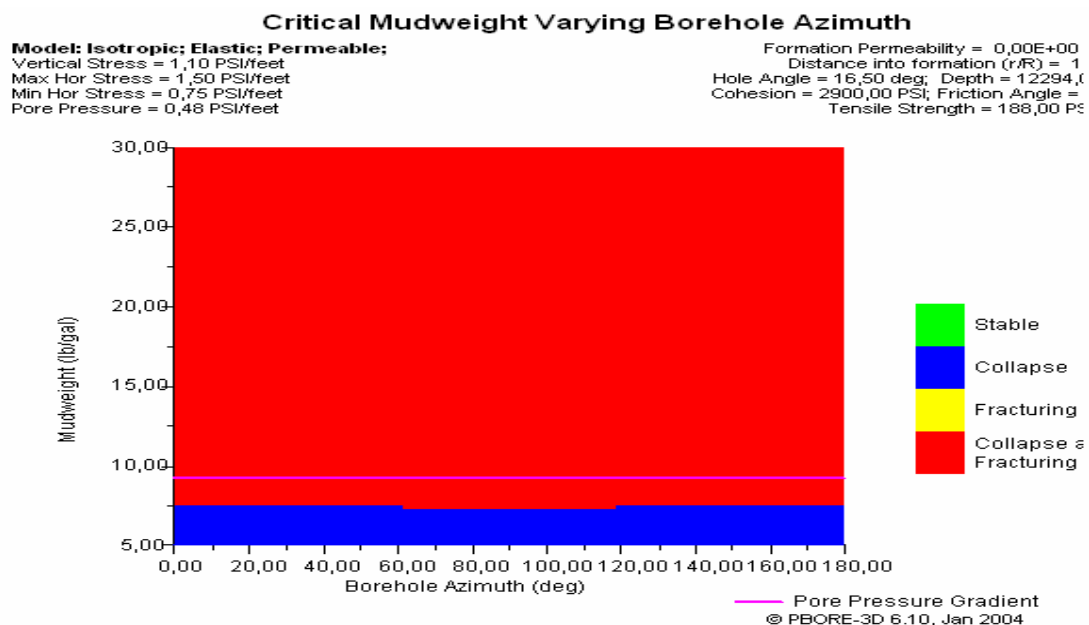


Figura 71. Peso de Lodo crítico variando el Azimut del pozo B2 ST para la F. Los Cuervos

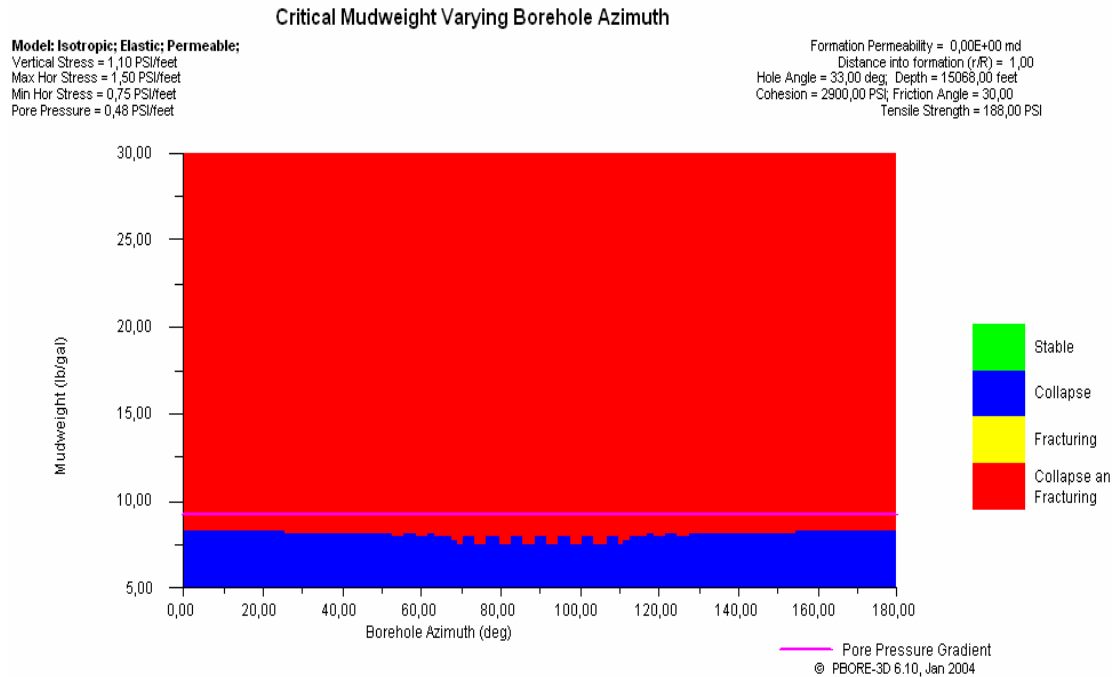


Figura 72. Peso de Lodo crítico variando el ángulo del pozo B2 ST para la F. Carbonera C6

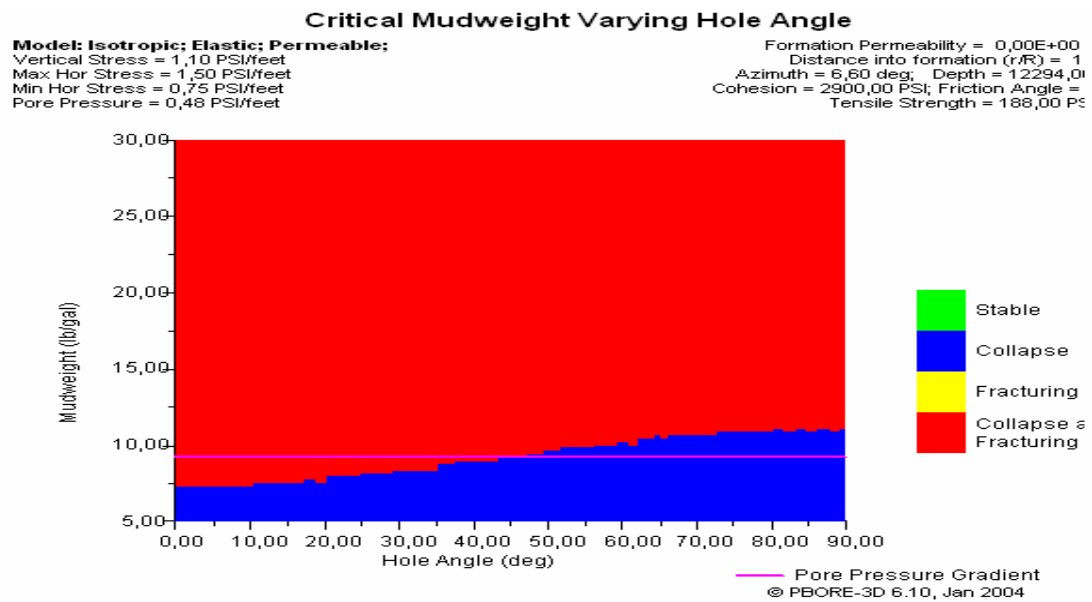
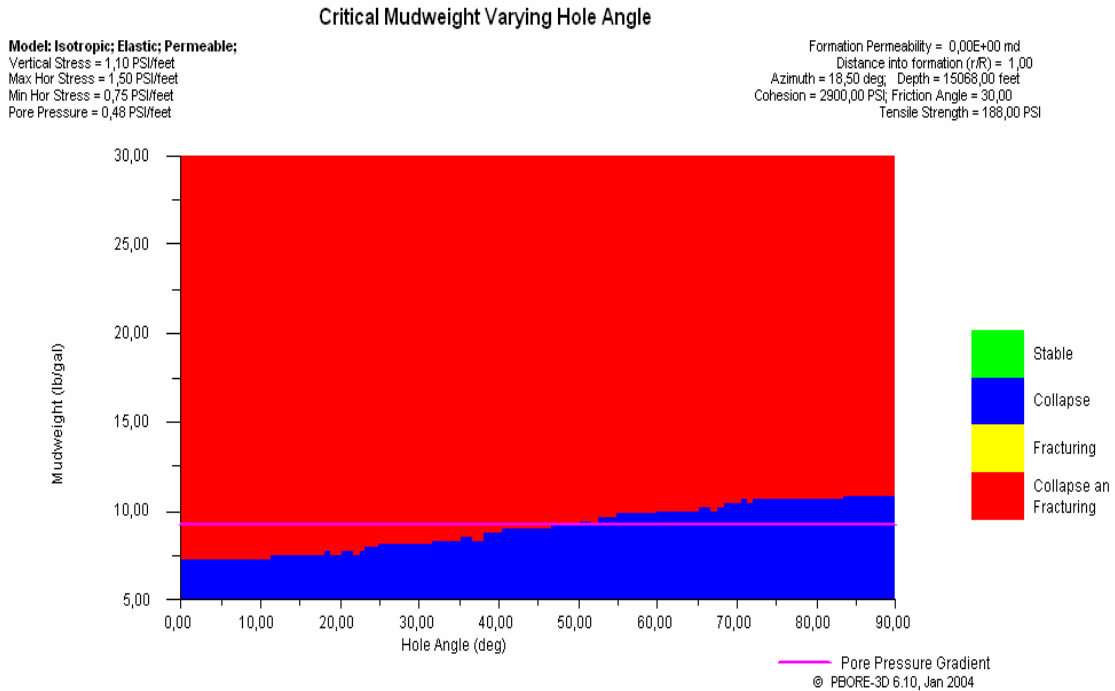


Figura 73. Peso de Lodo crítico variando el ángulo del pozo B2 ST para la F. Los Cuervos



De las figuras anteriores se puede concluir que para las condiciones de inclinación y azimut del pozo, en ambas formaciones, no existe un peso de lodo que pueda mantener estable el pozo. Peor aun, las condiciones son tan críticas que existe a la vez falla por compresión y falla por tensión, para todo azimut del pozo y para la mayor parte de las inclinaciones. Esto evidencia las condiciones extremas a las cuales se trabaja en el Piedemonte Llanero; el régimen de esfuerzos in situ es muy alto además de ser un régimen rumbo deslizante y al perforar pozos en formaciones de lutitas, que de por sí son difíciles de manejar, hace de los pozos del Piedemonte uno de los retos más grandes en el mundo para los Ingenieros de Perforación y como consecuencia de todo esto los altos costos, en promedio 25 millones de dólares por pozo.

Ahora se presentan los resultados que se obtuvieron con la Macro realizada en Excel, figuras 74 y 75. Para la Formación Carbonera C6, se obtiene que para todos los ángulos en la cara del pozo se presenta falla por colapso y para los ángulos de 0° a 15° y de 135° a 180°. Esto corrobora las gráficas presentadas por el software PBORE, donde ocurre la falla por colapso y la fractura hidráulica al mismo tiempo.

Figura 74. Criterios de Falla y tensión para el pozo B2 ST a la profundidad de la Formación Carbonera C6.

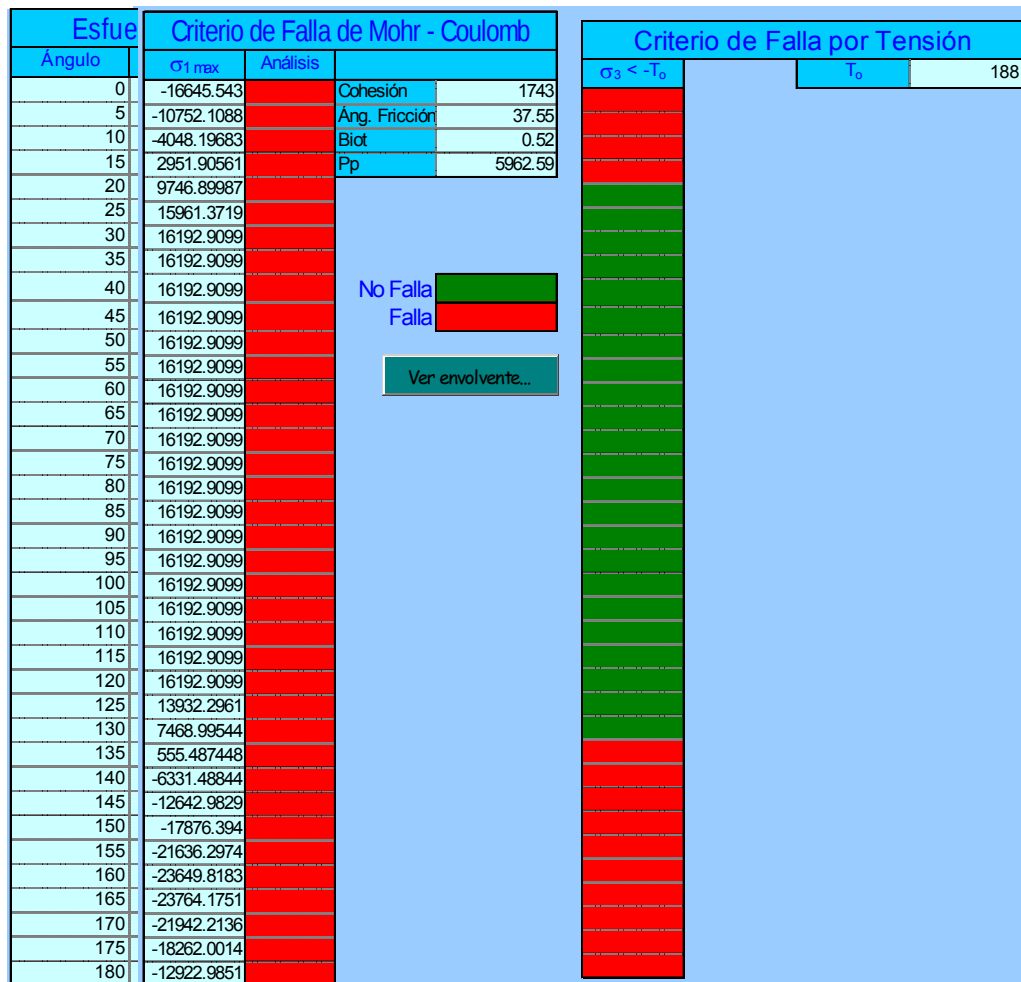


Figura 75. Criterios de Falla y tensión para el pozo B2 ST a la profundidad de la Formación Los Cuervos.

