

**ANÁLISIS, CAUSAS Y CARACTERIZACIÓN DE CAVINGS APLICADO A LA
ESTABILIDAD DE POZOS: DOS CASOS EN EL PIEDEMONTES LLANERO.**

AURA MARIA ROA PRADA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA
2006**

ANALISIS, CAUSAS Y CARACTERIZACIÓN DE CAVINGS APLICADO A LA ESTABILIDAD DE POZOS: DOS CASOS EN EL PIEDEMONTES LLANERO.

AURA MARIA ROA PRADA

Trabajo de Grado para optar por el título de Geólogo

DIRECTORES

M.Sc. Luis Miguel Bernardo.
Docente UIS

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

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA
2006

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	15
2. GENERALIDADES DE LA GEOMECÁNICA APLICADA A LA ESTABILIDAD DE POZOS.....	17
2.1. LA GEOMECANICA EN LA ESTABILIDAD DE POZOS	17
2.1.1 Antecedentes - Contexto Histórico.....	17
2.1.2 Problemas Asociados a la Inestabilidad de Pozos y sus Causas.....	18
2.1.3 Impacto Económico	19
2.1.4 Soluciones.....	20
3. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA DEL PIEDEMORTE LLANERO	22
3.1 MARCO GEOLOGICO REGIONAL.....	22
3.1.1 Localización.....	22
3.1.2 Generalidades de la cuenca.....	23
3.1.3 Estratigrafía	24
3.1.3.1 Formación Carbonera.....	26
3.1.3.2 Formación León	27
3.1.3.3 Formación Guayabo	28
3.1.4 Geología Estructural.....	28
3.1.5 Evolución Geológica de la cuenca Llanos	31
3.2 MARCO GEOLOGICO LOCAL	33
3.2.1 Características de las Formaciones Perforadas.....	33
3.2.2.1 Formación Carbonera.....	33
3.2.2.2 Formación León.....	36
3.2.2.3 Formación Charte.....	37
3.2.2.4 Formación Guayabo	38
3.2.2 Geología Estructural de Cupiagua	38
4. CAVINGS	41
4.1. MANEJO DE LA ESTABILIDAD DE POZO EN TIEMPO REAL	41
4.1.2. Monitoreo en Tiempo Real.....	42
4.2 IMPORTANCIA DE LA INTERPRETACION DE CAVINGS.....	42
4.3. CLASIFICACION MORFOLOGICA DE CAVINGS	43
4.3.1 Cavings Angulares.....	43
4.3.2 Cavings en Bloque.....	44
4.3.3 Cavings Astillosos	45
4.3.4 Otros Tipos de Cavings.....	46
5. VENTANA OPERACIONAL.....	48

5.1 DISEÑO DE LA VENTANA OPERACIONAL.....	49
5.1.1 Determinación del Esfuerzo Vertical.....	50
5.1.2 Determinación del Esfuerzo Mínimo Horizontal.....	50
5.1.3 Determinación del Esfuerzo Máximo Horizontal.....	51
5.1.4 Determinación de la Presión de Poro.....	52
5.1.5 Determinación de las Constantes Elásticas de las Formaciones.....	53
5.2 DETERMINACION DE LA VENTANA OPERACIONAL.....	55
5.3 DESARROLLO VENTANA OPERACIONAL POZO YZ-10.....	55
5.3.1 Propiedades Mecánicas.....	56
5.3.2 Determinación de Esfuerzos.....	57
5.3.2.2 Magnitud Esfuerzo Mínimo Horizontal.....	58
5.3.2.3 Magnitud Esfuerzo Máximo Horizontal.....	58
5.4 DESARROLLO VENTANA OPERACIONAL POZO ED-41.....	60
6. APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE CAVINGS A LA ESTABILIDAD DE POZOS	63
6.1 METODOLOGIA DE TRABAJO.....	63
6.2 CARACTERIZACION DE CAVINGS PARA LOS POZOS YZ-10 Y ED-41.....	65
6.3 EVALUACION DE LOS PARAMETROS DE PERFORACION EN LA PRODUCCION DE CAVINGS.....	70
6.3.1 Formación Guayabo.....	70
6.3.2 Formación Charte.....	73
6.3.3 Formación León.....	75
6.3.4 Formación Carbonera.....	77
6.4 DETERMINACION DEL MECANISMO DE FALLA A PARTIR DE LA CARACTERIZACIÓN DE CAVINGS Y SU VALIDACION MEDIANTE L USO DE LA VENTANA OPERACIONAL.....	81
6.4.1 Mecanismo de Falla a partir de la Caracterización de Cavings, Pozo YZ-10.	82
6.4.1.1 Mecanismo de Falla para la Formación Guayabo.....	82
6.4.1.2 Mecanismo de falla para la Formación Charte.....	83
6.5.1.4 Mecanismo de falla para la Formación Carbonera.....	84
6.4.2 Mecanismo de Falla a Partir de la Caracterización de Cavings, Pozo ED-41.	87
7. EVALUACION DE LA INFLUENCIA DE LA TRAYECTORIA DEL POZO EN LA PRODUCCION DE CAVINGS.....	88
7.1. Evaluación para el Pozo YZ-10.....	90
7.1.2 Formación Guayabo.....	90
7.1.3 Formación Charte.....	92
7.1.4 Formación León.....	92
7.1.5 Formación Carbonera.....	92
7.2. Evaluación para el Pozo ED-41.....	95
7.2.1 Formación Guayabo.....	95
7.2.2 Formación Charte.....	96
7.2.3 Formación León.....	97
7.2.4 Formación Carbonera.....	97
8. DISCUSION DE RESULTADOS.....	100

9. CONCLUSIONES.....	101
10. BIBLIOGRAFIA	105

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. Tren Normal de densidad de arcilla con profundidad

TABLA 2. Eventos y pruebas utilizado en el desarrollo del modelo geomecánico.

TABLA 3. Resumen de la caracterización de cavings para los pozos YZ-10 y ED-41.

ANEXOS

ANEXO 1. CATALOGO PARA EL POZO YZ-10

ANEXO 2. CATALOGO PARA EL POZO ED-41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca del Piedemonte Llanero.	22
Figura 2. Esquema tectónico regional del Nor-occidente de Suramérica.	23
Figura 3. Carta de Correlación Estratigráfica de la Cuenca de los Llanos Orientales, Colombia.	25
Figura. 4. Columna Estratigráfica Generalizada. Fuente.	26
Figura. 5. Ambiente de depositación de la Formación Carbonera. Fuente:	27
Figura 6. Modelo de ambiente de depositación de la Formación León Base.	27
Figura. 7. Modelo de ambiente de depositación de la Formación Guayabo.	28
Figura 8. Sección estructural esquemática representando los diferentes estilos estructurales del Piedemonte Llanero.	29
Figura 9. Mapa estructural del tren de algunos campos en el Piedemonte.	30
Figura 10. Restauración esquemática mostrando los diferentes tipos de estructuras y su posición con respecto a la cuenca. Estructuras frontales tipo Cusiana, estructuras aisladas apretadas tipo Cupiagua y estructuras cabalgantes “duplex” en una zona triangular tipo Piedemonte (Floreña, Pauto, Volcanera).	31
Figura 11. Plano Inclinado de Tiempo y Rumbo. Estructura de Cupiagua	39
Figura. 12. Apariencia de los cavings tipo angulares.	43
Figura 13. Caving angular asociados a fallas por cizallamiento.	43
Figura. 14. Apariencia de los cavings tipo bloque. a vista frontal b vista superior c vista lateral	44
Figura. 15. Caving en bloque de planos de debilidad: estratificación o fracturas Naturales.	44
Figura. 16. Apariencia de los cavings tipo astilloso	45
Figura. 17. Caving astilloso resultado de fallas tensiles.	45
Figura. 18. Shale astilloso Causado por fallas tensiles a lo Largo de la circunferencia del pozo. La ampliación del pozo puede darse a lo largo de la circunferencia del hueco.	46
Figura. 19. Zonas De Ripios” las cuales pueden ser causadas de manera natural debido a los cambios en los esfuerzos en el subsuelo.	47
Figura. 20. Metodología implementada para el desarrollo del modelo geomecánico	48
Figura. 21. Metodología implementada para el desarrollo del modelo geomecánico.	49
Figura. 22. Registro de imagen (UBI) en el cual se observan fallas de pozo compresivas (Breakout) y de tensión fracturas hidráulicas. A la izquierda se observan fallas de tensión provocadas por excesivo peso de lodo, a la derecha fallas de compresión por concentración de esfuerzos compresivos en la dirección del mínimo esfuerzo horizontal.	51

Figura. 23. Propiedades mecánicas pozo YZ10 a partir del VSP del YT8 y datos de calibración parcial.....	56
Figura.24. Ventana Operacional calibrada para el pozo YZ-10.....	59
Figura 25. Propiedades Mecánicas calculadas para el pozo E7 y extrapoladas al pozo ED-41.	60
Figura 26. Ventana Operacional calibrada para el Pozo ED-41	62
Figura 27. Metodología de trabajo en el análisis de cavings.....	65
Figura 28. Metodología para la descripción de muestras en el laboratorio	67
Figura 29. Comportamiento de los parámetros operacionales en la Formación Guayabo. Pozo YZ-10.....	72
Figura 30. Comportamiento de los parámetros operacionales en la Formación Guayabo. Pozo ED-41.	73
Figura 31. Comportamiento de los parámetros operacionales en la Formación Charte. Pozo YZ-10.....	74
Figura 32. Comportamiento de los parámetros operacionales en la Formación Charte. Pozo ED-41.	75
Figura 33. Comportamiento de los parámetros operacionales en la Formación León. Pozo YZ-10.	76
Figura 34. Comportamiento de los parámetros operacionales en la Formación Carbonera. PozoYZ-10.	80
Figura 35. Comportamiento de los parámetros operacionales en la Formación Carbonera. Pozo ED-41.	81
Figura 36. Breakout determinados a partir del registro OMI del pozo YZ-10.	83
Figura 37. Relación azimuth/esfuerzo y ángulo de ataque en la producción de cavings, pozo YZ-10.....	91
Figura 38 Relación azimuth/esfuerzo y ángulo de ataque en la producción de cavings, pozo ED-41.	96

TÍTULO: ANALISIS, CAUSAS Y CARACTERIZACIÓN DE CAVINGS APLICADO A LA ESTABILIDAD DE POZOS: DOS CASOS EN EL PIEDEMONTE LLANERO*.

AUTOR: AURA MARIA ROA PRADA**

PALABRAS CLAVES: Cavings, Morfología, Geomecánica, Estabilidad de pozo, Litología, Ventana Segura de lodo, Angulo de ataque, Peso de Lodo.

OBJETIVO GENERAL

- Reconocer la importancia de los cavings como indicadores de inestabilidad de pozos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar los cavings reportados para cada una de las formaciones a trabajar de acuerdo a la litología, morfología y tamaño.
- Realizar un catalogo de cavings para cada uno de los pozos a trabajar a partir de la información disponible.
- Identificar los posibles mecanismos de falla del pozo a partir de la caracterización de estos cavings.
- Validar el mecanismo de falla obtenido a partir de la morfología del caving con el mecanismo de falla obtenido a partir de la ventana operacional.
- Determinar la incidencia o no de diversos factores como la litología, peso de lodo y ángulo de ataque sobre la producción de cavings.

RESUMEN

La estabilidad de pozos es uno de los problemas más comunes durante la perforación en yacimientos de petróleo y gas natural. Este problema se complica, cuando la zona a perforar se encuentra enmarcada en áreas de alta complejidad estructural como ocurre en los Llanos Orientales de Colombia (SAGE, 1995).

Dada esta problemática, hace algunos años se ha venido implementando una serie de procedimientos que permitan dar solución o minimizar en cuanto sea posible, los problemas potenciales de inestabilidad de pozos.

Este control de la estabilidad permite a la industria reducir el incremento en los costos de operación adicionales generados durante la etapa de perforación.

* Trabajo de investigación

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología, Luís Miguel Bernardo.

Uno de estos procedimientos corresponde al monitoreo en tiempo real de la estabilidad de pozos, el cual busca mejorar las prácticas de perforación y por tanto disminuir los problemas de inestabilidad.

Dentro de este monitoreo en tiempo real, se encuentran los análisis en superficie, los cuales tienen en cuenta tanto los cortes (corte de broca) como los cavings (inestabilidad). Estos últimos, están siendo recientemente estudiados dada la gran información que pueden llegar a ofrecer.

La importancia de analizar estos cavings se basa en tres aspectos fundamentales: a) son una señal de alerta de inestabilidad del pozo, b) son indicadores de cuales formaciones son inestables y cuales podrían ser los posibles mecanismos de falla y c) podrían ayudar a determinar un rápido correctivo.

Para este estudio fue necesario plantear una metodología de trabajo enfocada en la obtención de los objetivos inicialmente planteados

Con base en este objetivo se consideraron tres etapas de trabajo: Trabajo de Oficina. Trabajo de Campo y Trabajo de laboratorio, las cuales involucraron tareas específicas con el fin de alcanzar los objetivos inicialmente planteados.

Toda esta información recopilada y revisada fue registrada en un formato final de presentación de datos que corresponde a los catálogos, se obtuvieron dos catálogos, uno por cada pozo estudiado y a partir de los cuales rápidamente se obtienen las diferencias relativamente marcadas entre los tipos de cavings reportados para cada pozo: para el pozo YZ-10 son predominantemente angulares mientras que para el pozo ED-41 son predominantemente cavings tipo bloque.

A partir de la clasificación morfológica realizada (a intervalos de cada 30pies en promedio) se obtuvo una serie de posibles mecanismos de falla a lo largo de las formaciones perforadas; con el fin de validar este mecanismo, se correlacionó con los mecanismos de falla obtenidos a partir de las ventanas operacionales generadas para cada uno de los pozos de estudio.

Una vez finalizada esta etapa, se llevó a cabo una revisión de la influencia del ángulo de ataque sobre la rata de cavings y la relación de la inclinación del pozo con respecto al esfuerzo máximo horizontal.

**TITLE: ANALYSIS, CAUSES AND CHARACTERIZATION OF CAVINGS APPLIED TO
THE WELLBORE STABILITY: TWO CASE STUDIES AT THE COLOMBIAN
“PIEDEMONTTE LLANERO”**

AUTHORS: AURA MARIA ROA PRADA**

KEYWORDS: Cavings, Morphology, Geomechanics, Wellbore Stability, Lithology, Safe Mud Window, Attack angle, Mud Weigh.

ABSTRACT

Wellbore stability is one of the most common problems during the drilling of oil and natural gas fields. This problem becomes even more complicated when the zone to be drilled is located in areas of high structural complexity such as the “Llanos Orientales” region of Colombia.

Given this problem, a series of procedures has been implemented in recent years in order to provide a solution, or to minimize the potential problems of instability in wells.

Controlling the stability allows industry to reduce the increments in operation expenses that arise during the perforation stage.

One of these procedures refers to the real time monitoring of the stability of the well, looking for the improvement in the perforation practices and therefore, lessening the instability problems. In the real time monitoring are found the surface analyses, which take into account not only the cuttings (cut of drill) but also the cavings (instability).

The above mentioned are being recently studied thanks to the big amount of information that they eventually can provide

* Research work

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología, Luís Miguel Bernardo.

The importance of analyzing these cavings is based in three fundamentals aspects: first, they are a warning sign of the instability of the well, they are indicators of which formations are unstable and which could be the possible failure mechanisms and besides they could help to determine a fast corrective action.

The first step in the study of these cavings consisted in proposing a work methodology focused in the better way to approach this topic.

With this purpose in mind, three stages were considered: work at the office, field work and work at the laboratory. Such stages involved specific tasks with the goal to achieve the objectives initially stated.

All this information was put together, reviewed and recorded in a final format for presentation of data, similar to the catalogs. Two catalogs were obtained, one for each studied well, and based on these catalogs the relative differences between the types of cavings reported were rapidly figured out for each well: for the well YZ-10 were predominantly angular, while for the well ED-41 were predominantly bloky.

Based on the morphologic classification realized (with intervals of 30 feet in average) it was obtained a series of possible failure mechanisms through the perforated formations. With the purpose of validating this mechanism, it was correlated with the failure mechanisms obtained from the operational windows generated for each one of the studied wells.

Once this stage was finished, a review of the influence of the angle of attack over the rate of cavings and the relation of the well slope with the maximum horizontal stress was carried out.

1. INTRODUCCIÓN

Los problemas de estabilidad de pozos son ocasionados por factores tanto químicos como mecánicos ó una combinación de estos, y son consecuencia de la potencialidad que tiene la roca a colapsar por compresión o por tensión. Los factores químicos hacen referencia generalmente a tópicos como tipo de lodo inapropiado y/o inadecuada capacidad de inhibición entre otros aspectos. Sin embargo, los factores mecánicos juegan un papel más relevante en la fase de perforación.

Los problemas mecánicos son en gran parte consecuencia de una selección no adecuada de las condiciones de perforación tales como trayectoria de pozo (inclinación y azimut del pozo), ángulo de ataque, y/o densidad del lodo, las cuales dependen de muchos factores como la litología, régimen de esfuerzos in situ y propiedades mecánicas de la roca, entre otras.

La acentuación de estos problemas se manifiesta cuando los pozos son perforados en zonas tectónicamente activas y en pozos direccionales de trayectorias complicadas.

En el control e implementación de procedimientos de remediación que permitan dar solución a problemas directos o asociados a la estabilidad de pozo se encuentra el monitoreo en tiempo real.

Este monitoreo en tiempo real involucra una serie de parámetros de perforación que buscan tanto optimizar estos procesos de perforación como reducir en cuanto sean posibles algunos problemas potenciales de inestabilidad.

Este manejo de la estabilidad de pozo en tiempo real involucra dos procesos:

1. Monitoreo en tiempo real

El monitoreo en tiempo real integra todos los datos disponibles en la locación y se divide en tres categorías de análisis:

- Información en superficie: Esta involucra los análisis de cavings-inestabilidad en el pozo, análisis de cuttings-limpieza del hueco, entre otros.
- Datos de MWD (Measure While Driller): Involucra una serie de parámetros de perforación.
- Datos de LWD (Measure While Logging): como los registros Gamma Ray, Resistivos, sónicos, predicción de presión de poro mientras se perfora y medidas de caliper entre otros.

2. Acciones inmediatas

Estas acciones inmediatas hacen referencia a todos los correctivos que se llevan a cabo para solucionar o prevenir un problema de inestabilidad y que por lo general se encuentran asociados a los aumentos del peso del lodo o al mejoramiento de las condiciones de limpieza del hueco.

Para este caso en particular, el interés radica en el análisis en tiempo real de la estabilidad de pozo con base en la utilización de cavings como herramienta principal de detección de los posibles mecanismos de falla del pozo.

El estudio de cavings constituye una herramienta muy útil de evaluación en tiempo real de la estabilidad de pozo, cuyo objetivo es minimizar y/o prevenir problemas que tengan lugar durante la perforación de pozos

Estos análisis de cavings reducen enormemente la ambigüedad en los diagnósticos de inestabilidad, con base en observaciones y análisis en cuanto a: rata (volumen), tamaño, morfología, litología, entre otros.

2. GENERALIDADES DE LA GEOMECÁNICA APLICADA A LA ESTABILIDAD DE POZOS

La geomecánica de yacimientos es una ciencia que estudia la respuesta mecánica de los materiales geológicos ante cambios del entorno físico entre los que se encuentran los esfuerzos, las presiones, la temperatura, que influyen en la exploración, desarrollo y producción en un campo petrolero (OSORIO, 2004). La geomecánica ayuda a comprender los diversos problemas asociados con la deformación de la roca por producción de fluidos, el fenómeno de fracturamiento, lutitas problemáticas, compactación y subsidencia y en general lo relacionado con la estabilidad de pozos, entre otros problemas geológicos (ZHENG, 1998).

2.1. LA GEOMECANICA EN LA ESTABILIDAD DE POZOS

Debido a que es una herramienta útil para evaluar la estabilidad de un pozo petrolero; es necesario conocer cuales han sido sus antecedentes, los costos que implica y las posibles soluciones que proporciona, con el fin de evaluar la utilidad que la herramienta ofrece a la industria.

2.1.1 Antecedentes - Contexto Histórico

Desde el comienzo de las investigaciones realizadas en el campo geológico en el siglo XIX , científicos como Charles - Augustin de Coulomb 1760, Otto Mohr 1900, Terzaghi, Kirsch, Gubert y Willis 1957, han elaborado diferentes teorías para describir el comportamiento mecánico de las rocas. Como resultado de estas investigaciones se ha

podido dar explicación a diferentes fenómenos en la industria entre los que se encuentran: Inestabilidad del pozo (Colapso de las paredes, pega diferencial, pérdida de circulación), estimación del régimen de esfuerzos, arenamiento, fracturamiento hidráulico, modelos de compactación/subsidencia y geopresiones.

Entre las áreas específicas en la industria petrolera donde la geomecánica es aplicada para dar solución a los problemas de estabilidad de pozo se encuentran:

- Mediciones de los esfuerzos in-situ: esfuerzos horizontales y verticales causados por el peso de los estratos supra-yacentes y la actividad tectónica.
- Análisis de la distribución de los esfuerzos alrededor de la pared del pozo sobre una roca elástica lineal alrededor de un hueco cilíndrico, incluyendo el efecto de la presión de poro.
- Fracturamiento del pozo el cual se ha venido utilizando desde los años 50's como un proceso para romper y fallar la roca.
- *Problemas asociados a la perforación donde pueden ocurrir inestabilidades durante o ligeramente después de la perforación, o se pueden desarrollar luego durante la operación del campo.*

2.1.2 Problemas Asociados a la Inestabilidad de Pozos y sus Causas

En el diseño de un programa de perforación y completamiento, así como en el periodo de producción, es necesario eliminar o minimizar las inestabilidades mecánicas en el pozo, para esto es necesario entender la interacción entre:

- Campo de esfuerzos in-situ
- Presiones de poro
- Fracturas naturales
- Resistencia de la roca
- Peso del lodo
- Trayectoria del pozo
- Litología de la formación
- Propiedades físico-químicas del lodo
- Tiempo
- Temperatura

- Aspectos operacionales
- Fenómenos de compactación y subsidencia

La interacción entre todos los anteriores factores genera problemas de estabilidad durante la perforación y producción.

Entre los problemas asociados con la estabilidad de pozos se encuentran:

- Ensanchamiento del pozo (cavings)
- Reducción del tamaño del pozo debido al flujo plástico de la roca dentro del pozo (flujo de shale y sal)
- Pérdida de circulación
- Exceso de torques y altas presiones de bombeo en la perforación
- Daño del pozo inducidos por los esfuerzos
- Fallas de pozo inducidas por la perforación
- Deterioro del casing debido a los esfuerzos de corte (deformaciones en el revestimiento y en la tubería de producción)
- Pega de tubería
- Consolidación
- Subsidencia
- Producción de arena
- Dificultades en la toma de registros.
- Side-tracking inadvertidos (poco control direccional).
- Problemas en los viajes: Washouts o zonas de lavado (que generan deformación del pozo en todas las direcciones) y Reaming
- Pobre cementación con sus respectivos problemas

2.1.3 Impacto Económico

Los problemas de inestabilidad de pozo producen elevados costos y pérdidas de tiempo asociadas a operaciones.

Este problema es evidente en la zona del Piedemonte y el cual le cuesta a la industria más de 6000 millones de dólares anuales solo durante operaciones de perforación .

Entender las relaciones entre esfuerzo, deformación, propiedades mecánicas, y mecanismos de falla de diferentes rocas y su respuesta a los diferentes esfuerzos

terrestres pueden conducir a grandes beneficios económicos en todas las fases de desarrollo de un proyecto petrolero.

Por lo menos el 10% de los costos de perforación pueden verse afectados normalmente por problemas de inestabilidad mecánica de la roca alrededor del pozo. Pérdidas por el mismo orden pueden ser generadas si la producción de sólidos se vuelve incontrolable. Mucho tiempo es perdido como resultado de un pozo inestable, difícil empaquetamiento del pozo, excesiva tensión en la sarta, tiempo extra necesitado para el reaming/backreaming del pozo o circular lodo para limpiar el hueco y transportar los ripios y cavings desde el fondo del pozo a superficie. Un tiempo que se traduce en dólares por hora.

