

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD CRÍTICA DE TRANSPORTE Y EL FACTOR DE EXCENRICIDAD DE LA TUBERÍA PARA EL ACARREO DE RIPIOS EN POZOS HORIZONTALES

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Pachón A. Carlos A.,
Brito G. Christian D.
Para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo

Caracas, 2013

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD CRÍTICA DE TRANSPORTE Y EL FACTOR DE EXCENRICIDAD DE LA TUBERÍA PARA EL ACARREO DE RIPIOS EN POZOS HORIZONTALES

Tutor académico: Prof. Pedro Díaz

Tutor industrial: Ing. Lenin Brito

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Pachón A. Carlos A.,
Brito G. Christian D.
Para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo

Caracas, 2013

**Pachón A., Carlos A.
Brito G., Christian D.**

**ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD CRÍTICA DE
TRANSPORTE Y EL FACTOR DE EXCENTRICIDAD DE LA TUBERÍA PARA
EL ACARREO DE RIPIOS EN POZOS HORIZONTALES**

Tutor académico: Prof. Ing. Pedro Díaz. Tutor industrial: Ing. Lenin Brito

**Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería de Petróleo.
Año 2013, 162 p**

Palabras Claves: Pozos horizontales, cama de arena, excentricidad, velocidad crítica de transporte, régimen de flujo, limpieza de hoyo.

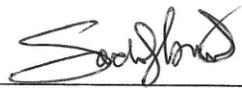
Resumen. Este trabajo especial de grado se enfocó principalmente a un estudio más profundo del comportamiento de las partículas de arena en el seno de un fluido, durante la limpieza de hoyo en pozos horizontales. La predicción efectiva del transporte de las partículas depende del correcto análisis en la interacción de todos los parámetros involucrados, gasto de limpieza, reología del fluido, excentricidad de la tubería de perforación (TP), diámetro de la TP, de la tubería de revestimiento (TR), ángulo de inclinación, régimen de flujo. Este estudio se hizo por medio de un modelo multifásico con dos fases (sólido y líquido), una capa que representa una cama de arena en la parte baja de la tubería, que puede o no estar en movimiento y otra capa heterogénea de fluido en la parte alta de la tubería. En particular el modelo describe, por balance de masa y de momentum, el comportamiento de transporte e incluye la influencia de los parámetros nombrados anteriormente, haciendo especial hincapié en la influencia que tiene la excentricidad en relación a todas las demás variables. Se elaboró un pequeño modelo matemático que permitió calcular la interacción de los parámetros mencionados anteriormente, sensibilizando cada uno de los mismos, para observar cuales eran los parámetros más relevantes a tomar en cuenta al momento de planificar la limpieza de hoyo en pozos horizontales. El parámetro que tiene mayor importancia, es la velocidad anular, la misma es controlada por medio del caudal que se bombea en superficie, tomando en cuenta las condiciones operacionales al momento de la perforación. El número de Reynolds también es factor importante en pozos con ángulos superiores a 40° , en donde lo más óptimo sería alcanzar regímenes turbulentos para una eficiente limpieza del hoyo. La excentricidad tiene un papel importante a partir de aproximadamente 60° de inclinación del pozo, donde se observa que mientras más concéntrica la tubería se encuentre a partir de este ángulo, mejor y más eficiente será la limpieza de hoyo. El estudio se realizó para un pozo horizontal 3D, observado la influencia que tiene la excentricidad no solo cuando varía en un solo eje, sino que a su vez también cuando la tubería se recuesta hacia los lados del pozo.

Caracas, Octubre de 2013

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Christian Daniel Brito Guerrero, y Carlos Alberto Pachón Aguirre, titulado:

“Análisis de la relación entre la velocidad crítica de transporte y el factor de excentricidad de la tubería para el acarreo de ripios en pozos horizontales”

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



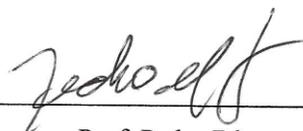
Prof. Sandro Gasbarri.

Jurado



Prof. Violeta Wills

Jurado



Prof. Pedro Díaz

Tutor Académico

DEDICATORIA

A mi abuelo, que en paz descanse, que a 2 meses de finalizar mi tesis te nos fuiste, tú siempre estuviste pendiente de mis estudios, y era el nieto del que estabas más orgulloso, yo sé que en donde estas, estas orgulloso de este momento, y a ti quiero dedicarte este logro.

A Dios, por hacerme la persona que soy, por haberme dado la posibilidad de cumplir todas mis metas y las que vendrán.

A mis padres y mi familia, por haberme cultivado todos los valores que hoy en día tengo, por siempre estar ahí en todo momento y siempre brindarme su apoyo y ayuda sin siquiera dudarlo. Por enseñarme el valor de conseguir todo lo que uno se propone y desea, con esfuerzo, dedicación, honestidad y trabajo continuo, así como también por ser siempre un apoyo no sólo a lo largo de mi carrera sino de mi vida. Gracias a ustedes soy quien soy y estoy logrando todo esto.

A mi hermano Richard por siempre ayudarme en todo y siempre ser un apoyo incondicional en todo momento, por apoyarme y siempre brindarme su ayuda.

A mi hermano y tutor industrial Lenin, que a pesar de las pruebas que nos ha puesto la vida, hoy en día somos más unidos de lo que algún día pudimos pensar, gracias por tu guía hacia el camino de la excelencia y tu cariño incondicional.

Christian Brito.

A mis padres; por estar a mi lado en todo momento, guiándome e incentivarme a seguir siempre adelante y nunca darme por vencido.

A Diana, por ser una guía y mas que una hermana una amiga.

A Mis hermanos, a pesar de no poder compartir todos los días, siempre hemos logrado mantenernos juntos apoyándonos en todo momento.

A ti Aimee, por ser tan bella y creer siempre en que podría alcanzar este sueño, nunca lo dudaste.

Alexander Piñón, por ser un hermano para mí.

A Cari, por estar a mi lado y darme todo el apoyo que necesite!!!

Carlos A. Pachón A.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la vida, por darme una familia tan maravillosa, por esas espléndidas amistades, por darme todo y hacerme muy feliz.

A la Universidad Central de Venezuela, porque en ella aprendí mucho de lo que se ahora y allí fue donde logré realizar este sueño, la cual considero mi segunda casa. Así como a todas aquellas personas que son y fueron parte de ella y de una u otra manera me apoyaron y colaboraron conmigo cuando lo necesite, y en especial a todos aquellos compañeros que a lo largo de la carrera no solo fueron compañeros de clases sino también supieron ser amigos.

A mis padres, quienes me han apoyado toda mi vida y a lo largo de toda mi carrera.

A mis hermanos que siempre y en todo momento me han apoyado.

A mi hermano y tutor industrial Lenin Brito por aceptar ser nuestro tutor industrial y habernos ayudado con tanto profesionalismo y ética.

A Pedro Díaz por ser nuestro tutor académico, por tanta ayuda y tener tanta paciencia con nosotros.

A todas mis amistades, por haberme ayudado siempre y sin dudarlo a lo largo de mi carrera, Pachón por ser tremenda persona y excelente compañero de tesis, siempre con buen humor logramos que se nos facilitara la realización de este trabajo especial de grado, Diego, Olesni, Ángel, Daniel, William, Silva y a todos los que me faltan por nombrar.

Christian Brito.

Ante todo le agradezco a Dios, por darme tantas cosas bellas en mi vida y permitirme alcanzar este logro.

A la U.C.V por ser más que una universidad para mí, ella fue una verdadera casa en la cual viví innumerables experiencias y en cuyos pasillos conocí a personas maravillosas, las cuales a su manera forman parte de mi vida.

A mi Papa, por estar en cada momento a mi lado y apoyarme. Por la paciencia que ha tenido y sus enseñanzas que al final me han permitido ser el hombre que hoy soy. Gracias a ti por siempre

Mamá especialmente a ti dedico este trabajo el cual es muestra de mi esfuerzo y mis ganas de seguir adelante, así como lo hiciste tú, eres una mujer emprendedora que siempre me inspiró a seguir adelante y a nunca rendirme.

A mi hermana Diana, por ser paciente conmigo y ayudarme en cada momento en que lo necesite. Por ser cada día una verdadera amiga y incluso en varios momentos como una madre. Para ti este trabajo.

A Jairo por ser una guía a lo largo de este trabajo y ayudarme cada día a seguir adelante y completarlo exitosamente.