Esfue Criterio de Falla de Mohr - Coulomb				Criterio de Falla por Tensión		
Angulo	$\sigma_1 \text{ max}$	Análisis		$\sigma_3 < -T_0$	T_0	188
0	-13723.8099		Cohesión	1743		
5	-9029.78717		Ang. Fricción	37.55		
10	-3562.32772		Biot	0.52		
15	2326.98183		Pp	6720.328		
20	8319.42344					
25	11639.5135					
30	11639.5135					
35	11639.5135					
40	11639.5135		No Falla			
45	11639.5135		Falla			
50	11639.5135					
55	11639.5135		Ver envolvente...			
60	11639.5135					
65	11639.5135					
70	11639.5135					
75	11639.5135					
80	11639.5135					
85	11639.5135					
90	11639.5135					
95	11639.5135					
100	11639.5135					
105	11639.5135					
110	11639.5135					
115	11639.5135					
120	11639.5135					
125	11639.5135					
130	11639.5135					
135	9455.27917					
140	4410.53619					
145	-15.8758737					
150	-3380.31831					
155	-5293.01626					
160	-5459.0161					
165	-3693.80055					
170	74.4646319					
175	5805.11484					
180	11639.5135					

El mismo comportamiento de la Formación Carbonera C6 se presenta en la Formación Los Cuervos para el pozo B2 ST. De nuevo se confirman los resultados obtenidos con el software PBORE en las Figuras 70 al 73.

El último paso que se realizó en la metodología para la estabilidad mecánica del pozo fue el peso del lodo. El software PBORE presenta unas cartas polares mostrando el peso del lodo crítico variando la inclinación y el azimut, las gráficas se presentan a continuación:

Figura 76. Peso de Lodo crítico para Fractura del pozo B2 ST en la F. Carbonera C6

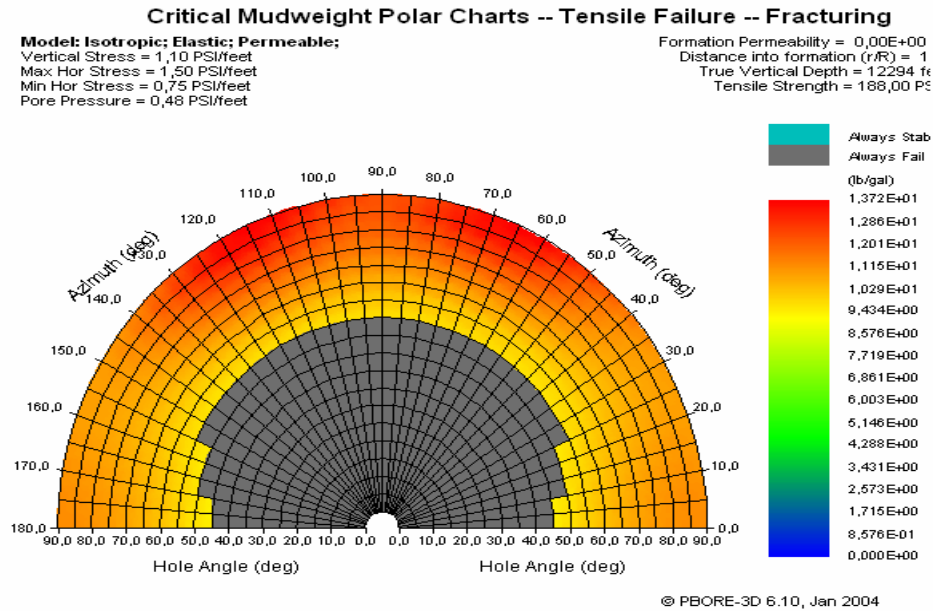


Figura 77. Peso de Lodo crítico para Colapso del pozo B2 ST en la F. Carbonera C6

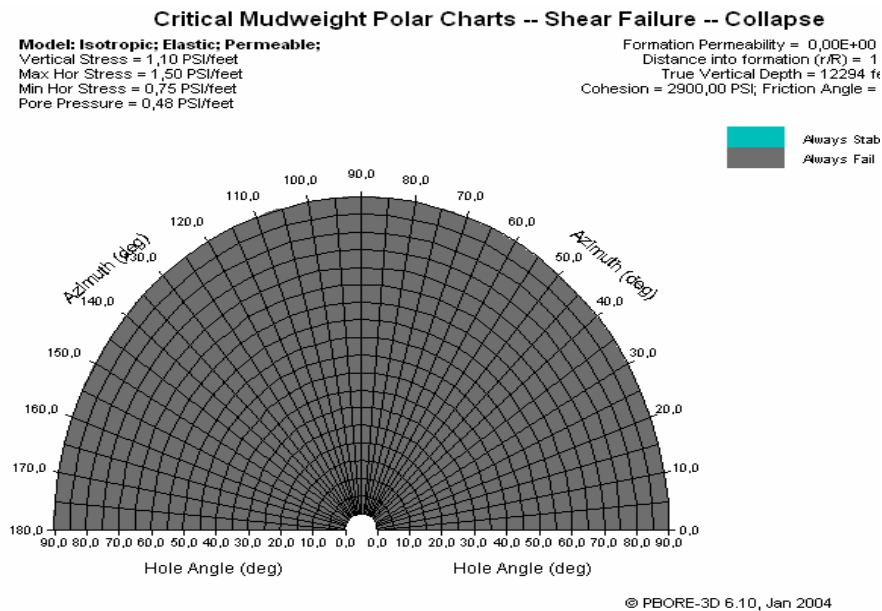


Figura 78. Peso de Lodo crítico para Fractura del pozo B2 ST en la F. Los Cuervos

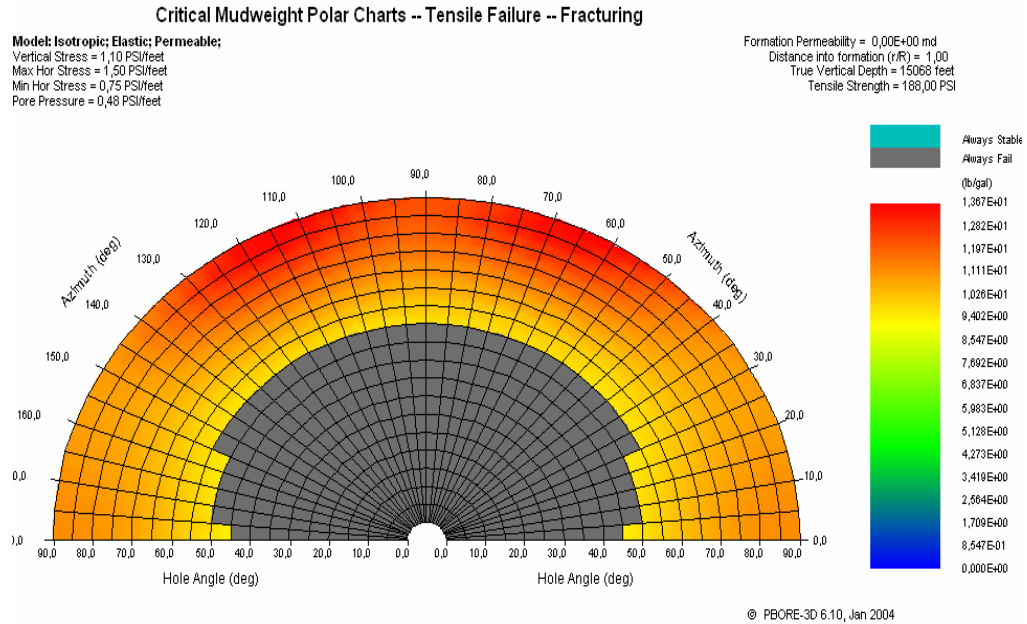
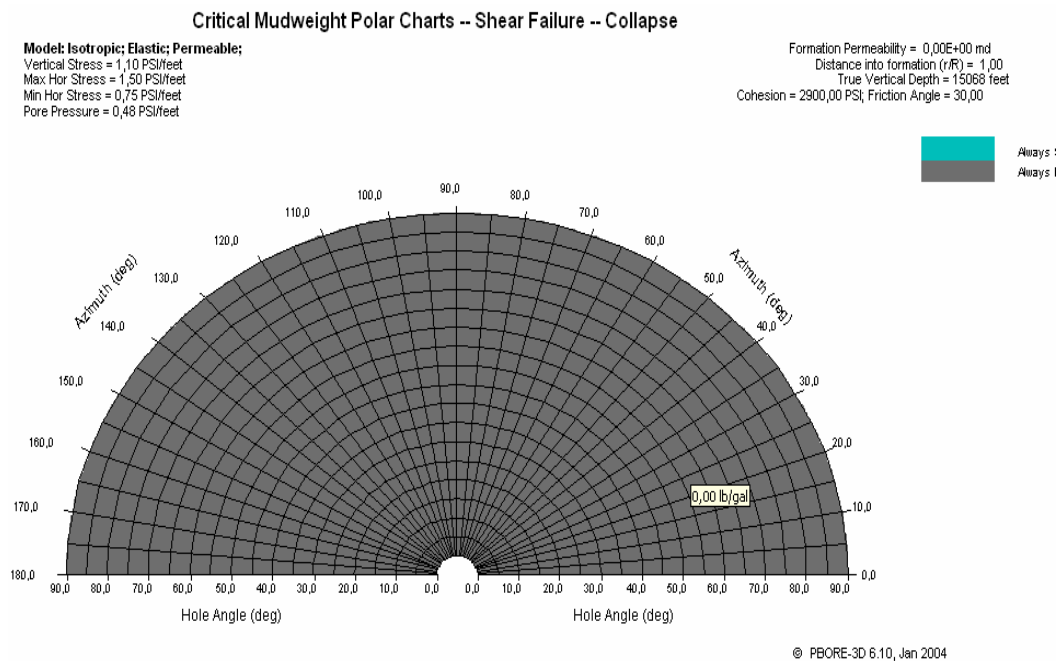
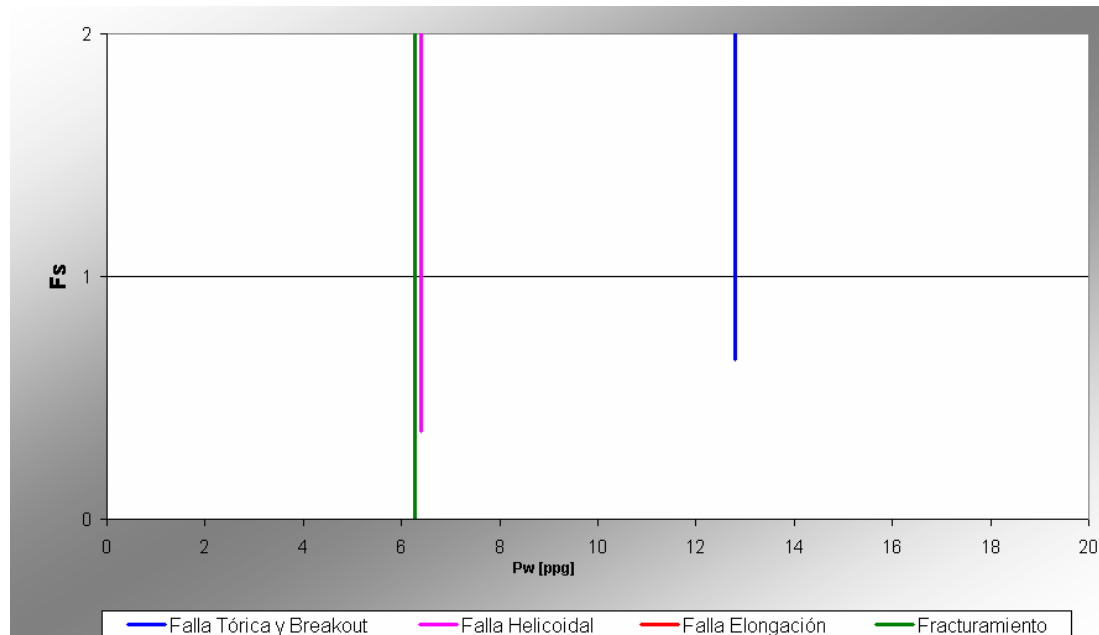


