

APLICACION DEL MODELAMIENTO GEOMECANICO BEDDING 3D PARA EL
DISEÑO DE TRAYECTORIAS Y PESOS DE LODO EN POZOS CON
COMPLEJIDAD ESTRUCTURAL - CAMPO CUPIAGUA

WILLIAM ARMANDO FERNANDEZ VERA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2015

APLICACION DEL MODELAMIENTO GEOMECANICO BEDDING 3D PARA EL
DISEÑO DE TRAYECTORIAS Y PESOS DE LODO EN POZOS CON
COMPLEJIDAD ESTRUCTURAL - CAMPO CUPIAGUA

WILLIAM ARMANDO FERNANDEZ VERA

Trabajo de grado para optar al título de Máster en Geotecnia

Director

Dr. Zuly Himelda Calderón
Docente UIS

Co-Director

Dr. Henry Arias
Ecopetrol S.A.

Co-Director

MSc. Reinel Corzo Rueda
ICP-Ecopetrol S.A.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2015

DEDICATORIA

*A Dios por haberme regalado una familia maravillosa,
A Cata, Rafa y Maty.*

William Armando Fernández Vera

AGRADECIMIENTOS

Mis sinceros agradecimientos a los profesores de la escuela de Ingeniería Civil. A los directores del proyecto por el tiempo dedicado en el presente trabajo. A los profesionales del Instituto Colombiano del Petróleo por su apoyo y disponibilidad. Agradezco a mis compañeros de la maestría que me colaboraron en incontables momentos. A los profesionales compañeros del Grupo Central de Tecnologías de Ecopetrol.

William Armando Fernández Vera

CONTENIDO

	pag.
INTRODUCCIÓN	12
1. RESISTENCIA COMPRESIVA DE ROCAS ANISOTROPICAS	14
2. IMPACTO DE LA DIRECCION DEL POZO EN LA ESTABILIDAD DE ROCAS ANISOTROPICAS - ANGULO DE ATAQUE	18
3. AREA DE ESTUDIO	21
3.1. CAMPO CUPIAGUA	21
3.2. FORMACIÓN LOS CUERVOS - MODELO BEDDING / MAPA ESTRUCTURAL 3D	21
3.3. RELACIÓN ESTADO DEL HUECO CON PROYECCIONES POLARES	22
4. MODELO GEOMECANICANICO BEDDING	25
5. DIP-ANALYSER	28
6. CONCLUSIONES	31
BIBLIOGRAFIA	32

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
FIGURA 1. AUTORES QUE HAN INVESTIGADO EL FENÓMENO DE MECANISMO DE FALLA DE ROCAS ANISOTRÓPICAS.	14
FIGURA 2. ANGULO DE OPERACIÓN (θ) PARA UNA ROCA LAMINADA SOMETIDA A DOS ESFUERZOS DE CONFINAMIENTO.	15
FIGURA 3. RESISTENCIA COMPRESIVA UNIAXIAL DEL ESQUISTO ZLOTY STOK EXPERIMENTADO POR KWASNIEWSKI (2009) A VARIOS ÁNGULOS DE OPERACIÓN.	15
FIGURA 4. ANISOTROPÍA EN LA RESISTENCIA DE LA ROCA EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE OPERACIÓN PARA UNA ROCA ISOTRÓPICA (IZQ) Y UNA ANISOTRÓPICA (DER).	16
FIGURA 5. EFECTO DE LA DIRECCIÓN DEL POZO EN LA CONDICIÓN DEL LAS PAREDES DEL POZO.	18
FIGURA 6. ANGULO DE ATAQUE.	19
FIGURA 7. ORIENTACIÓN RELATIVA DEL POZO RESPECTO AL PLANO DE DEBILIDAD.	19
FIGURA 8. PROYECCIÓN POLAR DE UN POZO PERFORANDO DOWN-DIP CON ALTO ÁNGULO DE ATAQUE.	20
FIGURA 9. UBICACIÓN Y ESTRUCTURA DEL CAMPO CUPIAGUA.	21
FIGURA 10. MODELO BEDDING PARA LA FORMACIÓN LOS CUERVOS.	22
FIGURA 11. RELACIÓN PROYECCIONES POLARES CON EL ESTADO DEL HUECO PARA LOS CUERVOS EN EL PAD P.	23
FIGURA 12. PLANOS DE DEBILIDAD EN ARCILLOLITAS LAMINADAS CARBONOSAS.	25
FIGURA 13. CONDICIÓN DE ESTABILIDAD PARA EL POZO P-33 EN FM LOS CUERVOS (A) ISOTRÓPICO (B) PLANOS DE DEBILIDAD.	26

FIGURA 14. CONDICIÓN DE ESTABILIDAD PARA LOS POZOS P-27 Y P-32 EN FM LOS CUERVOS MODELO PLANOS DE DEBILIDAD. 27

FIGURA 15. DIP ANALIZER PARA LOS POZOS DEL PAD P EN FM LOS CUERVOS, MODELO ISOTRÓPICO Y PLANOS DE DEBILIDAD 28

FIGURA 16. DIP ANALIZER PARA EL PAD P, PERMITIENDO UN ANCHO DE BREAKOUT DE 120°(FALLA DEL 33% DEL WELLBORE). 29

LISTA DE TABLAS

	Pag.
TABLA 1. POZOS DEL PAD P ANALIZADOS.	22
TABLA 2. ANGULO DE ATAQUE Y ORIENTACIÓN RELATIVA PARA LOS POZOS DEL PAD P EN FM. LOS CUERVOS.	23
TABLA 3. PROPIEDADES GEOMECÁNICAS PARA EL PAD P - FM. LOS CUERVOS.	26

RESUMEN

TITULO: APLICACION DEL MODELAMIENTO GEOMECANICO BEDDING 3D PARA EL DISEÑO DE TRAYECTORIAS Y PESOS DE LODO EN POZOS CON COMPLEJIDAD ESTRUCTURAL - CAMPO CUIAGUA *

AUTOR: WILLIAM ARMANDO FERNANDEZ VERA **

PALABRAS CLAVE: GEOMECANICA 3D, PLANOS DE DEBILIDAD, MODELAMIENTO BEDDING.

DESCRIPCION:

La necesidad de optimizar la producción y el recobro de yacimiento, además de perforar a partir de locaciones ya existentes, ha generado el requerimiento de pozos de tipo re-entry y multilaterales en el campo Cupiagua. A partir de un análisis del modelo estructural del campo y sus fracturas naturales, los ingenieros de yacimientos definen 'targets' de producción / inyección que permitan una mejor depleción del campo para asegurar el máximo recobro.

Lograr los anteriores 'targets' en la perforación, implica un alto riesgo operacional debido a los problemas típicos de estabilidad de pozos asociados a una zona con alta complejidad estructural, cuenca altamente fallada y tectónicamente activa, altos esfuerzos horizontales, capas buzando con gran pendiente y secuencias alternadas de arena y shale. Dentro de los problemas típicos encontrados en la zona se tienen colapsos de pozos, problemas de limpieza de hueco, pega de tubería, alto torque y fricción, huecos tortuosos, mala cementación, desenrosque inadvertido de la tubería de perforación (backoffs), así como constantes trabajos de 'reaming' y 'backreaming'.