A Aimee, por ser tan bella y estar conmigo en este camino a su manera. Tu compañía y cariño fue fundamental para llegar a este punto.

A Pedro Díaz, por ser amigo y guía. Gracias por apoyarme en la carrera y en especial en la realización de este trabajo.

A Lenin Brito, por todo el apoyo que nos otorgó y cada mensaje de ánimo dado. Eso nos incentivó día a día a alcanzar este trabajo y a llegar a ser colegas.

A mi compañero de trabajo Christian Brito, por ser perseverante y gracias a todos esos días extremos de trabajo alcanzamos juntos esta meta.

A mis amigos Eduardo Bastidas, Ana Figueroa, Charbel Maroun, Gustavo Araque y Néstor Agrizonis por siempre estar pendientes y estar tanto en las buenas como en las malas.

A Gonzo, Williams, Azuaje, Silva por ser excelentes amigos ya dentro de poco todos seremos colegas! Y especiales gracias a Cari Garcia, Adriana Guti, Olesni, Willeska, Angie Salazar , Diego Cortez, Efrain Rodríguez, Cristóbal, Anais Chacon y todos los que seguramente me falta nombrar, gracias!

Carlos A. Pachón. A.

ÍNDICE

ÍNDICE	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE TABLAS	xvi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
1.1 ANTECEDENTES	8
1.2 OBJETIVOS.....	19
1.2.1 Objetivo General.....	19
1.2.2 Objetivos Específicos.....	19
1.3 ALCANCE	20
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	21
1.5 LIMITACIONES.....	24
CAPÍTULO II	25
MARCO TEÓRICO.....	25
2.1 Perforación direccional.....	25
2.1.1 Procedimiento de perforación.....	26
2.1.2 Herramientas direccionales.....	26
2.1.3 Técnicas en hoyos direccionados.....	27
2.1.4 Tipos de pozos direccionales	29
2.2 Reología.....	33
2.2.1 Parámetros reológicos.....	33
2.2.2 Modelos Reológicos	33
2.2.3 Regímenes de flujo	35
2.3 Hidráulica	36
2.4 Hidráulica Avanzada	37
2.4.1 Factores a considerar en la simulación avanzada de Hidráulica.....	37

2.5 Transporte de partículas	42
2.5.1 Influencia de la rotación de la tubería en el transporte de partículas.....	43
2.5.2 Fuerzas Fluido-partícula	44
2.5.3 Mecanismos de asentamiento de la partícula.....	51
2.5.4 Patrones de flujo en el transporte de partículas	54
CAPÍTULO III	56
DESCRIPCIÓN DE LAS ÁREAS DE PRODUCCIÓN EN VENEZUELA	56
3.1 Faja Petrolífera Del Orinoco	56
3.1.1 Bloque Junín	56
3.1.2 Localización Pozo.....	57
3.1.3 Yacimiento MER SDZ0002.....	58
3.1.4 Modelo Petrofísico Mer Sdz0002 (Arena “D”)	60
3.1.5 Reservas Yacimiento Mer Sdz0002.....	61
3.1.6 Pronostico De Producción	62
3.1.7 Información General.....	63
CAPÍTULO IV	66
MARCO METODOLÓGICO.....	66
4.1 Tipo y Diseño de la Investigación	66
4.2 Población y Muestra	66
4.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	66
4.4 Procedimiento.....	67
4.5 Desarrollo Matemático	68
4.5.1 Predicción De La Excentricidad	69
4.5.2 Continuidad o Conservación De Masa	70
4.5.3 Concentraciones De Arena	72
4.5.4 Velocidad De La Cama De Arena, U_b	76
4.5.5 Ecuaciones De Momentum Para Flujo Permanente	78
4.5.6 Número De Reynolds.....	85
4.5.7 Cálculo de las Áreas y los Perímetros	85
4.5.8 Solución Del Modelo	92

4.5.9 Validación Por Ecuación Empírica de Evren	93
CAPÍTULO V	95
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	95
5.1 Comportamiento de la excentricidad de la tubería en el pozo de estudio JA19-12.....	96
5.2 Comportamiento Del Pozo.....	98
5.3 Efecto De La Excentricidad De La Tubería De Perforación Respecto Al Hoyo En La Formación De La Cama De Arena.	99
5.4 Influencia de la variación del ángulo de inclinación del pozo JA19-12 en la formación de la Cama de Arena.	101
5.5 Influencia del Caudal del Fluido en la Formación de la Cama de Arena. ...	102
5.6 Efecto Del Régimen De Flujo En La Formación De La Cama De Arena. ..	106
5.7 Influencia De La Excentricidad De La Tubería En La Velocidad De La Cama De Arena Y La Velocidad Del Área De Suspensión.	107
5.8 Influencia Del Diámetro De La Tubería De Perforación En La Formación De La Cama De Arena.	109
5.9 Influencia De La Excentricidad De La Tubería De Perforación En La Velocidad Crítica De Transporte.	110
5.10 Validación Por Ecuación Empírica de Evren	111
5.11 Análisis del comportamiento de torque del pozo JA19-22.....	113
5.12 Análisis del comportamiento del arrastre del pozo JA19-22.....	114
CONCLUSIONES	117
RECOMENDACIONES	119
BIBLIOGRAFÍA	120
APÉNDICE A	125
SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE DIFUSIÓN Y AJUSTE DE LA ECUACIÓN	125
APÉNDICE B	130
ÁREA DE LA REGIÓN DE SUSPENSIÓN	130
APÉNDICE C	132
CÁLCULO DE PARÁMETROS REOLOGICOS.....	132

APÉNDICE D..... 134
CALCULO TIPO DEL MODELO 134

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Parámetros de limpieza de hoyo, su influencia y posibilidad de control en el campo.	6
Figura 2. 2 Pozo tipo <i>Slant</i> o Tangencial.....	29
Figura 2. 3 Pozo Tipo S.	30
Figura 2. 4 Pozo Tipo S modificada.	31
Figura 2. 5 Pozo Tipo “J”.....	32
Figura 2. 6 Pozo Horizontal.....	32
Figura 2. 7 Variación de los espacios anulares.	38
Figura 2. 8 Trayectorias de pozo.....	39
Figura 2. 9 Excentricidad en diferentes puntos de un pozo.	40
Figura 2. 10 Cama de recortes y excentricidad.....	41
Figura 2. 11 Acumulación de recortes de acuerdo a diseños de pozos.	42
Figura 2. 12 Fuerzas que actúan sobre una partícula en el seno de un flujo.....	45
Figura 3. 1 Área de La Faja Petrolífera del Orinoco	56
Figura 3. 2 Mapa Isópaco - Estructural del Yacimiento MER SDZ0002. Ubicación localización JA19-12.....	57
Figura 3. 3 Sección estratigráfica NE-SO, arena D, Yacimiento MER SDZ0002. Ubicación localización JA19-12.	59
Figura 3. 4 Vista 2D Modelado Geoestadístico del Oligoceno Bloque Junín Sur.....	59
Figura 3. 5 Línea sísmica (“Crossline” 80) 3D Sísmico de Petrocedeno.	61
Figura 3. 6 Evaluación petrofísica del pozo ZPJ10-0011.	62
Figura 4. 1 Representación de las regiones de transporte, velocidades y esfuerzos de corte	70
Figura 4. 2 Momento generado en A por efecto de las fuerzas que actúan sobre las partículas.	76
Figura 4. 3 Fuerzas que actúan sobre la región de suspensión.....	79
Figura 4. 4 Perímetros mojados de las regiones.....	80