Figura 79. Peso de Lodo crítico para Colapso del pozo B2 ST en la F. Los Cuervos



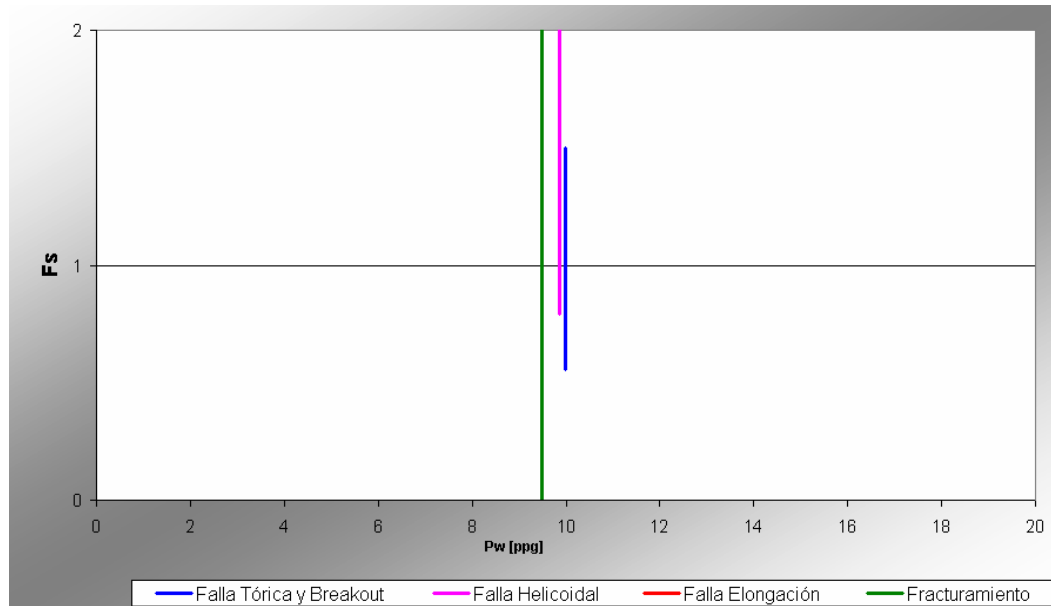
En las Figuras 76 al 79 se observan los pesos de lodo críticos para evitar las fallas por colapso y por fractura. Para las dos profundidades (formaciones Carbonera C6 y Los Cuervos) es evidente que siempre va a ocurrir falla por colapso sin importar la trayectoria que tenga el pozo. Esto, debido a que las propiedades mecánicas de la roca son especiales y su resistencia es demasiado baja. Para estos casos se debe bajar el revestimiento rápidamente. El resultado obtenido con la hoja electrónica de la ventana de lodo fue el siguiente:

Figura 80. Ventana de Lodo del pozo B2 ST en la Formación Carbonera C6



Siguiendo el algoritmo de la Figura 51, el límite inferior (LI), es decir la línea de falla torica y breakout se cruza con el límite superior y con la línea de fracturamiento hidráulico, por lo tanto se debe escoger un peso de lodo de 10 ppg aproximadamente para mantener un control normal de cavings y procurar no propagar las fracturas.

Figura 81. Ventana de Lodo del pozo B2 ST en la F. Los Cuervos



Para la Formación Los Cuervos se puede utilizar un peso de lodo de aproximadamente 10 ppg siguiendo el mismo procedimiento anterior.

4.3.6. Análisis de estabilidad con el software PBORE para La Formación Carbonera C7 y Los Cuervos del pozo Buca 2.

Los datos empleados para el análisis anterior, fueron también utilizados como datos de entrada para el software PBORE. Los resultados obtenidos son graficados en las Figuras 82 al 105, para el pozo Buca 2, en las Formaciones Carbonera C7 y Los Cuervos.

En las Figuras 82 al 89, se observa la distribución de esfuerzos alrededor del pozo en coordenadas cilíndricas utilizando el software PBORE.

Figura 82. Esfuerzo efectivo Tangencial alrededor del pozo Q6 para la F. Carbonera C7

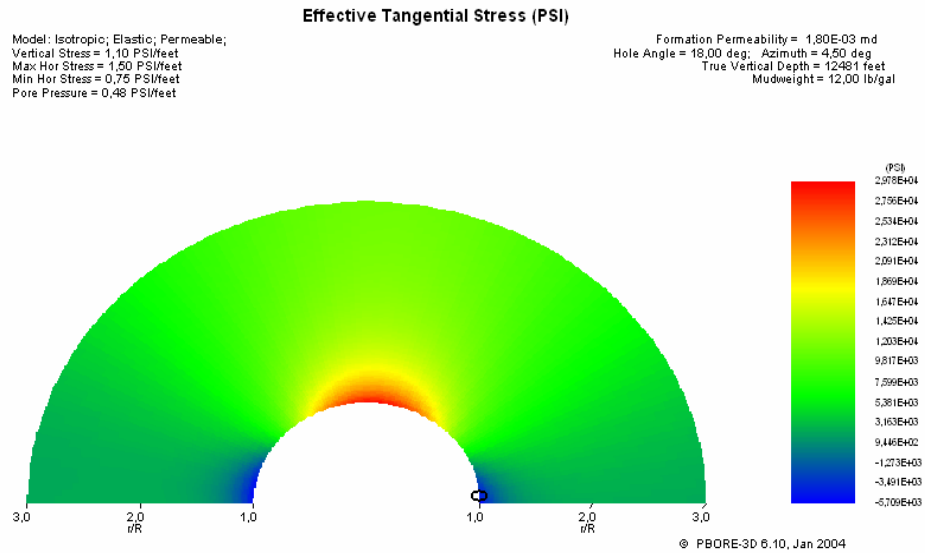


Figura 83. Esfuerzo efectivo Tangencial alrededor del pozo Q6 para la F. Los Cuervos

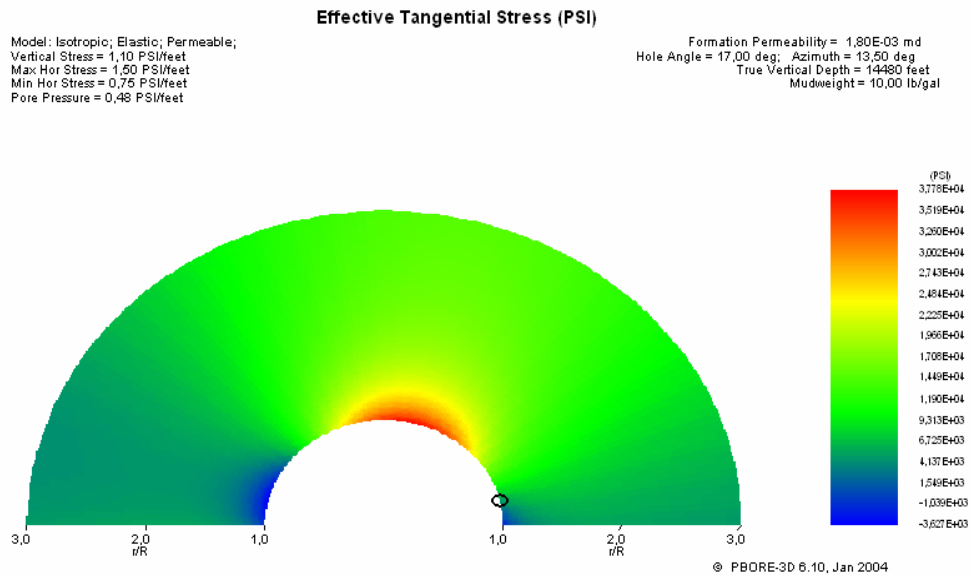


Figura 84. Esfuerzo efectivo Radial alrededor del pozo Q6 para la F. Carbonera C7.