El impacto de la trayectoria, el ángulo de ataque y la orientación relativa del pozo al perforar un shale constituyen elementos fundamentales para estabilizar este tipo de formaciones; premisas que no son consideradas por los modelos isotrópicos típicos como el de Mohr Coulomb o Lade Modificado. En éste trabajo se presenta la metodología para el diseño de las trayectorias y pesos de lodo requeridos teniendo en cuenta el modelamiento geomecánico de formaciones laminadas (Bedding) en el campo Cupiagua.

Este modelamiento considera la heterogeneidad y naturaleza laminar inherente de los shales para la estimación de la resistencia de la roca y el peso de lodo requerido para estabilizarlas. Para lograr lo anterior fue fundamental integrar el modelo geológico estructural, registros de imágenes y las propiedades mecánicas de la roca y la capa.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Zuly Calderón. Ingeniera de Petróleos.

ABSTRACT

TITLE: GEOMECHANICAL BEDDING 3D MODEL APPLICATION FOR WELL TRAJECTORY AND MUD WEIGHTS DESIGN IN STRUCTURAL COMPLEX AREA - CUIAGUA FIELD*

AUTHOR: WILLIAM ARMANDO FERNANDEZ VERA**

KEYWORDS: 3D GEOMECHANICS, WEAKNESS PLANES, BEDDING MODELING

DESCRIPTION:

To improve the oil recovery and production in Cupiagua Field is necessary to drill re-entry and multilateral wells from old locations. Analyzing the structural model of the field and its natural fractures, reservoir engineers define production / injection 'targets' to ensure maximum oil and gas recovery. Complete these 'targets' involves a high operational risk because the typical problems of wellbore stability associated to this area. Problems like borehole collapses, hole cleaning, stuck pipe, high torque and friction, poor cement quality, backoffs and reaming/backreaming are common. The impact of well trajectory, attack angle and relative orientation to drill shales with planes of weakness are key elements to stabilize this type of formations; premises that are not considered by the typical isotropic models such as Mohr-Coulomb or Modified Lade. This study presents the methodology to design well trajectories and mud weights considering the bedding modeling in Cupiagua Field.

This Geomechanical bedding model takes into account the inherent heterogeneity of shales resistance and the required mud weight to stabilize it. To do so, it is necessary to integrate the geological structural model, image logs and mechanical properties of rock and bedding plane.

* Master Thesis.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Zuly Calderón. Ingeniera de Petróleos.

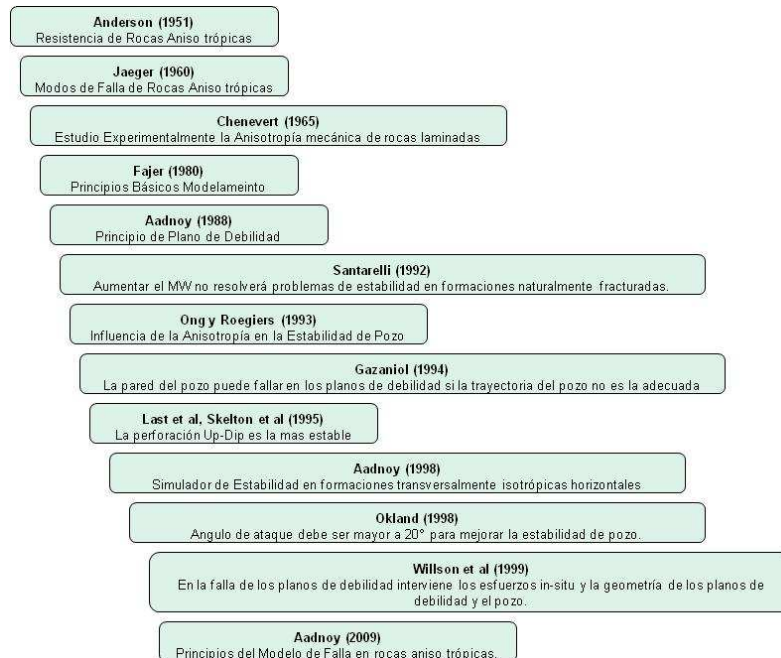
INTRODUCCIÓN

Cuando se perforan formaciones con planos de debilidad en ambientes geológicos con alto tectonismo, la trayectoria del pozo define en gran porcentaje la estabilidad del pozo. Para entender el mecanismo de falla de este tipo de formaciones se expone inicialmente el modelo matemático de la resistencia bajo cargas aplicadas (Capítulo-1). El impacto de la trayectoria en la estabilidad y conceptos como ángulo de ataque se presentan en el capítulo-2. Para aplicar el modelo planteado se utilizaron 3 pozos para el área Cupiagua (Pad P) en la Fm Los Cuervos; en el Capítulo-3 se expone cómo éstos pozos atraviesan la formación y la condición del hueco / problemas operacionales presentados. En el Capítulo-4 se aplica el modelo de planos de debilidad a los pozos del Pad P y se representa la superficie del hueco indicando el porcentaje de falla. En el Capítulo-5 se describe la herramienta para la selección de trayectorias y pesos de lodo 'Dip-Analyzer', la cual tiene en cuenta las propiedades mecánicas de los planos de debilidad, la trayectoria del pozo, la dirección del esfuerzo máximo regional y los esfuerzos in-situ.

1. RESISTENCIA COMPRESIVA DE ROCAS ANISOTROPICAS

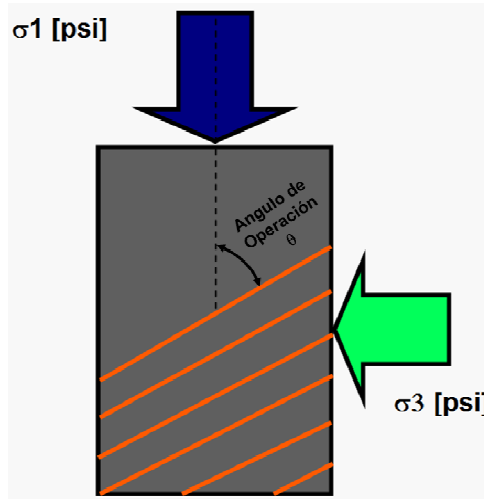
Cuando la resistencia de una roca es dependiente de la orientación del material con respecto a la configuración de los esfuerzos aplicados, se dice que la roca es anisotrópica. La mayoría de rocas son anisotrópicas en alguna forma; el origen de la anisotropía puede ser litológica o intrínseca (Bedding) o inducida por esfuerzos externos (Microfracturas). En los cálculos de mecánica de rocas, ignorar la anisotropía puede inducir grandes estimaciones en las propiedades de estas rocas. En la figura 1 se observa como varios autores han investigado el mecanismo de falla de rocas anisotrópicas desde 1951.

Figura 1. Autores que han investigado el fenómeno de mecanismo de falla de rocas anisotrópicas.