Figura 4. 5 Fuerzas que actúan sobre la región de la cama de arena.	81
Figura 4. 6 Representación esquemática la excentricidad.	86
Figura 4. 7 Representación esquemática de la geometría del pozo y la tubería de perforación.	87
Figura 4. 8 Representación esquemática de la geometría del pozo y la tubería de perforación para un ángulo ϕ de desfase.	88
Figura 5. 1 Excentricidad Versus Ángulo.....	97
Figura 5. 2 Comportamiento del pozo JA19-12. Caudal Constante 210 GPM.....	99
Figura 5. 3 Influencia de la excentricidad en la cama de arena	100
Figura 5. 4 Concentración en Suspensión Vs Ángulo.....	101
Figura 5. 5 Efecto de diferentes Caudales en el espesor de la cama de arena.	103
Figura 5. 6 Efecto de diferentes Caudales en el espesor de la cama de arena con desfase de 45°	104
Figura 5. 7 Hidráulica simulación WELLPLAN.	105
Figura 5. 8 Efecto del régimen de flujo.....	106
Figura 5. 9 Comportamiento de la velocidad en suspensión y en la cama de arena.	108
Figura 5. 10 Comportamiento de la velocidad en suspensión y en la cama de arena. Con $e=1$ y $\phi=45^\circ$	109
Figura 5. 11 Efecto del diámetro de la tubería de perforación.....	110
Figura 5. 12 Efecto de la Excentricidad a la Velocidad Crítica de Transporte.	111
Figura 5. 13 Validación del modelo.....	112
Figura 5. 14 Simulación de torques	114
Figura 5. 15 Simulación de arrastre	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1 Resumen del análisis petrofísico del pozo ZPJ10-0011 (Arena “D”).....	60
Tabla 3. 2 Información general	63
Tabla 3. 3 Información Geológica	64
Tabla 3. 4 Topes Formacionales	64
Tabla 5. 1 Parámetros de entrada para el modelo matemático.....	95
Tabla A. 1 Factor de corrección A.....	128

INTRODUCCIÓN

La ubicación natural de los yacimientos petroleros es generalmente muy incierta, por lo que se requiere un estudio y una planificación rigurosa a la hora de explorar y comenzar con el proceso de explotación. En la mayoría de los casos dichos yacimientos se encuentran por debajo de áreas inaccesibles verticalmente tales como zonas urbanas o restringidas ecológicamente y la forma tradicional de llegar a las arenas prospectivas es en extremo difícil, por lo tanto a través de los años se ha buscado la forma más práctica y económica para explotar estos yacimientos, llegando a una modificación de la perforación tradicional y desarrollándose lo que se llamaría perforación direccional, posicionando pozos perforados desde una localización ubicada a cientos de metros de la arena reservorio y así llegar al objetivo deseado. Este tipo de avance en la perforación permitió el desarrollo a su vez de yacimientos marinos los cuales resultarían incosteables si no hubiera sido posible perforar varios pozos direccionales desde una misma plataforma, ya sea esta del tipo marina auto elevables que se utilizan para perforar en aguas someras de un máximo de 100 metros de tirante de agua hasta las plataformas marinas semi-sumergibles que permiten perforar en agua mayores de 100 metros de profundidad.

En la actualidad la perforación direccional es una práctica común utilizada para explotar yacimientos petroleros. Sin embargo, el conocimiento de esta técnica de perforación está concentrado en muy pocos ingenieros de nuestras áreas de diseño y operación. Un pozo direccional es aquel que se perfora a lo largo de una trayectoria planeada para atravesar el yacimiento en una posición predeterminada (objetivo), localizada a determinada distancia lateral de la localización superficial del equipo de perforación. Para alcanzar el objetivo es necesario tener control del ángulo y la dirección del pozo, las cuales son referidas a los planos vertical (inclinación) y horizontal (dirección), respectivamente ^[1].

La perforación direccional entro en el escenario mundial alrededor de la década de 1970 como una técnica que permitía acceder a las reservas que de otro modo resultarían inalcanzables. Desde entonces ha estado en constante desarrollo y mejoramiento, pasando por la tecnología primitiva que implicaba el empleo de dispositivos tales como las cuñas de desviación que provocaban la deflexión de la barrena de perforación el cual ofrecía un control limitado y que con demasiada frecuencia se traducía en pérdida de los objetivos.

Posteriormente se introdujo el motor de desplazamiento positivo ofreciendo con este, una mejor capacidad de dirección y junto a esta un control direccional pero aun así carecía de una alta eficiencia. Así con el tiempo, se llegaron a los motores de direccionales permitiendo la rotación y el desplazamiento de la columna de perforación desde la superficie, lo que mejoro aun más el control direccional aunque aun le faltaba eficiencia dado que los esfuerzos de torsión y el arrastre extremos limitaban la capacidad de perforación en los modos de deslizamiento y rotación, impidiendo el acceso a algunos objetivos. La introducción de la tecnología rotativa direccional elimino varias de las desventajas de los métodos de perforación direccional previos. Esto se debe a que un sistema rotativo direccional perfora direccionalmente con rotación continua desde la superficie, no existiendo la necesidad de deslizar la herramienta, a diferencia de las perforaciones realizadas con motores direccionales. Esto termino de llevar a la perforación direccional a una escala mundial más aceptada en la industria. Permitiendo así el desarrollo de nuevas tecnologías continuando su actualización.

Entre los estudios realizados para mejorar la perforación direccional, no solo se han centrado en configuración del hoyo o del tipo de motor que se utiliza para desarrollarlo, también ha sido objeto de análisis las características reológicas del fluido de perforación para permitir una ejecución optima del proyecto de perforación bajo las condiciones operacionales establecidas por el equipo de diseño del pozo. Una de los factores que tienden a afectar el comportamiento reológico del fluido es la contaminación del mismo por los recortes producidos al fracturarse la formación por

medio de la mecha al realizarse la perforación. Así conjuntamente al desarrollarse el estudio de la perforación se lograron estudios para el análisis del transporte de los ripios en los pozos, partiendo principalmente en los verticales, pasando por los desviados y terminando en los horizontales. Entre dichos estudios se puede conseguir el desarrollado por Peden, Ford y Oyeneyn ^[2], realizado para mediados de 1990, el cual consistió en un análisis experimental en un pozo simulado, en el cual se tomaban en cuenta parámetros como los efectos de la rotación y de la excentricidad. Desde este estudio se concluyó que el ángulo de inclinación tiene un efecto sobre la limpieza del agujero, lo cual se puede también ver como resultado del trabajo desarrollado por Abdullah M. Qahtani y Dr. M. Amanullah ^[3] donde se observa la formación de la cama de ripios estable en pozos inclinados entre 65° y 90° por lo que es difícil su remoción. Dicha cama de ripios se genera cuando el fluido de perforación no cumple con los parámetros de limpieza y los recortes terminan asentándose en las zonas bajas del hoyo (esto principalmente observado en pozos con alto grado de desviación o pozos horizontales). Por lo que se requiere que el fluido de perforación posea unas características específicas para contrarrestar los problemas que se puedan presentar al aumentar la concentración de ripios. Y como también es reconocido, características del lodo de perforación juegan un importante rol en la remoción y transporte de los recortes desde la formación de la capa de revoque alrededor del hoyo, hasta de las características reológicas del fluido permitiendo la suspensión de los ripios e impidiendo su rápida deposición.

Por lo tanto se define la limpieza del hoyo como la habilidad del fluido de perforación de transportar y suspender recortes de la perforación. Para una limpieza de hoyo eficiente y un transporte de sólidos principalmente se debe controlar la velocidad de la fase líquida y la concentración de sólidos. De donde se deriva la necesidad de estudiar la velocidad crítica del fluido a lo largo de la perforación.

Existe una técnica muy usada para corregir el problema presentado por la cama de Ripios, la cual es conocida como *Back-Reaming*, por su nombre en inglés. Como explica David Wampler ^[4] una de las funciones de el mismo es agrandar el agujero de

perforación a un tamaño lo suficientemente grande como para permitir la instalación del producto requerido. Durante el proceso de *Back-Reaming*, el objetivo principal es la de mezclar los ripios con el fluido de perforación para crear una pasta que pueda ser desplazada a un lado, o descargados fuera del orificio, aunque es una técnica efectiva, la misma implica mayor tiempo de perforación, y por consecuente mayores costos operativos.