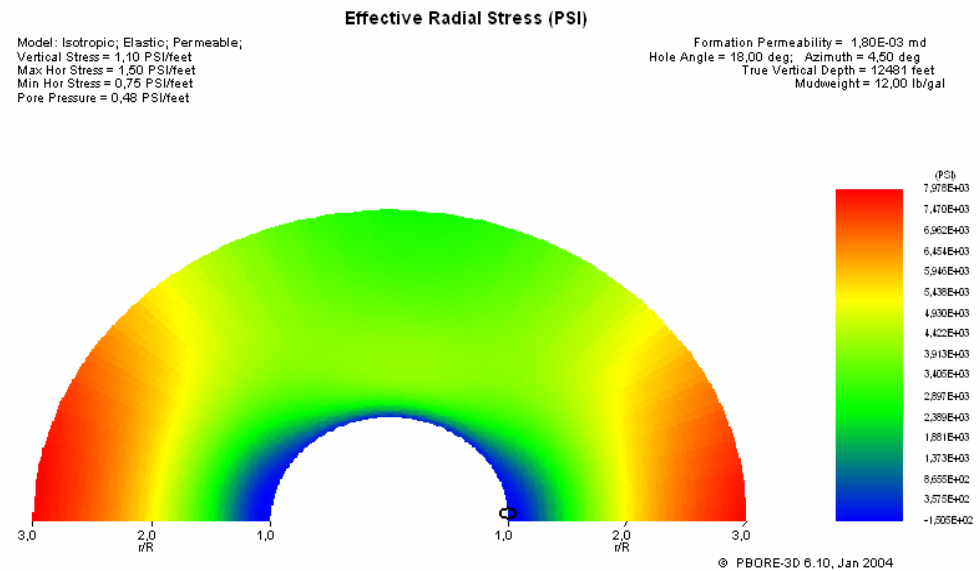


Figura 85. Esfuerzo efectivo Radial alrededor del pozo Q6 para la F. Los Cuervos

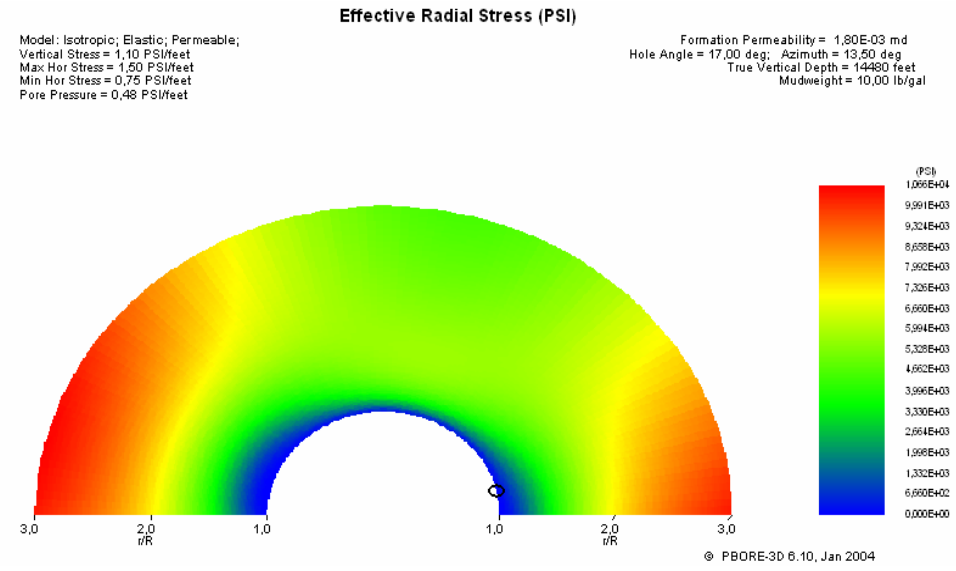


Figura 86. Esfuerzo efectivo Axial alrededor del pozo Q6 para la F. Carbonera C7

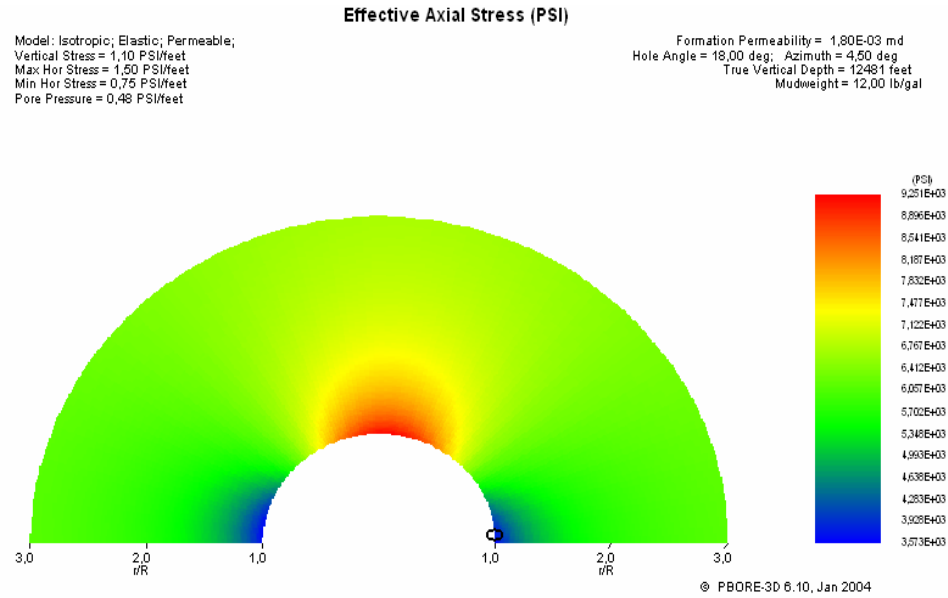


Figura 87. Esfuerzo efectivo Axial alrededor del pozo Q6 para la F. Los Cuervos

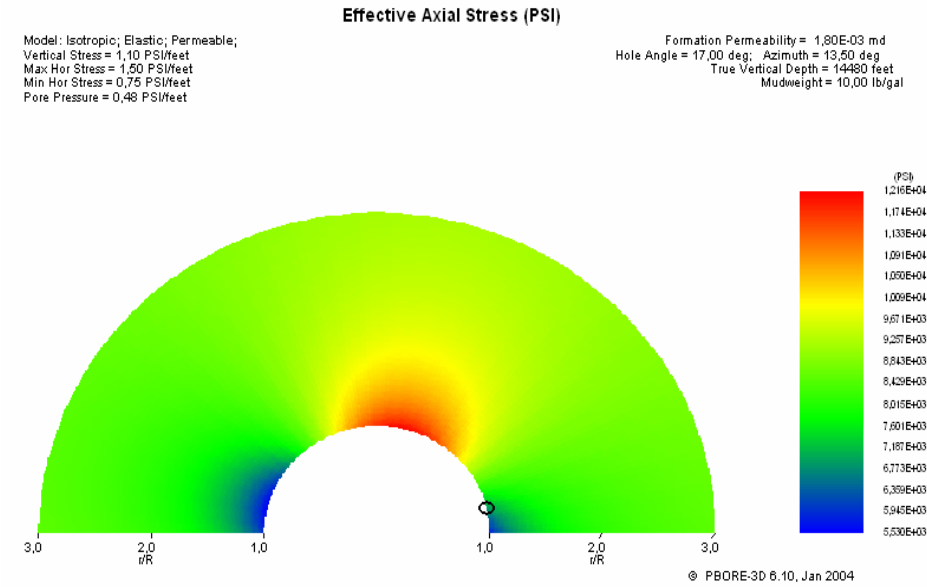


Figura 88. Esfuerzo efectivo de Corte alrededor del pozo Q6 para la F. Carbonera C7

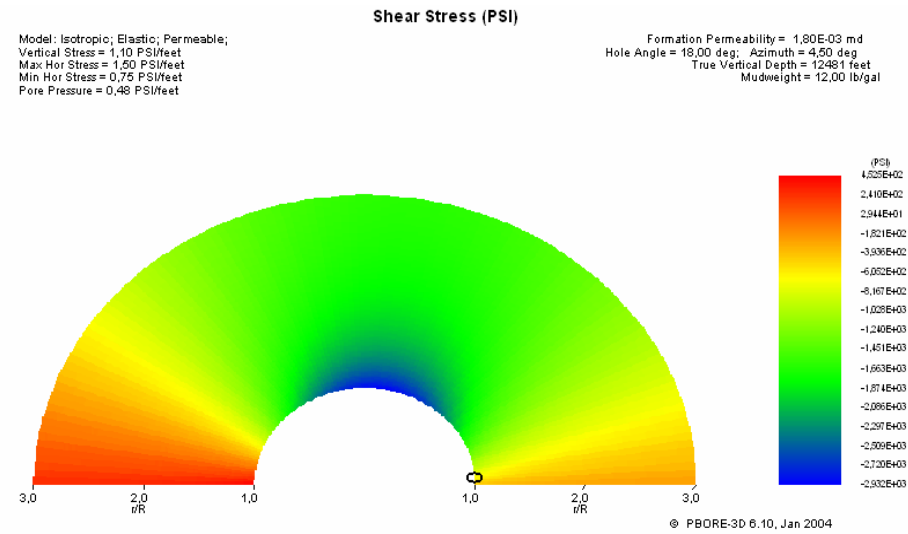


Figura 89. Esfuerzo efectivo de Corte alrededor del pozo Q6 para la F. Los Cuervos



La distribución de los esfuerzos en coordenadas cilíndricas para el pozo Q6 (Figuras 82 al 89) muestra las mismas características que las mostradas en el pozo B2 ST para las dos formaciones de estudio, en este caso Carbonera C7 y Los Cuervos. Esto se debe principalmente a que el régimen de esfuerzos in situ se asumió igual para los dos pozos, por la falta de datos reales para la medida de estos esfuerzos. Por tanto, la trayectoria ideal para este pozo viene a ser muy similar a la del pozo B2 ST. La validación de los resultados arrojados por el software PBORE se presentan a continuación de la misma manera que se hizo para el pozo anterior. Esta validación se realizó para la Formación Carbonera para varios ángulos en la cara del pozo. Aquí se presenta para un ángulo de 90°.

Figura 90. Distribución de esfuerzos tangenciales en 2D alrededor del Pozo Q6 a un ángulo de 90°. Software PBORE

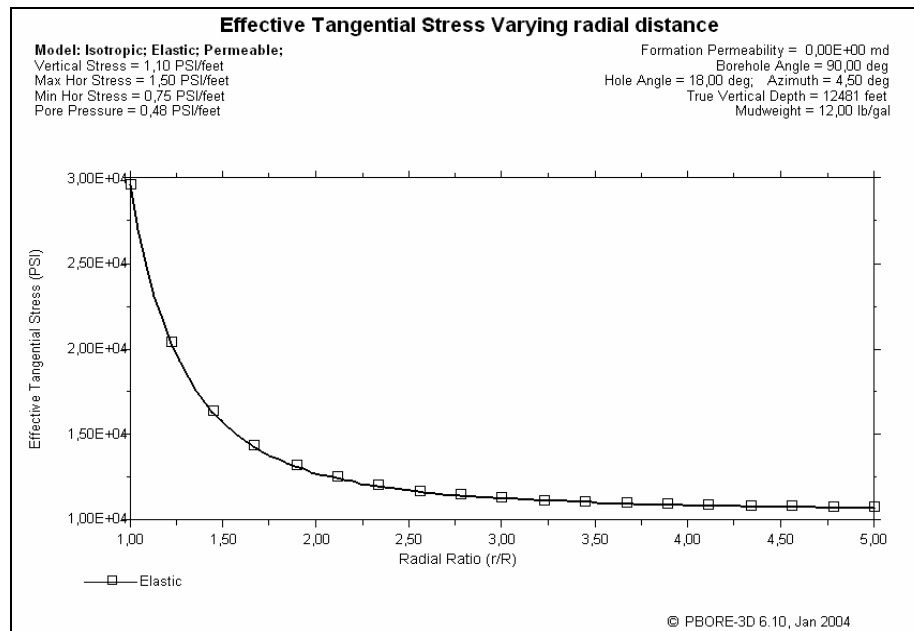


Figura 91. Distribución de esfuerzos radiales en 2D alrededor del Pozo Q6 a un ángulo de 90°. Software PBORE

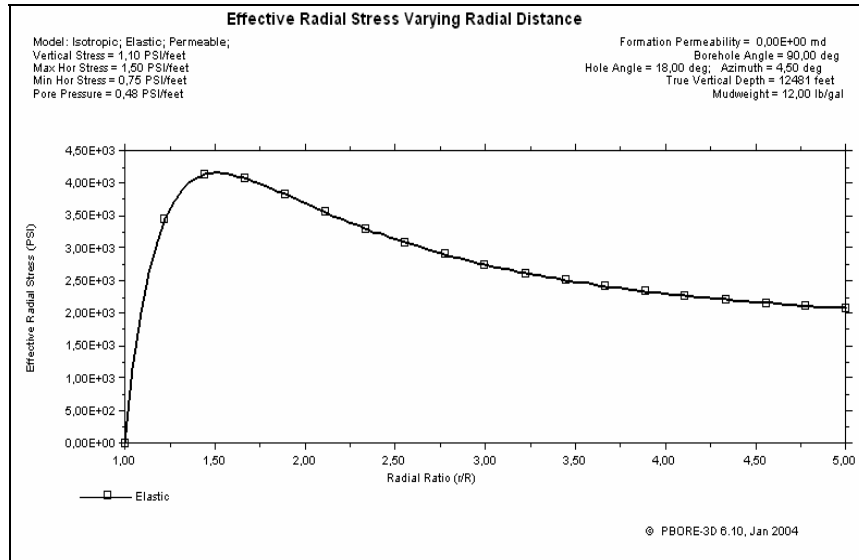


Figura 92. Distribución de esfuerzos axiales en 2D alrededor del Pozo Q6 a un ángulo de 90°. Software PBORE

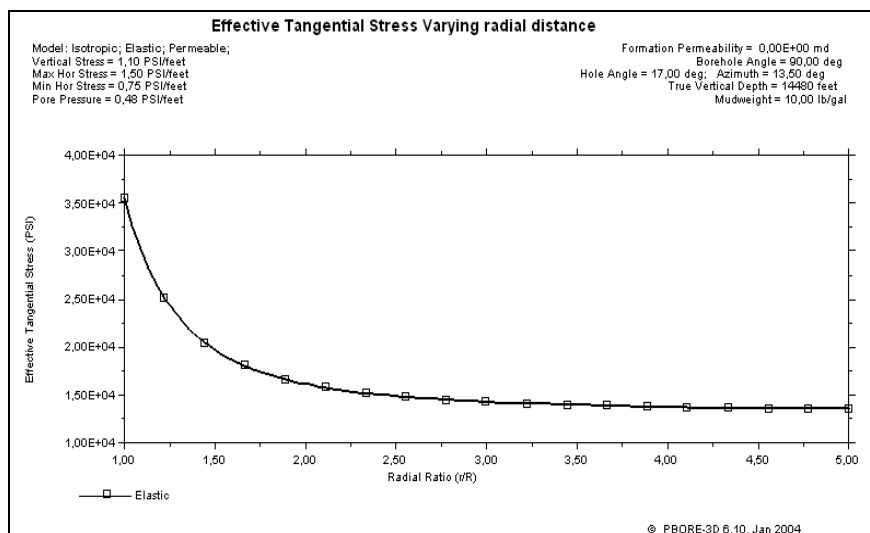
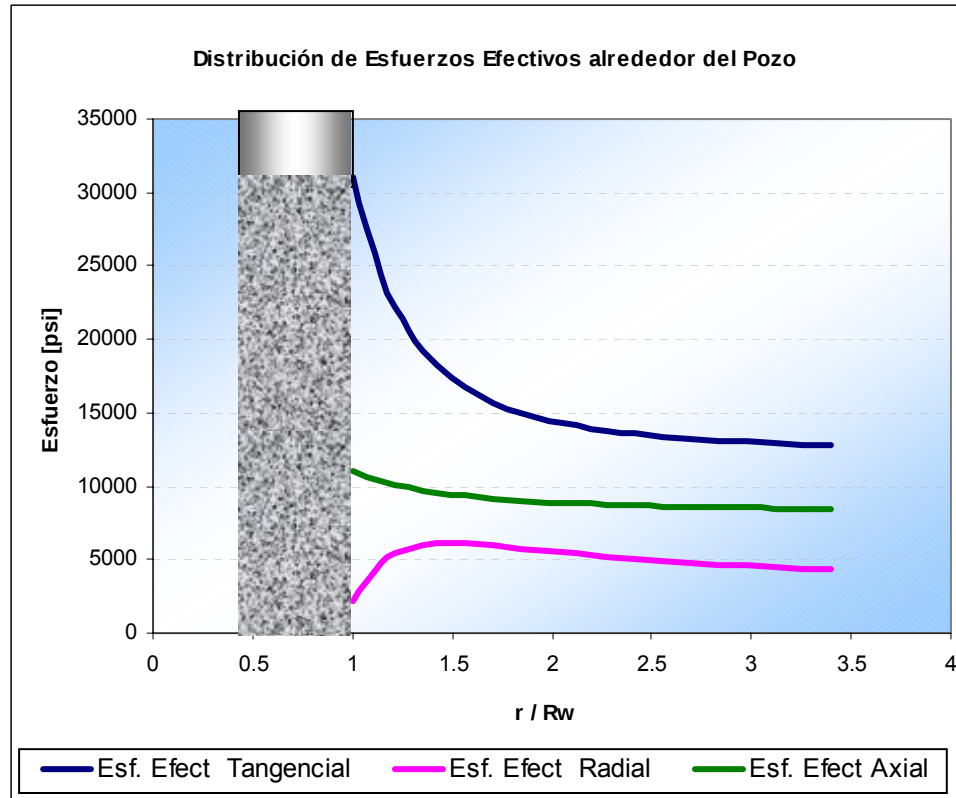


Figura 93. Distribución de esfuerzos alrededor en 2D del Pozo Q6 a un ángulo determinado. Programa en Excel



La validación nuevamente es realizada, las tendencias del programa realizado en Excel, herramienta Macros, se ajustan a las presentadas en las Figuras 90, 91 y 92. Ahora siguiendo el proceso se hallan los pesos de lodo críticos. Estos pesos de lodo crítico, presentados por PBORE, para evitar la falla variando algunos parámetros, son presentados en las Figuras 94 al 97.