2.1.4 Soluciones

El objetivo de un proyecto petrolero es ser lo mas rentable posible, para esto se debe perforar lo mas rápido y eliminar los tiempos no productivos asociados a problemas de inestabilidad. Para reducir los problemas relacionados con la estabilidad de pozo se debe implementar un adecuado plan de perforación usando un buen modelo geomecánico de la zona así como la optimización de las prácticas de perforación en la fase de planeación y perforación para el éxito del proyecto.

Para esto se debe tener control de las siguientes variables (www.bakerhughes.com):

- Selección adecuada del peso del lodo:
- Control térmico del pozo
- Control de las prácticas de perforación/viajes que afectan la densidad de circulación efectiva (ECD - Effective Circulation Density).

Dentro del programa para prevenir y mitigar los problemas de inestabilidad de pozo se pueden señalar:

- Selección del modelo geomecánico para el análisis de estabilidad.
- Estimación de los parámetros de entrada para el modelo seleccionado (esfuerzos in-situ, presión de poro, parámetros de resistencia, interacciones químicas).

- Aplicación de herramientas modernas para el análisis de estabilidad.
- *Implementación del monitoreo en tiempo real de los parámetros de perforación controlables durante la perforación.*

3. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA DEL PIEDEMONTE LLANERO

3.1 MARCO GEOLOGICO REGIONAL

3.1.1 Localización

La cuenca de los Llanos Orientales corresponde a una cuenca asimétrica, localizada al este de los Andes y hace parte de las cuencas Subandinas de antepaís, como se muestra en la Figura 1.

La cuenca se orienta en dirección Suroeste-Noreste y se extiende unos 100 kilómetros al norte y sur de la población de Yopal (Casanare), hasta Venezuela y está separada de la cuenca de Barinas por el Arco de Santa Barbara y hacia el sur se encuentra separada de la cuenca del Putumayo por el arco de la Macarena-Guaviare. La cuenca se encuentra limitada al oeste por el sistema de fallas de Guaicáramo y al este por el sistema de fallas de Yopal-Borde Llanero (VIRGILIO Y NARANJO, et. al, 2004).



Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca del Piedemonte Llanero. Fuente: Well Review 2001.

3.1.2 Generalidades de la cuenca

“En esta zona, los esfuerzos in-situ son afectados por los movimientos de placas y los procesos tectónicos asociados. Las placas continentales se están moviendo sobre el manto terrestre a tasas de hasta 12 cm/año” (COOPER et. al, 1994) (Figura 2).

La zona del Piedemonte llanero ubicada en las estribaciones orientales de la Cordillera Oriental contiene una gran cantidad de reservas de hidrocarburos encontradas principalmente en yacimientos de areniscas cuarzosas compactadas. La estratigrafía del área involucra formaciones con edades del Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico y la presencia de varias discordancias regionales debido a la gran actividad geológica de la zona. Las rocas mas antiguas perforadas en el área corresponden a arcillolitas del Ordovícico, las cuales están cubiertas de manera discordante por la secuencia cretácea (Formaciones Une, Gachetá y el grupo Guadalupe), la secuencia terciaria (Formaciones Barco, Los Cuervos, Mirador, Carbonera, León, Guayabo y Necesidad) (FAJARDO et al., 2000)

Las principales formaciones acumuladoras de hidrocarburos del área del Piedemonte se encuentran en las areniscas del Grupo Guadalupe y las formaciones Barco y Mirador. El entendimiento de la geometría estructural permite establecer que la evolución de estos campos se ha dado a través de diferentes etapas de deformación.

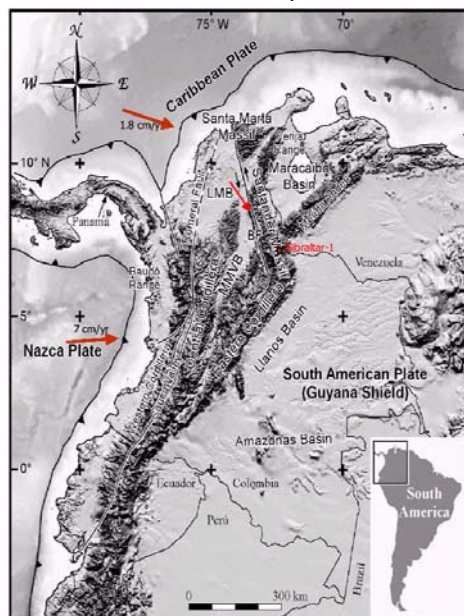


Figura 2. Esquema tectónico regional del Nor-occidente de Suramérica. Fuente: Reporte

final pozo 1, Gibraltar 2002.

3.1.3 Estratigrafía

En cuanto a la estratigrafía del Piedemonte, se presentan rocas del Paleozoico, Cretáceo y Terciario con presencia de múltiples discordancias regionales Figura 3. Las rocas más antiguas perforadas en el área son las arcillolitas del Ordovícico sobre las cuales yace de manera discordante la secuencia Cretácea, iniciada con la formación Une (Albiano – Aptiano - Cenomaniano), seguida de la formación Gachetá (Turoniano-Conoaciano-Santoniano) y el Grupo Guadalupe (Campaniano - Maastrichtiano). La secuencia Terciaria esta dada por las formaciones Barco y Los Cuervos (Paleoceno), Mirador (Eoceno), el Grupo Carbonera y formación León (Oligoceno-Mioceno), la formación Guayabo (Mioceno-Pleistoceno) y los depósitos mas recientes de la formación Necesidad (FAJARDO et. al, 2000). La estratigrafía a utilizar en este trabajo corresponde a un ajuste de la presentada por occidental y la cual corresponde a la presentada por Martínez (2000) como se muestra en la figura 4..

El entendimiento de las secuencias estratigráficas y sus efectos sobre la deformación y el estilo estructural y de los mecanismos que gobiernan su deformación han ayudado al mejor entendimiento de la estructuración del Piedemonte Llanero. Estas formaciones (figura 4) también actúan como sellos siendo el más importante y regional el miembro C8 del Carbonera (FAJARDO et. al, 2000).

Las principales acumulaciones de hidrocarburos en el área se encuentran en los niveles de areniscas del Grupo Guadalupe y las formaciones Barco y Mirador (figura 4). Las areniscas de estas formaciones tienen su aporte al este en el Escudo de la Guyana y por consiguiente son ricas en cuarzo. Esta secuencia de yacimientos se encuentra dentro de dos despegues principales como se muestra en la figura 4 (formación Gachetá y miembros basales del Carbonera C6/C8).

ERA	PERIODO	EPOCA	EDAD	Nomenclaturas Estratigráficas							
				PIED. LLAN. INGEOMINAS	META ECOPETROL	CASANARE ELF-AQUITAINE	ARAUCA INTERCOL	ARAUCA OCCIDENTAL			
CENOZOICO	Q	Pleistoceno									
		Plioceno	Tardío	CORNETA	Fm. NECESIDAD	Fm. GUAYABO	Fm. ISNOTU-PALOMAR	Fm. GUAYABO			
			Temprano		Fm. GUAYABO						
		Mioceno	Medio	CAJA							
			Temprano	DIABLO	SHALE LEON	SHALE LEON	SHALE LEON	SHALE LEON			
		Oligoceno	Tardío	SANFERNANDO	CARBONERA	CARBONERA	CARBONERA	CARBONERA			
	Temprano										
	Eoceno Tardío	Priaboniano	Fm. MIRADOR	T 2	Fm. MIRADOR	Fm. MIRADOR	Fm. MIRADOR				
	Paleoceno			SOCHA / LOS CUERVOS Arcillas		Fm. LOS CUERVOS	Fm. LOS CUERVOS				
				SOCHA / BARCO Arcillas		Fm. BARCO	Fm. BARCO				
Fm. GUADALUPE					Fm. GUADALUPE	Fm. GUADALUPE					
Fm. GACHETA					Fm. GACHETA	Fm. GACHETA					
MESOZOICO	CRETACEO	Tardío	Maastrichtiano	Fm. GUADALUPE	Fm. GUADALUPE	K1	Fm. GUADALUPE	K1	Fm. GUADALUPE	K1	
			Comanchiano	Fm. CHIPAQUE					Fm. GACHETA	Fm. GACHETA	Fm. CHIPAQUE
			Santoniano								
			Coniaciano								
			Turoniano								
	Campaniano										
	Temprano	Albino	Aptino	Fm. UÑE						Fm. UÑE	K3
	TRIÁSICO-JURÁSICO			Fm. BATA							
PALEOZOICO	COMBIBO - DEVONIANO		Fm. FARALLONES								
			Fm. GUSTAFME								
PRECAMBIANO				SASAMENIO CRISTALINO			(ESQUELO GUYANÉS)				

Figura 3. Carta de Correlación Estratigráfica de la Cuenca de los Llanos Orientales, Colombia. Fuente: Fajardo et al. 2000.

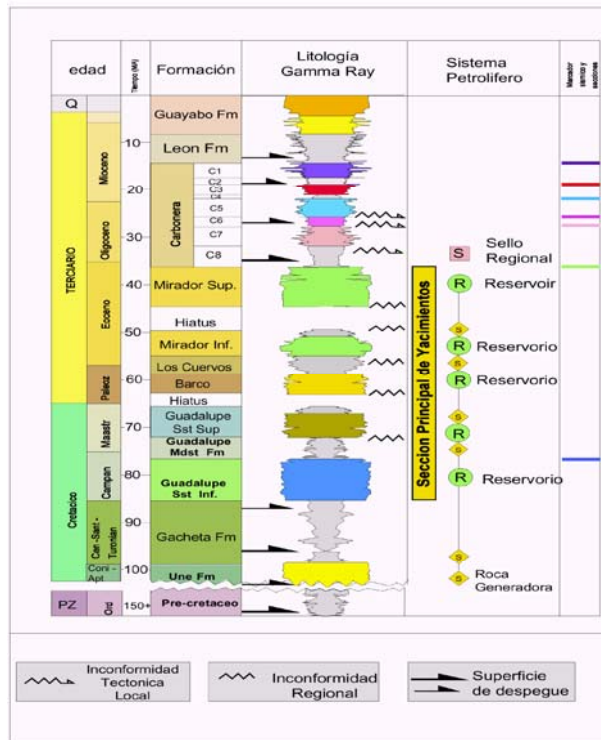


Figura. 4. Columna Estratigráfica Generalizada. Fuente: Martínez 2003.

A continuación se presenta una descripción geológica a escala regional de las formaciones de interés en el desarrollo de este trabajo.

3.1.3.1 Formación Carbonera

La Formación Carbonera es de edad Oligoceno a Mioceno temprano. Esta época corresponde a episodios transgresivos y regresivos de corta duración en mar epicontinental de poca profundidad y consiste en una alternancia de rocas arcillo-limosas, Limonitas, Limonita arenosa y areniscas, las cuales dan lugar a la diferenciación de ocho miembros: desde C1 hasta C8. El ambiente de depositación para la Formación Carbonera se interpreta como barras de estuarios, lagos o bahías para la base de la Formación Carbonera (Figura 5).

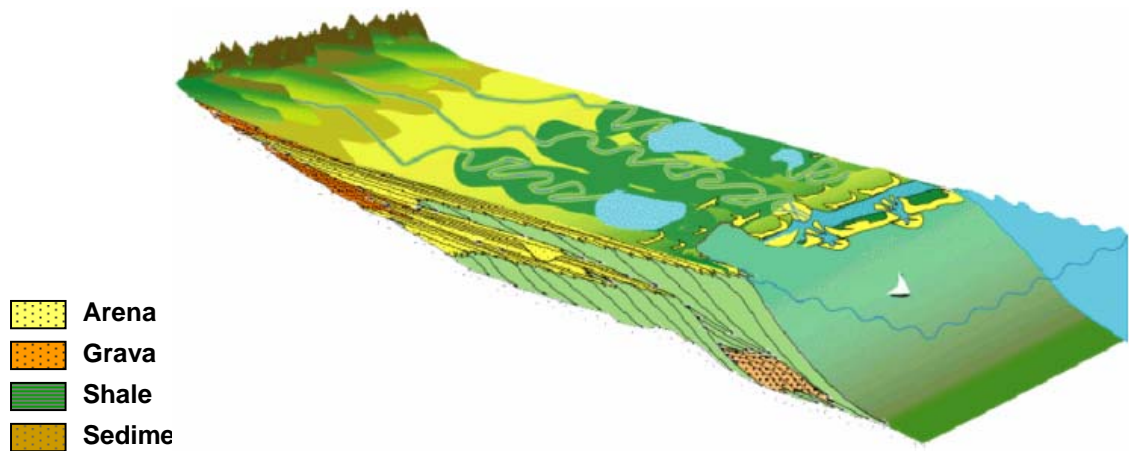


Figura. 5. Ambiente de deposición de la Formación Carbonera. Fuente: Virgilio y Naranjo, 2004.

Las unidades del C-6 al C-1 se desarrollaron como consecuencia de transgresiones y regresiones oligocenas-miocenas.

3.1.3.2 Formación León

La Formación León es de edad Terciaria (Mioceno medio) y constituye el único sello eficaz de la cuenca y representa la máxima invasión de los mares terciarios. La Formación León se depositó en ambientes lacustres con predominio de aguas dulces hacia el sureste y este de la cuenca y en ambientes de lagunas costeras, bahías o estuarios con influencia salobre hacia el noroeste y oeste de la cuenca (Figura 6). Está Compuesta por shales y arcillas, con delgadas Interestratificaciones.

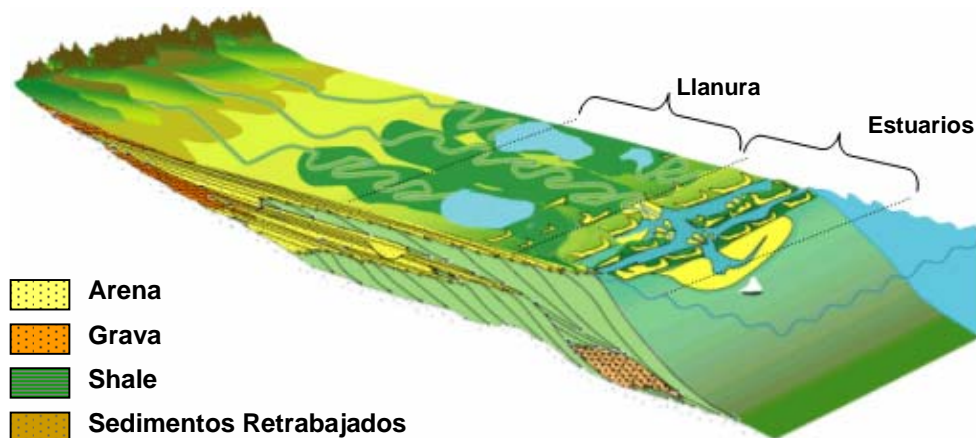


Figura 6. Modelo de ambiente de deposición de la Formación León Base. Fuente: Virgilio y Naranjo, 2004.

3.1.3.3 Formación Guayabo

La Formación Guayabo es de edad (plioceno) y representa la última sedimentación de la cuenca. Esta constituida por una alternancia de material detrítico, fino y grueso, mal clasificado en donde el miembro inferior es más arcilloso que el superior.. Los ambientes sedimentarios también varían, desde marino hacia la base y fluvio marino a continental hacia el tope (Figura 7).

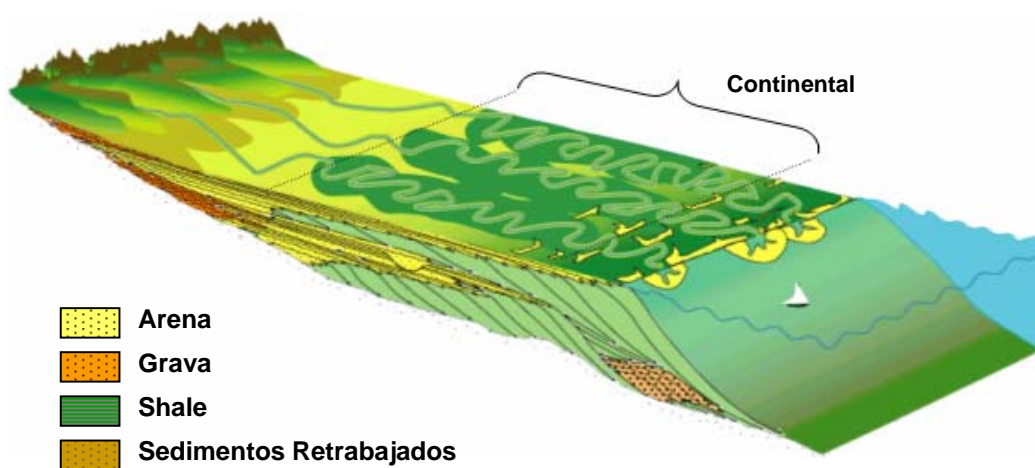


Figura. 7. Modelo de ambiente de deposición de la Formación Guayabo. Fuente: Virgilio 2004.

3.1.4 Geología Estructural

La complejidad de la cuenca aumenta a medida que avanza de sur a norte. Esta complejidad estructural en el subsuelo y en superficie se refleja en el deterioro de la calidad de la imagen sísmica (MARTINEZ, 2003).

La variación del estilo estructural a lo largo del Piedemonte central es en gran medida reflejo de la presencia de múltiples despegues y de la configuración del Basamento cristalino subyacente. La posición de estos despegues cambia de Oeste a Este ascendiendo estratigráficamente a medida que la deformación avanza, al igual que variando en la dirección de rumbo suroeste a noreste atravesando zonas de transferencia lateral. Para las estructuras en el bloque colgante del sistema Guaicaramo, el despegue se presenta en la formación Fómeque, luego asciende a la formación Gacheta en la zona triangular de cabalgamientos y posteriormente la deformación se transfiere a niveles superiores en los miembros inferiores del grupo Carbonera para finalizar en el Carbonera

superior y la formación León (MARTINEZ, 2003). Esta variación en la posición del despegue conlleva a la formación de estructuras tipo “duplex” o estacadas las cuales contienen diferente estratigrafía dependiendo de la posición del despegue inferior y superior y de su posición relativa en la cuenca. Por lo tanto a medida que el despegue asciende las estructuras involucran rocas cada vez más jóvenes (figura 8) lo que causa que en algunos sectores se encuentren zonas de apilados de hasta tres o cuatro laminas estructurales repitiendo las misma estratigrafía. Hacia el oeste y más profundo se encuentra un sistema que contiene rocas del Cretáceo Medio y al este y más somero la estructuración es dentro del Grupo Carbonera.

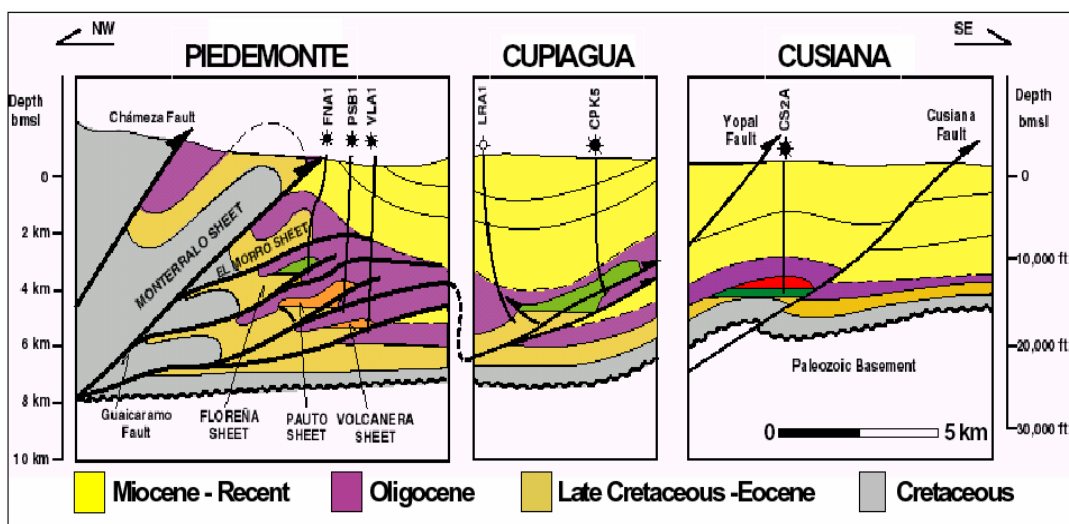


Figura 8. Sección estructural esquemática representando los diferentes estilos estructurales del Piedemonte Llanero. Fuente: Martínez 2003.

El mapa de la Figura 9 muestra los diferentes campos descubiertos a lo largo del tren y la Figura 8 es una sección estructural esquemática representando los diferentes estilos estructurales de estos campos y su posición relativa con respecto al tren. A manera general se presentan tres zonas de deformación: la zona del tren de estructuras frontales (ej, Cusiana), la zona de transición de estructuras aisladas (ej. Cupiagua) y la zona del tren de estructuras cabalgantes (ej. Volcanera, Pauto, Dele, Floreña).

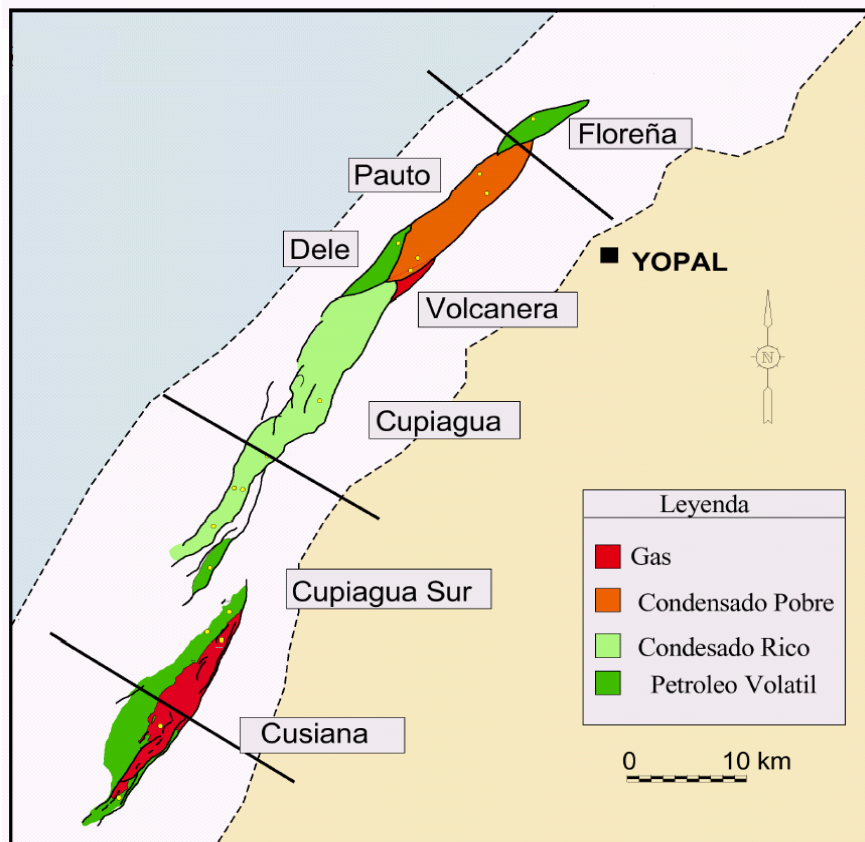


Figura 9. Campos descubiertos a lo largo del tren estructural en el Piedemonte. Fuente: Martínez 2003.