CAPÍTULO 1

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A medida que la industria petrolera ha mejorado las técnicas de perforación, pasando desde sus inicios de la perforación por percusión hasta la más utilizada en la actualidad la perforación rotatoria, se han desarrollado tecnologías que permiten de una manera óptima conseguir la construcción de un pozo petrolero y llegar así a las arenas contenedoras de crudo. Uno de los elementos de mayor importancia a la hora de realizar la construcción de un hoyo es el fluido de perforación. La perforación ocurre cuando se hace girar la columna de perforación y la barrena, mientras que los portamechas y la mecha imponen peso sobre la roca. Al girar bajo el peso de la columna de perforación, la barrena rompe o raspa la roca que está por debajo. Las barrenas usadas en la actualidad tienen dos o tres fresas cónicas que ruedan a medida que se hace girar la mecha, la superficie del rodillo cónico tiene dientes que entran en contacto con la mayor parte del fondo del agujero a medida que los conos ruedan sobre la superficie. Estas barrenas perforan fracturando las rocas duras y ranurando las rocas más blandas. El peso sobre la mecha, la velocidad de rotación, la dureza de la roca, la presión diferencial, la velocidad y la viscosidad del fluido de perforación afectan la velocidad de penetración de las mechas. Los jets contenidos dentro del cuerpo de la mecha aumentan la velocidad del lodo, produciendo un chorro cuando el lodo sale de la mecha, esto contribuye a una perforación más rápida. Esto es debido a un concepto denominado *Total Flow Area* (TFA), ya que el área donde pasa el fluido disminuye al llegar a los orificios de la mecha (jets), al sumar el área de todos los orificios, obtenemos el TFA, esta disminución de área ocasiona un aumento en la velocidad del fluido, por lo tanto la fuerza con la que impacta el fluido a la formación es mayor, lo cual si no es controlado correctamente puede ocasionar socavamientos.

El fluido de perforación permite enfriar y lubricar continuamente la mecha y retirar los recortes generados en el hoyo. Este lodo pasa a través de las toberas de la barrena, choca contra el fondo del agujero y luego sube en el espacio anular (el espacio entre la columna de perforación y la pared del pozo), acarreado los recortes que están suspendidos en él y llevándolos a superficie.

De ahí que la limpieza del hoyo por medio del fluido de perforación sea es un aspecto fundamental en la prevención de los problemas que se pueden suscitar al momento de perforar ya sea en pozos verticales o inclinados. El transporte de los recortes está influenciado por diferentes factores; algunos son posibles controlarlos en el pozo tales como la tasa de flujo, la reología del fluido, la tasa de penetración (ROP), el tamaño e inclinación del hoyo, y otros factores son de difícil control tales como el tamaño y densidad de los recortes y la excentricidad del hoyo.

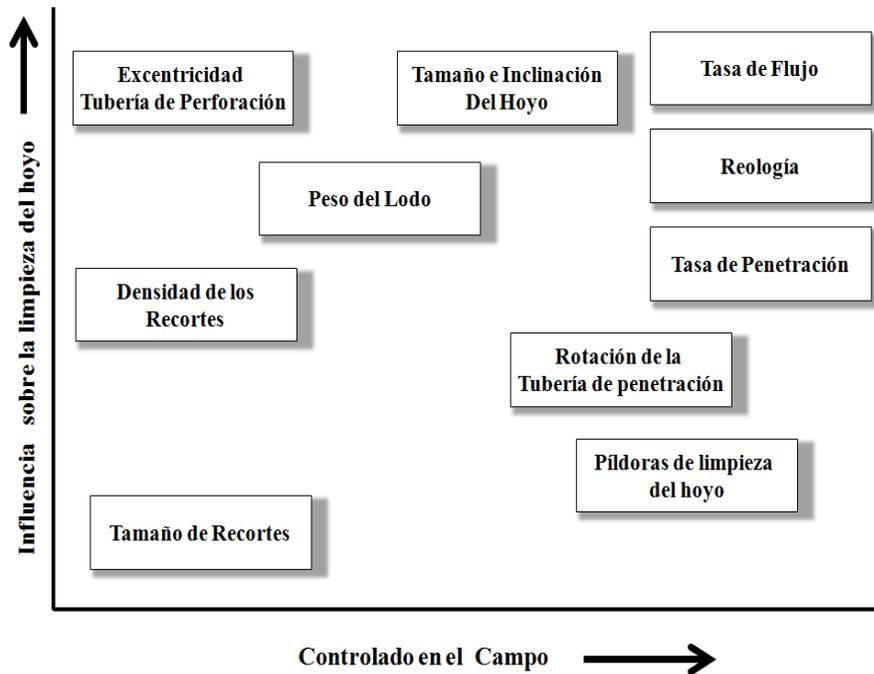


Figura 1. 1 Parámetros de limpieza de hoyo, su influencia y posibilidad de control en el campo. ^[6]

A medida que la limpieza sea menos eficiente, aumenta la concentración de ripios en el anular, ocasionando un incremento en la depositación lo cual genera una cama de ripios difícil de remover. Dicha cama de ripios provoca una disminución del área del hoyo lo que puede ocasionar atascamientos en la tubería y un aumento de la velocidad del fluido generando un aumento de la presión en la zona que a su vez provoca un socavamiento del hoyo en esa región, representando esto pérdidas de tiempo y recursos innecesarios.

Es importante el estudio de la excentricidad, el cual es un parámetro que determina el grado de desviación de la sarta de perforación con respecto al hoyo perforado. O en otras palabras se refiere a la posición de la tubería de perforación dentro del anular. La predicción de la excentricidad en la tubería de perforación es importante en el cálculo de la capacidad de carga del fluido de perforación en la parte baja del anillo excéntrico ^[5]. Lo cual se estima tiene una influencia significativa en el acarreo de ripios, pero por su baja capacidad de control la industria petrolera no ha profundizado en su estudio.

En nuestro campo en estudio, Campo Zuata Principal, es necesaria la perforación de pozos horizontales y estos presentan problemas esencialmente en la limpieza del pozo como atascamiento de la tubería de perforación, debido al desarrollo de lechos de ripios debajo de la tubería. Por lo que se hace necesario el estudio de la relación entre la excentricidad y la velocidad crítica de transporte para así observar en qué medida la posición de la tubería de perforación afecta la velocidad de limpieza de la cama de ripio. Un factor que siempre en el análisis de la perforación han considerado constante por su limitado control en el campo ha sido la excentricidad de la tubería de perforación dentro del hoyo, tanto en el campo como en el área de simulación, por lo que se espera observar cómo controlar de manera óptima ambas variables, para así obtener una análisis más real del comportamiento del fluido dentro del hoyo y a la larga una reducción de tiempo de perforación y por lo tanto disminución de los costos.

1.1 ANTECEDENTES

Desde mediados de la década de 1970 la perforación direccional dio sus primeros pasos en la industria petrolera en la búsqueda de esa técnica que permitiera alcanzar las reservas que de otro modo resultaban inaccesibles. De ahí que se hayan desarrollado gran cantidad de estudios enfocados en esta área. Para el entendimiento de los parámetros que afectan a la perforación direccional específicamente en lo referente a este Trabajo Especial de Grado se hará una revisión de los trabajos realizados que se enfoca principalmente en la velocidad crítica de transporte del fluido de perforación y a las variaciones de excentricidad de la tubería de perforación dentro del pozo.

Petter Tomren en 1979.^[7] fue uno de los primeros en realizar estudios con respecto a la influencia de la excentricidad en la limpieza del hoyo, en la Universidad de Tulsa, en el mismo se estudió el transporte de los recortes en el espacio anular de un pozo inclinado, llegando a la conclusión que la cama de recortes tiene una mayor concentración de partículas en la parte inferior del anular, y a medida que se aumenta dramáticamente el ángulo de inclinación se aumenta la concentración de partículas. También concluyó que para una limpieza efectiva en la sección inclinada era recomendable usar un lodo de alta viscosidad bajo un flujo laminar.

Peden, Ford y Oyeneyn (1990)^[2], publicaron un trabajo en el cual se simuló un pozo con la finalidad de estudiar la forma en que se realizaba el transporte de los ripios en pozos inclinados, partiendo de parámetros como la rotación y la excentricidad, parámetros analizados en el simulador. En este diseño, se permitió la configuración de la geometría del pozo en términos de espacio anular, para diferentes inclinaciones las cuales eran requeridas en el análisis. Dicho análisis partió de la velocidad crítica de transporte, la cual presumían puede limpiar el pozo con eficiencia si el valor es igual o superior a esta. Los resultados que se generaron mostraron la alta influencia que tiene el nivel de excentricidad, el tamaño del anular, la reología del fluido y el régimen de flujo sobre la velocidad crítica de transporte. Entre las conclusiones más importantes que obtuvieron de este estudio se tienen:

- El ángulo de inclinación tiene un fuerte efecto sobre la limpieza del agujero.
- Para los mecanismos de transporte de suspensión y rodamiento, las peores situaciones ocurren en los ángulos comprendidos entre 40° y 60°, pero estos mecanismos también son una función de la reología del fluido, la geometría del pozo, el tamaño de los recortes y la velocidad de rotación.
- Un espacio anular pequeño requiere de una baja velocidad Crítica de Transporte. La eficiencia en la limpieza del agujero también depende del grado de turbulencia en el anular.
- En espacios anulares grandes, la rotación de la tubería de perforación no tiene un efecto significativo en la limpieza del agujero.
- Los recortes pequeños son transportados eficientemente en todos los ángulos de inclinación usando un fluido de baja viscosidad, mientras que los recortes más grandes y ángulos comprendidos de 0° a 50°, son transportados de manera más eficiente con fluidos de alta viscosidad.