Figura 94. Peso de Lodo crítico variando el Azimut del pozo Q6 para la F. Carbonera C7

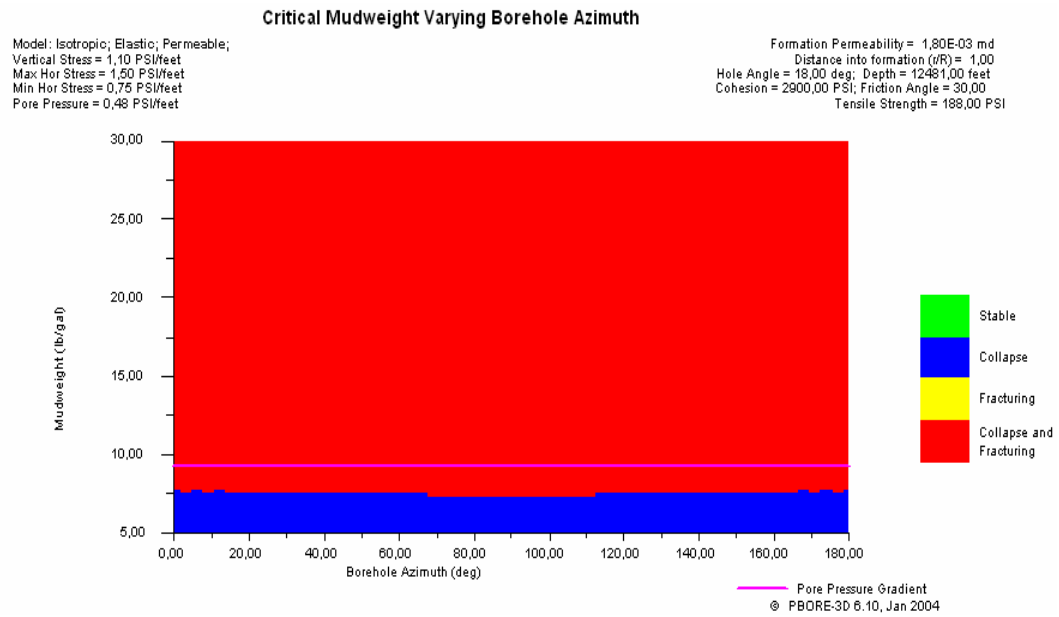


Figura 95. Peso de Lodo crítico variando el Azimut del pozo Q6 para la F. Los Cuervos

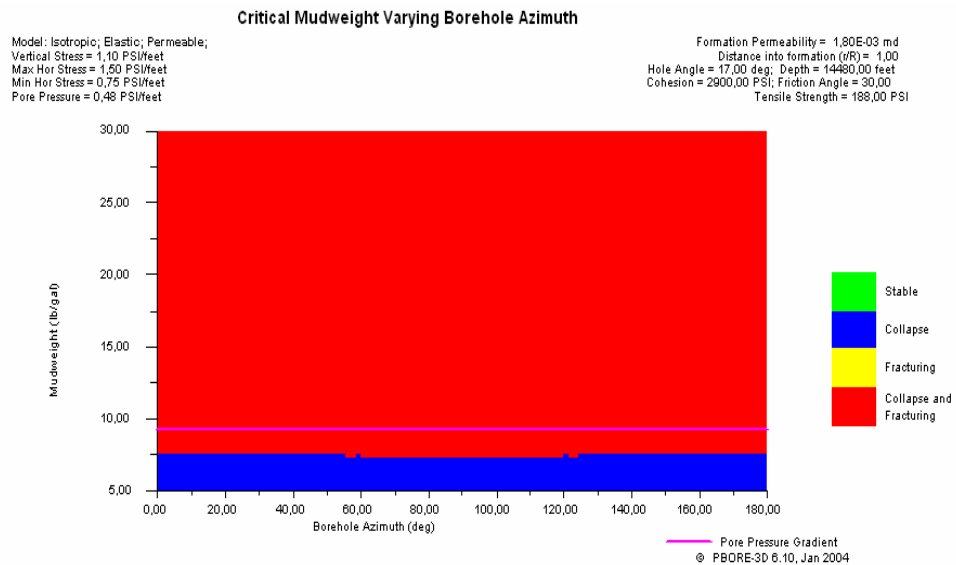


Figura 96. Peso de Lodo crítico variando la inclinación para el pozo Q6 en la F. Carbonera C7

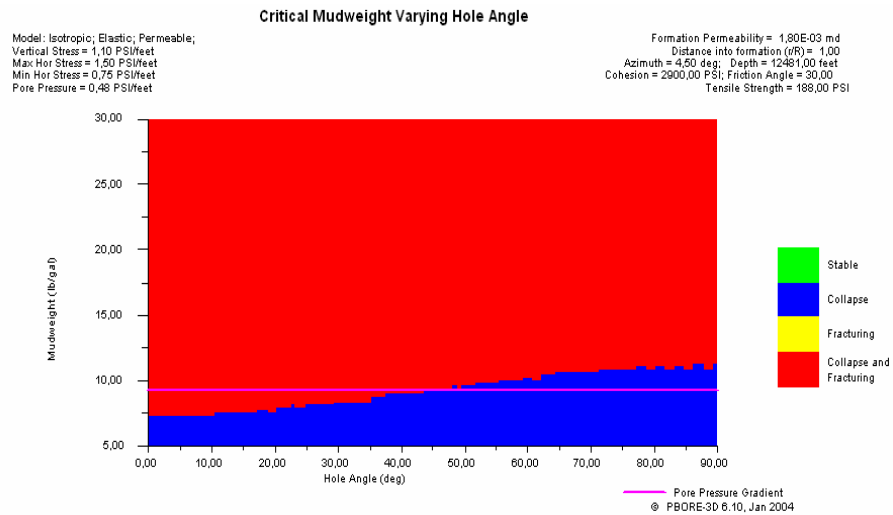


Figura 97. Peso de Lodo crítico variando la inclinación para el pozo Q6 en la F. Los Cuervos

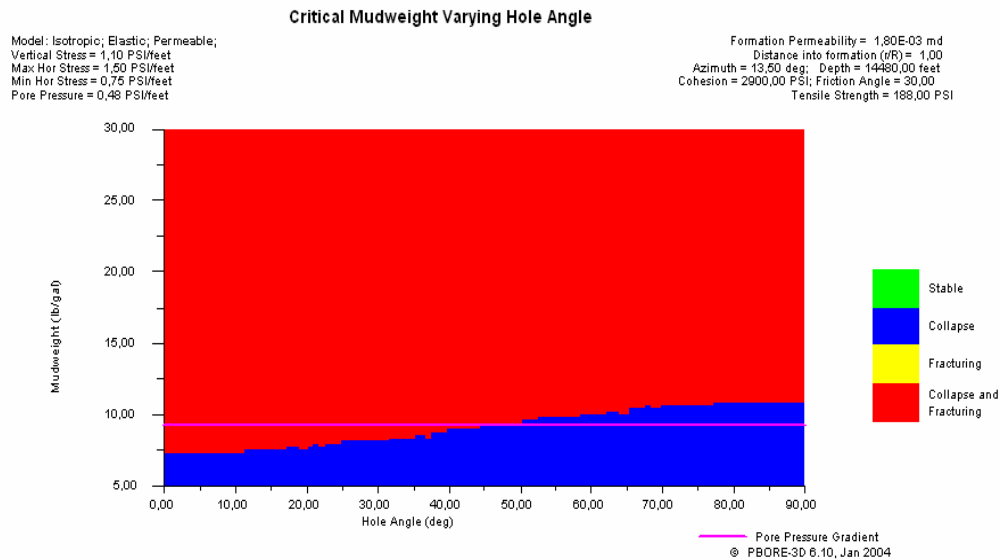
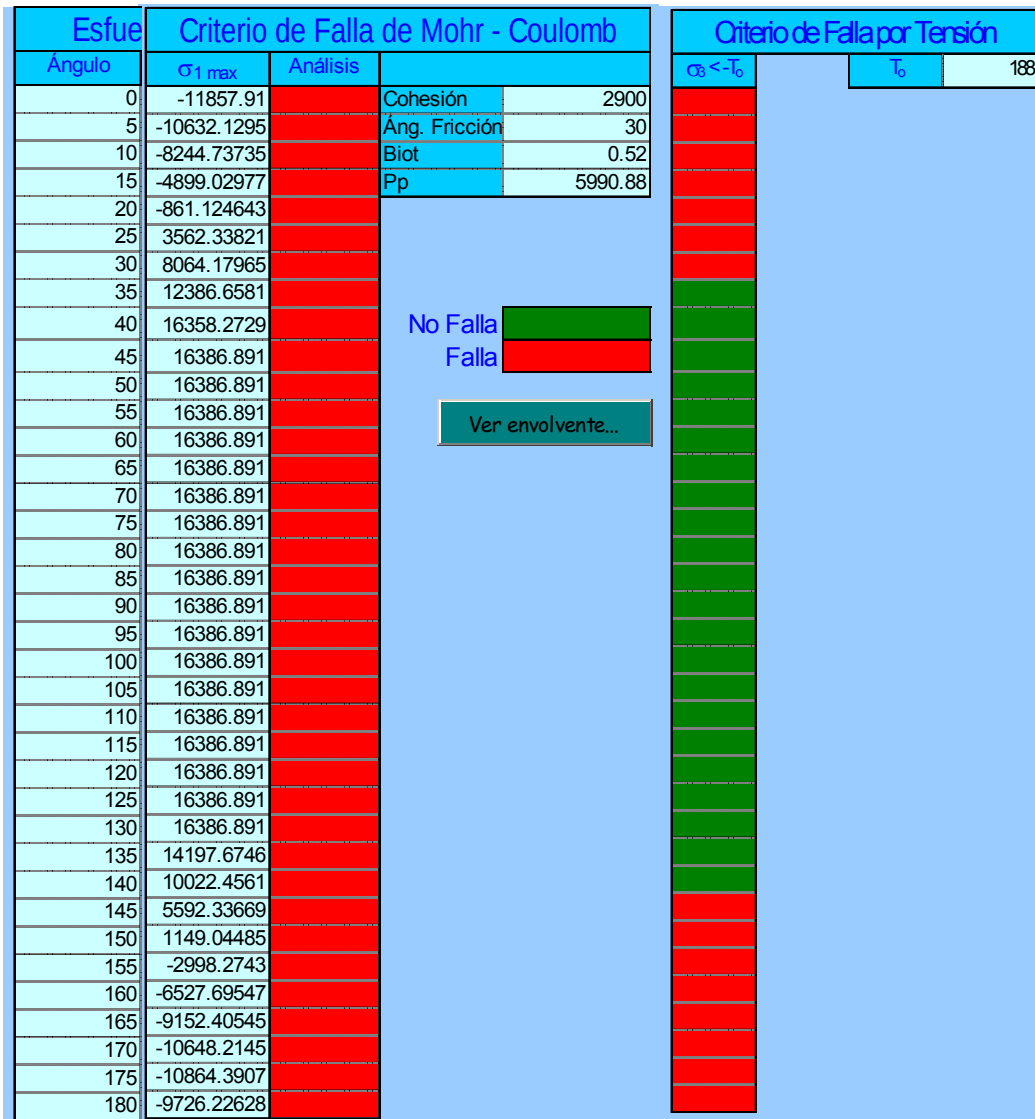