El estudio (MARTINEZ, 2003) de la geometría de las estructuras y de la historia cinemática del área ha permitido postular varias etapas de deformación en la evolución de estos campos. La etapa temprana, correspondiente a acortamiento paralelo a las capas y plegamiento antes de fallamiento, una segunda con despegues más profundos en las arcillolitas del Paleozoico la cual modifica las estructuras ya existentes y un último evento o simultáneo al anterior donde ocurre fallamiento fuera de secuencia (figura 10)

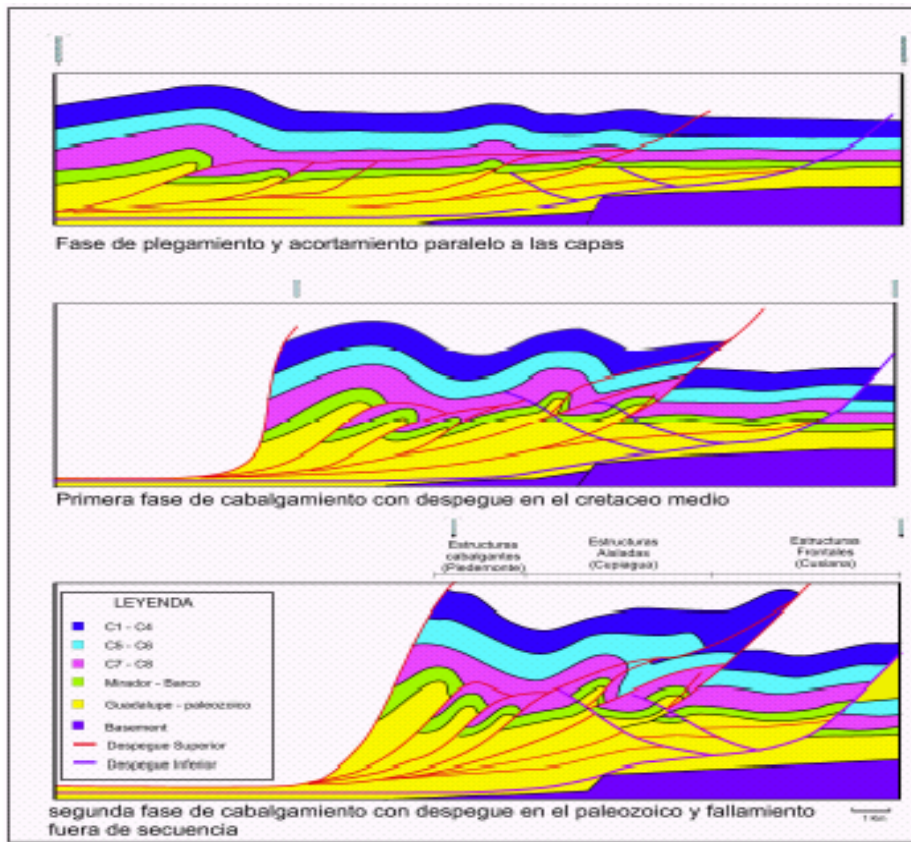


Figura 10. Restauración esquemática mostrando los diferentes tipos de estructuras y su posición con respecto a la cuenca. Estructuras frontales tipo Cusiana, estructuras aisladas apretadas tipo Cupiagua y estructuras cabalgantes "duplex" en una zona triangular tipo Piedemonte (Floreña, Pauto, Volcanera). Fuente: Martínez 2003.

3.1.5 Evolución Geológica de la cuenca Llanos

ECOPETROL en 1995 propone que la evolución geotectónica de la cuenca puede dividirse en las siguientes 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.

- Mastrichtiano – 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.
- 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.

Con base en la información de pozos, sísmica y afloramientos Ecopetrol (1995) plantea siete ciclos depositacionales mayores o megasecuencias limitados por inconformidades regionales. En el Paleozoico reconocen una megasecuencia del Cambro–Ordovícico (Grupo Quetame-Guejar) y una segunda megasecuencia del Devónico – Carbonífero (Grupo Farallones). El Mesozóico - Cenozóico inicia con una megasecuencia synrift I de edad Triásico – Jurásico, relacionada con el régimen extensivo de una cuenca de detrás de arco y también probablemente con la separación de Norteamérica y Suramérica en el área del Caribe. El desarrollo de la cuenca continuó durante el Cretáceo temprano depositando sedimentos marinos en una cuenca de detrás de arco; estos depósitos corresponden al relleno por subsidencia tectónica (synrift I) y constituyen el cuarto ciclo sedimentario.

En el Cretáceo tardío se depositan sedimentos en una cuenca de detrás de arco durante el periodo de subsidencia térmica (synrift II). En el Maastrichtiano temprano – Paleoceno la acreción final de la Cordillera Occidental creó el levantamiento de la Cordillera Central (Orogenia pre–Andina) y una subsidencia de la litosfera, generando una cuenca de antepaís pre-Andina (pre-andean foreland) y la depositación de una megasecuencia conformada por las Formaciones Barco y Los Cuervos que conforman el sexto ciclo depositacional. Durante el Eoceno temprano a medio ocurre un evento tectónico como

consecuencia de un basin rebound o retrogradación del forebulge debido a la cesación de la Orogenia pre-Andina, ocurre erosión e incisión de valles en el área de la Cuenca de los Llanos. Durante el Mioceno a Plioceno la colisión del Arco de Panamá generó la Cordillera Oriental (Orogenia Andina) y la cuenca de antepaís asociada (andean foreland) resultando en la depositación de la megasecuencia Andina. Esta megasecuencia pre-Andina terminal y Andina consta de las Formaciones Mirador, Carbonera, León y Guayabo.

3.2 MARCO GEOLOGICO LOCAL

A continuación se presenta la descripción geológica a detalle de las formaciones consideradas en este estudio a partir de la caracterización realizada por la empresa prestadora de servicios DATALOG COLOMBIA (2005).

3.2.1 Características de las Formaciones Perforadas

3.2.2.1 Formación Carbonera

- *Formación carbonera C7*

Esta unidad está conformada por intercalaciones de arenisca, limolitas y lodolitas con un espesor variable entre 400´ y 800´, aunque se ha reportado un máximo de 1100´.

Las areniscas son cuarzosas; de color gris claro, blanco grisáceo, localmente gris verdoso, gris pardusco; grano muy fino a fino; friables a duras; matriz arcillosa; comúnmente tienen inclusiones de material carbonoso; algunas tienen cemento ligeramente calcáreo; ocasionalmente glauconita.

Las limolitas son generalmente de colores pardos; localmente gradan a areniscas muy finas y casi siempre están asociadas con interlaminaciones carbonosas.

Las lodolitas son de color gris claro, gris medio, pardo o marrón claro y medio; algunas son de colores blancuzcos de consistencia blanda y plástica; también se presentan lodolitas carbonosas y piritosas localmente con inclusiones de siderita.

- *Formación carbonera C6*

Está compuesta por una secuencia homogénea de lodolitas raramente con interlaminaciones de limolitas. Su espesor promedio en la cuenca es de 300´ a 500´, aunque localmente se han reportado espesores hasta de 800´ en secuencias no falladas. Son lodolitas de color gris claro, gris medio y gris verdoso; subblocosa; subastillosa; moderadamente consolidadas a bien consolidadas.

- *Formación carbonera C5*

Es una secuencia de lodolitas con frecuentes intercalaciones de areniscas y limolitas. Ocasionalmente se presentan niveles carbonosos. El espesor de esta Formación varía entre 1200´ y 1500´.

La entrada al C5 está marcada por la aparición de areniscas abrasivas y/o limolitas pardo rojizas.

Las lodolitas son varicoloreadas; gris claro, pardo claro con moteados rojizos, rojo ladrillo, violeta y amarillos; ocasionalmente blancuzco; blandas. Las limolitas también son varicoloreadas al igual que las lodolitas.

Las areniscas son cuarzosas; de color gris claro, blanco y gris verdoso; grano fino y muy fino, friables a moderadamente duras, menor duras. *Aproximadamente 250´ debajo del tope, se presenta un desarrollo masivo de un cuerpo de arenisca cuyo espesor varía entre 30´ y 80´ de grano fino a grueso; friable; matriz arcillosa; localmente cemento calcáreo; inclusiones glauconíticas; e interlaminaciones de materia orgánica.*

Localmente se presentan niveles de costras ferruginosas y silíceas muy duras.

- *Formación carbonera C4*

Consiste de una sección de lodolitas de color gris claro, gris medio, menor gris pardusco y localmente gris verdoso; moderadamente consolidadas a bien consolidadas, subblocosa, subastillosa; con inclusiones piritosas. El espesor de esta unidad varía entre 120´ y 250´.

- *Formación carbonera C3*

Es una secuencia de intercalaciones de lodolitas, areniscas y limolitas. Su espesor varía entre 300´ y 400´.

Se produce un cambio neto con respecto a la secuencia lodosa suprayacente. La entrada al C3 se marca por la aparición de areniscas cuarzosas; gris claro y gris medio; menor gris verdoso y pardo claro; grano fino y muy fino; localmente limosas gradan a limolitas; localmente cemento calcáreo e inclusiones carbonosas.

Las limolitas son gris claro; pardo claro y medio; moderada a bien consolidadas; localmente gradan a areniscas; localmente presentan inclusiones carbonosas y piríticas.

Las lodolitas no presentan diferencias marcadas con las de la Formación anterior y conservan los colores gris claro, pardo claro y ocasionalmente gris verdoso.

En la parte superior e inferior de esta unidad son comunes los niveles carbonosos. Algunos de estos niveles principalmente hacia la base unos 10 o 30´ para entrar al C4, son realmente niveles de lodolitas carbonosas.

- *Formación carbonera C2*

Es una secuencia homogénea de lodolitas de color gris, gris verdoso, y tonos parduscos, moderada a bien consolidadas, astillosas; micropiríticas. En esta secuencia ocurren raras interlaminaciones de limolitas y de manera local se ha reportado la presencia de interlaminaciones de areniscas finas. Su espesor varía entre 450´y 800´.

- *Formación carbonera C1*

Es una unidad heterogénea de intercalaciones de lodolitas y areniscas con interlaminaciones menores de limolitas. Esta Formación alcanza un espesor variable entre 1400´y 1800´.

La entrada al C1 está marcado por la aparición de paquetes masivos de areniscas cuarzosas, grises, menor gris verdoso, ocasionalmente parduscas; grano fino a medio; friables a moderadamente duras; localmente presentan cemento calcáreo, matriz arcillosa e inclusiones de material carbonoso. En la parte superior y media estas areniscas ocurren intercaladas con lodolitas de color gris claro, gris verdoso, blanco, crema blancuzco, marrón o pardo rojizo, con moteamientos o manchamientos de colores rojizos, amarillentos y violáceos; son moderadas a bien consolidadas; blocosas; algunas son

astillosas; ligeramente limosas; no calcáreas; localmente piríticas y con inclusiones carbonosas.

Además de niveles masivos de areniscas, es importante destacar la presencia de lodolitas con moteados de colores rojizos, amarillento y violáceos, que aparecen entre 100´y 200´por debajo del tope de esta Formación.

Las interlaminaciones de limolitas son más frecuentes hacia la base y son de color gris, gris pardusco y localmente pardo rojizo; localmente gradan a areniscas y comúnmente presentan interlaminaciones e inclusiones carbonosas.

3.2.2.2 Formación León

La Formación León se ha dividido en tres miembros: Miembro Lodolita Superior, Miembro Arenisca Media y Miembro Lodolita Inferior.

- *Miembro lodolita superior*

Este Miembro consiste de una secuencia homogénea de espesor variable (500 a 1000 pies) de lodolitas grises, gris verdosas; consolidadas; blocosas; astillosas; con la aparición de una característica muy importante: *la fisibilidad*. Comúnmente son micropiríticas y ocasionalmente ocurren delgadas intercalaciones de limolitas.

Por tratarse de una secuencia litológica muy homogénea, la respuesta de la Rata de penetración (ROP) también es constante en su promedio e igualmente se establece una curva de gas muy homogénea. El material carbonoso desaparece en esta secuencia.

- *Miembro arenisca media*

Este miembro se puede presentar de dos maneras la primera como un paquete masivo de areniscas cuarzosas cuyo espesor varía entre 50´y 70´ con algunas intercalaciones de lodolitas grises y gris verdoso; blocosas; astillosas; subfísiles; micropiríticas. Estas areniscas son de color gris claro predominantemente y menor gris verdoso; de grano fino a muy fino; localmente limosas; matriz arcillosa y ocasionalmente con inclusiones carbonosas o glauconita.

La segunda como un intervalo de lodolitas con espesores entre 400´ y 700´ con intercalaciones de areniscas las cuales presentan un desarrollo masivo importante hacia la mitad del conjunto. También ocurren algunas intercalaciones menores de limolitas.

- *Miembro lodolita inferior*

Es una secuencia de espesor variable entre 550´ y 1100´ que consiste de lodolitas grises y gris verdoso que hacia la parte inferior van apareciendo colores parduscos. Estas lodolitas presentan intercalaciones menores de limolitas grises que hacia la parte inferior también adquieren tonalidades parduscas. En algunas áreas se han observado lodolitas solubles.

Estas areniscas son cuarzosas; gris claro a blancas; de grano fino; moderadamente friables, localmente con inclusiones carbonosas.

Como minerales traza se reportan pirita y dolomita y algunas veces hacia la base ocurre siderita.

3.2.2.3 Formación Charte

La Formación Charte está caracterizada por una facies más lodosa que la de la Formación suprayacente, en muchas clasificaciones no se reporta como es el caso en la figura 3. Sin embargo para algunas empresas petroleras con BP Company y algunas empresas prestadoras de servicios como DATALOG, se presenta esta formación como un paquete diferenciado de la Formación León.

Para esta formación se presentan intercalaciones de areniscas y limolitas. Comienzan a desaparecer los colores varicoloreados rojizos y se incrementan los colores grises y gris verdoso. Las lodolitas aparecen más consolidadas, blocosas, sublaminaadas, ligeramente solubles y micropiríticas. Las intercalaciones de areniscas son menos frecuentes y estas son de colores gris claro y gris blancuzco; predominantemente de grano muy fino a fino, menor grano medio; moderadamente friables; matriz arcillosa y generalmente presentan inclusiones de material carbonoso.

El espesor de la Formación Charte puede variar entre 1400 y 1900 pies.

3.2.2.4 Formación Guayabo

Esta Formación está constituida por una potente secuencia (del orden de los 5000 pies) de lodolitas varicoloreadas en donde predominan el marrón rojizo, rojo ladrillo con moteado de colores amarillentos. Son solubles, blandas a moderadamente consolidadas, plásticas, pegajosas y algunas tienen la característica de hincharse. La parte basal está caracterizada por colores grises claro y verde claro.

En toda la secuencia se presenta abundantes intercalaciones de areniscas grises, gris blancuzco, gris amarillento, gris verdoso; de grano fino a grueso; localmente conglomeráticas con gránulos de chert y fragmentos líticos; friables; mal seleccionadas; generalmente con matriz arcillosa.

3.2.2 Geología Estructural de Cupiagua

Los pozos considerados en este trabajo, se encuentran ubicados en el campo cupiagua, por tal motivo a continuación se hace énfasis en la geometría del campo.

La geometría general del campo Cupiagua corresponde a un anticlinal asimétrico (SOTO, 2001) que se clasifica como un fault propagation fold. Esta estructura esta asociada al bloque levantado de un sistema de fallas de cabalgamiento denominadas informalmente falla Core y falla Frontal. Estas fallas tienen vergencia SE con despegue dentro de los niveles arcillosos de la Formación Gacheta. La profundidad del despegue de estas fallas es menor hacia el norte, generando así una rampa lateral a partir de esta posición. En vista de planta estas dos fallas corren paralelas a lo largo de la estructura (figura 11).

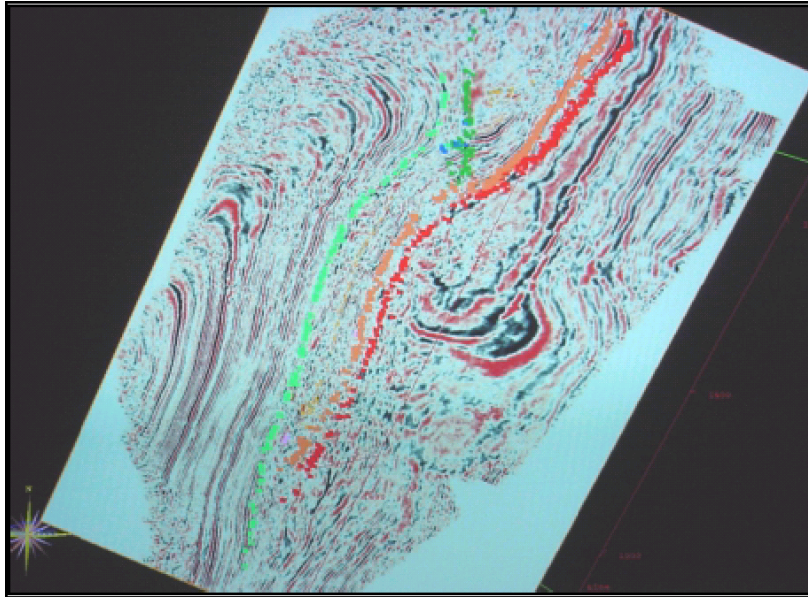


Figura 11. Plano Inclinado de Tiempo y Rumbo. Se puede ver el rumbo de las Fallas Core (Naranja) y Frontal (rojo) a lo largo de la estructura de Cupiagua, en verde se observa la Falla de Yopal. Fuente: Soto 2001.

El limbo frontal de esta estructura anticlinal es invertido, la porción invertida se limita hacia el techo por la falla Core y hacia la base por la falla Frontal. El eje axial de la estructura es 45° en azimuth, similar a las estructuras interpretadas en superficie, con lo cual se infiere que son estructuras de edades similares. A lo largo del eje tiene una extensión aproximada de 30 kilómetros y un ancho entre 3 y 7 kilómetros. El límite occidental de la estructura lo constituye un retrocabalgamiento asociado probablemente a una falla más profunda que la Falla Frontal y que hacia el sur se convierte en el campo Cupiagua Sur.

La estructura tiene un flanco trasero poco inclinado y elongado limitado en su parte más oeste por un retrocabalgamiento. En la parte norte de la trampa este retrocabalgamiento se interpreta como resultado cinemático de la falla frontal.

En la parte más norte del campo, a la altura del bloque Recetor, la estructura de Cupiagua está conformada por dos altos estructurales asociados a los bloques levantados de la falla Frontal (core fault) y del retrocabalgamiento separados por una estructura sinclinal; como

rasgos secundarios se tiene una serie de pequeños retrocabalgamientos con dirección similar al cabalgamiento principal

4. CAVINGS

Estudiar la estabilidad de un pozo en tiempo real, permite tomar acciones inmediatas para corregir y controlar cualquier evento indeseable durante la perforación.

Los análisis de cavings reducen enormemente la ambigüedad en los diagnósticos de inestabilidad, con base en observaciones y análisis en cuanto a: tasa (volumen), tamaño, morfología, litología, entre otros, como mencionó en capítulos anteriores.

4.1. MANEJO DE LA ESTABILIDAD DE POZO EN TIEMPO REAL

El manejo de la estabilidad de pozo en tiempo real involucra dos procesos:

. Monitoreo en tiempo real

El monitoreo en tiempo real integra todos los datos disponibles en la locación y se divide en tres categorías de análisis:

Información en superficie: Esta involucra los análisis de cavings-inestabilidad en el pozo, análisis de cuttings-limpieza del hueco, entre otros.

Datos de MWD (Measure While Driller): Involucra una serie de parámetros de perforación.

Datos de LWD (Measure While Logging): como los registros Gamma Ray, Resistivos, sínicos, predicción de presión de poro mientras se perfora, medidas de caliper entre otros.

. Acciones inmediatas

Estas acciones inmediatas hacen referencia a todos los correctivos que se llevan a cabo para solucionar o prevenir un problema de inestabilidad.

Para este en caso en particular, el interés radica en el análisis en tiempo real de la estabilidad de pozo con base en la utilización de cavings como mecanismo principal de detección de los posibles mecanismos de falla del pozo.

4.1.2. Monitoreo en Tiempo Real

Los cavings deben ser monitoreados debido a la importancia que representa un aumento en la tasa de cavings (volumen).

Este monitoreo consiste básicamente en tres pasos:

- El primero monitorear el volumen de cavings en función del tiempo.
- El segundo categorizar los cavings dentro de tres tipos, para lo cual existe una clasificación para cavings según su morfología y mecanismo de falla.
- El tercero reportar cuando la rata de cavings se incremente repentinamente.

La tasa de cavings es una medida del tiempo requerido para llenar una bandeja de capacidad conocida. Para calcular esa tasa, se lleva a cabo el siguiente proceso:

Se coloca una bandeja por rumba, por lo general cada bandeja tiene una capacidad de seis (6) galones; seguidamente se calcula el tiempo que se requiere para llenar esa bandeja -manejando unidades de barriles (bls) y horas (h)-; se debe tener en cuenta que ese valor corresponde al valor real de cuttings. Seguidamente se calcula el valor teórico de cuttings con ayuda de las dimensiones del hueco.

La resta del valor teórico y el valor real se asume como el valor de cavings, si ese valor es negativo significa que hay limpieza de hueco ineficiente y que se está quedando material en él.

Se debe tener especial cuidado con el tipo de actividad que se está llevando a cabo en el hueco en el momento de calcular la tasa de cavings, debido a que ésta es mayor cuando se está haciendo limpieza en comparación cuando se está perforando.

4.2 IMPORTANCIA DE LA INTERPRETACION DE CAVINGS

La producción e interpretación de estos fragmentos es muy importante básicamente por tres razones:

- Son una señal de alerta de inestabilidad de pozo.
- Son un indicador de cuales formaciones son inestables y cuales son los *posibles* mecanismos de falla.

- Ayudan a determinar un rápido correctivo; lo que se encuentra íntimamente ligado con los factores tiempo y costos.

4.3. CLASIFICACION MORFOLOGICA DE CAVINGS (BRADFORD et. al., 2000)

4.3.1 Cavings Angulares

En cuanto a su morfología, presentan formas irregulares y textura de superficie rugosa (Figura 12). Cada una de las nuevas superficies generadas, se convierte en nuevas superficies de fractura.

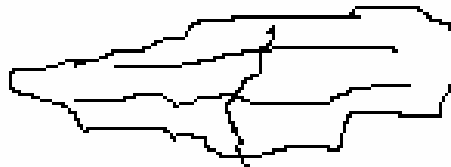


Figura 12. Apariencia de los cavings tipo angulares.

Su presencia indica que la concentración de esfuerzos en el pozo excede la resistencia compresiva de la formación dando como lugar a fallas por cizalla (Figura 13).



Figura 13. Caving angular asociados a fallas por cizallamiento.

4.3.2 Cavings en Bloque

Este tipo de cavings exhibe superficies planas y paralelas (Figura 14).



Figura. 14. Apariencia de los cavings tipo bloque. a vista frontal b vista superior c vista lateral

Estas superficies corresponden a planos preexistentes de debilidad como son la estratificación o las fracturas naturales.

Los cavings en forma de bloque indican Inestabilidad tectónica o estructural. Posiblemente por presión. Indican planos preexistentes de debilidad que se han desestabilizado (Figura 15).



Figura. 15. Caving en bloque de planos de debilidad: estratificación o fracturas Naturales.

4.3.3 Cavings Astillosos

Estos cavings presentan una morfología elongada, son laminados y cóncavos (Figura 16).



Figura. 16. Apariencia de los cavings tipo astilloso.

Muestran dos superficies cercanamente paralelas que pueden exhibir estructura tipo pluma.

Son el resultado de presiones, y se encuentran relacionados con el 'astillamiento' de la pared del hueco dando como resultado fallas tensiles (Figura 17).



Figura. 17. Caving astilloso resultado de fallas tensiles.

Una de las litologías más propensa a la formación de cavings astillosos son los shales (Figura 18).



Figura. 18. Shale astilloso Causado por fallas tensiles a lo Largo de la circunferencia del pozo.

4.3.4 Otros Tipos de Cavings

Aquellos que cumplen con la definición de caving pero que morfológicamente no coinciden que ninguno de los tipos anteriormente nombrados.

Existen zonas llamadas “Zonas De Ripios” las cuales pueden ser causadas de manera natural debido a los cambios en los esfuerzos en el subsuelo. Son muy comunes en zonas cerca de cuerpos de sal y fallas activas (Figura 19).

Se ha encontrado que las zonas cercanas a *CUERPOS SALINOS Y DIAPIROS* presentan características muy importantes:

- La sal afecta los esfuerzos en las rocas alrededor de los diapiros.
- El emplazamiento del cuerpo genera fracturamiento
- Existencia de shales sobrepresurizados alrededor de los diapiros.

Sin embargo se debe tener en cuenta que el mecanismo de fractura debido a una compresión excesiva puede conducir a la formación de cualquiera de los cuatro tipos de cavings, al mismo tiempo o en sucesión.