Martins y Santana (1992) ^[8], desarrollaron un modelo mecánico para representar el comportamiento de sólidos en fluidos newtonianos para pozos inclinados y horizontales. El modelo consistió en la configuración de dos capas, la capa superior representaría una mezcla heterogénea y la capa inferior una "cama de recortes". Este modelo está basado en la Ley de conservación de la masa y momento lineal, en una relación constitutiva la cual describe la interacción entre las dos fases y entre cada fase y las paredes del agujero. Entre las suposiciones más relevantes se puede mencionar que: no hay transferencia de masa entre la fase líquida y la sólida, el sistema sólido-líquido es incompresible y los parámetros reológicos son los mismos que los del fluido, la altura de la interfase entre las dos capas es constante en la sección anular estudiada y el efecto gravitacional es despreciable. El modelo fue aplicado a varios comportamientos de flujo que caracterizan el flujo horizontal sólido-líquido. Llegando a la conclusión principal de que el incremento de la densidad del fluido y el caudal de fluido, son efectivos para solucionar los problemas de transporte de recortes en pozos altamente inclinados.

Larsen y colaboradores (1993) ^[9] publicaron un estudio, apoyándose en una experiencia práctica de alrededor de 700 pruebas realizadas en un pozo modelo a escala ubicado en la Universidad de Tulsa, con recortes de perforación de tamaños diferentes (0,275 pulg, 0,175 pulg y 0,09 pulg). El estudio se basó fundamentalmente en el análisis de la velocidad crítica de transporte simulando distintas relaciones de penetración con la incorporación de distintos volúmenes de recortes. Generaron datos a ángulos de inclinación desde 55° hasta 90° con respecto a la vertical. Como producto final del estudio desarrollaron correlaciones para la predicción de la velocidad de transporte de ripios, la velocidad de transporte crítica y la concentración de ripios debido a las características del flujo en el espacio anular. Las expresiones derivadas para la velocidad de ripio y la velocidad de resbalamiento son:

$$U_{cut} = \frac{1}{\left(1 - \left(\frac{D_{pipe}}{D_{hoyo}}\right)^2\right) \left(0.64 + \frac{18.16}{ROP}\right)} \quad (1.1)$$

$$U_{slip} = 0,00516\mu_a + 3,006 \quad \mu_a \leq 53 \text{ cp} \quad (1.2)$$

$$U_{slip} = 0,02554 (\mu_a - 53) + 3,28 \quad \mu_a > 53 \text{ cp} \quad (1.3)$$

Donde:

U_{cut} : Velocidad de los ripios, ft/s.

U_{slip} : Velocidad de deslizamiento, ft/s.

μ_a : Viscosidad aparente, cp.

Consecutivamente se introdujeron varios factores de corrección en cuanto al tamaño de los recortes, peso del lodo y ángulo de inclinación:

$$FC_{angulo} = 0,0342 \alpha - 0,000233 \alpha^2 - 0,213 \quad (1.4)$$

$$FC_{Tamaño recorte} = -1,04d_p + 1,286 \quad (1.5)$$

$$FC_{densidad lodo} = 1 - 0,0333(\rho_{lodo} - 8,7) \quad \rho_{lodo} > 8,7 \quad (1.6)$$

$$FC_{densidad\ lodo} = 1 \qquad \rho_{lodo} \leq 8,7 \qquad (1.7)$$

Donde:

α : Ángulo de inclinación, grados.

d_p : Diámetro de las partículas de arena, cm.

ρ_{lodo} : Densidad del fluido de perforación, gr/cm³.

Estos factores permiten corregir a la velocidad de resbalamiento de la partícula. Así la velocidad de resbalamiento corregida sumada a la velocidad del recorte de U_{cut} será la velocidad crítica que posea el fluido. Las unidades de los diámetros son expresadas en pulgadas, la ROP en ft/hr, la viscosidad en cP y las densidades en lb/gal para así obtener el valor de la velocidad en ft/s.

Clark, R.K. y colaboradores ^[10] (1994), generaron un modelo que tuvo como finalidad representar el transporte de los ripios generados por la mecha al ser llevados a superficie a través del hoyo. Este modelo depende principalmente del ángulo que presenta el pozo, por lo que para pozos de alto ángulo (con respecto a la vertical), el aspecto fundamental es el rodamiento de los ripios mientras que para los pozos de ángulos intermedios o verticales sería el levantamiento. Por lo que Clark realizó una combinación para así predecir la forma de llevar los ripios independientemente de la configuración de los pozos. Para el rodamiento la ecuación que gobierna la velocidad crítica del fluido es:

$$U_{rolling} = \sqrt{\frac{4[3\tau_y(\varphi+(\pi/2-\varphi)\text{sen}^2\varphi-\text{cos}\varphi\text{sen}\varphi)\text{tg}\varphi+d_p g(\rho_s-\rho_f)(\text{cos}\alpha+\text{sen}\alpha\text{tg}\varphi)-d_p \Gamma]}{3\rho_f(C_D+C_L\text{tg}\varphi)}} \qquad (1.8)$$

Y para levantamiento se tiene:

$$U_{lifting} = \sqrt{\frac{4[3\tau_y(\varphi+(\pi/2-\varphi)\text{sen}^2\varphi-\text{cos}\varphi\text{sen}\varphi)+d_p g(\rho_s-\rho_f)(\text{sen}\alpha)]}{3\rho_f C_L}} \qquad (1.9)$$

Donde:

τ_y : Punto de cedencia del lodo, lb/100ft².

U_{rolling} : Velocidad de rodamiento, ft/s.

U_{lifting} : Velocidad de deslizamiento, ft/s.

ϕ : Ángulo de reposo de la partícula, grados.

ρ_f : Densidad del fluido, lpg.

C_L : Coeficiente de levantamiento.

Γ : es el gradiente de presión, lpc/ft.

Martins, A.L y colaboradores ^[11] (1996) desarrollaron pruebas a modelo escala de un pozo horizontal. Estas tenían como objetivo principal el análisis de la erosión de la cama de ripios que se hallaba depositada en la zona baja del anular de la sección horizontal. El experimento contó con un tubo de acrílico de aproximadamente 12 metros de largo, en el cual un tubo de PVC era introducido concéntrica y excéntrica, aunque las variaciones de excentricidad fueron solo para valores de 0,5 y -0,5. y la arenisca utilizada para representar a los recortes presentes en la perforación. Por medio de estos análisis se desarrollaron las correlaciones, basándose en los datos obtenidos experimentalmente, para así poder predecir tanto la velocidad crítica del fluido como la altura que alcanza la cama de ripios. Los resultados indican que el *Yield Point* o punto cedente del fluido resulto ser influyente solo para la erosión de la zona excéntrica. Por lo cual recomendaron un estudio más profundo para la interpretación de los efectos reológicos del fluido.

Santana, M. y Martins, L ^[12] (1998) presentaron un modelo de dos capas con el cual se deseaba simular la forma en que fluían los ripios de perforación en los pozos que tienen algún grado de inclinación (inclinados y horizontales principalmente). El estudio partió del análisis de las ecuaciones de momentos para cada una de las capas estudiadas, una ubicada en la parte baja de la pared del pozo y conformada por la

cama de recortes, y la segunda representaba al fluido de perforación mezclado con los ripios suspendidos dentro de él, y esta estaba ubicada en la parte alta del agujero. Así en el análisis se puede tomar en cuenta los diversos patrones de flujo que pueden ser presentados por el flujo del sistema líquido-sólido en un espacio anular. De esta forma fueron tomados en cuenta 5 modelos reológicos lo que enfatizó la importancia de la reología del fluido en el transporte de partículas y así se propone la selección adecuada del modelo a la hora de realizar la simulación. Hicieron énfasis en la importancia de la reología del fluido en la simulación del transporte del fluido pero teniendo dudas en que modelo de los 5 propuestos utilizar. La respuesta para esto fue incluir aspectos tales como una adecuación de la velocidad de sedimentación de las partículas y la consistencia con los resultados de la altura de la cama de ripios. Concluyendo que basados en este escenario, los 3 modelos (Herschell-Bulkley y Robertson Stiff) muestran mejores resultados.