Figura 98. Criterios de Falla para el pozo Q6 en la Formación Carbonera C7



Nuevamente quedan evidenciadas las condiciones críticas de perforación, también mostradas por el Software PBORE. El pozo Q6 presenta los mismos problemas que el pozo B2 ST, exhibiendo al mismo tiempo falla por colapso y fractura hidráulica. Los mismos resultados para ambas formaciones (Figuras 98 y 99)

Figura 99. Criterios de Falla para el pozo Q6 en la Formación Los Cuervos

Esfue Criterio de Falla de Mohr - Coulomb				Criterio de Falla por Tensión		
Ángulo	$\sigma_1 \text{ max}$	Análisis		$\sigma_3 < -T_o$	T_o	188
0	-8877.01287		Cohesión			
5	-5396.8098		Áng. Fricción			
10	-1108.21779		Biot			
15	3651.63501		Pp			
20	8547.21972					
25	11709.1767					
30	11709.1767					
35	11709.1767					
40	11709.1767		No Falla			
45	11709.1767		Falla			
50	11709.1767					
55	11709.1767					
60	11709.1767		Ver envolvente...			
65	11709.1767					
70	11709.1767					
75	11709.1767					
80	11709.1767					
85	11709.1767					
90	11709.1767					
95	11709.1767					
100	11709.1767					
105	11709.1767					
110	11709.1767					
115	11709.1767					
120	11709.1767					
125	11709.1767					
130	11709.1767					
135	10211.2955					
140	5481.26664					
145	913.659858					
150	-3117.29827					
155	-6250.22924					
160	-8188.08677					
165	-8722.42524					
170	-7740.78646					
175	-5228.84578					
180	-1275.38197					

Figura 100. Peso de Lodo crítico para Fracturar en el pozo Q6 para la F. Carbonera C7

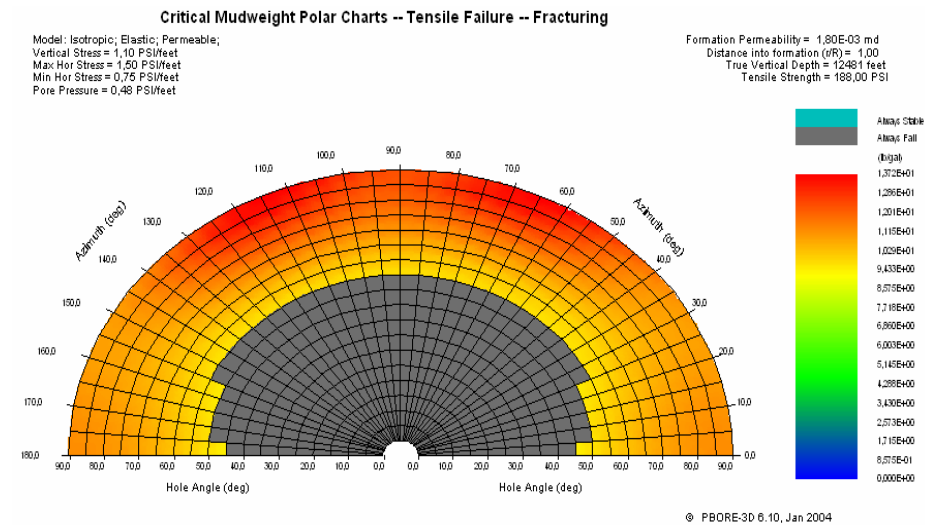


Figura 101. Peso de Lodo crítico para Colapso en el pozo Q6 para la F. Carbonera C7

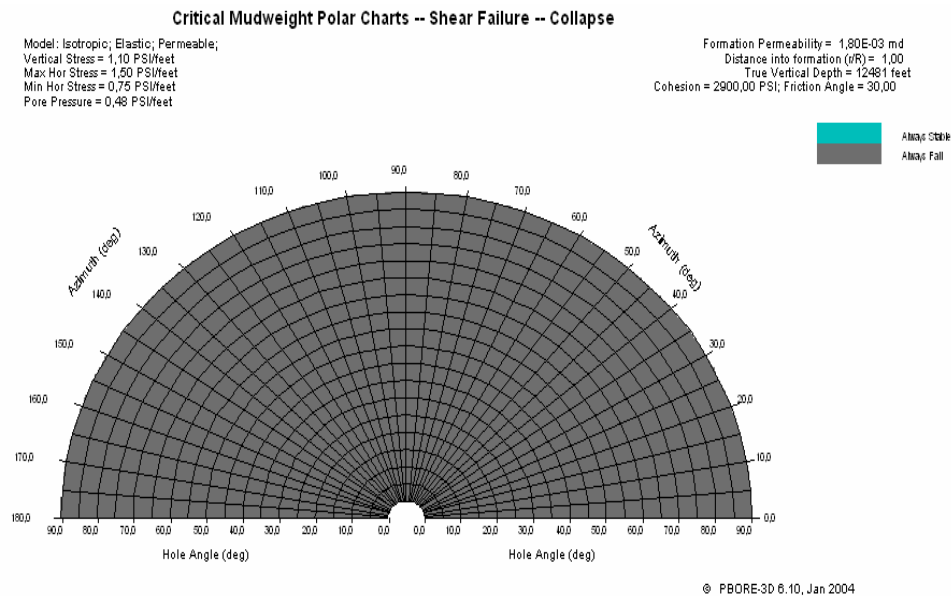
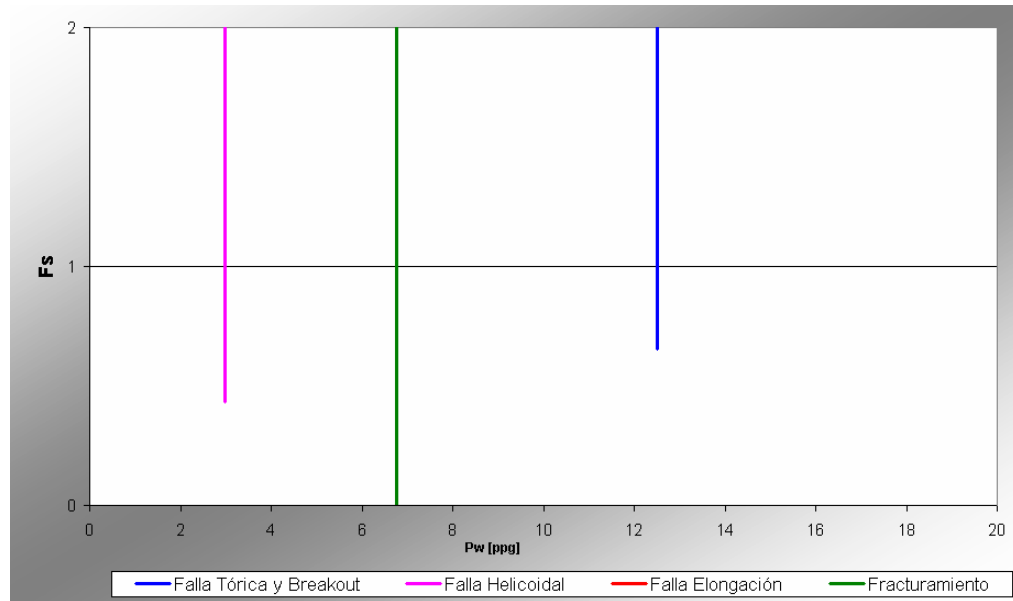


Figura 102. Ventana de Lodo del pozo Q6 en la F. Carbonera C7



Como puede apreciarse en la Figura anterior, para el pozo Q6 en la Formación C7 no existe una ventana de lodo. Los límites de pesos de lodo óptimo para cada falla se cruzan, deducción a la que también llega el PBORE, y se debe seguir la metodología planteada en la Figura 51.

Figura 103. Peso de Lodo crítico para Fracturar en el pozo Q6 para la F. Los Cuervos

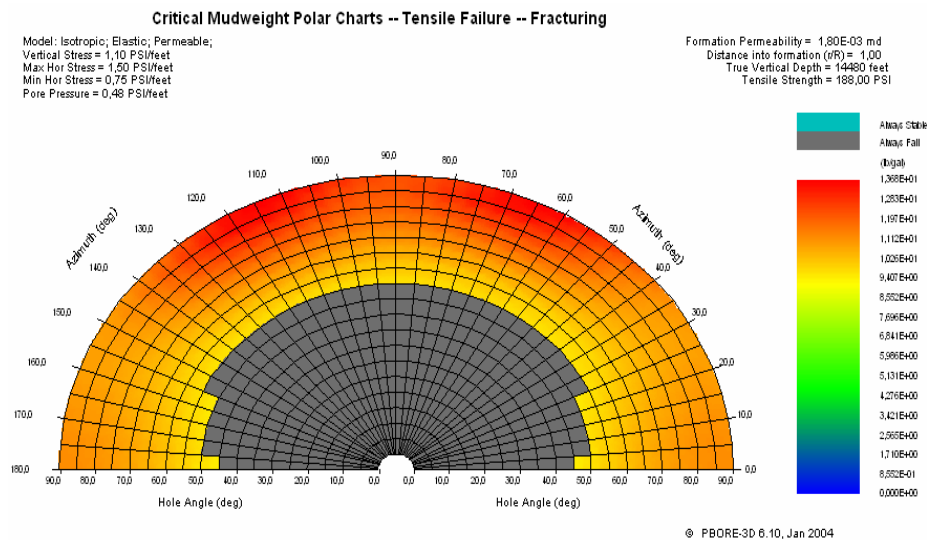


Figura 104. Peso de Lodo crítico para Colapso para Los Cuervos

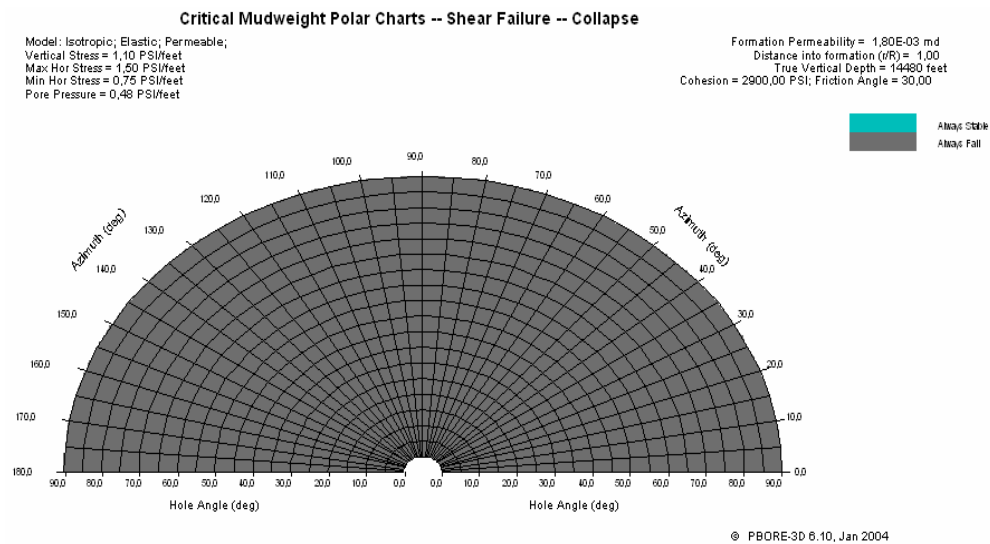
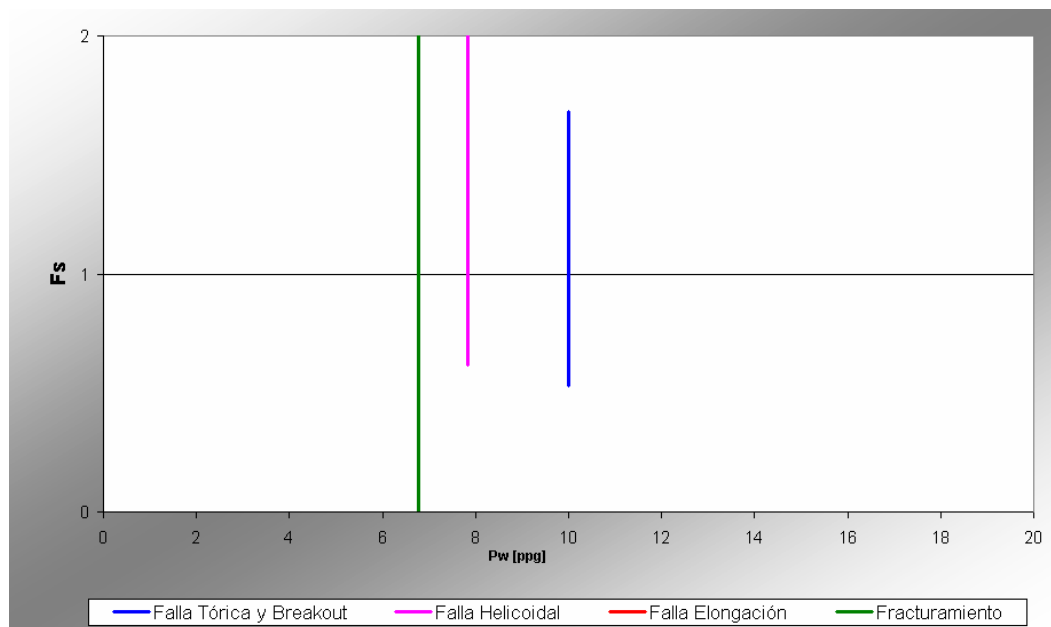


Figura 105. Ventana de Lodo del pozo Q6 en la Fm. Los Cuervos



Nuevamente se presenta el caso sin ventana de lodo. Se validan de nuevo los datos obtenidos en el PBORE y queda expuesta la complejidad de la perforación en el Piedemonte Llanero.