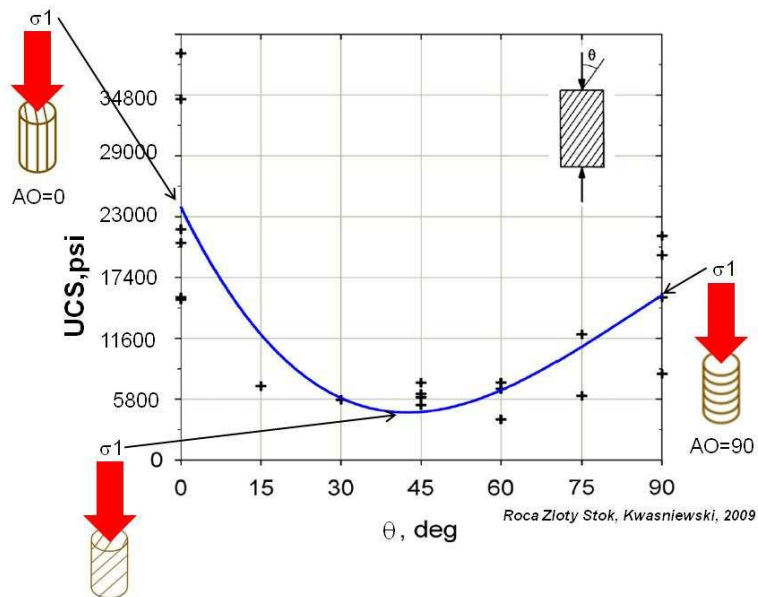
Para rocas anisotrópicas la resistencia a la compresión depende del ángulo de operación (θ). El ángulo de operación es el ángulo entre el esfuerzo máximo aplicado a una roca (σ_1) y los planos de estratificación o de debilidad (Bedding Planes) como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Angulo de operación (θ) para una roca laminada sometida a dos esfuerzos de confinamiento.



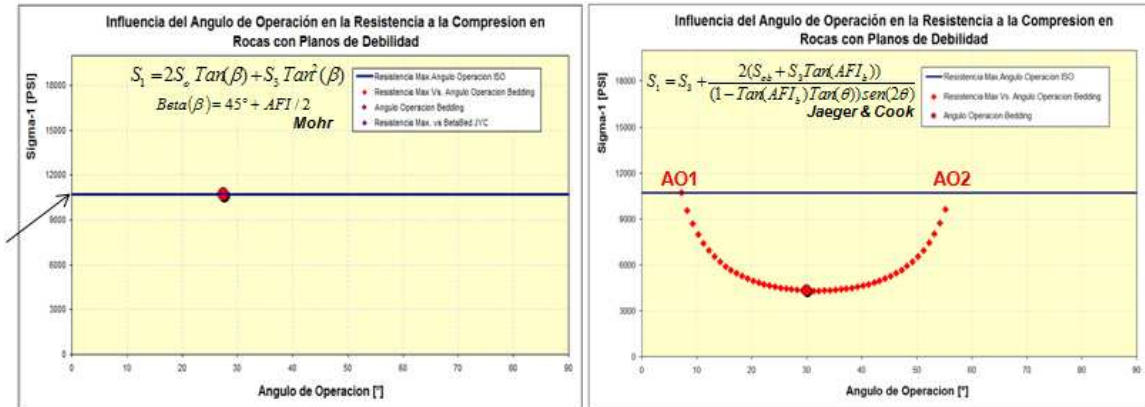
En la figura 3 se expone el comportamiento típico de la resistencia compresiva uniaxial en una roca con planos de debilidad con sus respectivos ángulos de operación. Un ángulo de operación de 0° genera la resistencia máxima de la roca.

Figura 3. Resistencia Compresiva Uniaxial del Esquisto Zloty Stok experimentado por Kwasniewski (2009) a varios ángulos de operación.



El grado de anisotropía de la resistencia del plano de falla dependerá de que tan diferentes son las propiedades AFI y Cohesión del Plano con respecto a la roca intacta.

Figura 4. Anisotropía en la Resistencia de la roca en función del ángulo de operación para una roca isotrópica (Izq) y una anisotrópica (Der).



Dependiendo del ángulo de operación la roca puede fallar por los planos de debilidad o de forma isotrópica. En la figura 4 la línea azul corresponde al valor de resistencia isotrópica de la roca (S_1) utilizando el criterio isotrópico de Mohr, determinada a partir de el esfuerzo de confinamiento S_3 y unas propiedades mecánicas de cohesión (S_o) y AFI como se expone en la siguiente ecuación:

$$S_1 = 2S_o \tan(\beta) + S_3 \tan^2(\beta)$$

El ángulo Beta (β) es el ángulo entre el esfuerzo principal S_1 y la normal al plano de falla y es igual a:

$$Beta(\beta) = 45^\circ + AFI / 2$$

De forma similar para la roca con plano de debilidad (Figura 1.4. Línea roja) la resistencia se calcula utilizando el criterio de Jaeger & Cook (2007) dependerá del ángulo de operación (θ) o ángulo $Beta_{bed}$ ($Beta_{bed} = 90 - \theta$), del confinamiento S_3 y por supuesto de las propiedades mecánicas del plano de debilidad -Cohesión (S_{ob}) y AFI_b , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$S_1 = S_3 + \frac{2(S_{ob} + S_3 \tan(AFI_b))}{(1 - \tan(AFI_b) \tan(\theta)) \sin(2\theta)}$$

La roca con planos de debilidad tendrá resistencias más bajas que la roca isotrópica cuando los ángulos de operación estén entre AO_1 y AO_2 .

$$AO_1, AO_2 = \tan^{-1} \left(\frac{a \pm \sqrt{a^2 - b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \tan(AFI_b)}}{b + 2 \cdot a \cdot \tan(AFI_b)} \right)$$

donde:

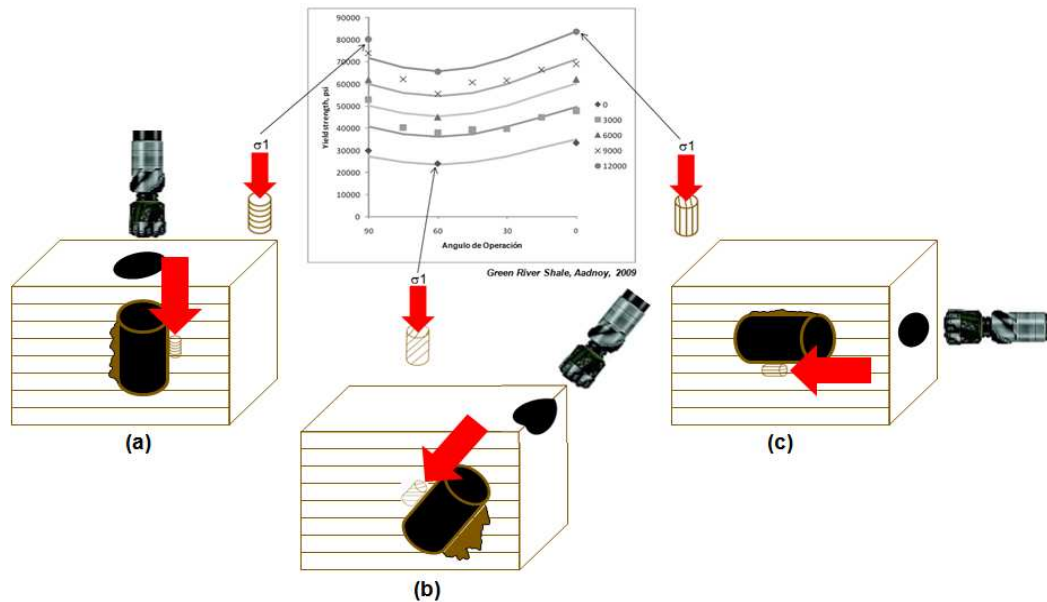
$$a = (S_o + S_3 \cdot \tan(AFI)) \cdot (\tan(AFI) + \sqrt{1 + \tan^2(AFI)})$$

$$b = S_{ob} + S_3 \cdot \tan(AFI_b)$$

2. IMPACTO DE LA DIRECCION DEL POZO EN LA ESTABILIDAD DE ROCAS ANISOTROPICAS - ANGULO DE ATAQUE

Para entender de forma sencilla como la dirección del pozo afecta la estabilidad de las paredes del pozo usaremos el Green River Shale (Aadnoy,2009). 3 pozos atravesaran este shale con planos de debilidad, uno vertical, uno horizontal y otro con inclinación de 30°. Se asume que la carga máxima que soporta la cara del pozo (Esfuerzo Principal Máximo) siempre está en la dirección del eje del pozo (Figura 5).