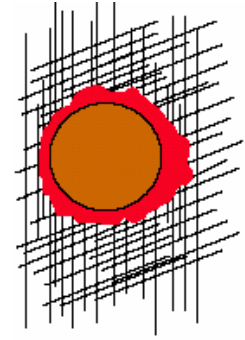
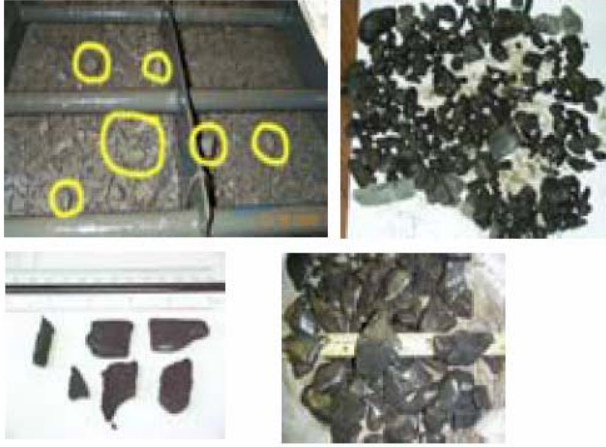


Figura. 19. Zonas De Ripios” las cuales pueden ser causadas de manera natural debido a los cambios en los esfuerzos en el subsuelo.

5. VENTANA OPERACIONAL

El desarrollo de la perforación en zonas como el Piedemonte Llanero Colombiano, implica el reto de enfrentarse a grandes esfuerzos horizontales que pueden causar fallas por tensión y por compresión en las paredes del pozo (MATEUS et. al., 2000).

Además de los esfuerzos in situ y desde el punto de vista mecánico, el comportamiento de un pozo dependerá de las propiedades mecánicas de la roca atravesada, la trayectoria del mismo y el peso de lodo utilizado. De estos factores solo los dos últimos son manipulables durante la perforación para mejorar las condiciones del pozo o minimizar el efecto de los factores que son inmodificables.

La metodología utilizada fue planteada por el equipo de investigación del proyecto “Impacto Geomecánico en los Costos de Desarrollo del Piedemonte Llanero” y se presenta en la Figura 20.

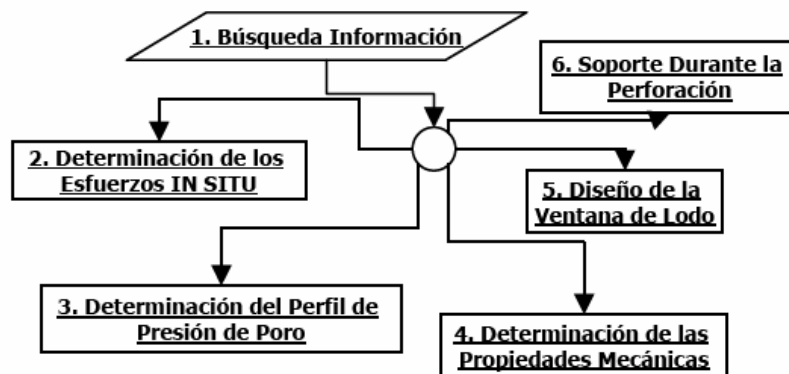


Figura. 20. Metodología implementada para el desarrollo del modelo geomecánico.

El desarrollo de los modelos geomecánicos involucra dos etapas, una de recomendaciones durante la planeación y otra de seguimiento a la operación o calibración del modelo generado (Figura 21)

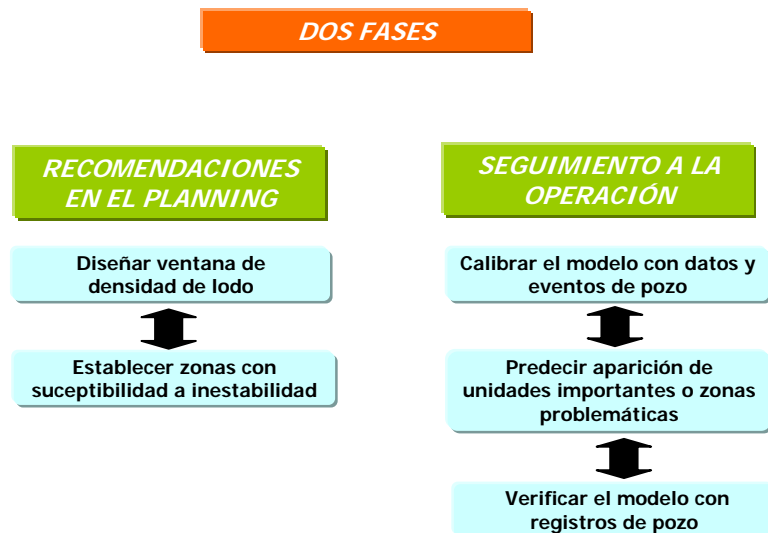


Figura. 21. Metodología implementada para el desarrollo del modelo geomecánico.

5.1 DISEÑO DE LA VENTANA OPERACIONAL

Un análisis de estabilidad de pozo es un estudio que integra las propiedades mecánicas de las rocas, su estado de esfuerzos y algunos criterios de falla para determinar una ventana segura de lodo (MATEUS et. al., 2000). Esto decir, un rango de pesos de lodo apropiado para la perforación de las diferentes formaciones.

El modelo geomecánico se desarrolla para uno de los pozos cercanos al pozo prospecto (llamados offsets), se revisan los eventos, los reportes de perforación y registros tanto de este pozo como de otros pozos offsets para validar la información, una vez finalizado y validado el modelo con ayuda de los registros Gamma Ray y los topes del pozo prospecto, se procede a extrapolar la información.

5.1.1 Determinación de los esfuerzos, de las propiedades Mecánicas y de la presión de Poro

Se ha desarrollado una metodología estandarizada para la determinación de las propiedades y parámetros necesarios para el desarrollo del modelo geomecánico.

Esta metodología consiste en la caracterización de tres factores que son; el estado de esfuerzos in situ, las propiedades mecánicas de las rocas y la presión de poro (MATEUS et. al., 2000). .

5.1.1 Determinación del Esfuerzo Vertical

El método más directo para determinar el gradiente de esfuerzo de sobrecarga u overburden, es la integración del registro de densidad con la profundidad.

$$(Ecuación 1) \quad s_v = g \left[\int_b^z \rho_b * dz \right]$$

Donde: ρ_b : es la densidad reportada en el registro RHOB.

Después de calculado este esfuerzo, es comparado con los datos obtenidos para los pozos offsets.

5.1.2 Determinación del Esfuerzo Mínimo Horizontal

Para determinar el esfuerzo mínimo horizontal se utilizaron los resultados de las pruebas de integridad de formación (FIT) y pruebas leak-off realizadas en los pozos para la calibración.

Este esfuerzo puede ser calculado mediante dos relaciones, como se muestra en las ecuaciones 2 y 3

$$(Ecuación 2) \text{ Hubbert y Willis} \quad \sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_{ver} - Pp) + Pp$$

$$(Ecuación 3) \text{ Saltz} \quad \sigma_h = 0.57e^{(0.55*Pp)}$$

Los datos que se reportan en dichas pruebas, corresponden a la presión de fuga de la formación, la cual a su vez, corresponde al límite inferior del gradiente de fractura de la formación. La presión de fractura es definida como la presión a la cual una formación expuesta se romperá y aceptará todo el fluido de perforación desde el pozo, esta presión varía con la profundidad y representa la máxima densidad del fluido de perforación que puede ser tolerada sin ocasionar fractura en las zonas expuestas y en zonas débiles debajo del zapato del revestimiento.

5.1.3 Determinación del Esfuerzo Máximo Horizontal

Este esfuerzo se puede determinar a partir de las siguientes relaciones:

$$\text{(Ecuación 4)} \quad \sigma_H = 3\sigma_h - P_{fractura} - P_p + T_o$$

$$\text{(Ecuación 5)} \quad P_{fractura} = \sigma_h - 3\text{ó}4\% \sigma_h$$

Una vez la magnitud ha sido calculada, la siguiente etapa consiste en determinar la orientación de los esfuerzos in situ.

En el caso de los esfuerzos horizontales, se parte de la suposición que las fallas de pozo provocadas por esfuerzos se orientan en la dirección de estos según su naturaleza.

Si se tienen fallas de cizalla provocadas por bajo peso de lodo (breakout) estas se encuentran orientadas en la dirección de la mayor concentración de esfuerzos compresivos (dirección del mínimo esfuerzo horizontal) y las fallas provocadas por tensión con peso de lodo alto (fracturamiento hidráulico) se orientan en dirección del máximo esfuerzo horizontal como se muestra en la Figura 22.

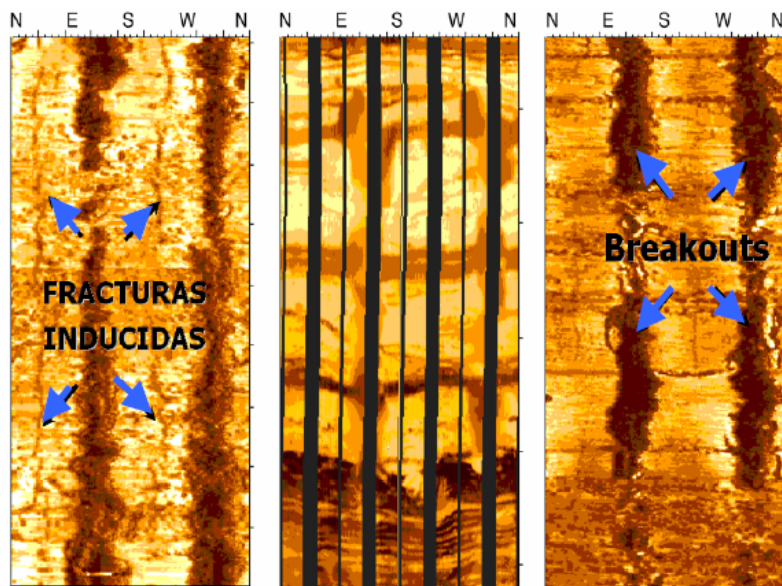


Figura. 22. Registro de imagen (UBI) en el cual se observan fallas de pozo compresivas (Breakout) y de tensión fracturas hidráulicas. A la izquierda se observan fallas de tensión provocadas por excesivo peso de lodo, a la derecha fallas de compresión por concentración de esfuerzos compresivos en la dirección del mínimo esfuerzo horizontal. Tomado de GGS 2003.

5.1.4 Determinación de la Presión de Poro

Existen tres métodos para calcular la Presión de poro:

- Mediante Registros Resistivos
- Mediante Registros Sónicos, Ecuación de Eaton
- Mediante la utilización de Parámetros de Operación

El más utilizado para determinarla, es el calculado a partir de registros sínicos. Esto se debe principalmente a la información disponible y al mejor ajuste que se ha encontrado para los casos analizados en el Piedemonte.

El procedimiento utilizado en la estimación del perfil de presión de poro se basa en la correlación de Eaton, utilizando el parámetro de ajuste para la correlación del Modelo Geomecánico para análisis de estabilidad de pozo.

El parámetro de correlación para ajuste depende de la fuente de datos que se tenga. En varios casos se utiliza el registro sínico (D_T) teniendo en cuenta la relación que existe con el gradiente de presión de poro normal, mediante las siguientes relaciones:

$$\text{(Ecuación 6)} \quad Pp = \sigma_v - (\sigma_v - Pp_{normal})(f^\alpha)^{n(3.61.2)}$$

$$\text{(Ecuación 7)} \quad f^\alpha = (D_{TNormal} / D_{TObservado})$$

El valor del $D_{TObservado}$ corresponde al valor leído directamente del registro y el valor del $D_{TNormal}$ corresponde a la pendiente de la línea de tendencia del perfil $D_{TObservado}$. Para ese cálculo del $D_{TNormal}$, se utilizan las ecuaciones de las líneas de tendencia, generalmente son dos líneas, las cuales agrupan dos intervalos de características similares, el primero va de la Formación Guayabo hasta la Formación Charte y el segundo va del miembro C1 de la Formación Carbonera en adelante.

Otra de las formas muy utilizadas para la evaluación de la Presión de Poro preferiblemente en la etapa de calibración es la de la utilización de parámetros operacionales, mediante la siguiente ecuación:

(Ecuación 8)

$$Pp = \sigma_v - (\sigma_v - Pp_{normal})(f^\alpha)^{n(3.61.2)}$$

(Ecuación 9)

$$f^\alpha = (D_{xobservado} / D_{xnormal})$$

(Ecuación 10)

$$D_{xobservado} = \left[\frac{\text{Log}\left(\frac{ROP}{60 * RPM}\right)}{\text{Log}\left(\frac{12 * 1000 * WOB}{1 * 10^6 * BIT}\right)} \right]$$

ROP: Rata de Penetración Es posible determinar las propiedades mecánicas con base en

RPM: Revoluciones por minuto ROP

WOB: Peso sobre la broca

BIT: Diámetro de la broca.minuto

5.1.5 Determinación de las Constantes Elásticas de las Formaciones

Es posible determinar las propiedades mecánicas con base en las velocidades de la onda compresional y la onda de corte. El procedimiento a seguir para establecer esta relación es el siguiente:

- Se determina la velocidad de la onda compresional a partir de los datos de tiempo de transito reportados en el registro sísmico (DT).
- Se determina la velocidad de la onda de corte con base en las velocidades de la onda compresional y el tipo de litología. Con este objetivo se han desarrollado un gran número de correlaciones empíricas. Entre ellas las propuestas por Han para arenas arcillosas.

$$\text{Han's (1986) relationship: } V_s \text{ (km/sec) } = 0.842 V_p - 1.099 \text{ \{for clay > 25\% \}} \text{ (8)}$$

$$\text{Han's (1986) relationship: } V_s \text{ (km/sec) } = 0.754 V_p - 0.657 \text{ \{for clay < 25\% \}} \text{ (8)}$$

- Con base en las velocidades antes calculadas, se determina el valor de la relación de Poisson.

(Ecuación 11)

$$v = \frac{2 - \left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_c}\right)^2}{2 * \left(1 - \left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_c}\right)^2\right)}$$

De acuerdo con datos reportados en la literatura, la relación de Poisson dinámica suele ser entre 40 y 60 % mayor que la relación de Poisson estática. Dicha diferencia suele incrementarse con el incremento de porosidad, razón por la cual es necesario corregir el valor calculado por porosidad.

- Se calcula un registro sintético de porosidad a partir de los tiempos de transito de la onda compresional.

(Ecuación 12)

$$Por_s = \frac{I_c - 60}{189 - 60}$$

- La porosidad así calculada debe ser corregida por compactación

(Ecuación 13)

$$Por_{corr} = Por_s * \frac{1}{\frac{I_c}{100}}$$

- Finalmente, se construye un registro sintético de densidad, el cual es utilizado junto con los datos previamente calculados de relación de Poisson para calcular el modulo de corte (G), el modulo de Young (E), el modulo

volumétrico, la compresibilidad volumétrica y finalmente la cohesión de la roca. Las ecuaciones para el cálculo de estas variables son presentadas a continuación.

$$(Ecuación 14) \quad G = 1.34e10 * \frac{(1 - 2 * \nu)}{2 * (1 - \nu)} * \frac{RHOB}{I_c}$$

$$(Ecuación 15) \quad E = G * (1 + \nu)$$

$$(Ecuación 16) \quad \tau_0 = \frac{0.026}{K * 1e6} * E * (0.008 * V_{cl} + 0.0045 * (1 - V_{cl}))$$

5.2 DETERMINACION DE LA VENTANA OPERACIONAL (MATEUS et. al., 2000).

Una vez determinados los parámetros se procede a plantear la ventana operacional. Esta ventana permite identificar posibles zonas inestables al momento de perforar o durante los viajes de tubería.

Realizando un análisis de estabilidad es posible visualizar de manera más fácil, que clase de inconvenientes pueden presentarse durante la operación. Se debe tener en cuenta que los problemas causados por inestabilidad de pozo no siempre pueden ser evitados por completo, pero si pueden ser manejados operacionalmente, por ejemplo, con mejoras en las condiciones de limpieza de hueco o replanteamiento de la trayectoria del pozo.

El software utilizado en este análisis es el AGE, herramienta desarrollada por el ICP, que permite mediante la incorporación de datos de registros y algunos otros parámetros, facilitar el cálculo de todas las propiedades, sin embargo es importante realizar cálculos manuales de estas propiedades con el fin de revisar la información final presentada por el programa.

5.3 DESARROLLO VENTANA OPERACIONAL POZO YZ-10 (MATEUS et. al., 2000).

Para el desarrollo de este modelo se utilizó la información de las historias de perforación, parámetros operacionales y registros de los pozos offsets YT8 y YT9.

5.3.1 Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas se calcularon de acuerdo con la metodología planteada anteriormente.

Primero con base en la información de los pozos offset se realiza la ventana operacional de uno de los pozos y después se extrapola al pozo prospecto incluyendo algunas variaciones en cuanto a inclinación, azimuth, casing y topes de formación.

Para este pozo se utilizó la información de los pozos offsets YT8 y YT9, debido a su cercanía, posteriormente durante la visita al pozo YZ durante la etapa de perforación, se ajustaron los topes de las formaciones de acuerdo a los reportes de Geología y la litología la cual puede hacer variar algunas o todas las propiedades inicialmente cargadas.

En la figura 23 se muestran algunas propiedades como la cohesión, la relación de Poisson y la resistencia tensil.

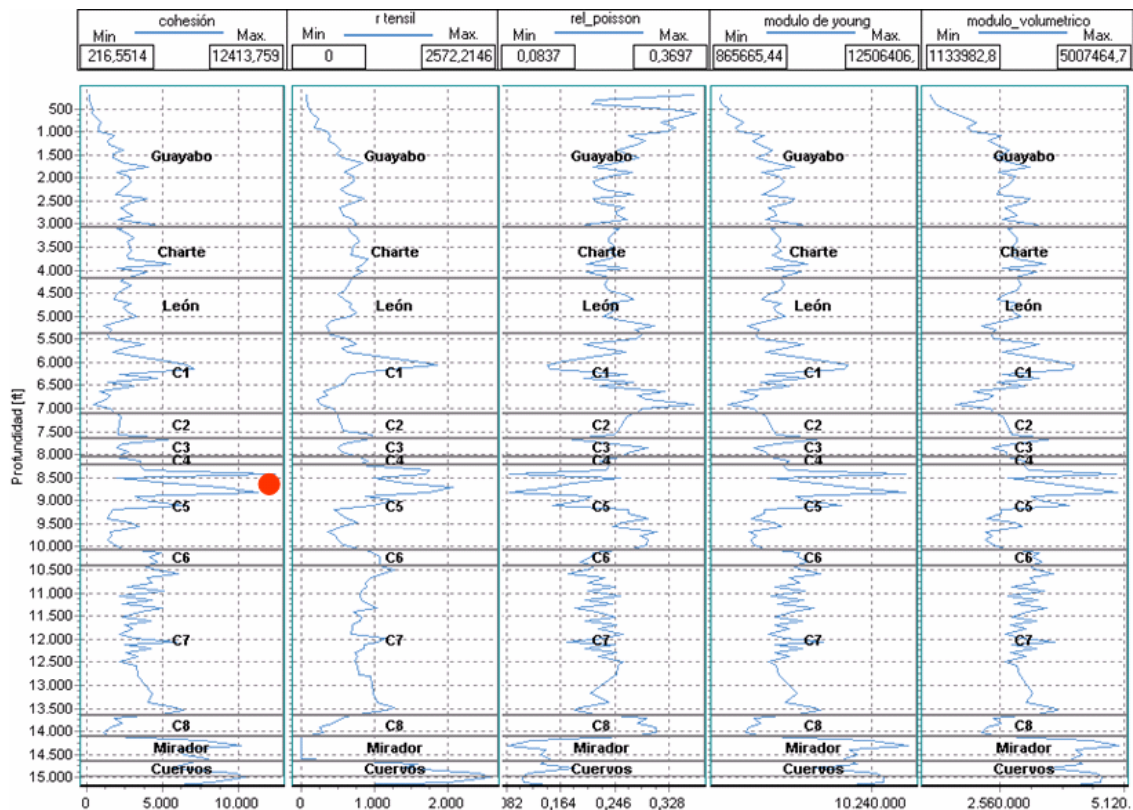


Figura. 23. Propiedades mecánicas pozo YZ10 a partir del VSP del YT8 y datos de calibración parcial

5.3.2 Determinación de Esfuerzos

5.3.2.1 Esfuerzo Vertical

Para la calibración parcial del registro de densidad se tuvo en cuenta además de las pruebas de shale density, un tren normal de densidades preestablecidas en la industria del petróleo (DATALOG), Tabla 1.

Tabla 1. Tren Normal de densidad de arcilla con profundidad

MD (ft)	Densidad (g/cc)
superficie	~ 1.9
2000´	~ 1.95 – 2.00
4000´	~ 2.2
6000´	~ 2.3
8000´	~ 2.4
10000´	~ 2.4 – 2.45
12000´	~ 2.5
14000´	~ 2.5 – 2.55

Las pruebas de shale density se realizaron teniendo en cuenta el registro Formation Evaluation Log (FEL) construido en tiempo real por los geólogos de DATALOG del pozo.

La prueba utilizada se basa en el principio de Arquímedes y la fórmula empleada para el cálculo de la densidad es la siguiente:

$$(Ecuación 17) \quad \rho = \frac{V}{W}$$

Donde: ρ es la densidad del Shale, V es el volumen desplazado por la muestra utilizada, y W es el peso de la muestra. Este método es el más sencillo y recomendado para pruebas de campo, ya que el solvente utilizado es agua y los implementos necesarios son una probeta para medir densidad de sólidos y una balanza de precisión.

5.3.2.2 Magnitud Esfuerzo Mínimo Horizontal

Para el cálculo de este esfuerzo se utilizaron los resultados de las pruebas de integridad de formación (FIT) que han sido corridas en todos los pozos del bloque Recetor. Los datos reportados en dichas pruebas, corresponden a la presión de fuga de la formación, la cual a su vez, corresponde al límite inferior del gradiente de fractura de la formación.

El valor promedio para el esfuerzo fue de 0,7732 psi/pie; aunque este valor representa más un gradiente de esfuerzo regional que local. Las pruebas fueron tomadas de pozos que estaban ubicados tanto en el flanco como en la cresta de la estructura. Esto se hizo con el fin de buscar alguna variación en la magnitud del gradiente de esfuerzo mínimo dependiendo de la profundidad, sin embargo el resultado mostró una tendencia casi lineal indicando que no existía variación del gradiente. Sin embargo hay que resaltar que una prueba FIT no es la mejor forma de estimar el gradiente de esfuerzo mínimo por razones propias de la prueba, ya que esta no se realiza ni siquiera mediante un ciclo. Por otra parte, sin embargo, el dato obtenido es consistente con los datos reportados en la literatura para otros pozos ubicados cerca de la región.

5.3.2.3 Magnitud Esfuerzo Máximo Horizontal

Para calcular este esfuerzo no existe en la industria un método o técnica de estimación directa, normalmente se calcula a partir de correlaciones basadas en pruebas LOT, fracturamiento hidráulico y fallas de pozo inducidas durante la perforación tales como los breakouts y las fracturas por tensión.

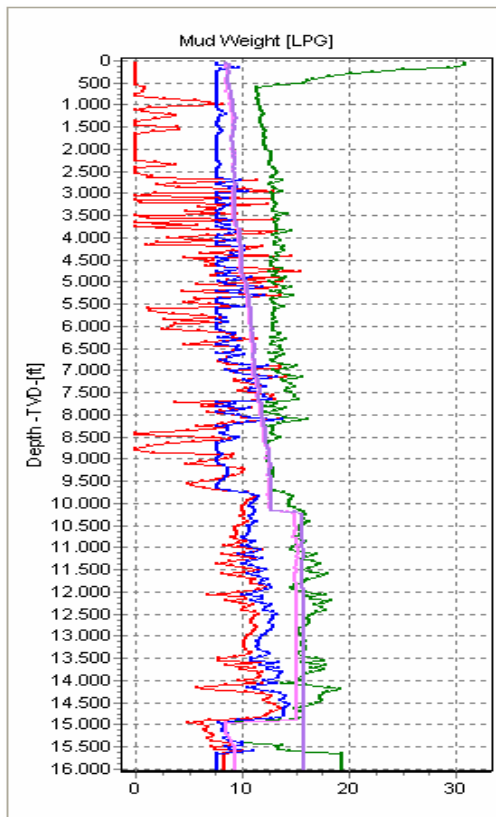
De las relaciones que se presentan en la literatura como una opción para medir la magnitud del esfuerzo máximo se eligió la correlación de Kirsch (Ec. 7 y 8) debido a que es la técnica que más se ajusta por existencia de datos y por condiciones geológicas propias del Piedemonte.