Rubiandini (1999) ^[13], presentó una ecuación para la determinación de la velocidad mínima de limpieza que deberían tener los fluidos en pozos inclinados, para cualquier ángulo requerido, incluyendo los pozos horizontales; todo esto basándose en los experimentos que realizó Larsen (1993) ^[9]. Este último estudio se basa principalmente en tres parámetros que presentan significativa influencia en la remoción de los ripios del pozo la primera es la velocidad de depositación de los ripios, también conocida como velocidad de resbalamiento. La segunda corresponde a la velocidad de caída de los recortes, mejor conocida como velocidad del recorte y por último la velocidad mínima que consiste en la suma de las velocidades de resbalamiento y de recorte. Dando como resultado una nueva función que permite pronosticar cuál sería la velocidad del fluido mínima para realizar una limpieza eficaz del hoyo, introduciendo un nuevo factor de corrección el cual toma en cuenta las revoluciones por minuto (RPM) de la sarta de perforación.

$$U_{min} = U_{cut} + \left[1 + \frac{\alpha(600-RPM)(3+\rho_f)}{202500} \right] U_{slip} \quad \alpha \leq 45^\circ \quad (1.10)$$

$$U_{min} = U_{cut} + \left[1 + \frac{\alpha(600-RPM)(3+\rho_f)}{4500} \right] U_{slip} \quad \alpha > 45^\circ \quad (1.11)$$

Donde:

U_{\min} : Velocidad mínima, ft/s.

U_{cut} : Velocidad de los ripios, ft/s.

ρ_f : Densidad del fluido, lpg.

α : Ángulo de inclinación, grados.

Kamp y Rivero (1999) ^[14] proponen un modelo de dos capas, este estudio consistió en desarrollar un modelo de dos capas, con las cuales se pretendía simular el movimiento del lodo y los recortes en una cama heterogénea y el de la cama de recortes empacada en otra capa en la parte baja de la tubería. El estudio se basó en principios tanto físicos fundamentales como de Ley de continuidad y momentum. Por medio de la realización de simulaciones numéricas del modelo, se consiguió predecir la altura de la cama de recortes, las caídas de presión y las velocidades de transporte para diferentes tasas de penetración y volúmenes de fluido bombeado, por lo que al realizar una comparación de los resultados obtenidos por simulación con datos reales, observaron que los obtenidos por simulación representaban valores más altos que en la realidad.

Fue desarrollado un modelo matemático por Huyn Cho, Shah y Osinsaya (2000) ^[15], que consistía en tres capas para pozos con ángulos mayores de los 10° con respecto a la vertical (pozos inclinados y horizontales). Cada una de las capas representa un segmento de elementos presentes dentro de un volumen de control que se desplaza dentro de la tubería siendo la cama estática de recortes la primera capa y la cama en movimiento y el fluido de perforación la segunda y tercera capa respectivamente. Cabe destacar que las tres capas estarán presentes en cada una de las secciones del pozo independientemente sea inclinado u horizontal, pero en las secciones de construcción de ángulo solo se va a tener presente la cama de recortes en movimiento y la capa de los recortes en suspensión. En la sección vertical del pozo (ángulo de

inclinación del pozo menor a 10°) la capa que gobernará el comportamiento será la de suspensión de los recortes en el fluido de perforación.

Entre los estudios realizados acerca de la limpieza del pozo, enfocado a la velocidad de transporte, se encuentra el de Nazari y Hareland (2010) ^[16], presentaron un análisis de estudios y discusiones previas bajo un enfoque metodológico y sistemático, el cual es el más adecuado para el seguimiento y control de los problemas de limpieza. Dicho enfoque se basa en una relación entre vectores de estado tanto de entrada como de salida. El concepto básico es clasificado por parámetros de perforación comprobando la controlabilidad de la limpieza del pozo como un estado interno durante la perforación. Entre las conclusiones que obtuvieron se encuentra que las malas interpretaciones de datos de entrada tienen que ser corregidas definiendo efectivamente más parámetros de entrada y estados internos dentro de la estructura de proceso de perforación. También se consiguen algunas contradicciones en los resultados de unos análisis de sensibilidad de trabajos previos dado que todos dependen de condiciones experimentales específicas y es posible que dichas contradicciones sean el resultado de esto.

E. Cayeux (2013) ^[17] y colaboradores desarrollaron un modelo de transporte de ripios desarrollado mediante la integración de una correlación empírica para condiciones críticas de transporte de ripios en un modelo de perforación que toma en cuenta tanto el transporte de líquidos como la mecánica de la sarta de perforación (torque, excentricidad, etc.). El modelo se calibró con los datos reales en el ajuste de parámetros como el tamaño de los ripios y el factor de erosión de la cama de ripios, utilizando los tipos de ripios medidos en la superficie como los mejores criterios de idoneidad. Un modelo de transporte de ripios permite predecir las mejores condiciones de fondo de pozo, ya que es capaz de representar fenómenos que evolucionan con el tiempo, tales como la eliminación de la cama de ripios. También se tienen en cuenta los efectos relacionados con la modificación de parámetros operacionales de manera que es lo más realista posible. Al tener una estimación real de las condiciones de fondo de pozo, es posible proporcionar operativamente

recomendaciones que se pueden utilizar para evitar atascamiento de la tubería. Mediante el ajuste de los parámetros de perforación como el caudal, velocidad de giro de perforación cadena o el ROP, se puede identificar donde es necesario realizar ajustes para evitar la formación de la cama de ripios o cómo eliminarlos.

Ogunrinde J.O (2012) ^[18]., desarrollo un trabajo en el cual buscaba optimizar la hidráulica en el pozo para mejorar la eficiencia en la limpieza de hoyos en pozos horizontales, como todos los trabajos previos, consideraba que esta optimización dependía fundamentalmente de factores como el ángulo de pozo, el tamaño de los ripios, la rotación y excentricidad de la tubería de perforación y la hidráulica de la mecha. Aquí se examinó estos diferentes factores en la eficiente limpieza/transporte de recortes y la hidráulica de la mecha en pozos inclinados desde el punto de vista de entender como minimizar las dificultades y reducir el tiempo de no producción (*non producing time, NPT*) durante las operaciones de perforación. El modelo desarrollado se concentro en los ángulos entre 45° y 60° y determino el caudal optimo en conjunto con la tasa de penetración (ROP) para asegurar una limpieza optima. El modelo propuesto aseguro mejorar el tiempo de perforación cuando se presentan problemas de altas concentraciones de ripios lo que causa alta densidad equivalente de circulacion (*Equivalent circulation density, ECD*), lo que puede resultar en un problemas de pérdida de circulación.

Fadairo Adesina ^[19] y colaboradores (2013) realizaron un estudio que investigó la capacidad de transporte de los ripios de perforación tanto de *Jatropha* (lodo base aceite) y lodos basados en diesel. También examinó el efecto de los contaminantes en las propiedades reológicas de los lodos. Las propiedades medidas son viscosidad plástica, punto cedente, viscosidad aparente, densidad del lodo y fuerza de gel. Los resultados obtenidos muestran que los ripios tienen efectos perjudiciales sobre las propiedades reológicas de los lodos como el aumento del espesor del revoque, la pérdida de circulación, pega de la tubería y costes operativos, por lo tanto, la reducción en la eficiencia de la perforación. Concluyeron principalmente que mientras se eliminan los ripios de la perforación, la viscosidad plástica disminuye con

lo cual aumenta la tasa de esfuerzo de corte permitiendo que sean más fácilmente extraíbles los ripios a la superficie.

Rodolfo Larez (2005) ^[20] presentó frente a la Universidad Nacional Autónoma de México, la Tesis Especial de Grado titulada "Desarrollo de un Modelo Mecánico para Predecir la Eficiencia de Limpieza de Arena con Tubería Flexible en Pozos Inclinados" la cual buscaba profundizar en el estudio del comportamiento de la partícula de arena en el fluido mientras se realizan las labores de limpieza con tubería flexible. Para lo cual realizó un análisis en la relación de parámetros involucrados en el proceso de limpieza, tales como el caudal de limpieza, reología del fluido, excentricidad de la tubería flexible, diámetro de la tubería flexible, diámetro de la tubería de revestimiento, ángulo de inclinación, y el número de Reynolds. En el estudio propuso un modelo de dos capas con dos fases (sólido y líquido), una capa que representa una cama de arena en la parte baja de la tubería, que puede o no estar en movimiento y otra capa heterogénea de fluido ubicada en la parte alta de tubería. Este modelo en particular describe, por balance de masa de momentum, los procesos de transporte e incluye parámetros relevantes mencionados anteriormente.