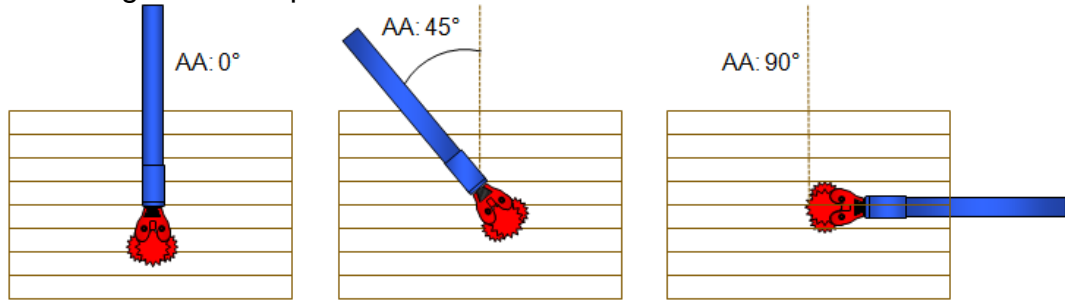
Figura 5. Efecto de la dirección del pozo en la condición de las paredes del pozo.



Bajo las anteriores suposiciones se observa como la condición del hueco, luego de la perforación, es diferente para las trayectorias analizadas. Cuando el pozo se perfora en la condición (b) las paredes del hueco tienen la menor resistencia posible y causarían las mayores deformaciones del hueco.

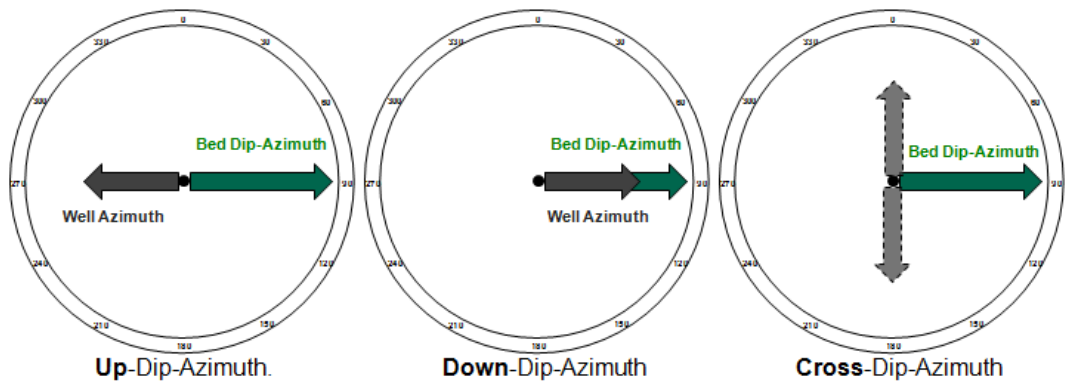
Cuando se propone la trayectoria para la perforación de un pozo que va a atravesar formaciones anisotrópicas o con planos de debilidad se debe definir cómo van a ser atravesados los planos de debilidad por el pozo. Para hacer lo anterior se definen los conceptos de ángulo de ataque y orientación relativa. El ángulo de ataque está relacionado con la inclinación del pozo y la inclinación de la capa o plano de debilidad. Es el ángulo formado entre la inclinación del pozo y la normal a los planos de debilidad, como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Angulo de ataque.



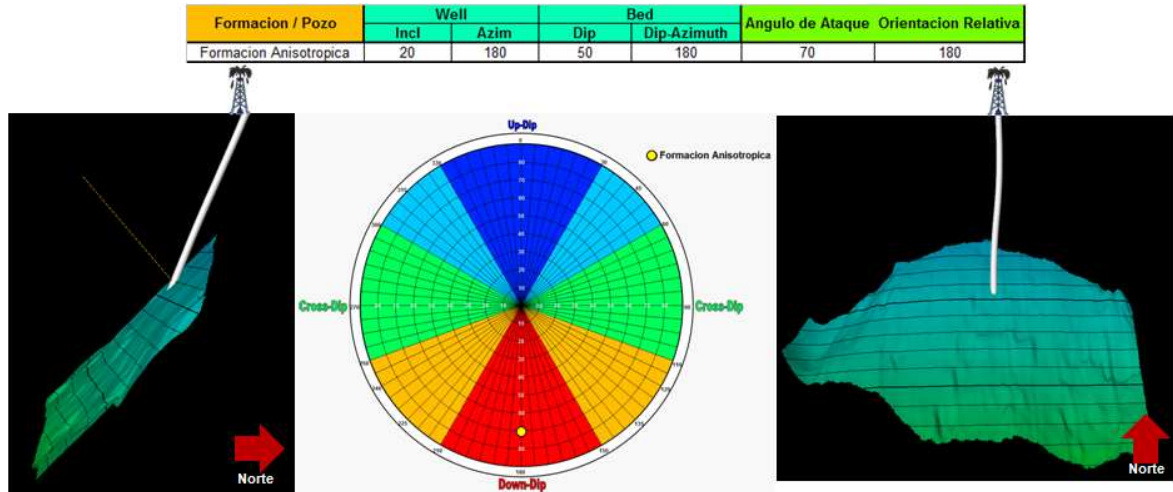
La orientación relativa está relacionada con los azimuts del pozo y del plano de debilidad, y determina el sentido en el que se perfora un pozo con respecto al dip-azimut del plano de debilidad como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Orientación Relativa del pozo respecto al plano de debilidad.



Tanto el ángulo de ataque como la orientación relativa se pueden representar en una proyección polar (Ver Figura 8), para lo cual se necesita la geometría de tanto el pozo (Inclinación y Azimut) como del plano de debilidad (Dip y Dip-Azimuth).

Figura 8. Proyección Polar de un pozo Perforando Down-Dip con Alto ángulo de Ataque.