Una vez se realizaron los cálculos y se determinaron las propiedades, se desarrolló el modelo geomecánico con ayuda del software AGE.

Este modelo fue subsecuentemente calibrado con la información real del pozo, es decir, durante la operación de perforación. Algunos perfiles fueron entonces calibrados y recalculados.

Los cavings fueron registrados pero los niveles fueron relativamente bajos y no causaron problemas de empaquetamiento Aunque las tasas de cavings son bajas es normal que se aumente ligeramente la rata de formación en las zonas lutíticas como por ejemplo en los miembros C2 y C4.

Finalmente se obtuvo la ventana operacional (Figura 24)



- Línea roja = Peso de lodo de colapso
- Línea verde = Peso de lodo de fractura
- Línea azul = Presión de poro
- Línea rosada = Peso de lodo estático utilizado
- Línea lila = Peso de lodo dinámico utilizado

Figura.24. Ventana Operacional calibrada para el pozo YZ-10

5.4 DESARROLLO VENTANA OPERACIONAL POZO ED-41 (MATEUS et. al., 2000).

Para el desarrollo de esta ventana se utilizó la historia de perforación y los registros de los pozos offsets E7 y E10.

Para realizar el modelo se sigue el procedimiento ya mencionado, calculo de propiedades, utilización de historias de perforación y registros; luego la extrapolación de toda esta información al pozo de interés o pozo prospecto y su posterior calibración ya durante la etapa de perforación.

En la Figura 25 se muestran algunas de las propiedades mecánicas calculadas.

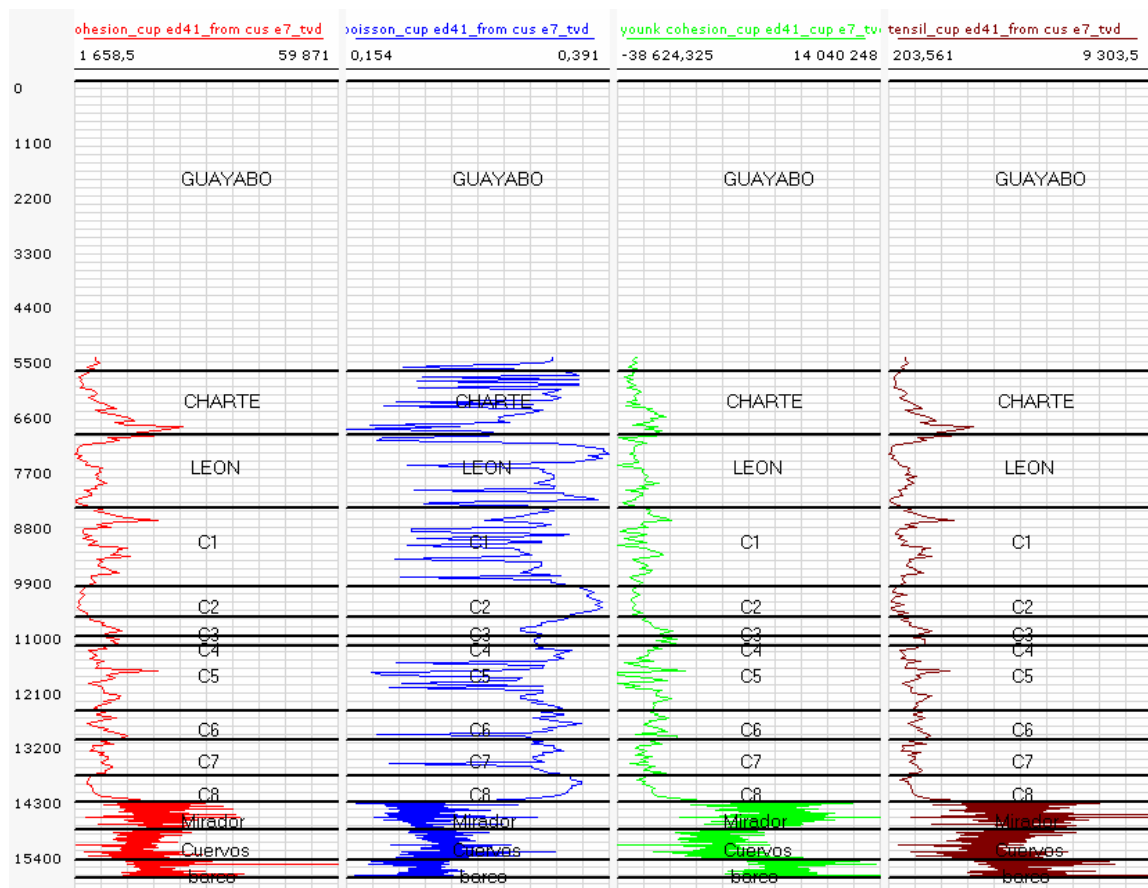


Figura 25. Propiedades Mecánicas calculadas para el pozo E7 y extrapoladas al pozo ED-41.

La calibración del modelo antes de la perforación se realizó a partir de algunas pruebas realizadas en los pozos offsets, entre ellas la FIT así como también de los eventos reportados como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Eventos y pruebas utilizados en el desarrollo del modelo geomecánico.

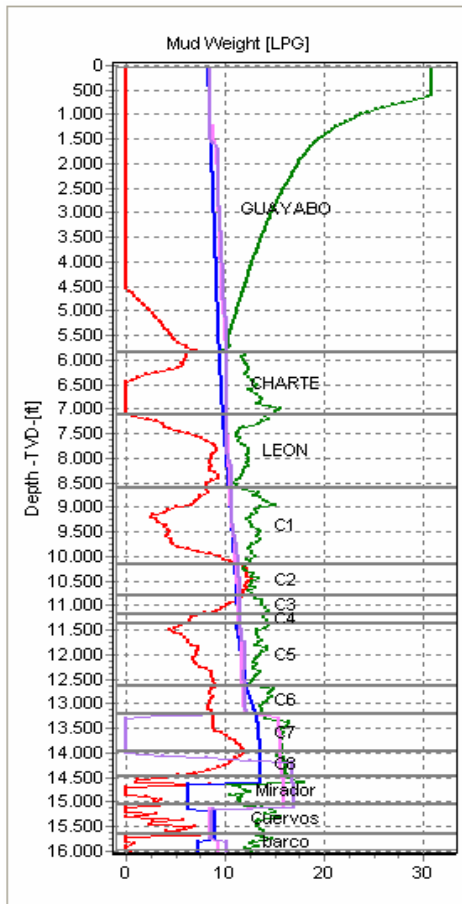
Prueba (tvd)	EMW (ppg)	Prueba (tvd)	EMW (ppg)
1168	13,4	8479	15,9
1190	14,5	8860	13,5
1195	12,52	8905	15,6
1205	11,2	9361	19,6
1222	13,9	10022	12,8
1239	15	10253	15,4
1284	16	10600	16,27
1285	14,8	10643	15,3
1308	14	11085	12,61
1325	12,85	11401	17,07
1513	13,9	11442	15
1799	16	11800	13,2
1819	14,28	12435	14,07
1935	18,16	12743	13,5
1935	13,4	12987	15,5
1977	14,65	13081	19
2024	15,18	13539	10,67
2504	17,28	13570	16
5803	16,3	13802	17
7106	14,7	14480	14,28
7557	17,72	15346	10,5
7873	16,6	15644	16,6
8396	16,48	16081	15,43

TVD	INFLUJO
14470	1

MD	PEGAS
12680	1
13813	1

El valor del gradiente del esfuerzo mínimo horizontal fue de casi 0.95psi/ft, el valor calculado para el gradiente del esfuerzo máximo horizontal fue aproximadamente de 1.2psi/ft.

El resultado final fue entonces la ventana operacional calibrada del pozo, que se muestra en la figura 26.



- Línea roja = Peso de lodo de colapso
- Línea verde = Peso de lodo de fractura
- Línea azul = Presión de poro
- Línea rosada = Peso de lodo estático utilizado
- Línea lila = Peso de lodo dinámico utilizado

Figura 26. Ventana Operacional calibrada para el Pozo ED-41

6. APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE CAVINGS A LA ESTABILIDAD DE POZOS

Como se mostró en el capítulo 4, los cavings son muy importantes en cuanto a que son indicadores de inestabilidad en el hueco y por tanto pueden ayudar a corregir a tiempo algunos problemas durante la perforación del pozo.

Es importante plantear una metodología de estudio de cavings y definir el mejor modo para revisarlos.

A continuación se presenta la metodología a utilizar y los aspectos que fueron considerados en el estudio.

6.1 METODOLOGIA DE TRABAJO

Para el desarrollo de ese estudio se plantearon las siguientes tres actividades de trabajo (figura27):

- **TRABAJO DE CAMPO**

El objetivo de esta fase fue conocer y adquirir experiencia asociada con la producción de cavings y la revisión de la clasificación, descripciones y demás factores y consideraciones que se debían tener en cuenta. Esta actividad se realizó directamente en los pozos que se trabajaron.

- **TRABAJO DE LABORATORIO**

Este trabajo involucró la toma del registro fotográfico (figura 27) y la caracterización litológica de los cavings disponibles.

Esa caracterización comprendió: litología, porcentajes visuales, morfología y tamaño.

Morfológicamente se tuvo en cuenta los siguientes tipos de cavings: angulares, astillosos, blocosos, retrabajados, platy (formas planas y en ocasiones cóncavas, como su nombre lo indica en forma de plato) y tabulares; y los tamaños fueron reportados en mm.

- TRABAJO DE OFICINA

Este trabajo de oficina constó de dos fases, una fase previa de revisión y búsqueda de información y una fase posterior enfocada en los resultados.

PRIMERA FASE

Este trabajo llevó a cabo dos tareas principales:

/ Realizar una revisión bibliográfica con ayuda de publicaciones, experiencias en campo etc.

/ Recopilar información de los pozos, lo cual incluye historias operacionales, parámetros de perforación, reportes diarios de geología, survey, bit record, datos de lodo, registros, feld, y hacer una revisión de la caracterización litológica de los cavings reportados durante la perforación de los pozos.

SEGUNDA FASE

Esta segunda fase está conformada por tres tareas:

/ La creación del catalogo, apoyado tanto por el trabajo de laboratorio como por el trabajo de oficina.

Este formato del catálogo incluyó las curvas de los parámetros de perforación: ROP, GPM, SPP, TRQ, además de cavings y cuttings y ventana de lodo; por otro lado muestra la columna del registro fotográfico, y de las descripciones de los cavings.

/ Análisis de los resultados finales: enfocado en la observación del comportamiento de cada parámetro escogido en relación con la producción de cavings, la correlación de la caracterización de los cavings entre los pozos seleccionados así como del mecanismo de falla obtenido a partir de esta caracterización y a partir de la utilización de la ventana de lodo y la evaluación del ángulo de ataque y el esfuerzo máximo horizontal.

/ Elaboración del libro, el cual recopiló todos los resultados del trabajo de oficina, de campo y de laboratorio; junto con la teoría resultado de la revisión bibliográfica y de la experiencia en campo.

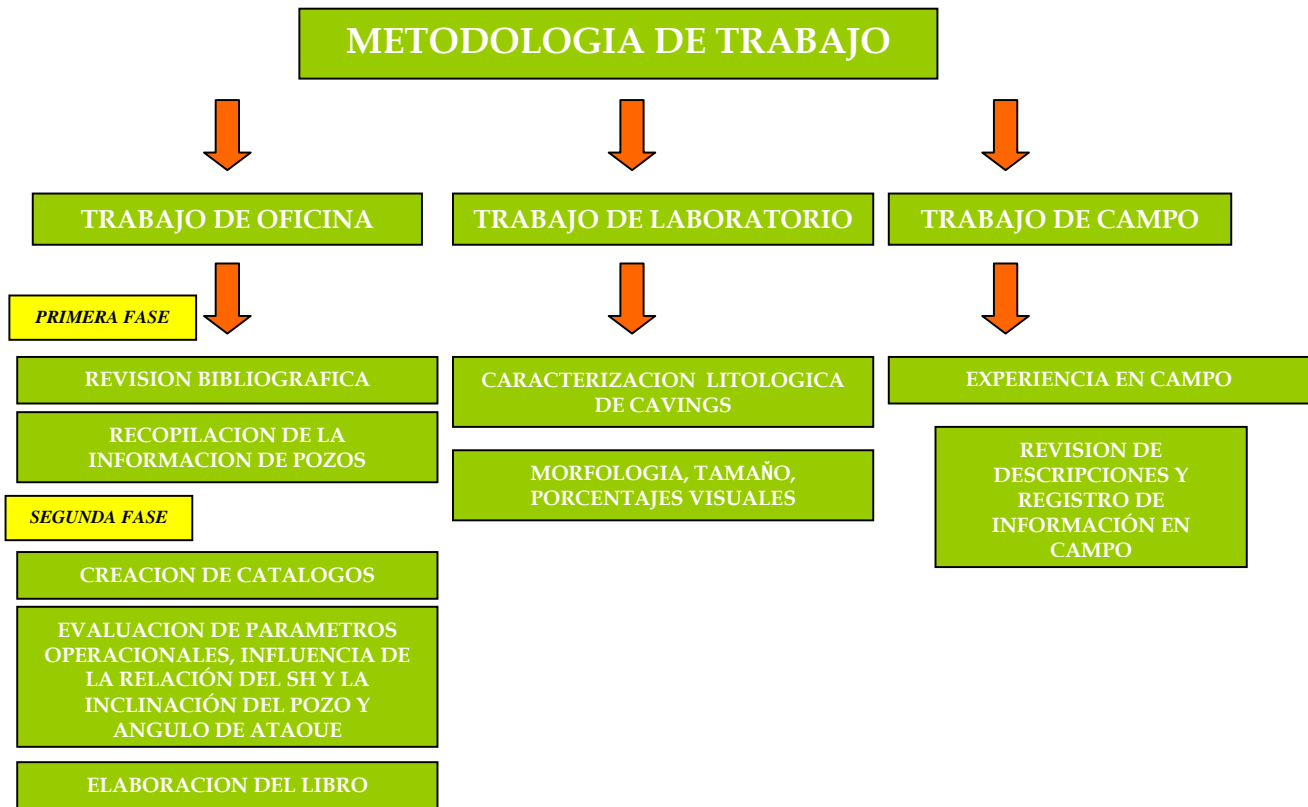


Figura 27. Metodología de trabajo en el análisis de cavings.

6.2 CARACTERIZACION DE CAVINGS PARA LOS POZOS YZ-10 Y ED-41

La clasificación morfológica de los cavings es muy importante en la determinación del mecanismo de falla por este motivo es una de las primeras actividades a realizar en este estudio de cavings (figura 28).

La caracterización litológica de cavings incluyó las descripciones considerando los siguientes aspectos:

- Morfología

En cuanto a la morfología se incluyen tres tipos principales: angulares, astillosos y blocosos, dentro de estos últimos se encuentran los platy y tabulares.

Determinar la forma de estos cavings es una de las actividades mas importantes en cualquier análisis o revisión de información en cuanto a material de colapso durante la perforación.

- Tamaño

El tamaño se reportó en milímetros (mm) y en la mayoría de casos se registra un valor promedio y un valor máximo de los cavings presentes.

- Redondez

La redondez de la partícula es muy importante para determinar cualitativamente si las condiciones de limpieza del hueco son realmente óptimas o si por el contrario se está quedando material dentro del hueco y por las condiciones ineficientes de arrastre no ha podido alcanzar la superficie.

- Porcentajes visuales

Los porcentajes visuales son solo estimativos de la abundancia relativa de un tipo morfológico de cavings con respecto a otro. Este porcentaje varía con respecto a las descripciones de pozo debido a que el material que se envía al instituto no es el mismo que se describe en las bandejas de muestra en la caseta de geología en pozo, sin embargo lo importante de este porcentaje es determinar el tipo de caving predominante mas que el porcentaje propio.

La nomenclatura litológica a utilizar fue la misma utilizada en el pozo (DATALOG Colombia) bajo las políticas de Bp pero traducida al español. Esta descripción litológica incluye básicamente Mudstone (arcillolitas), silstone (limolitas) y sandstone (areniscas).

Esta actividad se llevó a cabo en el laboratorio de Mecánica De Rocas ubicado en las instalaciones del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP).

Para la etapa de caracterización, se contó con muestras de ripios y cavings disponibles para los dos pozos a trabajar, para el pozo YZ-10 las muestras disponibles cubren los miembros C5-C6 y C7 de la formación Carbonera y para el pozo ED-41 se contaron con muestras disponibles de la base de la Formación Guayabo hasta el miembro C8 de la Formación Carbonera.

Para el caso del pozo YZ-10 se encontraban disponibles 85 muestras de las cuales fueron revisadas y descritas 78 muestras; y para el pozo ED-41 se tenía 145 muestras pero solo fueron revisadas y descritas 118 muestras, para un total de 196 muestras trabajadas.

Las restantes 34 muestras no fueron descritas debido a problemas de preservación, ya que se encontraban llenas de aceite y lodo de perforación el cual había borrado los valores de profundidad.

Aunque fueron descritas un número considerable de muestras (78 muestras), para el pozo YZ-10 el intervalo de muestras solo cubrió el intervalo comprendido entre los miembros Carbonera C6 y C7 y la zona de falla (figura 4); para el pozo ED-41 la cantidad de muestras recibidas fue mas representativa abarcando de la base de Guayabo hasta el miembro C8 de la formación carbonera.

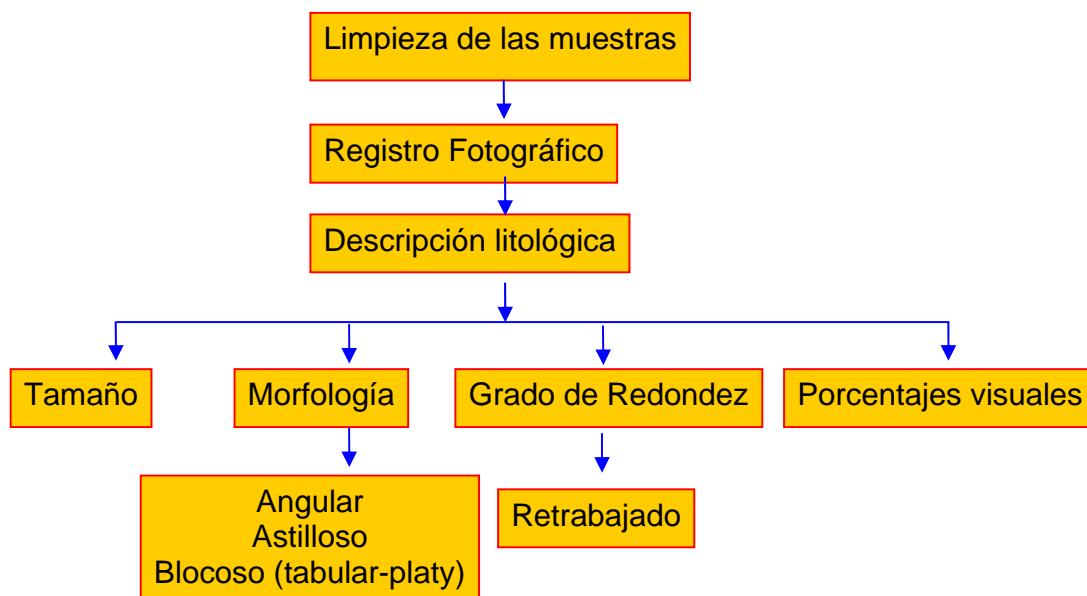


Figura 28. Metodología para la descripción de muestras en el laboratorio

Básicamente se contó con dos descripciones, la realizada en pozo y la realizada en el laboratorio de Mecánica de Rocas. Las descripciones se compararon y al final se presentó una sola, para los intervalos donde no se contó con muestras, se mantuvo la descripción original enviada de pozo.

Una vez terminado el trabajo de laboratorio se procedió a registrar toda esta información dentro de un catálogo de presentación final de datos que incluyó una columna con el registro fotográfico, otra con la descripción, una columna con la columna litológica y una última con la gráfica de rata de cavings con la profundidad. También fueron incorporados algunos parámetros operacionales.

En la tabla 3 se muestra el resumen del resultado de la caracterización para los dos pozos y en los anexos 1 y 2 se presentan los catálogos finales para cada uno de los pozos evaluados.

Como se observa, en el pozo YZ-10 los cavings son mas de tipo angular con tamaños que varían de 5-10mm mientras que para el pozo ED-41 los cavings son mas blocosos con tamaños de 4-30mm.

Cabe resaltar que ninguno de estos cavings resultó problemático durante la etapa de perforación y aunque los cavings del ED alcanzaron mayores tamaños, la cantidad de cavings formados y trasportados a superficie fue bastante baja.

Tabla 3. Resumen caracterización de cavings para los pozos YZ-10 y D-41

FORMACIÓN	YZ-10	ED-41
GUYABO	Angular y blocosos. 2-10mm	Blocosos. 5-20mm
CHARTE	Blocoso, occ. Angular y retrabajado. 5-15mm	Subblocosos y Platy. 5-20mm.
LEON	Blocoso y subblocoso, occ angular y retrabajado. 5-10mm	Subblocosos, platy y retrabajado. 4-20mm.
C1	Subblocosos (T) y angulares (B), occ. Platy 6-12mm	Blocosos, subblocosos y platy, trazas astillosos. 2-20mm.
C2	Angulares(B) y Blocosos (T). 3-10mm	Subplaty y platy, occ. Angulares. 4-30mm.
C3	Subblocoso y subplaty, occ. Angulares. 8-25mm.	Platy. 4-25mm
C4	Subblocosos y subplaty. 10-30mm.	Subplaty y astillosos. 4-35mm.
C5	Subblocosos y platy. 10-25mm; occ. Astillosos. 5-10mm.	Subplaty, blocosos y astillosos. 4-25mm.
C6	Subblocosos y subplaty (T) +, y angulares (B) 5-20mm	Subblocoso y subplaty. 5-25mm.
C7	Angulares (T) y blocosos y platy (B). 10-15mm	Subplaty y subblocosos. 4-25mm.
C8	Platy. 8mm.	Subplaty y subblocosos. 3-15mm.

6.3 EVALUACION DE LOS PARAMETROS DE PERFORACION EN LA PRODUCCION DE CAVINGS

Si bien el estudio de cavings ha sido muy escaso, en los últimos años ha venido tomando importancia poco a poco debido a la gran información que éstos pueden llegar a ofrecer.

En algunas publicaciones se ha planteado la incidencia que pueden llegar a tener las operaciones (por ejemplo reaming o backreaming, etc) durante la perforación sobre la producción de cavings así como los parámetros de perforación por sí mismos, por este motivo se decidió llevar a cabo una revisión de la posible incidencia que algunos de éstos factores puede llegar a tener sobre la producción de cavings.

Para llevar a cabo esta revisión, fue necesario considerar la litología ya que los parámetros son una serie de relaciones en función –la mayoría de ellos- de las propiedades de las rocas a perforar.

Partiendo de esto, los parámetros a evaluar fueron RPM, ROP, GPM, WOB y TRQ.

6.3.1 Formación Guayabo

Litológicamente la Formación Guayabo está constituida por una potente secuencia continental de aproximadamente 3157ft de espesor de lodolitas varicoloreadas con abundantes intercalaciones de areniscas grises localmente conglomeráticas . Son blandas a moderadamente consolidadas, plásticas, pegajosas y algunas tienen la característica de hincharse.

Esta es la primera de las fases en la operación de perforación.

La aparición de niveles conglomeráticos hacen optimizar los parámetros de perforación teniendo en cuenta que hay bajo peso en la sarta para perforar, debido a esto los parámetros que mas se controlan en esta sección son en primer lugar WOB (peso sobre la broca) que no debe exceder el limite del peso del BHA que se tenga en ese momento, por lo general se puede colocar de 20 a 80K klbs/ft con un RPM de 40-100.