S.K. Elsayed Salem, M.A. Nasr El-din (2006) ^[5], realizaron un análisis de las propiedades mecánicas del pozo para predecir la excentricidad máxima de la tubería de perforación en función de parámetros tales como el ángulo de inclinación del pozo, peso sobre la mecha y el tamaño del hoyo. Dicha ecuación ya había sido trabajada previamente pero encontrándosele errores de exactitud lo que llevo a los autores a realizarle modificaciones hasta llegar a la versión presentada. Como resultado presentaron una serie de gráficas y tablas que permiten su fácil uso en las aplicaciones de perforación. Dichas tablas permiten relacionar tanto el peso sobre la mecha como el ángulo de inclinación que se tiene en el pozo, obteniendo porcentajes de excentricidad para cada valor presentado. Resaltando así el hecho que a medida que el ángulo del hoyo se hace más cercano a 90° el peso de la tubería por unidad de longitud representa un factor importante de la falta de centralización de la tubería-hoyo.

Ozbayoglu, Evren (2007) ^[21], presentó los resultados de sus estudios sobre la velocidad crítica, determinando que esta podía ser estimada usando una serie de correlaciones propuestas con una precisión razonable, esto también le sirvió para validar velocidades de flujo menores que los valores críticos, en los cuales el espesor de la cama estacionaria de ripios puede ser detectada dentro de un rango de error de $\pm 10\%$. Basándose en la definición de las principales variables que influyen en el transporte de los ripios y su posterior depuración para así solo tomar para el estudio las variables que son independientes entre sí. Aplicando el teorema de Buckingham- π determinó grupos adimensionales para conseguir la respuesta a los sistemas generados. Estas correlaciones empíricas estiman la velocidad crítica del fluido para prevenir el desarrollo de una cama estacionaria comparados experimentalmente con los resultados obtenidos en el equipo *METU Cuttings Transport Flow Loop*, y así proponer ecuaciones que estiman el área de la cama estacionaria de recortes y la predicen con un rango de error en algunos casos de 15% de error. También para tres métodos diferentes, bajo las condiciones experimentales aplicadas, se estimó que la velocidad crítica del fluido fue de 9,0 ft/s y en otras mediciones de 8,0 ft/s en el orden de prevenir el desarrollo de una cama estacionaria.

Una vez analizados todos estos trabajos investigativos, se tomaron como base para conocer el comportamiento de la limpieza de hoyo en pozos inclinados, que variables influyen (aunque principalmente el enfoque se hará para la velocidad crítica de transporte de los ripios), y así observar la manera en que se relacionan con la excentricidad del hoyo, para así apreciar la influencia de la posición de la tubería de perforación con el acarreo de los ripios.

1.2 OBJETIVOS.

1.2.1 Objetivo General.

Analizar la relación entre el comportamiento del factor de excentricidad de la tubería de perforación y la velocidad crítica del fluido de perforación en pozos horizontales en el transcurso de la perforación del hoyo.

1.2.2 Objetivos Específicos.

- Estudiar las distintas variables que puedan relacionar la excentricidad del hoyo y la velocidad crítica.
- Analizar los diferentes perfiles de velocidades a lo largo de las secciones del pozo.
- Analizar la excentricidad en todas las secciones del pozo horizontal.
- Analizar y comparar en un caso de estudio, el comportamiento del pozo horizontal perforado en el Campo Zuata Principal, según los resultados obtenidos por la ecuación modificada de excentricidad.
- Analizar y comparar en un caso de estudio, el comportamiento del pozo horizontal perforado en el Campo Zuata Principal, según los resultados obtenidos por los cálculos hidráulicos.
- Analizar la relación entre el comportamiento del factor de excentricidad de la tubería y la velocidad crítica del fluido de perforación en pozos horizontales.

1.3 ALCANCE

El presente estudio se centrará en relacionar la velocidad crítica del fluido y la excentricidad de la tubería en las distintas secciones de los pozos horizontales, para lo cual se realizará el estudio en un pozo perteneciente a la faja petrolífera del Orinoco, específicamente al Bloque Junín, Campo Zuata Principal. Para la excentricidad se utilizará una ecuación modificada desarrollada por S.K. Elsayed Salem⁽⁵⁾, la cual es dependiente del ángulo del pozo, el peso sobre la mecha, las propiedades mecánicas de la tubería de perforación tales como el módulo de Elasticidad y su peso por unidad de longitud tanto como de la configuración del pozo. Se calculará la hidráulica del hoyo, para el cálculo de las velocidades óptimas, y a través del análisis de ambos factores, se encontrarán variables que permitan relacionar ambas, y será comparada con la simulación obtenida.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Las compañías que tienen su campo de desarrollo en la industria petrolera están continuamente haciendo análisis de los parámetros operacionales que toman parte durante la construcción de un pozo, con el propósito de aumentar la eficiencia de las actividades a lo largo de la perforación de un pozo direccional y prevenir problemas a la hora de lograr la limpieza efectiva del hoyo, entre estos problemas se encuentran la tubería atorada, torsión y arrastre excesivos, empacamiento del espacio anular, pérdida de circulación, viscosidad excesiva y fuerzas de gel, altos costos de lodo, trabajos de tubería de revestimiento y cementación pobres y ritmos lentos de perforación. Se ha propuesto la realización de este Trabajo Especial de Grado, con el cual se espera realizando una análisis entre la relación existente entre la posición de la tubería de perforación dentro del pozo y la velocidad del fluido en el espacio anular, prevenir la depositación de la cama de ripios y en dado caso que se genere removerla eficientemente y así reducir el tiempo que se tarda en corregir los problemas suscitados y disminuir los costos operativos. Se ha analizado en trabajos previos que el ángulo del agujero, velocidad del fluido en el espacio anular y la viscosidad del lodo son considerados muy importantes al momento de realizar la limpieza; por lo cual por medio de una relación entre la velocidad crítica del lodo para el transporte de los recortes y la excentricidad de la tubería de perforación se espera relacionar dos parámetros importantes a la hora de la perforación. Distintos autores han desarrollado estudios sobre el acarreo de ripios, basándose en las variaciones de la velocidad crítica tales como Evren ^[21], Soepyan ^[22] e incluso más recientemente Abdullah M. Qahtani ^[3], por otra parte se han realizado análisis del efecto de la excentricidad y las variaciones de los regímenes de flujos a lo largo de la tubería, como la tesis presentada por Petter Tomren ^[7], y un artículo publicado en 2006 por S.K. Elsayed Salem, M.A. Nasr El-din ^[5].

La excentricidad es un parámetro importante para la hidráulica del pozo, S.K. Elsayed Salem, M.A. Nasr El-din ^[5], citan en su artículo publicado en 2006, que la predicción

de la excentricidad de la tubería de perforación es importante en el cálculo de la capacidad de carga del fluido de perforación en la parte baja del anillo excéntrico.

En una tesis desarrollada en la Universidad de Tulsa, por Petter Tomren ^[7], estudia el transporte de los ripios en un anular excéntrico inclinado, y llega a la conclusión que la cama de ripios tiene una mayor concentración de partículas en la parte inferior del anular, y a medida que se aumenta dramáticamente el ángulo de inclinación se aumenta la concentración de partículas. Así como concluyo que para una limpieza efectiva en la sección inclinada era recomendable usar un lodo de alta viscosidad bajo un flujo laminar.

Por otra parte se tiene que la velocidad de flujo del fluido de perforación es la variable dominante en la limpieza del hoyo debido a su relación directa con el esfuerzo cortante que actúa sobre la cama de ripios (Evren M. e.t) ^[21]. Evren mostró como resultados que la velocidad crítica puede ser estimada usando una serie de correlaciones propuestas con una precisión razonable cuando se comparan sus resultados, y también para velocidades de flujo menores que los valores críticos, el espesor de la cama estacionaria de ripios puede ser detectado dentro de un rango de error de $\pm 10\%$.