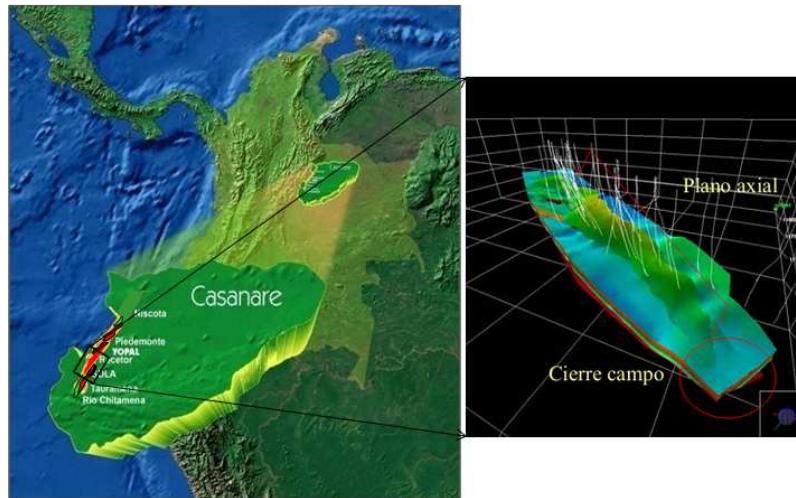
El impacto de la trayectoria (el ángulo de ataque y la orientación relativa) del pozo al perforar un shale constituyen elementos fundamentales para estabilizar este tipo de formaciones; premisas que no son consideradas por los modelos de estabilidad isotrópicos típicos como el de Mohr Coulomb o Lade Modificado.

3. AREA DE ESTUDIO

3.1. CAMPO CUIPIAGUA

El campo Cupiagua está ubicado en el piedemonte de la cordillera oriental de los Andes colombianos en el departamento del Casanare a 175 Km al noroeste de Bogotá y fue descubierto en 1992. La estructura corresponde a un anticlinal asimétrico orientado al nororiente con múltiples fallas inversas como se muestra en la figura 9. El área es de interés ya que se iniciará una campaña de perforación re-entry para la optimización de la producción de crudo y condensado a través de la inyección de gas en yacimiento.

Figura 9. Ubicación y Estructura del Campo Cupiagua.



La perforación de los pozos re-entry constituye un reto dados los factores como complejidad estructural, cuenca altamente fallada y fracturada, altos esfuerzos horizontales (Tectonismo), altos buzamientos de las capas, pozos profundos y formaciones anisotrópicas como el shale de Los Cuervos. La presente aplicación se realizó para los 3 pozos que componen el PAD P (P-27, P-32 y P-33).

3.2. FORMACION LOS CUERVOS - MODELO BEDDING / MAPA ESTRUCTURAL 3D

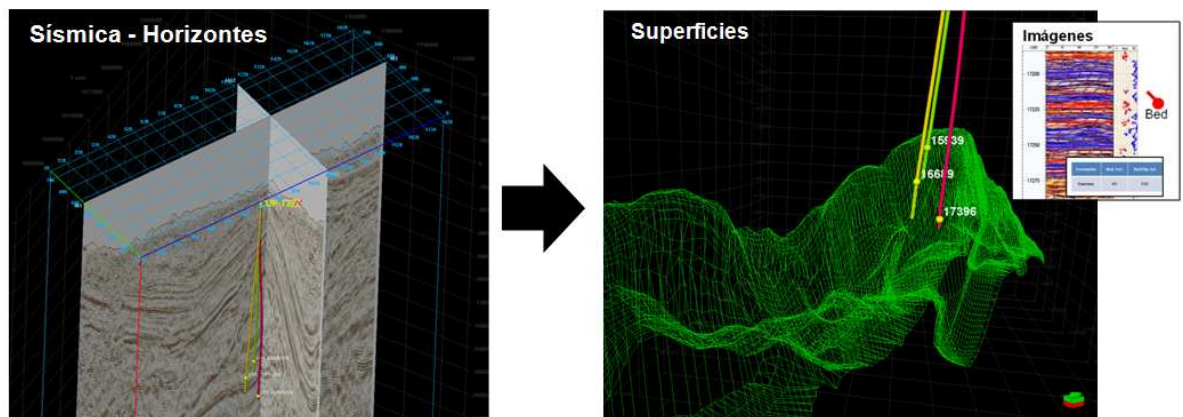
La formación Los Cuervos es una arcillolita / lutita predominante gris cuya superficie se encuentra a aproximadamente -15000 TVDSS, - 17500 ft MD de profundidad. Es la formación problemática de interés ya que es de obligatoria perforación para llegar a las arenas productoras de la Formación Barco. Para saber cual es al ángulo de ataque y la orientación relativa que se presenta al

perforar los pozos que pasan por esta formación es necesario conocer el modelo bedding (Modelo Estructural o Modelo de Capas), donde información de la geometría de la capa esté disponible para cualquier pozo que atraviese la formación. La geometría de las capas se definió utilizando la sísmica de reflexión y registros de pozos disponible para el área.

Para la elaboración del modelo bedding de la formación Los Cuervos (figura 10) se siguieron los dos siguientes pasos:

1. A partir de la Sísmica de Reflexión (Secciones / Volumen Sísmico) en profundidad se interpretaron los horizontes para la formación Los Cuervos.
2. Crear las superficies calibradas (Grillas) con registros de imágenes que permiten conocer valores de Dip y Dip-Azimut de las capas.

Figura 10. Modelo Bedding para la Formación Los Cuervos.



3.3. RELACION ESTADO DEL HUECO CON PROYECCIONES POLARES

El Pad P está compuesto por 3 pozos que perforaron la formación Los Cuervos, cuyas principales características que muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Pozos del Pad P Analizados.

Perforación PAD P			Formación Los Cuervos		
Nombre Pozo	Inicio Perforacion	Profundiad Total (ft)	Tope Fm. Los Cuervos (Md)	Inclinacion Pozo (°)	MW (ppg)
P27	Sept-1998	18035	16668	20	10
P32	Mar-1999	17184	15939	32	10
P33Y	Ago-1999	17696	17395	5	10

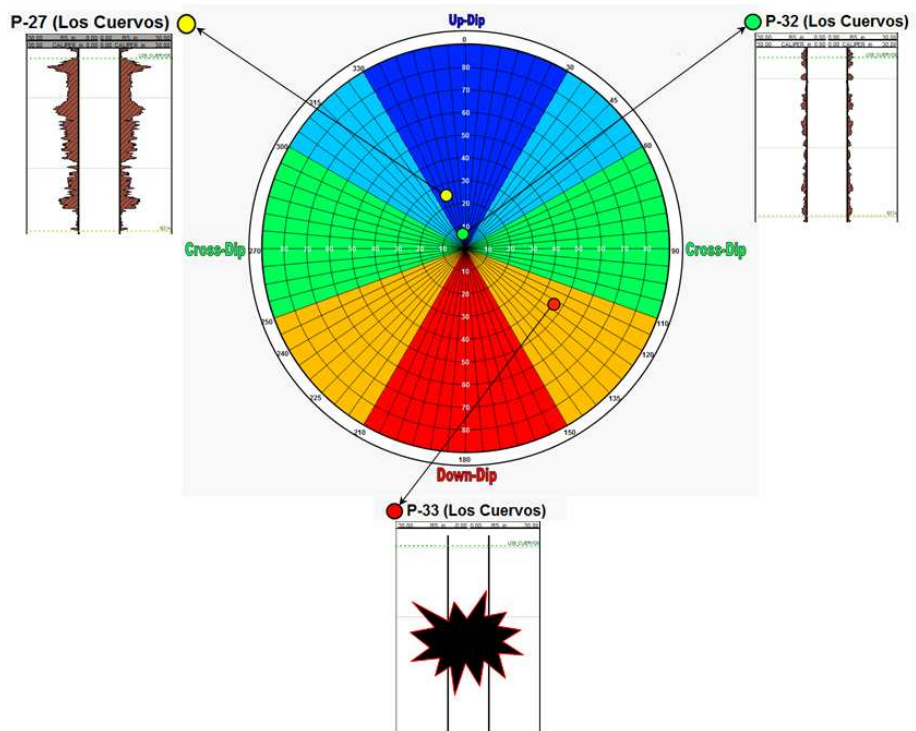
A partir del modelo de capas creado para la formación Los cuervos es posible obtener la geometría de la capa que está siendo atravesada por cada pozo, los datos de ángulo de ataque y orientación relativa se exponen en la tabla 2.