La presión de circulación se aumenta gradualmente a medida que se adquiere profundidad ya que se puede canalizar a superficie y puede causar serios problemas de

fractura somera, en esta primera etapa se limita el caudal de flujo o de bombeo en galones por minuto, luego a medida que se profundiza se debe ir incrementando la rata de flujo para optimizar la limpieza del hueco con una buena velocidad anular, en esta etapa los cambios mas significativos son el torque por las altas vibraciones axiales y laterales al perforar, los conglomerados y el arrastre de gran material debido a la inestabilidad de las rocas y por su tamaño, además por el fluido utilizado -agua floculada-, las presiones son muy variadas debido a los cambios de flujo utilizado durante esta etapa, después de sentado y cementado el conductor se continua perforando la misma formación pero con unos parámetros un poco mas estables como: 70/80 RPM, 30/40 WOB, 850 GPM, para unas presiones de 1800 PSI y con un peso de lodo de 8.8 PPG. En esta sección los cambios mas significativos son las presiones que nos indican un hueco cargado de cortes y cavings y el resultado es la variación en el torque el cual se incrementa, otra causa en los cambios de presión pueden indicar pérdidas parciales o totales de circulación y por tanto colapso y grandes derrumbes en el hueco.

En la Figura 29 se muestra la producción de cavings para el pozo YZ-10 ; asociada a un intervalo lodoso, se puede observar un pico muy marcado que corresponde a una producción de 50 bls/h aproximadamente.

Teniendo en cuenta la columna litológica presentada en el catálogo, la zona donde la producción de cavings es mayor (526-2032ft), se encuentra asociada a un intervalo donde el contenido lodoso es bastante alto con respecto a las zonas suprayacente e infrayacente, el ROP y RPM presentan un comportamiento similar aumentado en las zonas mas lodosas por tanto en las zonas donde la producción de cavings es mayor.

Es posible como se comentó líneas mas arriba, que las vibraciones axiales durante la perforación de los niveles conglomeráticos ubicados hacia al tope estén relacionados con los picos de cavings que se observan en la Figura 29.

Los cambios en el torque parecen estar más relacionados con la cantidad de cortes que con el material de colapso.

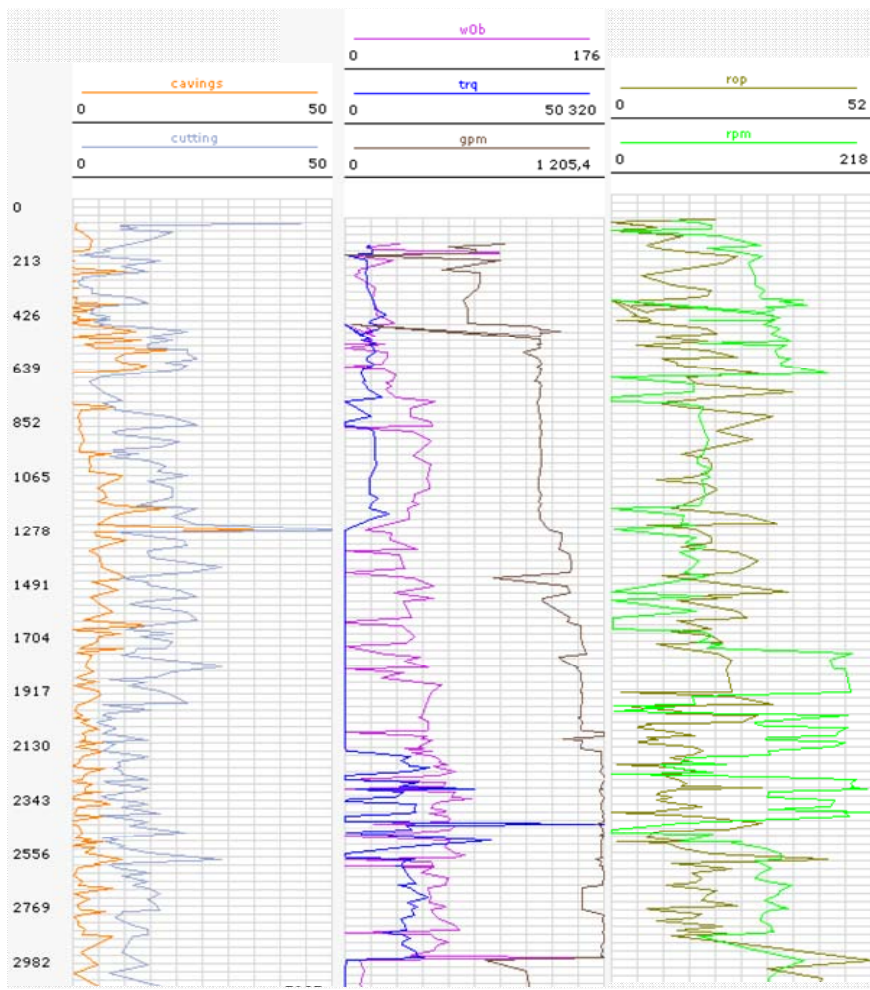


Figura 29. Comportamiento de los parámetros operacionales en la Formación Guayabo. Pozo YZ-10.

En la Figura 30 se muestra el comportamiento de los parámetros de perforación para el pozo ED-41.

La producción de cavings es bastante baja a o largo de todo el intervalo y los parámetros de perforación como el ROP y el RPM varían de acuerdo a la litología, solo a 4800ft se observan cambios importantes en el WOB, en el TRQ y en el RPM pero estos cambios se encuentran asociados a condiciones de limpieza del hueco, por esto se ve observa un ligero aumento en la producción de cavings hacia este intervalo.

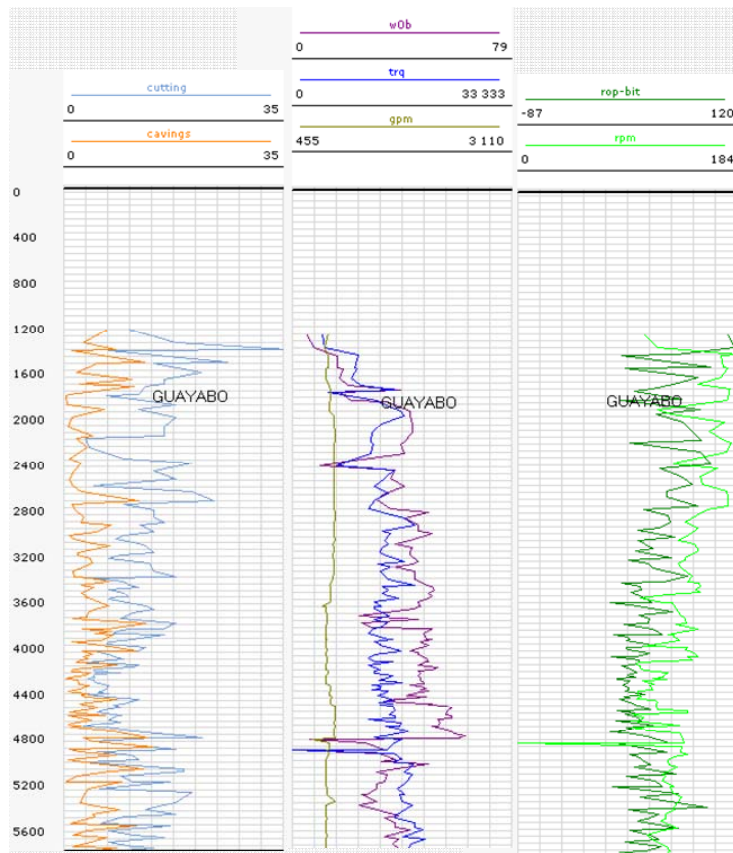


Figura 30. Comportamiento de los parámetros operacionales en la Formación Guayabo. Pozo ED-41.

Si se compara el rango de valores entre los parámetros de perforación para los dos pozos incluidos los de producción de cavings, se observa que son muchos menores para el pozo ED.

6.3.2 Formación Charte

En esta etapa los cambios en los parámetros no son muy significativos, pero si muy importantes en el caso de que se observen cambios como presión, torque y arrastre lo cual puede indicar un envejecimiento del hueco, pérdidas, empaquetamientos y desestabilización de las paredes del pozo. Los parámetros utilizados son los mismos que en la formación Guayabo con algunos cambios en al curva de lodo estos parámetros son: 80 RPM, 30/40 WOB, 850 GPM

En la Figura 31 se presentan las gráficas de los parámetros operacionales a lo largo de la formación Charte junto con la producción de cavings.

Si se observa con detenimiento el intervalo de 3332-3910ft, el cual corresponde a una zona de producción de cavings baja pero bastante continua, sugiere que existe una influencia mayor por parte de la interestratificación arena-lodo más que de niveles sólo lodosos y esto a su vez se refleja en el comportamiento del ROP y por tanto del RPM. Los demás parámetros permanecen casi constantes sin variaciones importantes.

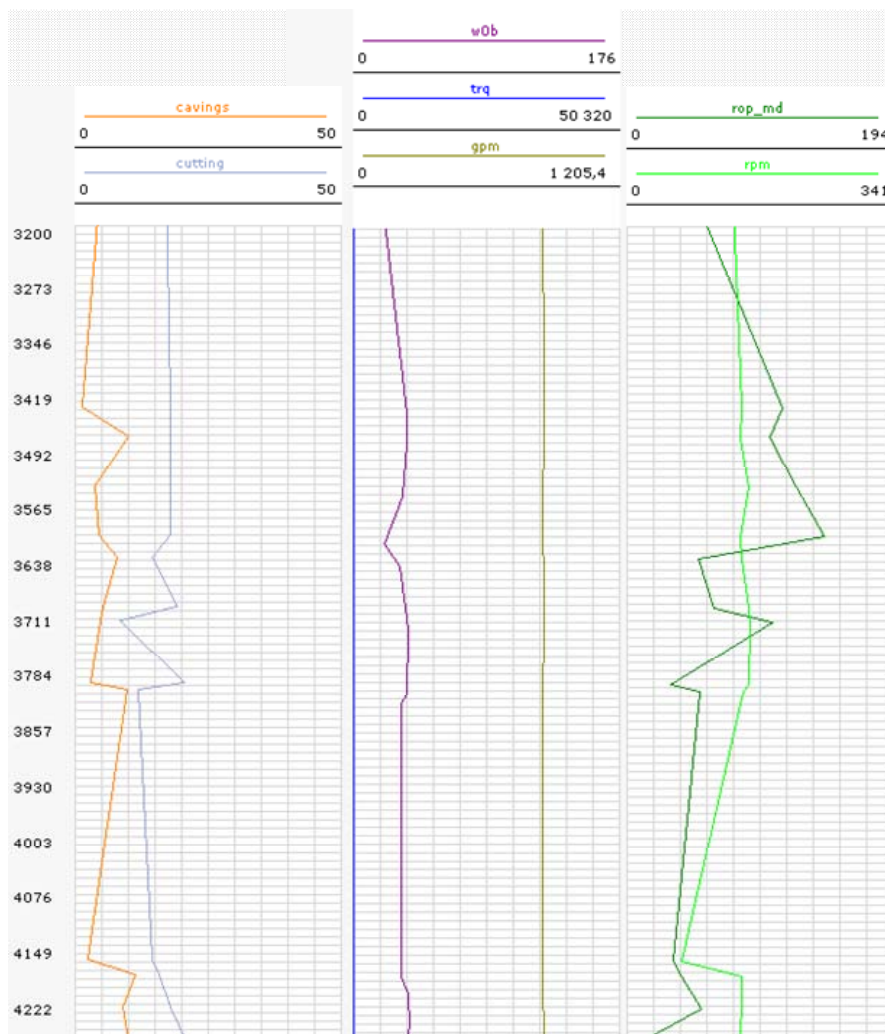


Figura 31. Comportamiento de los parámetros operacionales en la Formación Charte. Pozo YZ-10.

En la Figura 32 se presentan los parámetros de perforación para el pozo ED. Para este intervalo el comportamiento es bastante homogéneo, con algunas variaciones como en el intervalo anterior, asociadas a operaciones de limpieza de hueco.

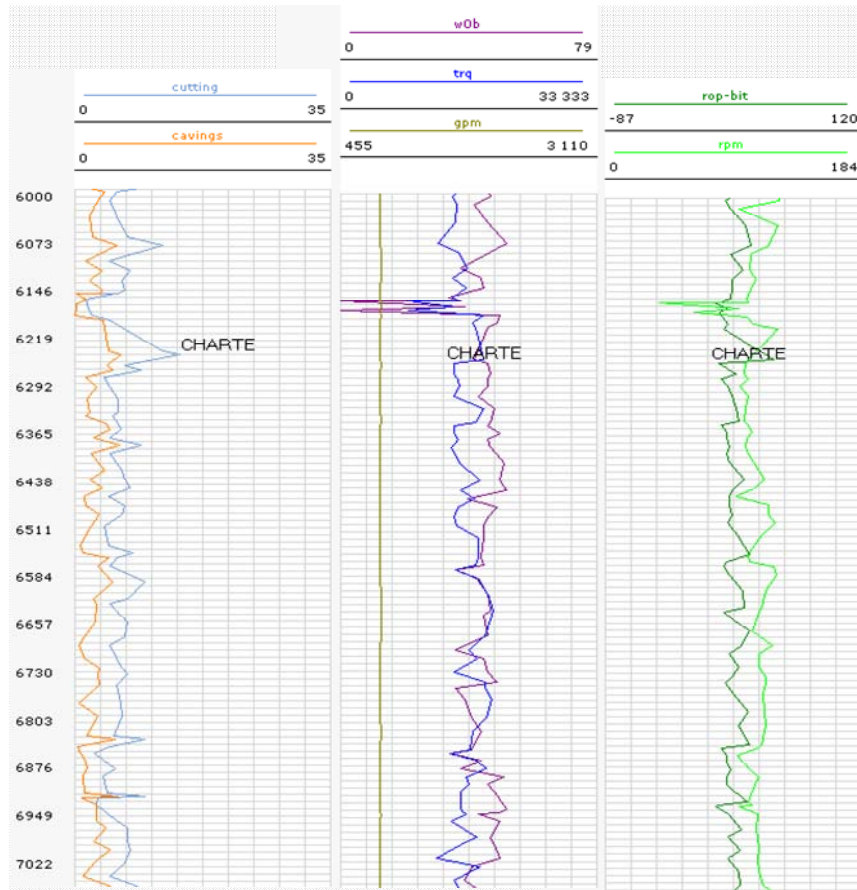


Figura 32. Comportamiento de los parámetros operacionales en la Formación CharTE. Pozo ED-41.

6.3.3 Formación León

Esta formación corresponde a una zona de alto riesgo de colapso. Si se deja por largo periodo el hueco abierto se envejece y puede ocasionar problemas de inestabilidad, además se debe tener la curva de lodo en el punto óptimo ya que se pueden presentar pérdidas parciales o totales, los parámetros utilizados son: una ROP de 30 ft/hr a 40 ft/hr, 190 SPM = 860 GPM, 1870 PSI, 140 RPM para un torque fuera de fondo de 9.0 Klbs/ft y en fondo de 11 a 15 Klbs/ft, un peso sobre la broca WOB de 35K a 50K, peso de la sarta

arriba de 370K un peso debajo de 335K y un peso rotando libre de 340K, en esta parte los valores de ECD son muy importantes ya que indican si se tiene el anular sobrecargado con cortes.

El intervalo de 4550-4950ft corresponde a una zona de intercalación de areniscas y lodolitas y esta a su vez se relaciona con el pico máximo de producción de cavings como se muestra en la Figura 33.

En cuanto al comportamiento del RPM, para el intervalo, donde se presentan cavings, se observa una ligera tendencia al aumento, es decir, valores altos de RPM están asociados con las zonas de mayor producción de cavings y fuertes caídas en el RPM muestra zonas de producción mínima de cavings, comportamiento presentado también con el ROP

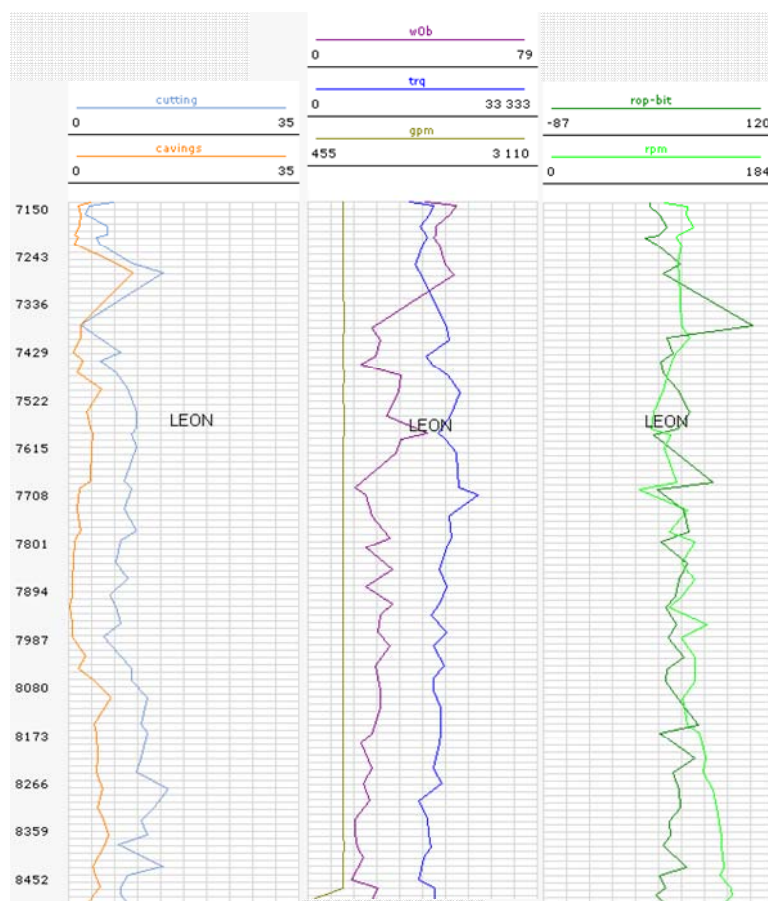


Figura 33. Comportamiento de los parámetros operacionales en la Formación León. Pozo YZ-10.

Para el caso del pozo ED (Figura 33) se observa un comportamiento bastante similar en cuanto a cavings, ROP y RPM se refiere.

Se presenta una zona de pico de cavings a aproximadamente 7350ft la cual coincide con el aumento del ROP, si se revisa la columna litológica, corresponde al primer paquete lodoso que se perfora en la transición de la Frm. Charite a la Frm León.

Cualitativamente el comportamiento de los parámetros en los dos pozos es muy similar.

6.3.4 Formación Carbonera

La revisión de los parámetros se realizó para cada uno de los miembros de carbonera como se muestra a continuación (figura 34).

- **C-1:** Para perforar este intervalo (1831ft) es necesario mantener una buena curva de lodo un -peso optimo- así como los siguientes parámetros aplicados: 864 GPM 2130 PSI, 90/150 RPM, torque 19/22Klbs/FT, WOB 30/50Klbs, en esta parte se debe monitorear o seguir el tren de presión muy de cerca ya que es el principal indicador de posibles problemas en el hueco, generando entonces la producción de cavings angulares.

Como se muestra en la Figura y con base en la columna litológica, los picos de cavings coinciden con las zonas de intercalamiento con presencia de material carbonoso.

El RPM y ROP presentan un aumento en las zonas donde la rata de cavings aumenta.

Se observan cambios ligeros en el torque posiblemente esté asociado a los cavings que según la caracterización, coinciden con las zonas donde se reporta alto porcentaje de caving retrabajado.

- **C-2:** Es un intervalo (578ft) relativamente fácil de perforar y se utilizan los mismos parámetros con unos cambios en la curva de lodo y un valor mayor de ROP.

La producción de cavings de esta zona es bastante alta por la persistencia en el tamaño de grano. Como es de esperarse en estos niveles fuertemente lodosos, el ROP y RPM tiende a aumentar con respecto al miembro anterior.

- **C-3:** Los parámetros de perforación se mantienen constantes durante esta etapa (380ft) con algunos cambios en los pesos arriba y abajo al igual que el peso libre

rotando, la presión de circulación aumenta un poco manteniendo el mismo flujo. Los cavings a lo largo de este intervalo disminuyen a medida que el contenido de arenas aumenta, esto se evidencia también en el comportamiento de los parámetros de perforación, como claramente ocurre en el ROP.

- **C-4; C-5:** este intervalo se perfora un poco mas rápido y fácil pero requiere mas cuidado ya que puede presentar problemas de inestabilidad y cuellos de botella al pasar de formaciones duras a blandas y viceversa, los parámetros utilizados son: 864 GPM 2130 PSI 90/150 RPM torque on BTM 25/32 Klbs/ft off BTM 19/22Klbs/FT WOB 30/50Klbs, estos parámetros se mantienen hasta perforar c-5 y unos 50 ft de c-6 donde se reviste con un casing de 11 3/4" y 11 7/8", los cambios mas significativos y importantes en esta área son la presión y el torque que indican problemas de inestabilidad del hueco y por consiguiente se puede tener grandes cantidades de cortes y cavings, los cuales al pasar por los cuello de botella pueden causar grandes problemas de empaquetamiento. El WOB –C5- muestra una disminución bastante marcada hacia la parte media, si se revisa el TRQ tiende a aumentar, como consecuencia posiblemente de algunos puntos apretados, que fueron reportados para este intervalo y que a su vez coinciden con el pico mas alto de producción de cavings. Las ratas de perforación en C5 fueron muy bajas debido a la presencia de zonas lutíticas con alta presencia de cemento siliceo, además de zonas arenosas compactas.
- **C-6:** Los parámetros utilizados son: WOB 20K a 45K, con una RPM entre 90 a 150, 650 GPM para una presión entre 2700 a 3050 PSI, en esta parte del pozo los cambios mas significativos son el peso del lodo y esto cambia indudablemente el resto de parámetros como son el peso de la sarta.
La producción de cavings es bastante bajo a lo largo del intervalo. Por otro lado se observa un fuerte cambio de galonaje que al parecer afectó ligeramente la rata de cavings, se observa que la caída en el galonaje trae consigo también un aumento en el torque.

- **C-7:** en esta zona se presentan influjos (gas asociado a niveles carbonosos) por esta razón se necesita tener un buen seguimiento del peso del lodo y los parámetros de perforación que para este intervalo son: WOB 20 – 45 klb. RPM 90 – 150, 650 gpm. 2700 – 3050 PSI de presión, torque entre 15 y 26 klb-ft, además en esta sección se encuentra un sistema de fallas importante relacionadas con la **Falla de Yopal** por este motivo es indispensable cambia algunos parámetros de perforación como son la ROP y las presiones de circulación.

El RPM y ROP presentan un comportamiento bastante similar, aumentando en la zona de mayor producción de cavings, sin embargo el ROP permanece casi constante en relación al RPM, esto posiblemente como respuesta a la litología perforada.

En cuanto al WOB, en las zonas donde el ROP aumenta, el peso sobre el gancho disminuye, lo que puede estar más relacionado con la operación de perforación.

- **C-8:** Los parámetros de perforación se mantienen con respecto al miembro anterior, sin embargo están sujetos a algunas variaciones dadas debido al aumento del material lodoso, el cual afecta levemente el peso de la sarta. Los parámetros son los mismos: WOB 20 – 45 klb. RPM 90 – 150, 650 gpm. 2700 – 3050 PSI de presión, torque entre 15 y 26 klb-f, en esta parte se pueden presentar lecturas erróneas de torque por efecto de la falla.