CONCLUSIONES

- En el caso del Piedemonte Llanero Colombiano, es primordial el estudio de la influencia de cada factor que interviene en el análisis de estabilidad de pozo y su importancia sobre el mismo. La exactitud en la predicción de la trayectoria del pozo a partir de la distribución de los esfuerzos alrededor del pozo, la densidad crítica de lodo, y la ventana operacional, dependen en gran medida de los datos disponibles, de las mediciones de éstos y de su exactitud. Información como el régimen de esfuerzos in situ, la presión de poro, los parámetros de resistencia y las propiedades poroelásticas de la roca se encuentran con facilidad en las formaciones productoras; sin embargo, a través de la columna estratigráfica no se dispone de información suficiente; el costo de los pozos hace no rentable la corrida de registros y la calidad del análisis de estabilidad dependerá directamente de la astucia para correlacionar estos datos y de la confiabilidad para utilizarlos.
- El cálculo de los esfuerzos utilizado en este proyecto está basado en un modelo elástico lineal, es decir, la curva esfuerzo-deformación es lineal y la deformación es completamente reversible. Se debe ser consciente de las limitantes de los modelos elásticos y la importancia de esto en relación con el tipo de roca, características de deformación, etc. Todo esto puede conllevar a una estimación conservativa, la cual podría ser excedida sin consecuencias dramáticas.

- Dadas las limitaciones del modelo y la disponibilidad de información, se hace indispensable que el método sea calibrado con los resultados de campo y apoyado en la experiencia del grupo de Ingeniería de Perforación del campo.
- Para el caso del área de estudio, los esfuerzos horizontales no son iguales, es más sus magnitudes son bastante diferentes y al ser el esfuerzo mayor horizontal superior al esfuerzo vertical, la trayectoria y por tanto la estabilidad dependerá de la dirección del azimut del pozo. Se puede inferir con base en el análisis, que la óptima trayectoria para los pozos analizados es en la dirección del máximo esfuerzo horizontal, con una alta inclinación preferiblemente y en lo posible perpendicular a los planos de debilidad para evitar su efecto sobre la falla por cizalladura.
- El efecto de la presión de poro es de suma importancia debido a que este determina los esfuerzos efectivos. Los esfuerzos efectivos determinan de manera más acertada y real las fallas por tensión y las fallas por compresión.
- En la mayoría de las arcillas ubicadas en el Piedemonte Llanero no existe una ventana segura de lodo, debido en primera instancia al régimen de esfuerzos in situ, y segunda, por las características mecánicas de la arcilla. Por tanto no se puede evitar la presencia de uno o más modos de falla. Para estas formaciones, se debe adoptar un peso de lodo capaz de manejar la inestabilidad, de tal manera que se puedan minimizar los daños producidos por colapso de pozo y/o que las pérdidas de circulación no sean tan perjudiciales o de poca viabilidad económica.

RECOMENDACIONES

- El paso más importante para realizar un análisis de estabilidad es la obtención de datos. Si se desea analizar las formaciones sobre la zona productora se debe reunir la información suficiente, ya sea correlacionando registros o realizando un trabajo estadístico. Es necesario realizar un estudio sobre los datos disponibles y a partir de estos, qué modelos se pueden aplicar. Se sugiere para próximas perforaciones en la zona del Piedemonte Llanero correr registros eléctricos, de imágenes, etc., a lo largo de toda la columna estratigráfica; tomar muestras de rocas de las arcillas a diferentes profundidades, sobretodo en las formaciones León, secciones de Carbonera con alto contenido de arcilla y Los Cuervos.
- Al momento de realizar el análisis de Estabilidad de Pozo usar, en primera instancia la Teoría de la Poroelasticidad, para luego aplicar otros criterios de falla menos conservadores, como lo son el Criterio de Drucker-Prager y el Criterio Modificado de Lade y comparar los resultados con el estudio realizado en este trabajo.
- El software PBORE asume isotropía de las propiedades mecánicas de la roca y planos de estratificación perpendiculares al eje axial del pozo. Se recomienda realizar un estudio de la influencia de la anisotropía en la estabilidad de pozo y su viabilidad de incluirla en el estudio como un parámetro de gran incidencia. Además, incluir el estudio de los planos de estratificación y su influencia en la trayectoria y en los criterios de falla de la formación.

NOMENCLATURA

σ	Esfuerzo [psi]
σ'	Esfuerzo efectivo [psi]
σ_h	Esfuerzo horizontal mínimo [psi].
σ_H	Esfuerzo horizontal máximo [psi].
σ_v	Esfuerzo vertical [psi].
σ'_1	Esfuerzo efectivo máximo [psi]
σ'_2	Esfuerzo efectivo intermedio [psi]
σ'_3	Esfuerzo efectivo mínimo [psi]
σ_θ	Esfuerzo tangencial
σ_z	Esfuerzo vertical
σ_{rr}	Esfuerzo Radial
$\sigma_{\theta\theta}$	Esfuerzo Tangencial
σ_{zz}	Esfuerzo Axial
σ_r	Esfuerzo Radial
σ_θ	Esfuerzo Tangencial
σ_z	Esfuerzo Axial
$\sigma_{x,y,z}$	Esfuerzos en coordenadas locales [psi]
τ	Esfuerzo de corte
T_o	Resistencia de la roca a tensión
P_w	Presión de pozo
P_f	Presión de poro
p_o	Presión de poro inicial [psi]
φ_z	Ángulo de Inclinación del pozo
φ_y	Azimut del pozo.

r	Radio del Pozo [ft]
E	Módulo de Young [psi]
ν	Relación de Poisson
λ	Parámetro de Lamé
θ	Posición angular alrededor del pozo
R	Distancia a partir del pozo [ft]
B	Coeficiente de Skempton
G	Módulo de corte drenado
ε	Deformación
Γ	Deformación de corte
C	Constante Elástica
ν	Relación de Poisson
T_o	Cohesión
D	Profundidad [ft]
P	Presión de formación [psi]
R	Resistividad del shale [ohm-m]
μ_w	Potencial químico, ML^2/T^2 , N.m
V_w	Volumen parcial molar de agua, L^3 , m^3
R	Constante universal de los gases
q_i	Descarga específica L/T, m/seg
C_h	Capacidad calorífica cal/Kg °C
ν	Relación de Poisson drenada
ν_u	Relación de Poisson no drenada
B	Coeficiente de presión de poro de Skempton
ε	Deformación [μ in/in]
α	Coeficiente de esfuerzo efectivo de Biot.
ρ_b	Densidad volumétrica [g/cm ³]
v_s	Velocidad de corte [ft/seg]
v_c	Velocidad compresiva [ft/seg]

t_s	Tiempo de tránsito de corte [$\mu\text{seg/ft}$]
t_c	Tiempo de tránsito compresivo [$\mu\text{seg/ft}$]
C	Difusividad
K	Permeabilidad
μ	Potencial químico
v_w	Volumen parcial molar del agua
R	Constante Universal del gas
T	Temperatura
ϕ_o	Porosidad.
T	Temperatura, ($^{\circ}\text{C}$)
M	Módulo de Biot
k	Permeabilidad, md
$\overline{M}$	Modulo de Biot correspondiente.
ζ	Variación del contenido de fluido en el poro.
E	Módulo de Young drenado.
B	Coefficiente de presión de poro de Skempton.
η	Coefficiente de esfuerzo poroelastico.
q_i	Tasa específica L/T, m/seg
ε_{ij}	Componente del tensor de esfuerzo conjunto
φ_y, φ_z	Ángulos de Inclinación y azimuth del pozo.
K_{ij}	Componentes del tensor permeabilidad
ζ	Variación del contenido de fluido poroso.
ε_{ij}	Componentes del tensor de tensión global.
λ_{ij}	Componentes del tensor de conductividad termal.
σ_{ij}	Componentes del tensor total de esfuerzo, m/Lt ² , MPa
$\tilde{p}$	Presión de poro en el dominio de la trasformada de Laplace.
D_{ijkl}	Componentes del tensor del Módulo elástico drenado.
α_{ij}	Componentes del tensor del coeficiente de esfuerzo efectivo de Biot.

$\bar{D}_{ijkl}$	Componentes del tensor de módulo elástico drenado.
α_m^T	Coeficiente de expansión volumétrica para el material de formación.
α_f^T	Coeficiente de expansión volumétrica para el fluido.
D_{ijkl}	Componentes del tensor de modulo elástico drenado, m/LT ² , MPa
α_{ij}	Componentes del tensor de coeficientes de esfuerzos efectivos de Biot
$\tilde{\sigma}_{ij}$	Componentes del tensor total de esfuerzos en el Dominio de la transformada de Laplace drenada.
$\bar{\alpha}_{ij}$	Componentes del tensor del coeficiente de esfuerzo efectivo correspondiente a Biot.
$\tilde{\zeta}$	Variación del contenido de fluido dentro del poro en el Dominio de la transformada de Laplace.
$\tilde{\varepsilon}_{ij}$	Componentes del tensor de deformación conjunto en el dominio de la transformada de Laplace.
β_{ij}	Componentes del tensor de coeficiente térmico relacionados a la expansión termal del esqueleto sólido.
β_m	Coeficiente térmico relacionado al cambio en presión de poro debido al cambio en temperatura/ °C
$S_{x'}, S_{y'}, S_{z'}$	- Esfuerzos regionales en el sistema de coordenadas $x'y'z'$, m/LT ² , MPa
$l_{xx'}, l_{xy'}, \text{etc.}$	- Dirección de cosenos entre los sistemas de coordenadas $x'y'z'$ y xyz .

BIBLIOGRAFÍA

1. Abousleiman, Y., Ekbote, Tare, U., "Time-Dependent Wellbore (In) Stability Predictions: Theory and Case Study". Artículo SPE 62796. 2000.
2. Aadnov, B.S., Rogoland, U., and Chenevert, M.E.: "Stability of Highly Inclined Borehole" Artículo SPE 16052. 1987.
3. Abousleiman, Y., Ekbote, S.L., Cui, L., Mody, F., Roegiers, J.C., Zaman, M., "Time-Dependent Coupled Processes in Wellbore Design and Stability: PBORE 3D" SPE paper 56759. 1999.
4. BP Exploration (Colombia) Ltda. "Informe final de perforación: pozo Buca 1". Septiembre 1996 – Enero 1997. Colombia.
5. BP Exploration (Colombia) Ltda. "Informe final de perforación: pozo Buca 2". Septiembre 1996 – Enero 1997. Colombia.
6. British Petroleum. Well Review Cusiana – Cupiagua 2001.
7. CORONEL, I. L., MATEUS, D. "Evaluación de los mecanismos de falla que conducen a la Inestabilidad de Pozo". Universidad Industrial de Santander. 2004.
8. DA FONTOURA, S. "Rock Mechanics Principles and Petroleum Engineering Application". Asistencia Técnica 2002.

9. Eaton, B. A.: "Fracture gradient prediction and its application in oilfield operations" Artículo SPE 2163. 1969.
10. Eaton, B. A.: "The equation for geopressure prediction from well logs" Artículo SPE 5544. 1975.
11. ECOPETROL. Estudio Geológico Regional, Cuenca de los Llanos Orientales, EMPRESA COLOMBIANA DE PETRÓLEOS, Santa fe de Bogota, Volumen I, 1995.
12. Evolucion geologica Toussand
13. Ewy, R.T.: "Wellbore stability predictions by use of a Modified Lade Criterion". Artículo SPE 56862. 1999.
14. FJÆR, E., HOLT, M. R., HORSRUD, P., RAAEN, I., RISNES, R., "Petroleum related rock mechanics". Elsevier Science Publishers. 1992.
15. FAJARDO, Andres, CRISTANCHO Julio, ROJAS Luis.: "DEFINICIÓN DEL MODELO ESTRATIGRÁFICO EN LA CUENCA LLANOS ORIENTALES Y PIEDEMONTE LLANERO". Piedecuesta - Santander, Abril 2000
16. MARTINEZ Jairo. *"Modelamiento Estructural 3D y aplicaciones en la Exploración y Explotación de Hidrocarburos en el Cinturón de Cabalgamiento del Piedemonte Llanero, Cordillera Oriental, Colombia"*. VIII Simposio Bolivariano – Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas. BP Exploration Colombia. Cartagena 2003.