Tabla 2. Angulo de ataque y orientación relativa para los pozos del Pad P en Fm. Los Cuervos.

Formacion / Pozo	Well		Bed		Angulo de Ataque	Orientacion Relativa
	Incl	Azim	Dip	Dip-Azimuth		
P-27 (Los Cuervos)	20	136	43	336	25	340
P-32 (Los Cuervos)	32	140	28	331	7	349
P-33 (Los Cuervos)	5	280	43	338	46	122

En la figura 11 se observa la relación entre las proyecciones polares del ángulo de ataque y orientación relativa con el estado del hueco tomado a partir de registros calíper de 4 brazos. Se identifica como en el pozo P-33 presenta la condición menos favorable de estabilidad (Cross-Down-Dip) ya que el pozo no se pudo seguir perforando en Los Cuervos por 'malas condiciones de estabilidad' según el reporte de perforación.

Figura 11. Relación Proyecciones Polares con el estado del hueco para Los Cuervos en el Pad P.

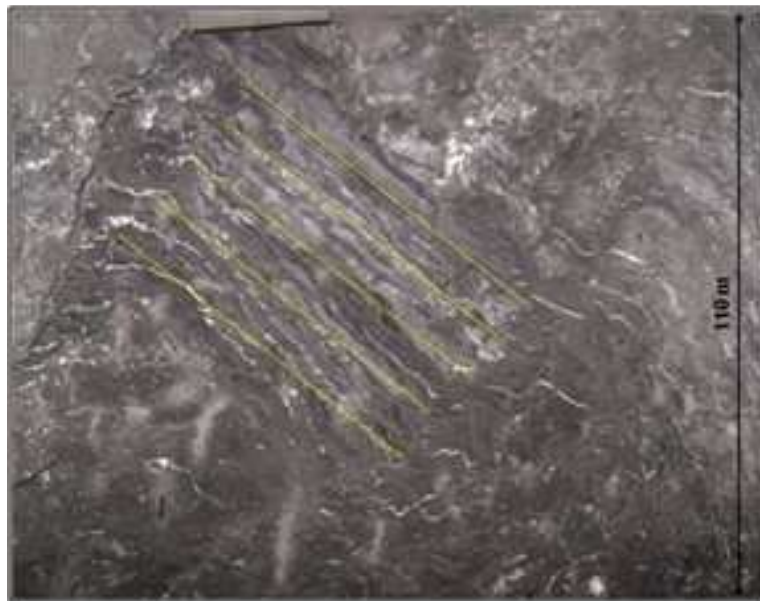


Los pozos P-32 y P-27 se pudieron perforar en Los Cuervos pero el registro cáliper muestra una mejor condición de la pared del hueco en el pozo P-32 que en el pozo P-27 (cáliper promedio de 13 pulgadas en hueco de 8.5 pulgadas). La diferencia de la mejor condición en el pozo P-32 es que éste pozo perforó con mejor tendencia Up-Dip y con un ángulo de ataque muy bajo (7°). Willson et al. (1999) demostró que los pozos con tendencia Up-dip perforados en el piedemonte llanero, son más estables que los pozos perforados con tendencias Cross o Down-Dip. Según Zhang (2005) no solo el estado de esfuerzos alrededor del pozo debe ser considerado en los cálculos de estabilidad de pozo, sino también las propiedades de resistencia anisotrópica de las formaciones laminadas; en la siguiente sección se presenta el modelo geomecánico bedding que tiene en cuenta los planos de debilidad de rocas anisotrópicas.

4. MODELO GEOMECANICO BEDDING

El modelo geomecánico anisotrópico bedding tiene en cuenta el grado más simple de anisotropía de la roca, es decir los planos de debilidad, donde se considera que existen planos paralelos de debilidad cuya resistencia mecánica es menor. Normalmente para rocas sedimentarias pueden considerarse como planos de debilidad las fracturas naturales o shales laminados como se muestra en la figura 12.

Figura 12. Planos de debilidad en Arcillolitas Laminadas Carbonosas.



El criterio de la anisotropía de la resistencia de los planos de debilidad utilizado en el presente estudio corresponde a Jaeger & Cook (2007), donde las variables adicionales para caracterizar este tipo de formaciones son el AFI y Cohesión de la Capa o Plano de debilidad, AFI_b y S_{ob} , respectivamente.

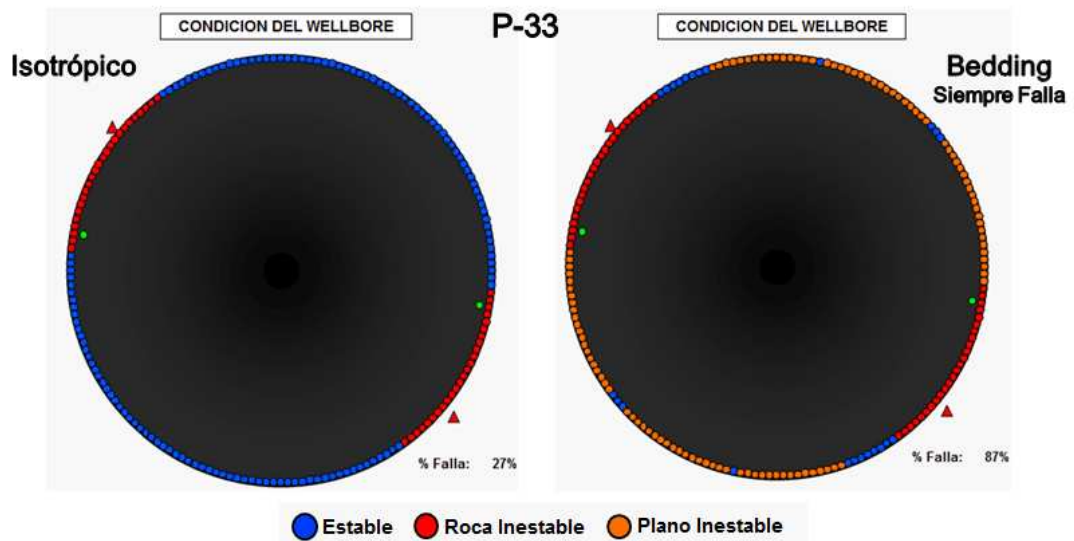
En la tabla 3 se exponen las propiedades geomecánicas utilizadas para el modelamiento geomecánico de los pozos del Pad P.

Tabla 3. Propiedades Geomecánicas para el Pad P - Fm. Los Cuervos.