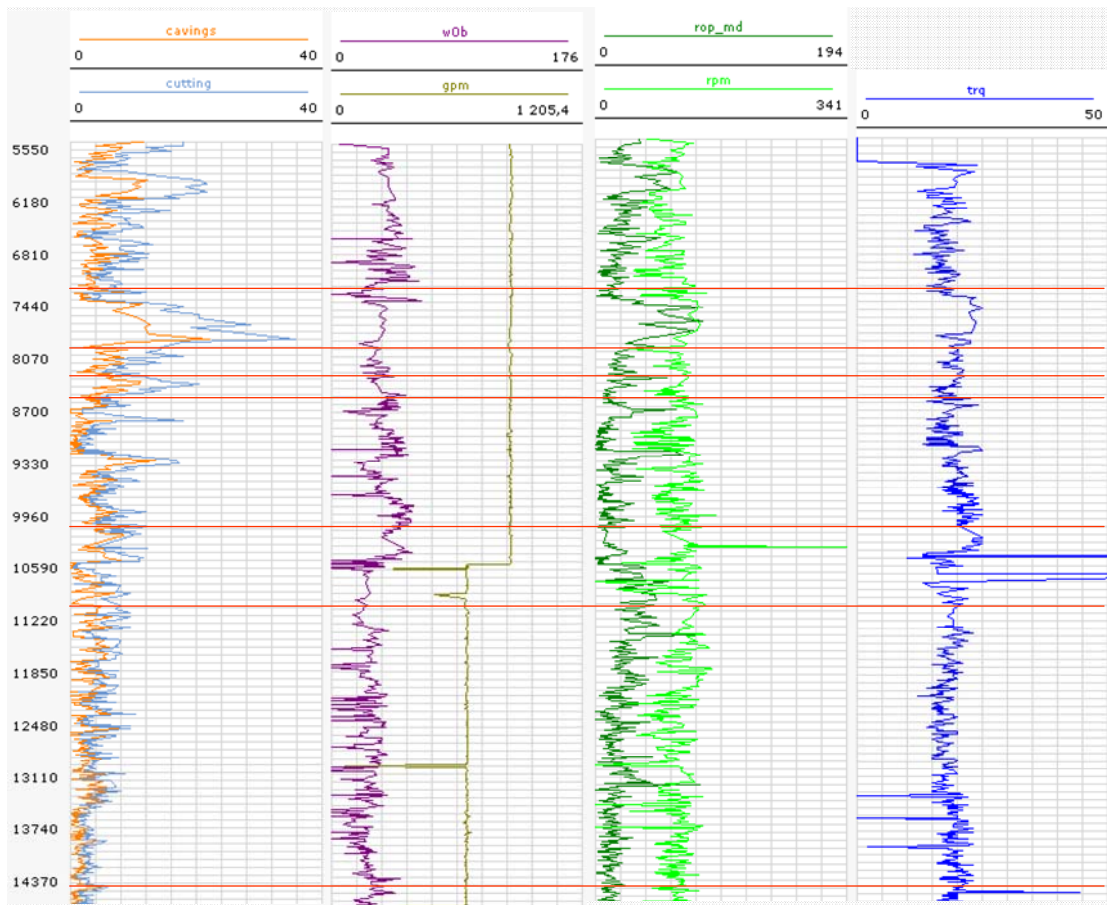


Figura 34. Comportamiento de los parámetros operacionales en la Formación Carbonera. PozoYZ-10.

En la Figura 35 se muestra el comportamiento de los parámetros para la Formación Carbonera en el pozo ED. Aunque las formaciones son más someras en este pozo, el tren de datos de los parámetros de perforación son muy similares.

Para C1 se muestra un pico de producción importante el cual se encuentra relacionado con un paquete lodoso de 300ft aproximadamente, lo cual también influencia el comportamiento del RPM.

El valor del RPM a lo largo de los miembros de carbonera es ligeramente mayor con respecto al pozo YZ, sin embargo el ROP permanece casi constante.

Los cambios fuertes en el WOB y TRQ no se evidencian en la producción de cavings, es probable que estos se encuentren más relacionados con la operación misma que cambios por litología.

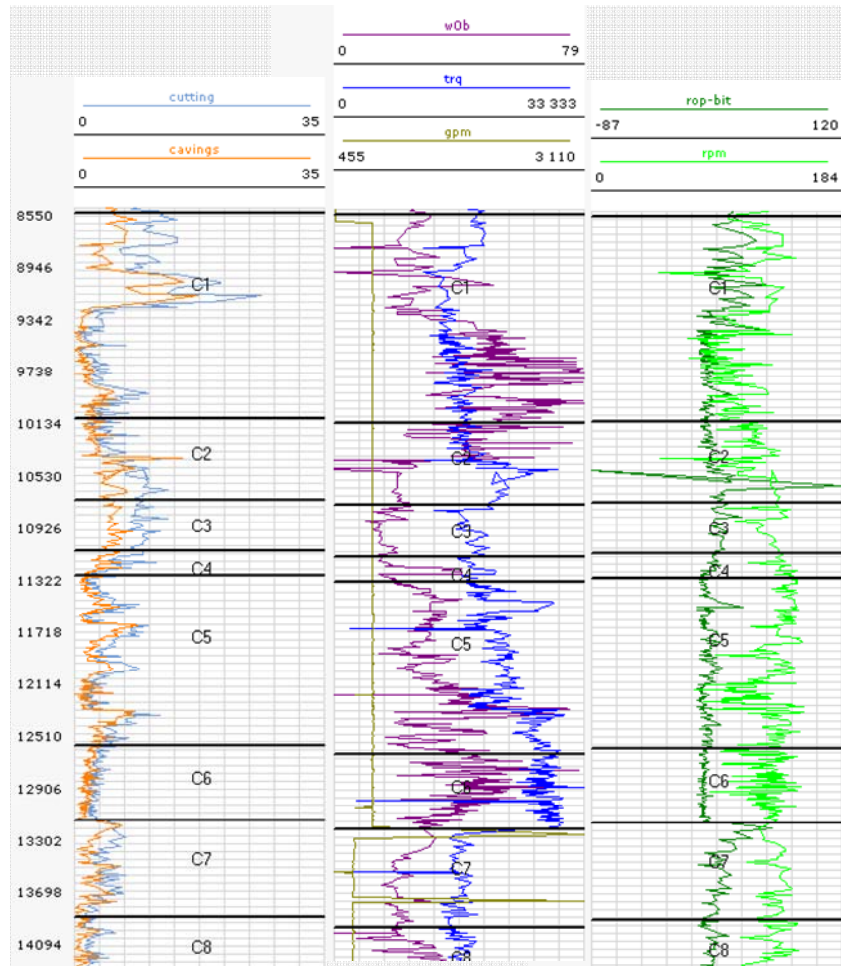


Figura 35. Comportamiento de los parámetros operacionales en la Formación Carbonera. Pozo ED-41.

6.4 DETERMINACION DEL MECANISMO DE FALLA A PARTIR DE LA CARACTERIZACIÓN DE CAVINGS Y SU VALIDACION MEDIANTE L USO DE LA VENTANA OPERACIONAL

Una vez realizado el modelo geomecánico y calibrado directamente en pozo, la ventana operacional permite observar las zonas de mayor inestabilidad y el mecanismo de falla que puede estar ocurriendo.

Con base en lo anterior, es posible entonces validar el mecanismo de falla obtenido a partir de la caracterización de los cavings.

La ventana operacional limita esta correlación en el caso de cavings blocosos asociado a fracturas naturales, sin embargo muestra puntos importantes para zonas inestables asociadas a colapso de las paredes y fallas tensiles.

A continuación se presenta la validación del mecanismo de falla a partir de la caracterización y de la ventana operacional, por formaciones para cada uno de los pozos revisados.

6.4.1 Mecanismo de Falla a partir de la Caracterización de Cavings, Pozo YZ-10.

6.4.1.1 Mecanismo de Falla para la Formación Guayabo

Morfológicamente en este intervalo se tienen cavings predominantemente blocosos y algunos angulares con tamaños promedios 2-8mm. A partir de esta información y de acuerdo a lo encontrado en la literatura, el mecanismo de inestabilidad está asociado a desestabilización de planos ya sean de fracturas o de estratificación para el caso de los blocosos, para los angulares se estaría hablando de colapso de las paredes del hueco (breakout) por fallas de cizalla, es decir, cuando los esfuerzos aplicados exceden la resistencia compresiva de la roca.

La ventana de lodo, como ya se comentó no aporta información acerca de fracturas naturales, pero en cuanto a fallas por tensión y compresión sí, (VER figura 25 - hacia la base donde se observan puntos de colapso y por tanto relacionan la formación de cavings angulares.

Con la información obtenida a partir de los registros, es posible comprobar también el mecanismo de falla.

A partir de la información disponible de registros, no fueron reportados breakouts (Figura 36) por encima de la Formación Charte, luego es posible que los breakouts formados fueran muy pequeños como para ser detectados por la herramienta de registro.

Por otro lado, en cuanto a fracturas, se reportaron 27 de 80 fracturas cerradas hacia la base de la formación, luego pueden justificar el alto aporte de cavings blocosos registrados a estas profundidades.

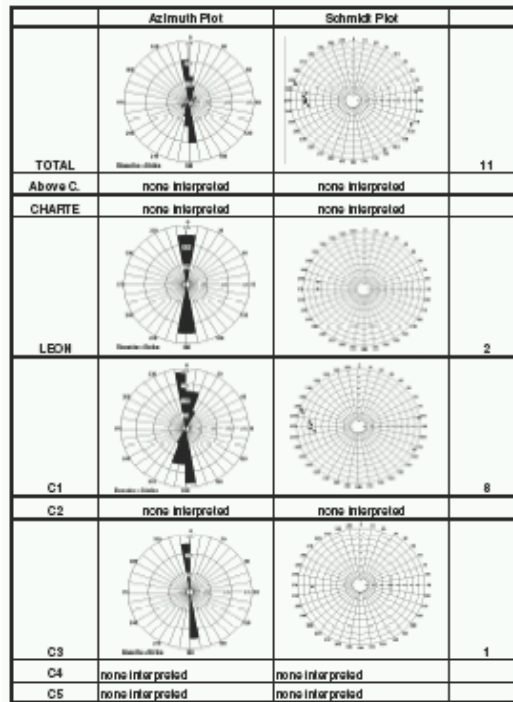


Figura 36. Breakout determinados a partir del registro OMI del pozo YZ-10.

6.4.1.2 Mecanismo de falla para la Formación Charte

Para esta formación se reportaron cavings blocosos y retrabajados de 5-15mm, luego se asume que se esta perforando a lo largo de una zona fracturada.

La ventana de lodo (figura 24) presenta la gran limitante sin embargo se tienen disponibles la información de los registros. Se reportaron 10 fracturas cerradas y 2 fracturas parcialmente abiertas, lo cual muestra que es una formación bastante fracturada en relación a su espesor (1183ft) y por tanto se refleja en el tipo de caving descrito.

6.4.1.3 Mecanismo de falla para la Formación León

Los cavings reportados para la formación león son blocosos y algunos angulares y subblocosos con tamaños de 5-10mm.

La ventana de lodo (figura 24) y la información de los registros muestran zonas en común de colapso de las paredes del hueco y por lo tanto justifican los cavings angulares reportados.

A partir de los registros se tiene: 5 fracturas cerradas y 1 fractura parcialmente abierta distribuidas a lo largo de un espesor de 1273ft.

Cabe recordar la marcada fisilidad reportada para esta formación que junto con el nivel de fracturamiento justifica la producción de éste tipo de caving.

6.5.1.4 Mecanismo de falla para la Formación Carbonera

- Miembro C1

Los cavings reportados hacia el tope son angulares de 5-10mm, con algunos platy y ocasionalmente trazas de astillosos. El porcentaje de retrabajados aumenta hacia la parte media y hacia la base con algunos angulares y tamaños menores de 3-8mm.

Como se observa la morfología de los cavings cambia drásticamente de la formación suprayacente.

La ventana operacional (figura 24) junto con los registros muestran importantes zonas de colapso de las paredes del pozo coincidiendo en varios de estos intervalos, mostrando que esta producción de cavings angulares se encuentra asociada a colapso por peso de lodo bajo.

Se reportaron 7 fracturas cerradas, 17 fracturas parcialmente abiertas y 3 fracturas abiertas a lo largo de 1832pies lo que se refleja en la formación de cavings tipo platy.

- Miembro C2

Se reportaron cavings subplaty, algunos angulares con tamaños de 3-10mm, lo que indicaría planos de debilidad que se han desestabilizado.

La ventana de lodo (figura 24) muestra puntos de colapso que pueden estar asociados a los cavings angulares, sin embargo a partir de la información de los registros no fueron reportados breakouts debido posiblemente a la mínima deformación sufrida en las paredes del hueco y por tanto no registrada por la herramienta; pero si 8 fracturas cerradas y 5 fracturas parcialmente abiertas distribuidas en solo 578pies, que se relaciona con la formación de cavings tipo platy.

- Miembro C3

Los cavings reportados para este miembro son predominantemente subplaty, algunos angulares y trazas de astillosos, con tamaños de 5-15mm.

En cuanto al mecanismo de falla, la ventana de lodo (figura 24) muestra un punto de posible colapso de las paredes del hueco, por otro lado se observan algunos puntos donde la presión de poro se acerca mucho al peso de lodo utilizado, es posible que este comportamiento se refleje en la producción de algunos (trazas) cavings astillosos.

Por otro lado a partir de los registros, se reporta la formación de un breakout y en cuanto a fracturas se interpretaron 13 fracturas cerradas, 7 fracturas parcialmente abiertas y 1 fractura abierta a lo largo de 388pies, luego este intervalo se asume como altamente fracturado por tanto valida la tasa de cavings predominantemente platy, que fueron registrados.

- Miembro C4

Para este miembro se reportaron cavings platy y algunos angulares de 5-30mm. Relacionados con planos de fracturamiento-estratificación y colapso de las paredes del pozo por peso de lodo bajo.

A partir de la información obtenida de la ventana de lodo (figura 24), se tiene hacia la parte final del intervalo un único punto de colapso que coincide con la zona donde se registran cavings angulares, por otro lado y en cuanto a datos de fracturas reportados se tiene 18 fracturas cerradas, y 6 fracturas parcialmente abiertas distribuidas a lo largo de un espesor de 178pies, luego el efecto del fracturamiento es notable sobre la producción de cavings para este miembro.

- Miembro C5

Para este miembro fueron reportados hacia el tope cavings blocosos aumentado el porcentaje de retrabajados y subblocosos hacia la base.

Ni la ventana operacional (figura 24) ni los registros reportan colapso de las paredes luego este comportamiento coincide indirectamente con el tipo de caving morfológico reportado.

En cuanto a fracturamiento se reportan 4 fracturas cerradas y 2 fracturas parcialmente abiertas, aunque el efecto de estas fracturas a lo largo de una secuencia tan potente (1535pies) parece bajo, en este momento debe considerarse el efecto de las fallas que atraviesan la secuencia a medida que se aumenta la profundidad.

- Miembro C6

Los cavings reportados fueron predominantemente blocosos con tamaños que varían de 5-30mm aproximadamente.

Para este miembro, el fracturamiento mantiene un control bastante importante sobre el tipo de caving formado, a lo largo de esta zona se presentan tres fallas importantes entre las que se encuentran la Falla de Yopal, y este efecto que se sugiere, también se evidencia en el tamaño de los caídos que se reportan que en ocasiones pueden alcanzar hasta los 40mm.

- Miembro C7

Para este miembro los cavings reportados fueron blocosos y platy con tamaños promedios de 8-10mm, asociados por morfología a planos de fracturas y de estratificación.

La ventana de lodo (figura 24) no muestra puntos de colapso, manteniendo la idea del mecanismo de falla partir de la morfología, no se cuenta con información de registros para este intervalo, sin embargo a partir de la información obtenida de los otros miembros, se mantiene entonces la influencia del fracturamiento y la estratificación como mecanismo de inestabilidad durante la perforación de este intervalo.

6.4.2 Mecanismo de Falla a Partir de la Caracterización de Cavings, Pozo ED-41.

En la determinación del mecanismo de falla se sigue el procedimiento anterior, sin embargo para este pozo no se cuenta con información de registros que puedan soportar o validar la caracterización.

Si bien no se cuenta con la misma cantidad de información como para el pozo anterior, existe ya claridad y validez de los resultados del mecanismo de falla por morfología con base tanto en la literatura como en los resultados de la anterior revisión.

Por otro lado el resultado de la caracterización de los cavings disponible para el pozo muestra que la mayor influencia para su formación esta asociada a planos de estratificación y a fracturas mas que a colapso de las paredes del pozo por peso de lodo bajo lo cual corresponde a una de las limitantes que el modelo geomecánico restringe, sin embargo es probable que los pocos cavings angulares que se registren se encuentren asociados a peso de lodo alto. Esto último ocurre en casos muy particulares de acuerdo a la complejidad geológica de la zona -como ocurre en el Piedemonte llanero- y se manifiesta en la formación de cavings angulares de mayor tamaño, lo cual coincide con los cavings reportados a lo largo de la perforación de éste pozo.

Con base en lo anterior, resulta casi imposible validar el mecanismo de falla a partir de la utilización de la ventana de lodo así como también de los registros.

7. EVALUACION DE LA INFLUENCIA DE LA TRAYECTORIA DEL POZO EN LA PRODUCCION DE CAVINGS

Algunos de los trabajos relacionados con caracterización de cavings, han sido desarrollados en el Golfo de México. En uno de los ejemplos (WILLSON, et. al., 1999), se muestra la revisión de cavings de acuerdo a los problemas que se presentaron durante la perforación, teniendo en cuenta la trayectoria del pozo y el peso de lodo. Con base en este estudio y en la importancia ya reportada por otros autores de la trayectoria de pozo en el éxito de la perforación, se sugirió entonces llevar a cabo una revisión detallada teniendo en cuenta los tipos morfológicos de cavings, el ángulo de ataque y el peso de lodo; además de algunas consideraciones relacionadas con el esfuerzo horizontal máximo reportado para cada uno de los intervalos.

La experiencia y los trabajos de análisis sobre el campo Cusiana muestran que los pozos perforados con trayectorias up-dip son más estables que aquellos perforados down-dip o cross-dip (LAST et. al, 1996). Es por esto que el ángulo de ataque es un factor importante para tener en cuenta en el análisis y revisión de cavings (ZOBACK et. al, 1999).

El ángulo de ataque se encuentra definido como la orientación del pozo con respecto a la estratificación y existen diferentes puntos de vista para considerar el punto 0 y 90° es decir paralelo o perpendicular a la estratificación.

Según Willson, et al. (1999), El ángulo de ataque es cero cuando el pozo es perforado perpendicular a la estratificación, mientras que para Okland and Cook (1998) el ángulo de ataque es cero cuando se perfora paralelo a la estratificación.

Cuando el pozo se aparta de la estratificación normal, la estabilidad generalmente decrece.

Un valor en el ángulo de ataque define amplias trayectorias de pozos, sin embargo se ha encontrado que los pozos perforados up-dip son mas estables que los perforados down-

dip con ángulos de ataque similar, luego el ángulo de ataque por si mismo no describe una trayectoria de pozo óptima.

Por otro lado diferentes modelos físicos, afirman que la orientación del pozo con respecto a la estratificación y con respecto al máximo esfuerzo horizontal es muy importante en el control de la estabilidad del pozo.

En otros estudios, se ha encontrado que existe una influencia muy fuerte entre el ángulo del eje del hueco y los planos de estratificación del shale; específicamente cuando el ángulo de ataque es de 10° aproximadamente como reporta y concluye el trabajo de Okland and Cook(1998) para el shale Draupne del campo Oseberg, el hueco es relativamente estable; si el eje del hueco es paralelo a la estratificación, el hueco es altamente inestable formando grandes cantidades de cavings.

Para este análisis, se llevó a cabo la realización de las siguientes tareas:

- Para calcular el ángulo de ataque se partió de los datos de inclinación y azimut del pozo, dado por el survey (Guayabo-Miembro C7) y los datos de buzamiento de las formaciones.
- A partir de las relaciones entre estas inclinaciones se obtuvo el ángulo de ataque a lo largo de las formaciones del pozo.
- Una vez se realizaron los cálculos, el siguiente paso fue crear las gráficas con ayuda del programa grapher.

Se realizaron cuatro gráficas, una que corresponde al ángulo de ataque, otra la producción de cavings y cuttings otra correspondiente al peso de lodo utilizado en la perforación de las diferentes formaciones y una última gráfica que muestra la relación de la inclinación del pozo con respecto al esfuerzo máximo horizontal.

- La etapa final constó de la revisión, análisis y amarre de la información presentada.

7.1 ANALISIS DE LA RELACION DEL ANGULO DE ATAQUE, ESFUERZO MÁXIMO HORIZONTAL/AZIMUTH, Y LA PRODUCCION DE CAVING

7.1. Evaluación para el Pozo YZ-10

7.1.2 Formación Guayabo

Para el intervalo de Guayabo (sup-3157') inicia de 85° finalizando el intervalo con 45° aproximadamente; el buzamiento para esta formación fue estimado de alrededor de 25°, siendo los niveles de mayor buzamiento a lo largo de 1000' (figura 37).

Cuando el ángulo de ataque empieza a disminuir a medida que se profundiza, se tiene el pico máximo de cavings para esta formación de aproximadamente 15bls/h. Se observa un ligero cambio en el tipo morfológico de caving de subbloco (considerando algunos angulares) a bloco, lo que indicaría que a medida que la perforación se acerca al buzamiento, posiblemente se están desestabilizando los planos de estratificación y/o las zonas de fracturas.

Por otro lado, al revisar la relación del azimuth del pozo y el esfuerzo horizontal máximo que varía de 88-40° disminuyendo hacia la base, se puede observar que el pico de cavings se encuentra asociado a intervalo donde esta relación inclinación/esfuerzo es mayor, lo cual puede estar justificando la rata de cavings en esta sección, nótese que a medida que el ángulo de ataque disminuye (hacia la base) la rata de cavings también disminuye. El peso de lodo varió de 8.5 -9.2ppg.

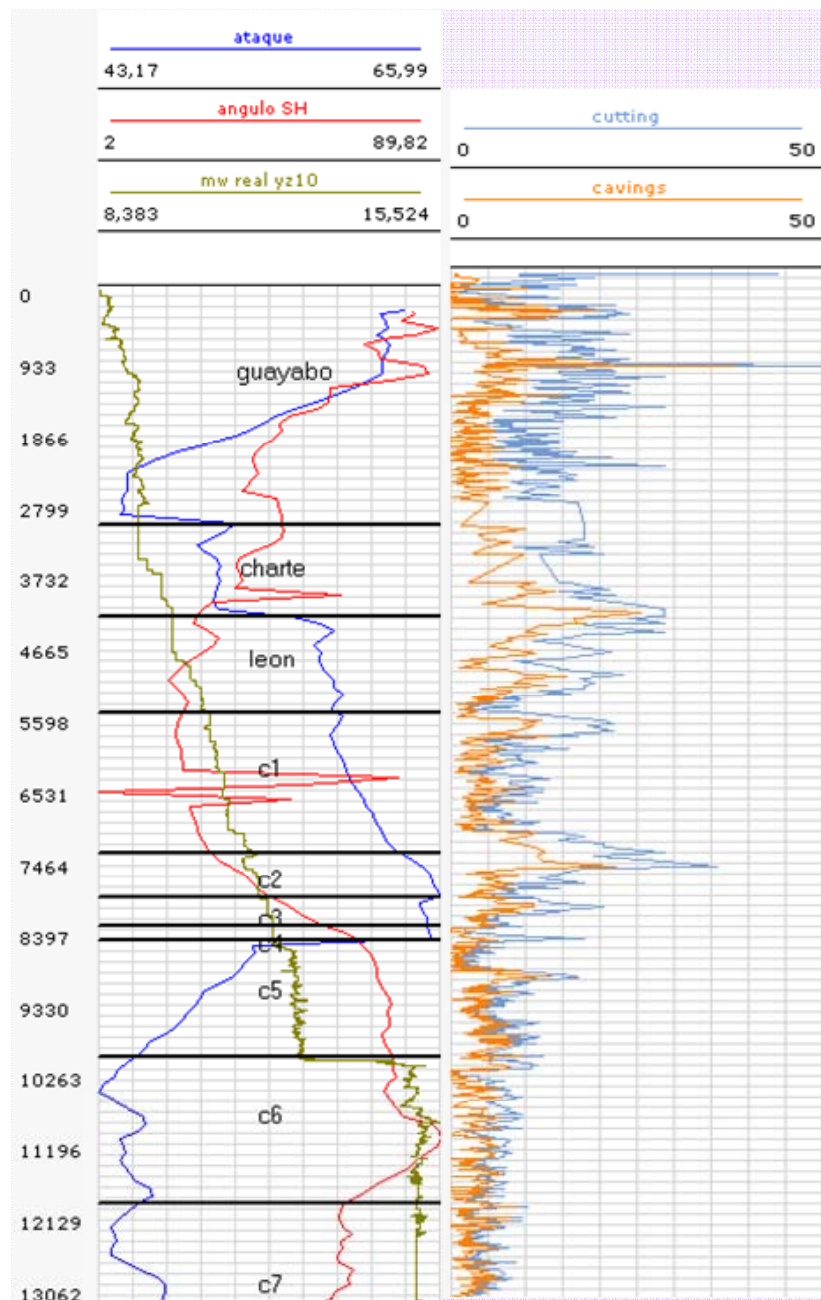


Figura 37. Relación azimuth/esfuerzo y ángulo de ataque en la producción de cavings, pozo YZ-10.