17. ROJAS, Luis Ernesto. "Interpretación Estructural Piedemonte Central Cuenca Llanos Orientales" Vicepresidencia Adjunta De Exploración, Gerencia De Prospección ECOPETROL. Mayo del 2002.
18. Lal, M.: "Shale stability: Drilling fluid interaction and shale strength". Artículo SPE 54356. 1999.
19. MARTÍNEZ, José Ramón. "Geología Estructural y Dinámica Global", Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca, España, 2002-2003.
20. McLean, M.R. and Addis, M.A.: "Wellbore stability analysis: A review of current methods of analysis and their field application". Artículo SPE 19941. 1990.
21. McLean, M.R. and Addis, M.A.: "Wellbore stability: The effect of strength criteria on mud weight recommendations". Artículo SPE 20405. 1990.
22. NARANJO, Julian., VIRGILIO, Antonio.: "COMPILACIÓN Y SÍNTESIS ESTRATIGRAFICA DE LOS LLANOS ORIENTALES". GEOCONSULT Ltda., PANGEA Ltda. Piedecuesta, 2004.
23. Occidental de Colombia INC. "*Gibraltar 1 Reporte Final, Tomo 1, Geología*" Bogota Colombia. Marzo del 2003.
24. LINARES, Roberto. Memorias de la Materia Estructural Avanzada. Bucaramanga, 2003, 80p. Universidad Industrial de Santander, UIS. Facultad de Ingenierias Fisico-químicas. Escuela de Geología.

25. LINARES, Roberto, POSADA Claudia. Modelamiento Estructural en Zonas Complejas Escala de Laboratorio. Ecopetrol ICP. 2002.
26. OSORIO, G. Memorias del seminario "Geomecánica de Rocas". ICP Piedecuesta. 2003
27. S. Ekbote, L. Cui y Y. Abousleiman. "PBORE 3D for Windows Versión 2,01". The University of Oklahoma. 1997
28. Tiab, D.: "Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties". Gulf Publishing Co. 1996
29. TORRES, M., GONZALEZ A J and Last N C. "In- situ Estress estate Easter Cordillera Colombia". Paper SPE 81074. 2003.
30. UNIVERSIDAD DE OKLAHOMA, Ayuda de Microsoft Windows 5.1.2600.0 para PBORE 3D versión 5.50
31. X. Chen, C:P Tan and C.M Haberfield "A Comprehesive Practical Aproach For Wellbore Instability Management" SPE 48898. 1998.
32. Y. Abousleiman, S. Ekbote,: "Time-Dependent Wellbore (In) Stabillity Predictions:
33. ZAMORA, Wilson. "Modelamiento Geoquímico del Piedemonte" GEOCONSULT, Piedecuesta, 2003.

ANEXO 1. ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN COORDENADAS CILÍNDRICAS

Para evaluar los esfuerzos en las rocas alrededor del pozo, es conveniente expresar los esfuerzos y las deformaciones en coordenadas cilíndricas¹⁴. Los esfuerzos en un punto P identificados por coordenadas cilíndricas r , θ , y z (Figura A.1) son denotados por σ_r , σ_θ , σ_z , $\tau_{r\theta}$, τ_{rz} y $\tau_{\theta z}$. El esfuerzo σ_r es llamado esfuerzo radial, el esfuerzo σ_θ , es el esfuerzo tangencial y σ_z el esfuerzo axial. Estos esfuerzos se relacionan al sistema cartesiano de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 \sigma_r &= \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \\
 \sigma_\theta &= \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_y \cos^2 \theta - 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \\
 \sigma_z &= \sigma_z \\
 \tau_{r\theta} &= (\sigma_y - \sigma_x) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \\
 \tau_{rz} &= \tau_{xy} \cos \theta + \tau_{yz} \sin \theta \\
 \tau_{\theta z} &= \tau_{yz} \cos \theta - \tau_{xz} \sin \theta
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

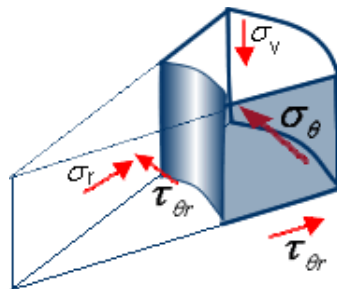
Las deformaciones están denotadas en coordenadas cilíndricas por ε_r , ε_θ , ε_z , $\Gamma_{r\theta}$, Γ_{rz} y $\Gamma_{\theta z}$. Si el desplazamiento en la dirección r es denotado por u , en la dirección θ , v , y en la dirección z , w , las deformaciones son:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_r &= \frac{\partial u}{\partial r} \\
\varepsilon_\theta &= \frac{1}{r} \left(u + \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) \\
\varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\
\Gamma_{r\theta} &= \frac{1}{2r} \left(\frac{\partial u}{\partial \theta} - v \right) + \frac{\partial v}{\partial r} \\
\Gamma_{rz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\
\Gamma_{\theta z} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)
\end{aligned} \tag{A.2}$$

Estas deformaciones se relacionan a los esfuerzos en el sistema cartesiano así:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_r &= \varepsilon_x \cos^2 \theta + \varepsilon_y \sin^2 \theta + 2\Gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta \\
\varepsilon_\theta &= \varepsilon_x \sin^2 \theta + \varepsilon_y \cos^2 \theta - 2\Gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta \\
\varepsilon_z &= \varepsilon_z \\
\Gamma_{r\theta} &= (\varepsilon_y - \varepsilon_x) \sin \theta \cos \theta + \Gamma_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \\
\Gamma_{rz} &= \Gamma_{xy} \cos \theta + \Gamma_{yz} \sin \theta \\
\Gamma_{\theta z} &= \Gamma_{yz} \cos \theta - \Gamma_{xz} \sin \theta
\end{aligned} \tag{A.3}$$

Figura A.1. Esfuerzos en Coordenadas cilíndricas



Para un material isotropico, las relaciones esfuerzos-deformación son fácilmente trasladadas a coordenadas cilíndricas:

$$\begin{aligned}
 \sigma_r &= (\lambda + 2G)\varepsilon_r + \lambda\varepsilon_\theta + \lambda\varepsilon_z \\
 \sigma_\theta &= \lambda\varepsilon_r + (\lambda + 2G)\varepsilon_\theta + \lambda\varepsilon_z \\
 \sigma_z &= \lambda\varepsilon_r + \lambda\varepsilon_\theta + (\lambda + 2G)\varepsilon_z \\
 \tau_{r\theta} &= 2G\Gamma_{r\theta} \\
 \tau_{rz} &= 2G\Gamma_{rz} \\
 \tau_{\theta z} &= 2G\Gamma_{\theta z}
 \end{aligned} \tag{A.4}$$

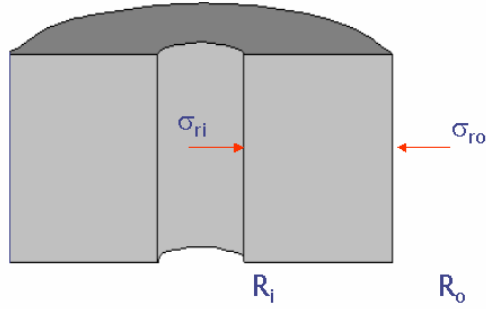
Las Ecuaciones de Equilibrio pueden ser expresadas en coordenadas cilíndricas, así:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \rho R &= 0 \\
 \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + \rho \theta &= 0 \\
 \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\tau_{rz}}{r} + \rho Z &= 0
 \end{aligned} \tag{A.5}$$

Esfuerzos en un cilindro hueco.

Para un pozo vertical en una formación elástica lineal con esfuerzos horizontales iguales. Y considerando un cilindro hueco con radio interno R_i y un radio externo R_o . (Figura 13) La presión en la superficie interna es σ_{ri} y sobre la superficie externa es σ_{ro} . No hay fuerzas de corte actuando sobre las superficies.

Figura A.2. Sección Transversal de un cilindro hueco



Despreciando las fuerzas del cuerpo y asumiendo que todas las cantidades son independientes de θ y z , la primera de las ecuaciones se convierte en:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (\text{A.6})$$

Las dos ecuaciones restantes de la Ecuación (A.5) se satisfacen para, $\tau_{r\theta} = \tau_{rz} = 0$, lo cual es también válido en los límites $r = R_i$ y $r = R_o$. De las ecuaciones (A.2) y (A.4) se encuentra que:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= (\lambda + 2G)\varepsilon_r + \lambda\varepsilon_\theta + \lambda\varepsilon_z \\ &= (\lambda + 2G)\frac{\partial u}{\partial r} + \lambda\frac{u}{r} \\ \sigma_\theta &= \lambda\varepsilon_r + (\lambda + 2G)\varepsilon_\theta + \lambda\varepsilon_z \\ &= \lambda\frac{\partial u}{\partial r} + (\lambda + 2G)\frac{u}{r} \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Introduciendo los esfuerzos de la ecuación (A.7) dentro de la ecuación (A.6), se obtiene la ecuación de desplazamiento en dirección u :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) \right] = 0 \quad (\text{A.8})$$

La cual tiene por solución general:

$$u = Ar + \frac{B}{r} \quad (\text{A.9})$$

Introduciendo el desplazamiento (A.9) dentro de la ecuación (A.2) y el resultado dentro de la ecuación (A.4) se obtiene para los esfuerzos radial y tangencial:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= (\lambda + 2G) \left(A - \frac{B}{r^2} \right) + \lambda \left(A + \frac{B}{r^2} \right) \\ \sigma_\theta &= \lambda \left(A - \frac{B}{r^2} \right) + (\lambda + 2G) \left(A + \frac{B}{r^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

Las condiciones límite para el esfuerzo radial son:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_{ri} \quad \text{para} \quad r = R_i \\ \sigma_r &= \sigma_{ro} \quad \text{para} \quad r = R_o \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

Aplicando las ecuaciones (A.11) dentro de la ecuación (A.10), se pueden determinar los coeficientes A y B. Introduciendo los resultados dentro de la ecuación (A.10) se obtiene:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sigma_{ro} R_o^2 - \sigma_{ri} R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} - (\sigma_{ro} - \sigma_{ri}) \frac{R_i^2}{r^2} \frac{R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_{ro} R_o^2 - \sigma_{ri} R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + (\sigma_{ro} - \sigma_{ri}) \frac{R_i^2}{r^2} \frac{R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

Las ecuaciones (A.12) expresan como cambian los esfuerzos radial y tangencial con la distancia desde el eje axial, en un cilindro hueco. Cabe notar que la presión radial interna es la más baja, comparada con la presión radial externa, y la mayor diferencia entre σ_r y σ_θ es la pared interna del cilindro.

En una situación de: $\sigma_{ri} \rightarrow p_w$, donde p_w es la presión del pozo, $R_i \rightarrow R$, donde R es el radio del pozo, $R_o \rightarrow \infty$, y $\sigma_{ro} \rightarrow \sigma_h$, con σ_h es el esfuerzo horizontal. La solución para los esfuerzos radial y tangencial se convierte entonces:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \sigma_h - (\sigma_h - p_w) \frac{R^2}{r^2} \\ \sigma_\theta &= \sigma_h + (\sigma_h - p_w) \frac{R^2}{r^2}\end{aligned}\tag{A.13}$$

El esfuerzo axial σ_z no es determinado por la ecuación (A.6). Sin embargo, tomando la derivada con respecto a r de σ_z como en la ecuación (A.4), usando la expresión (A.2) para ε_r y ε_θ , y haciendo uso de la ecuación (A.8), se encuentra que $\partial\sigma_z/\partial r = 0$, por lo tanto σ_z es constante, independiente de r . La magnitud de esta constante esta dada por la condición límite para σ_z , la cual requiere que $\sigma_z = \sigma_v$ cuando $r \rightarrow \infty$. Por lo tanto, se tiene que $\sigma_z = \sigma_v$ para todo $r > R$.

Se puede observar de la ecuación (A.13) que una reducción en la presión de pozo produce una reducción en el esfuerzo radial, e igualmente incrementa el esfuerzo tangencial. La variación de los esfuerzos como una función del radio r es mostrado en la Figura A.3. Se puede apreciar que la mayor desviación del estado de esfuerzos inicial es encontrado en la cara del pozo.

Figura A.3. Esfuerzos Alrededor del pozo en una formación con comportamiento elástico lineal