Propiedades Geomecánicas Promedio Para los Shales de Fm. Los Cuervos		
Profundidad TVD [ft]		15000
Esfuerzos In-Situ	Esfuerzo Vertical [psi/ft]	1
	Esfuerzo Minimo [psi/ft]	0.8
	Esfuerzo Maximo [psi/ft]	1.1
	Direccion Esfuerzo Maximo [°]	130
Presion de Poro [psi/ft]		0.468
Propiedades Mecanicas Roca	Cohesion Roca [psi]	5000
	AFI Roca [°]	30
	Poisson [adim]	0.2
Propiedades Mecanicas Plano	Cohesion Plano [psi]	1300
	AFI Plano [°]	20

En la figura 13 se muestra la condición de estabilidad del pozo P-33 usando el modelamiento isotrópico y de planos de debilidad.

Figura 13. Condición de Estabilidad para el pozo P-33 en Fm Los Cuervos (a) Isotrópico (b) Planos de Debilidad.

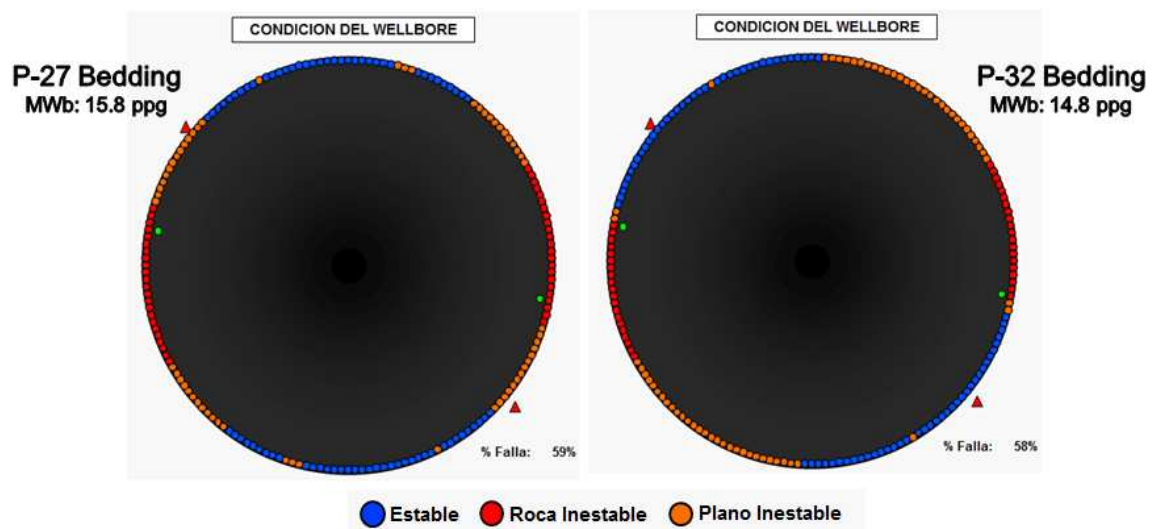


En la figura 13 los puntos azules representan condiciones de estabilidad a lo largo del wellbore, puntos naranja indican zonas donde fallan los planos de debilidad y puntos rojos donde falla la roca de forma isotrópica. Según el modelo de planos de

debilidad para el pozo P-33 el 87% del wellbore falla si se utiliza un peso de lodo de 10 ppg, mientras que el modelo isotrópico solo pronostica falla del 27% del wellbore.

Para los pozos P-27 y P-32 las condiciones del wellbore mejoran como se aprecia en la figura 14, donde los porcentajes de falla del son 58% y 57% respectivamente.

Figura 14. Condición de Estabilidad para los pozos P-27 y P-32 en Fm Los Cuervos Modelo Planos de Debilidad.

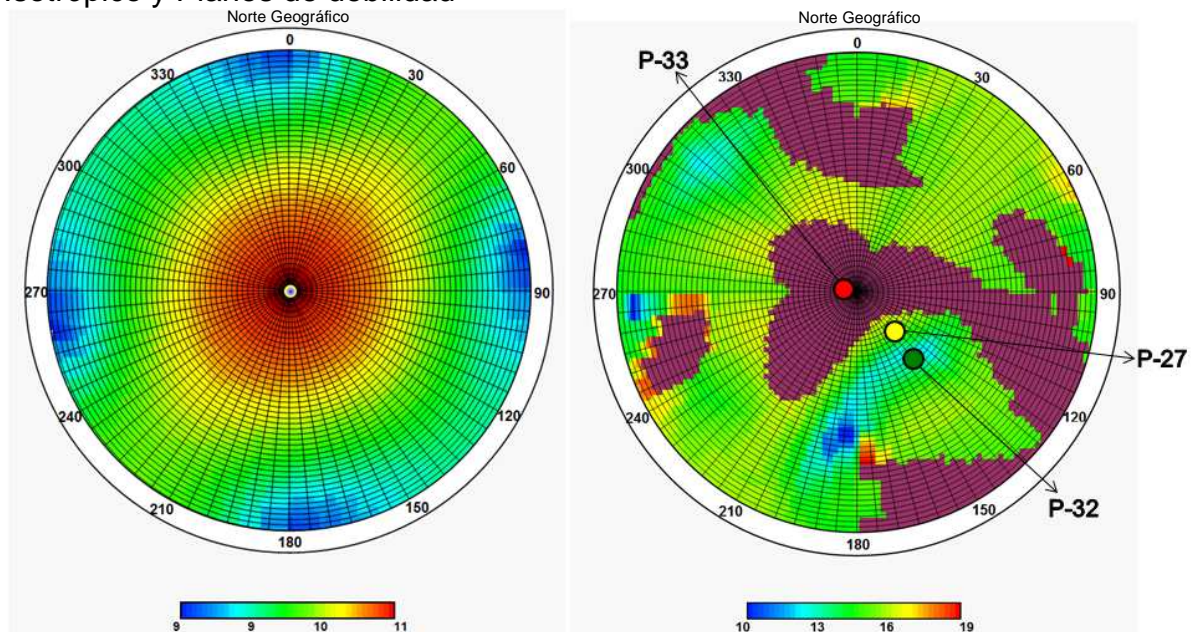


Así mismo, el modelamiento determinó que para la trayectoria del pozo P-33 no existe peso e lodo mínimo que se pueda utilizar para hacer el hueco estable (0% de Falla); para el pozo P-27 ese peso de lodo se determinó en 15.8 ppg y para el pozo P-32 se requiere un peso de lodo de 14.8 ppg para mantener la integridad total del wellbore.

5. DIP-ANALYSER

Según Aadnoy (2009) son tres las condiciones que determinan si una roca falla a través de los planos de debilidad: magnitud de los dos esfuerzos in-situ, orientación del pozo con respecto a la orientación de los esfuerzos in-situ y posición del pozo con respecto a la orientación del plano de debilidad. Para tener en cuenta estos factores al momento de seleccionar una trayectoria se realizó la carta polar llamada Dip-Analizer, la cual se muestra en la figura 15, aplicada al caso de los pozos del Pad P.