7.1.3 Formación Charte

Para esta formación (3157'-4340') el buzamiento reportado fue de 16°, por otro lado el ángulo de ataque permanece casi constante y aproximadamente de 52°, con una producción de cavings bastante baja en promedio de 5bls/h y una relación de esfuerzo/azimuth del pozo de 30°-50°. Sin variaciones importantes en la rata de cavings (figura 37) .

7.1.4 Formación León

Para este intervalo (4340'-5613') el buzamiento de las capas es de 12°, el ángulo de ataque fluctúa entre 59° y 60°, siendo mayor hacia el tope del intervalo en donde se encuentran una serie de paquetes lodosos.

Se observa un aumento en la rata de caídos hacia la zona donde se tienen los mayores valores en el ángulo de ataque (figura 37).

La tasa de cavings es de aproximadamente entre 15-20bls/h de tipo blocosos, con un peso de lodo que se mantuvo alrededor de 9.8ppg y una relación de esfuerzo/azimut de 21-32°, hacia el tope donde aumenta ligeramente esta relación, se tiene un aumento en la rata de cavings.

Para este intervalo esta última relación corresponde a la mas baja (las condiciones óptimas se alcanzan cuando la inclinación del pozo se acerca al esfuerzo principal que en nuestro caso es el esfuerzo máximo horizontal), es posible que debido a la litología y al ángulo de ataque la producción de cavings este asociada a la desestabilización de planos de fracturas y/o estratificación.

7.1.5 Formación Carbonera

- Miembro C1

En este intervalo (5613'-7444') el buzamiento reportado fue de 11°. Con un ángulo de ataque de 58-63° y con un peso de lodo de 10.5-11ppg (figura 37) .

La producción de cavings es bastante baja aproximadamente 5bls/h sobre una litología predominantemente arenosa, hacia la parte inicial la rata de cavings muestra un aumento

asociado a un intervalo lodoso en la transición de la formación León con el primer Miembro de la Formación carbonera.

Hacia la parte inicial y final del intervalo, la relación esfuerzo/inclinación oscila entre 20-50° en promedio sin embargo hacia la parte media del miembro (6560´) y asociado a niveles de arcillolita y limonita principalmente, se muestra un aumento de ésta relación la cual puede ser considerada como un dato anómalo por su valor y por la tendencia del tren de datos; tampoco se observan cambios en los tipos de cavings (los cuales son en su mayoría angulares y algunos platy).

- Miembro C2

El buzamiento para este intervalo fuertemente lodoso (7444´ - 8022´) fue de al igual que C1, 11°. El ángulo de ataque calculado varía de 63-66°, los cuales corresponden a los máximos valores de ángulo de ataque alcanzados a lo largo de la perforación. El peso de lodo varió de 11-11.5ppg. La tasa de cavings al igual que el ángulo de ataque corresponde a los valores más altos registrados, de 10-20bls/h hacia la parte final del intervalo donde también es registrado el mayor valor para el ángulo de ataque.

La relación esfuerzo/inclinación es bastante baja, inferior a 40-50° (figura 37) .

- Miembro C3

Para este intervalo areno-lodoso (8022´-8410´) el buzamiento aumentó de 11° a 13° y El peso de lodo utilizado fue de 11.5-11.7ppg (figura 37) .

El ángulo de ataque reportado para este miembro poco potente fue de 65°, los cavings reportados no superan los 8bls/h y son predominantemente platy. La relación esfuerzo/inclinación es de 52-62°.

- Miembro C4

Para este miembro (7820´-8223´) lodoso con trazas de pirita se reporta también 13° de buzamiento y el peso de lodo utilizado fue de 11.8-11.9ppg (figura 37) .

El ángulo de ataque reportado fue de 66° y la producción de cavings varía de 10-15bls/h disminuyendo hacia la base, predominantemente platy. La relación esfuerzo/inclinación fue de 68-70° aumentado hacia la base.

- Miembro C5

El buzamiento reportado para este miembro (8595`-10130`) fue igualmente de 13° con un peso de lodo de 11.9-12.5ppg (gran parte del intervalo se perforó con este último) (figura 37).

El ángulo de ataque fue de 65° disminuyendo a 57° hacia la base del miembro, con una producción de cavings que no supera los 5bls/h excepto a 9350` donde se observa un pico de 13bls/h asociado a un zona de 150` de arcillolitas con algunas intercalaciones de limolitas; hacia el tope son tipo platy y hacia la base blocosos que comparados con el miembro suprayacentes, son de mayo tamaño (25-30mm).

La relación esfuerzo/inclinación continúa en aumento y para este miembro fue calculado entre 70°-78°. La baja producción de cavings en este intervalo se encuentra posiblemente asociado al alto contenido de arenas reportado a lo largo del intervalo.

- Miembro C6

Para este intervalo (10130`-11144`, falla intra C6 10666`) el ángulo de buzamiento es de 13° y el peso de lodo utilizado fue de 12.5-15.1ppg reportando un fuerte cambio a 10635` por efecto del casing.

El ángulo de ataque calculado fue de 55-58°. La rata de cavings para este intervalo lodoso es bastante baja no superior a 7bls/h subblocosos, debido al aumento en el peso de lodo el tamaño de los cavings disminuyó ligeramente (de 10-35mm a 5-20mm en promedio) (figura 37).

El ángulo calculado en la relación esfuerzo/inclinación fue de 58-70° disminuyendo hacia la base donde la tasa de cavings también disminuye. Puede que en este intervalo, donde la cantidad de caving es baja y el ángulo de la relación esfuerzo-azimut es alta se encuentre controlado mas por el peso de lodo utilizado durante la perforación.

Los cambios en el comportamiento de las relaciones de ángulo de ataque y esfuerzo-azimut pueden estar controlados fuertemente por el efecto de las diferentes fallas que atraviesan este miembro.

- Miembro C7

En este miembro (11144`-14940`, Falla a C6 11986, Falla de Yopal 13105) el buzamiento es variable debido al fallamiento. Para la primera falla se reporta 22° y para la falla de Yopal 20°.

El ángulo de ataque calculado fue de 57° aumentando drásticamente a 13000` a 64° posiblemente por efecto de la falla de Yopal (figura 37) . La producción de cavings hacia el tope es alcanza los 10bls/h y hacia el tope es inferior a 5bls/h posiblemente por el aumento en el contenido de arenas, son predominantemente blocosos. Se utilizó un peso de lodo de 15-15.1ppg.

La relación esfuerzo/inclinación calculada fue de 40-50°.

7.2. Evaluación para el Pozo ED-41

7.2.1 Formación Guayabo

Para el intervalo de Guayabo (sup-5987`) inicia de 55° finalizando el intervalo con 38° aproximadamente; el buzamiento para esta formación fue estimado de alrededor de 35°.

En la grafica se observa que a medida que aumenta el ángulo de ataque cerca de los 30°, se tiene el pico máximo de cavings para esta formación de aproximadamente 10bls/h, esto mismo ocurre hacia la base de la formación en los intervalos cercanos a ese valor. Sin embargo no se observan variaciones en el tipo morfológico de caving que continúa siendo blocoso, lo que indicaría que a medida que la perforación se da a lo largo del buzamiento, son los planos de estratificación y/o las zonas de fracturas los que se están desestabilizando (figura 38).

Por otro lado, al revisar la relación del azimuth del pozo y el esfuerzo horizontal máximo que varía de 4-24° hacia el tope y de 24-8° hacia la base, se puede observar que el pico de cavings se encuentra asociado a intervalo donde esta relación inclinación/esfuerzo es mayor, lo cual puede estar justificando la tasa de cavings en esta sección. El peso de lodo varió de 8.4 -10.2ppg.

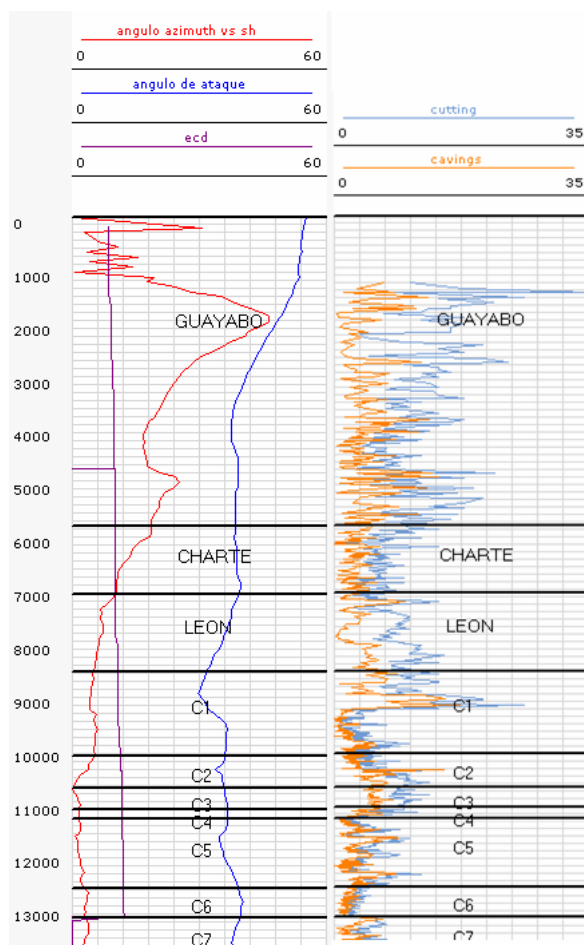


Figura 38 Relación azimuth/esfuerzo y ángulo de ataque en la producción de cavings, pozo ED-41.

7.2.2 Formación Charte

Para esta formación (5987'-7313') el buzamiento reportado continúa siendo 35°, por otro lado el ángulo de ataque permanece casi constante y aproximadamente de 39°, con una producción de cavings bastante baja e inferior a 5bls/h y una relación de esfuerzo/azimuth del pozo de 8.5°-14.3°. Sin variaciones importantes en la tasa de cavings. El peso de lodo se mantuvo constante a 10.2ppg (figura 38).

7.2.3 Formación León

Para este intervalo (7313´-8886´) el buzamiento de las capas se mantiene en 35°, el ángulo de ataque fluctúa entre 36° y 31°, disminuyendo hacia la base.

La rata de cavings es muy inferior a 0.4bls/h, de tipo blocoso, con un peso de lodo que se mantuvo alrededor de 10.2ppg y una relación de esfuerzo/azimut bastante baja de 4-7°. Si bien, este intervalo es reconocido como una de las formaciones mas problemáticas, se pudo observar que fue uno de los intervalos hasta ahora mas estables y de menor producción de cavings (figura 38).

7.2.4 Formación Carbonera

- Miembro C1

En este intervalo (8886´-10568´) el buzamiento reportado continúa a 35°. Con un ángulo de ataque que varía de 30-35° aumentando hacia la base y con un peso de lodo de 10.7-11,6ppg (figura 38) .

Se observa un pico de rata de cavings alrededor de 15bls/h, asociado operaciones de limpieza en el hueco, las cuales tienden a sobrestimar el volumen de caving.

La relación esfuerzo/inclinación es bastante baja y oscila entre 4.5-5 tampoco se observan cambios en los tipos de cavings que se mantienen entre subblocosos y platy.

- Miembro C2

El buzamiento para este intervalo lodoso (10568´- 11226´) fue el mismo reportado para C1 -35°. El ángulo de ataque calculado fué en 36° a lo largo del miembro. El peso de lodo se mantuvo en 11.6ppg. La tasa de cavings continúa siendo baja, no superó los 6bls/h La relación esfuerzo/inclinación fue también bastante baja, variando entre 0.5-1.4°. El tipo de cavings para este intervalo es predominantemente platy (figura 38).

- Miembro C3

Para este intervalo areno-lodoso (11226´-11630´) el buzamiento continúa en 35° y el peso de lodo utilizado fue de 11.6-11.7ppg.

El ángulo de ataque reportado para este miembro fue de 36°, los cavings reportados no superan los 3bls/h y son predominantemente platy. La relación esfuerzo/inclinación es de 1.4-1.7° (figura 38).

- Miembro C4

Para este miembro (11630`-11839`) lodoso se reporta también 35° de buzamiento y el peso de lodo utilizado fue de 11.7-12.03ppg.

El ángulo de ataque reportado fue de 34° y la producción de cavings sigue manteniéndose muy baja, los cavings fueron predominantemente platy. La relación esfuerzo/inclinación fue de 1.1° (figura 38).

- Miembro C5

El buzamiento reportado para este miembro (11839`-13147`) fue igualmente de 35° con un peso de lodo de 11.9-12.8ppg.

El ángulo de ataque fue de 35-39°, con una producción de cavings que no supera los 5bls/h.

La relación esfuerzo/inclinación para este miembro fue calculado entre 1.4-2.95°. La baja producción de cavings en este intervalo se encuentra con en los miembros suprayacentes es bastante baja (figura 38).

- Miembro C6

Para este intervalo (13147`-13787`) el ángulo de buzamiento cambia para este miembro de 35 a 33° y el peso de lodo utilizado fue de 12.1-15.2ppg.

El ángulo de ataque calculado fue de 37.5-38.7°. La tasa de cavings para este intervalo lodoso es bastante baja no superior a 2bls/h subblocosos y algunos platy.

El ángulo calculado en la relación esfuerzo/inclinación fue de 2.8-3,7°. No se observan grandes variaciones aún cuando se encuentra cercana la Falla de Yopal (figura 38).

- Miembro C7

En este miembro (13147`-14567`, Falla Yopal 14494`) el buzamiento se mantiene a 33°. El ángulo de ataque calculado fue de 36.7-37.7°. La producción de cavings aumenta ligeramente pero no sobrepasa los 5bls/h. Se utilizó un peso de lodo de 16.7-16-8ppg.

La relación esfuerzo/inclinación calculada fue de 0.2 a 4.95 ° aumentando hacia la base, sin embargo no se observan cambios ni en la tasa de cavings ni en el tipo morfológico el cual continúa siendo blocoso y platy (figura 38) .

8. DISCUSION DE RESULTADOS

- Para llevar a cabo la evaluación de cavings fue necesario primero plantear una metodología para su estudio. Esta metodología constó de tres fases una de oficina, otra de laboratorio y una de campo, cada una de estas fases incorporó una serie de actividades previamente establecidas.

Una de las actividades más importantes en el desarrollo de este proyecto correspondió a la fase de caracterización, debido a que todos los análisis y revisiones partían de la revisión morfológica de estos fragmentos de roca.

A partir de los resultados de esa caracterización fue posible manejar una primera idea del posible mecanismo de falla que tuvo lugar durante la perforación del pozo.

Una vez se identificó el mecanismo de falla fue posible entonces validarlo con la información obtenida a partir de los registros y se prosiguió a revisar si la ventana operacional desarrollada para cada uno de los pozos mostraba zonas inestables, a que profundidades y que tipo posible de falla. Después de comparar toda esta información, se pudo concluir que la morfología del caving indudablemente corresponde a un medio físico de comprobación del mecanismo de falla en el pozo y que a futuro cuando se conozca con mayor certeza su profundidad, se convertirán en una herramienta mas completa de calibración inclusive para los modelos de estabilidad.

- En cuanto a la definición del mecanismo de falla a partir de su morfología y su subsiguiente validación, es necesario enfatizar primero en la información que ofrece la ventana operacional.

Si bien la ventana constituye una herramienta que permite predecir intervalos de posible inestabilidad, esta solo ofrece información en cuanto a dos mecanismos de falla: falla por tensión y fallas por compresión, luego cualquier revisión que involucre fracturas naturales está fuera del alcance.

Debido a esto es bueno contar con información de registros e información geológica adicional para poder validar este tipo de caving.

9. CONCLUSIONES

- A partir de la caracterización realizada y nivel general, los cavings obtenidos a lo largo de las diferentes formaciones para el pozo YZ-10 fueron básicamente de dos tipos, blocosos-platy y angulares con tamaños de 5-10mm en promedio y con una tasa en promedio de 15bls/h. Se definen entonces dos mecanismos de falla principales que son el efecto de la estratificación y las fracturas y por otro lado el colapso de las paredes del pozo por peso de lodo bajo, esto último corroborado con la información obtenida a partir de los registros tomados

Por otro lado la caracterización de cavings realizada para el pozo ED-41 muestra que a nivel general el tipo predominante de cavings es blocoso con tamaños promedios de 15-25mm asociados a fracturas e inestabilidad en los planos de estratificación y una tasa de 5bls/h.

Esta diferencia en los tipos de cavings entre un pozo y otro pueden ser justificadas debido a los pesos de lodo utilizados.

El espesor de la *Formación Guayabo* en el pozo ED-41 fue casi dos veces el espesor encontrado en el pozo YZ-10, los pesos de lodo utilizados a medida que se profundiza son mas altos entonces se estaban perforando formaciones iguales con pesos de lodo diferente además de esto se debe tener en cuenta las diferencias en los ángulos de ataque y la relación esfuerzo máximo horizontal-azimut del pozo, para los casos.

No se presentaron problemas asociados a cavings además las tasas permanecieron bastante bajas.

- En cuanto a la evaluación de los parámetros operacionales o de perforación y su relación con la producción de cavings, se debe tener en cuenta algunos aspectos. El ROP varía principalmente con el tipo de litología como ocurre con otros parámetros, a medida que se perforan niveles más lodosos, sus valores tienden a disminuir; algo similar ocurre con el comportamiento del TRQ, debido a que la

resistencia de la roca al ser perforada disminuye. Esto también ocurre con el comportamiento del RPM.

Los valores en el GPM se establecen según la operación y pueden variar si se presentan daños en las bombas ya que estas últimas son las encargadas de transmitir potencia dentro de la broca además de transportar los cortes; así que el GPM y el TRQ son muy útiles para determinar las condiciones de limpieza en el hueco.

El volumen adicional de material que debe transportar el lodo, dado por los cavings, podría llegar a tener un impacto sobre la limpieza del hueco, sobre el ECD, torque, volumen de fluido/ propiedades usadas, mientras se perfora.

Con base en lo anterior, a medida que se perfora un intervalo lodoso, como por ejemplo los miembros pares de la *Formación Carbonera* o algunos sectores de la *Formación León*, lo que se esperaría es una producción de cavings mayor con relación a los niveles más arenosos; por tanto bajo esas litologías se espera entonces una ROP y una RPM más alta.

El TRQ evidentemente puede ser afectado entre otros factores por el volumen de cavings que se formen.

Por otro lado fue evidente también que dependiendo de la operación en pozo, se puede estar registrando información poco confiable del volumen de cavings, esto por ejemplo cuando la actividad reportada en el pozo no es perforación sino acondicionamiento del hueco, ya sea rimado o limpieza.

- En cuanto a la evaluación del ángulo de ataque para el pozo YZ-10, se encuentra que a medida que el ángulo entre el buzamiento de las capas y el azimut del pozo disminuye, la rata de cavings también disminuye; siendo el mejor rango de valores para el ángulo de ataque de 45-50°. En cuanto a la relación del esfuerzo máximo horizontal con el azimut del pozo., se presenta un comportamiento bastante similar; a medida que se perfora en la dirección de este esfuerzo, las formaciones se muestran más estables, sin embargo hacia la parte media de la formación carbonera se muestra un comportamiento contrario, sin embargo el volumen de cavings se mantiene bajo; es probable que el alto

peso de lodo (mayor a 15ppg) utilizado sea el que realmente este controlando la integridad de las formaciones a esa profundidad.

Para el pozo ED_41 se presenta un comportamiento similar y bastante uniforme del ángulo de ataque y la relación del esfuerzo máximo horizontal-azimut del pozo, con la profundidad. Para este caso el mejor rango de valores para el ángulo de ataque es de 42-50°.

- El trabajo realizado hasta ahora constituye solo la primera parte en la investigación de cavings, se espera mas adelante poder extender esta metodología de revisión a varios pozos y como un proyecto posterior incluir el efecto probable de la salinidad en la formación de cavings.
- Una parte fundamental en el estudio de cavings corresponde a la caracterización litológica y morfológica, por lo tanto es importante contar con un registro mas completo de las muestras de cavings para los pozos además de implementar una mejor metodología tanto en la recolección como en la preservación de éste material.

10. BIBLIOGRAFIA

1. COOPER M. A., ADDISON F.T., ALVAREZ R., CORAL M., GRAHAM R. H., HAYWARD A. B., and TABORDA. Basin Development and Tectonic History of the Eastern Cordillera and Llanos Basin, Colombia, 1994.
2. DATALOG Colombia, Empresa Prestadora de Servicios, 2005.
3. D. OKLAND ET. AL.: Bedding – Related Borehole Instability in High – Angle Wells, SPE/ISRM 47285, 1998.
4. D.R. BRADFORD, Schlumberger Cambridge Research, et al. When Rock Mechanics Met Drilling: Effective Implementation Of Real Time Wellbore Stability Control, SPE 59121, 2000.
5. DSI Y DUAL OBMI Interpretation Report, Schlumberger. BP Liria YZ-10.
6. EVANS J., FOLMER D.: “Wellbore Stability (Geomechanics) Modelling and Drilling Optimization Practices Reduce Drilling Cost – Terra Nova Project”. Paper N° 2003 – 005, 2003.
7. FAJARDO A., ROJAS L. E., and CRISTANCHO J. Modelo Estratigráfico Llanos y Piedemonte, Definición del Modelo Estratigráfico en el Intervalo Cretáceo Tardío a Mioceno Medio en la Cuenca Llanos Orientales y Piedemonte Llanero, ICP, Abril 2000.
8. I.D.R. BRADFORD, Schlumberger Cambridge Research, et al. When Rock Mechanics Met Drilling: Effective Implementation Of Real Time Wellbore Stability Control, SPE 59121, February 2000.
9. MARTINEZ J. A. Modelamiento Estructural 3D y Aplicaciones en la Exploración y Explotación de Hidrocarburos en el Cinturón de Cabalgamiento del Piedemonte Llanero, Cordillera Oriental, Ecopetrol. Roberto Linares. Colombia
10. MATEUS CORZO REINEL D., Modelamiento Geomecánicos para los pozos YZ-10 y ED-41, ICP, 2000.
11. N.C. LAST AND M.R. MCLEAN: Assessing the Impact of Trajectory on Wells Drilled in a Overthrust Region, SPE 30465, 1995.

12. OSORIO G., Aspectos geomecánicos de la estabilidad de pozos, Memorias, ICP, 2004.
13. SAGE L., HERNANDEZ C., Cuenca de los Llanos Orientales: Estudio Geológico Regional, Vol 1 Texto, Santa Fe de Bogotá, 1995.
14. SOTO C. P., SANDOVAL J. E., GOMEZ J. A., POSADA C. R., and LINARES R. Evaluación Integrada de Yacimientos del Campo Cupiagua, Modelo Integrado Campo Cupiagua, ECOPETROL, Julio de 2001
15. S.M. WILLSON, et. Al.: Drilling in South America: A Wellbore Stability Approach for Complex Geologic Conditions, SPE 53940, 1999.
16. STANDIFIRD WILLIAM, Knowledge Systems www.knowsys.com
17. STEPHEN EDWARDS, BRUCE MATSUTSUYU, STEVE WILLSON, Bp America: Imaging Instable Wellbores While Drillings, SPE 79846, 2003.
18. VIRGILIO A., y NARANJO J. "Compilación y Síntesis Estratigráfica de los Llanos Orientales", GEOCONSULT LTDA, 2004.
19. ZHENG, Z.: "Integrated Wellbore Stability Analysis – Against Tradition", SPE 47282, 1998.