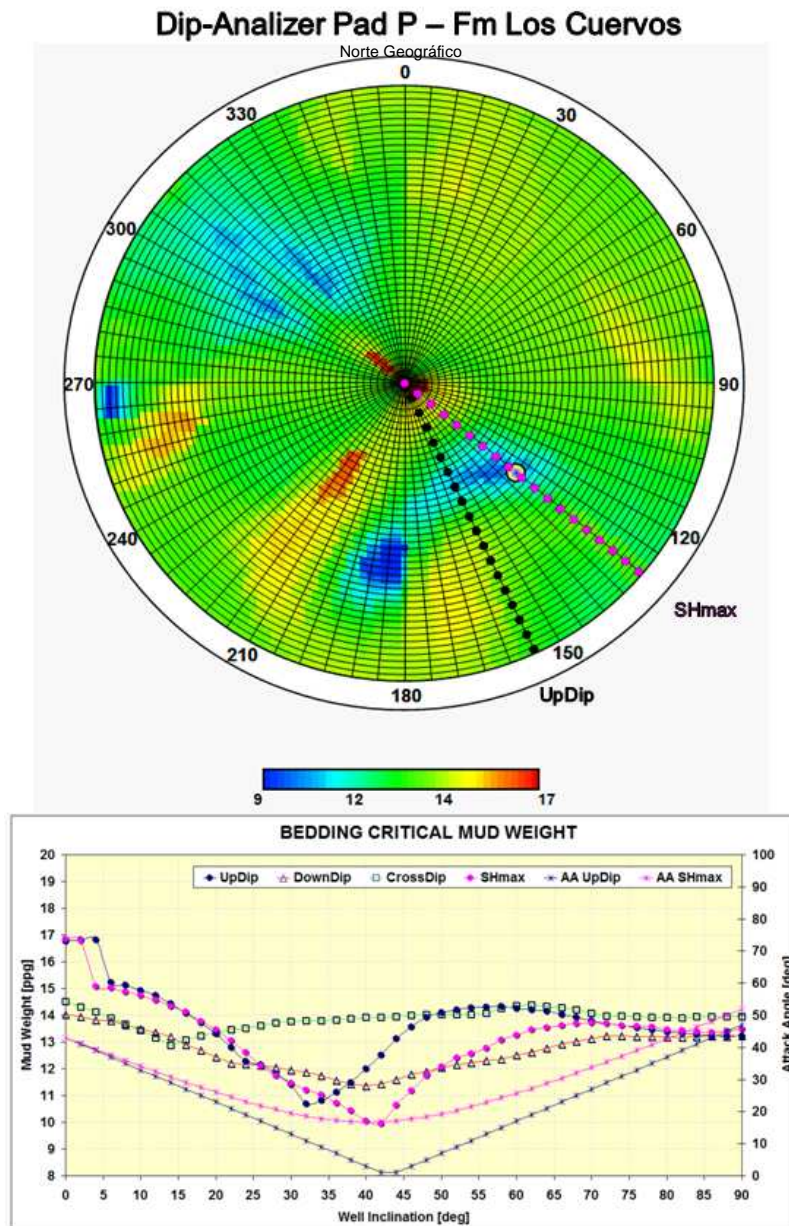
Figura 15. Dip Analizer para los pozos del Pad P en Fm Los Cuervos, Modelo Isotrópico y Planos de debilidad



Cada carta polar maneja un diagrama de temperatura que muestra las mejores trayectorias (En Azul) y las trayectorias con más riesgo (En Rojo), así como zonas en la que bajo ninguna opción de peso de lodo se puede lograr un pozo estable (En Purpura). En la figura 15 se observa que bajo el modelo isotrópico los pozos del Pad P se podrían perforar de forma estable en cualquier trayectoria utilizando un peso de lodo no mayor a 11 ppg. El modelo de planos de debilidad por el contrario indica que no siempre es posible lograr una condición 100% estable del wellbore (Pozo P-33) y que los pesos de lodo requeridos para lograr la estabilidad varían en el rango de 10 a 19 ppg.

En la figura 16 se muestra la carta Dip-Analizer para los pozos del PAD P, permitiendo un ancho de Breakout de 120° (Equivalente a la falla del 33% del wellbore). En la figura 16 se expone que el peso de lodo más bajo requerido en la trayectoria UpDip se logra con ángulos de ataque entre 5° y 13° (Inclinaciones de pozo entre 30° a 38°). También se observa que las trayectorias CrossDip son las que requieren mas overbalance.

Figura 16. Dip Analizer para el Pad P, permitiendo un ancho de Breakout de 120° (Falla del 33% del Wellbore).



A la pregunta si es mejor direccionar el pozo en azimuth Up-Dip o hacia el esfuerzo máximo, bajo las condiciones expuestas en Dip-Analizer para el Pad P, es mejor direccionar los pozos en azimuth hacia el esfuerzo máximo regional (Figura 16 Línea Fucsia) y con ángulo de ataque entre 16 a 17° (Inclinaciones de pozo entre $36 - 44^\circ$).

6. CONCLUSIONES

- Es indispensable la incorporación del modelo estructural, sísmica y registros de imágenes para el análisis del modelo geomecánico de planos de debilidad; trabajo que debe hacerse en conjunto con el grupo de geología del área.

-No tener en cuenta el efecto de los planos de debilidad en el modelo de estabilidad implica considerar condiciones estables para trayectorias que podrían estar dirigiendo el pozo hacia una inminente pega de tubería.

- Para seleccionar la trayectoria optima al perforar formaciones con planos de debilidad no basta con analizar el ángulo de ataque, es necesario revisar la magnitud de los esfuerzos in-situ y la orientación del pozo con respecto al esfuerzo máximo. La Carta Dip-Analizer es idónea para esta tarea ya que implícitamente tienen en cuenta las variables más importantes para evaluar la falla del wellbore por planos de debilidad.

-Según el modelo geomecánico de planos de debilidad planteado, la condición más estable para perforar los pozos es en orientación UpDip o DownDip. El peso de lodo más bajo requerido para estabilidad se logra con una trayectoria UpDip con ángulo de ataque entre 5° a 13°.

- Para la zona del Pad P se logran pesos de lodo más bajos para estabilidad del wellbore si se perfora en la dirección del esfuerzo máximo con ángulo de ataque entre 16 y 17°.

BIBLIOGRAFIA

AADNOY, B, *et al.* Borehole Failure Related to Bedding Plane. En: American Rock Mechanics Association. 2009.

BOL, G, *et al.* Borehole Stability in Shales. En: Society of Petroleum Engineers. (1994); p. 87-94.

COOPER, M. A. Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. En: AAPG Bulletin. Vol. 79, No. 10 (Oct. 1995); p. 1421–1443.

FJAER, Erling. Petroleum related rock mechanics. 3ed. Hungria. 2008. 515 p.

JAEGER, J. COOK, N. Zimmerman, R. Fundamentals of rock mechanics. 4ed. Singapur. 2007. 489 p.

KWASNIEWSKI, M. Testing and Modeling of the Anisotropy of Tensile Strength of Rocks. En: International Conference on Rock Joints and Jointed Rock Masses. Ene. 2009); 8 p.

LABENSKI, F. REID, P. SANTOS, H. Drilling Fluids Approaches for Control of Wellbore Instability in Fractured Formations. En: Society of Petroleum Engineers. No. 85304 (2003); 8 p.

OORT, V. E. Physico-Chemical Stabilization of Shales. En: Society of Petroleum Engineers. No. 37263 (1997); 16 p.

WILLSON, S.M, *et al.* Drilling in South America: A Wellbore Stability Approach for Complex Geologic Conditions. En: Society of Petroleum Engineers. No. 53940 (1999); 10 p.

ZHANG, Jinaguo. The Impact of Shale Properties on Wellbore Stability. Texas. 2005. 276 p. Disertación Doctoral. Universidad de Texas en Austin. Facultad de Ingeniería de Petróleos.