También se tiene el trabajo realizado por Soepyan ^[22] y colaboradores, el cual consiste en la selección de la velocidad crítica óptima para el transporte de arena bajo condiciones de operación. Ellos realizaron el estudio con una data pública y haciendo un análisis refinaron el modelo para comparar e identificar las mejores aproximaciones de la velocidad para dichas condiciones de operación. Estas consideraciones aportaron que dichas predicciones arrojadas por la metodología empleada eran consistentes.

A su vez el artículo publicado por Rubiandini ^[13], explica que hay muchos problemas asociados con ripios depositados en el pozo con el uso de métodos de perforación rotativos para perforar algunos pozos verticales, direccionales o incluso horizontales. Para superar estos problemas determinó una tasa mínima de lodo para que existiera

una buena capacidad para limpieza del pozo perforado. El autor relaciona dicha tasa mínima de lodos con la suma de las velocidades de deslizamiento y la velocidad de los recortes caídos. Se tiene presente que la velocidad de los recortes depende de la geometría del pozo y la magnitud de la ROP característica con la cual muchos autores están de acuerdo. Esta investigación desarrolló así la velocidad de deslizamiento de Moore de pozo vertical con el fin de ser utilizado en pozos inclinados hasta horizontal con algunas correcciones de velocidad de rotación y el peso del lodo por el procedimiento de la velocidad de deslizamiento de Larsen ^[9].

En Venezuela, específicamente en la Faja Petrolífera del Orinoco, se hace necesaria la utilización de tecnología de punta para la extracción de hidrocarburos, debido a la complejidad de estos yacimientos. Se identifican principalmente problemas durante la perforación como el atascamiento de la tubería, esto debido al tipo de formación (no consolidada), y debido a que se hace necesaria la utilización de pozos horizontales para la óptima recuperación de hidrocarburos. Es por eso que se requiere un estudio de Hidráulica avanzada que tome en cuenta ciertas variables como excentricidad, espesor de la cama de ripios, entre otros factores que no serían necesarios en otros tipos de pozos.

1.5 LIMITACIONES

- Disponibilidad y calidad de la información de los pozos.
- Experiencia previa con la terminología y programas utilizados en investigaciones previas.
- Experiencia en operaciones direccionales, para el análisis de los resultados.
- Escasa información sobre la excentricidad en pozos petroleros.
- Ningún estudio previo de la relación entre excentricidad y velocidad crítica de transporte.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Perforación direccional

La perforación direccional es la ciencia de dirigir un pozo a lo largo de una trayectoria, para atravesar el yacimiento en una posición predeterminada (objetivo), localizada a cierta distancia lateral de la localización superficial del equipo de perforación. Para alcanzar el objetivo es necesario tener control del ángulo y la dirección del pozo, las cuales son referidas a los planos vertical (inclinación) y horizontal (dirección), respectivamente. ^[1]

Existen varias razones para perforar un pozo en forma desviada, entre ellas se encuentran las siguientes:

- Localizaciones inaccesibles.
- Domos de sal.
- Pozos de alivio.
- SideTrack* (Desviación Corta).
- Formaciones con fallas.
- Pozos geotérmicos.
- Pozos de tierra a costa fuera.
- Pozos en forma agrupadas (macollas)

-Múltiples pozos en una misma plataforma.

-Multiplicidad de arenas.

2.1.1 Procedimiento de perforación

Las etapas normales de una perforación, direccional u horizontal, son realizadas tomando en cuenta los tipos de pozo que serán construidos, el radio y el alcance que se van a plantear durante el proceso de perforación.

Los tipos de secciones de pozos a ser perforados son los siguientes:

-Pozo conductor.

-Pozo superficial.

-Pozo intermedio.

-Pozo productor.

En cada etapa se establecen las herramientas, técnicas, compañías de servicio responsable y procedimientos a seguirse durante la operación correspondiente. ^[1]

2.1.2 Herramientas direccionales

Luego de la Perforación del Hoyo Superficial, se comienza el empleo de las herramientas direccionales que van a permitir inclinar la trayectoria de la sarta de perforación, controlando la dirección o azimuth de la sarta respecto al norte del plano horizontal. Las herramientas direccionales importantes para este trabajo de grado y comúnmente empleadas durante la perforación de hoyos horizontales son:

2.1.2.1 Ensamblaje de Fondo

El ensamblaje de fondo o *Bottom hole assembly* es la sección de la sarta de perforación que agrupa el conjunto de herramientas entre la mecha y la tubería de perforación. Tiene como funciones proporcionar el peso requerido sobre la mecha para maximizar la tasa de penetración, producir hoyos en calibre, evitar la formación de desviaciones tipo pata de perros y minimizar vibraciones y atascamientos de la

sarta de perforación. Está compuesto por: motor de fondo, portamechas (*Drill Collar*), tubería pesada (*Heavy Weight*), estabilizadores y accesorios.

Debido a la complejidad de la trayectoria para alcanzar los yacimientos, se están aplicando nuevas tecnologías en la perforación direccional, los sistemas rotatorios del motor de fondo (RSS, por sus siglas en inglés), han sido de gran ayuda para pozos más calibrados, mayor precisión y un mejor control direccional, la cual se consiguen avances en la limpieza del pozo, el aumento de la velocidad de penetración (ROP) y una reducción en el riesgo de atascamiento diferencial, como parte principal de su diversa gama de beneficios. Estos sistemas más avanzados simplemente aplican una fuerza lateral de forma similar a los estabilizadores tradicionales que rotan con la columna de perforación y orientan la mecha en la dirección deseada.

2.1.3 Técnicas en hoyos direccionados

Durante la perforación en hoyos direccionales y horizontales se pueden emplear diversas técnicas para ir construyendo el hoyo del pozo. Primeramente la rotación permite perforar el hoyo por la energía proporcionada por el *top drive* al girar toda la sarta. El Deslizaje, o *Sliding*, es una técnica que permite ir direccionando la sarta con la rotación únicamente de la mecha, de manera que permita crear ángulo o direccionar la sarta de perforación según el plan del Pozo. Ello es posible por la herramienta *Bent Housing* del BHA, la cual es el codo de la herramienta que permite producir una desviación de manera orientada, por la cual se construye y controla el ángulo correcto, posicionando la mecha en la dirección deseada.

La orientación es controlada por la herramienta MWD (*Measurement While Drilling*), que va aportando datos cada cierto punto. Estos datos son: profundidad, inclinación y azimuth.

Con esta data, la herramienta direccional puede calcular parámetros tan importantes como: profundidad vertical verdadera (*True Vertical Depth*), *dog leg* (patas de perro), desplazamiento este – oeste (si los valores son positivos se muestra una inclinación

hacia el oeste, si son negativos hacia el este) y desplazamiento norte – sur (si los valores son positivos se muestra una inclinación hacia el Norte, si son negativos hacia el Sur).^[1]

2.1.3.1 Técnica de rotación

En esta técnica, la rotación de la mecha es transmitida por el mecanismo que lo hace girar desde superficie (mesa rotaria o *top drive*) a través de la sarta de perforación. El *top drive* también se utiliza para mantener en suspensión la tubería de perforación y la tubería de revestimiento al bajarlas, así como, para colgarlas y desenroscarlas. Por eso el *top drive* también es necesario al perforar con motores de fondo. La particularidad de la perforación rotacional es la existencia de dos canales de transmisión de energía al fondo: la energía mecánica del *top drive* y la energía hidráulica de las bombas o compresores. Esto determina la posibilidad de transmitir a la mecha una energía mecánica relativamente grande. Durante la rotación de la sarta de perforación hay menos peligro de su adhesión, suspensión y atascamiento, aumenta la tasa de penetración o ROP por sus siglas en inglés, ya que gira el motor de fondo ayudado por el lodo de perforación y además toda la sarta también se encuentra girando.

2.1.3.2 Técnica de deslizamiento

En la técnica de deslizamiento la sarta de perforación no gira sino que percibe el momento torsor reactivo del motor de fondo y sirve de canal para transmitir la energía hidráulica al fondo. Mediante el empleo de esta técnica se facilita la desviación del pozo en la dirección requerida. Mejora las condiciones de trabajo de la sarta de perforación, lo cual permite aligerarla y abaratarla usando tubería de perforación fabricada a base de aleaciones ligeras y tubería de acero de paredes finas, crece la velocidad mecánica de perforación a consecuencia de la alta frecuencia de rotación de la broca, lo cual conduce a un incremento considerable de la tasa de penetración, sobre todo al perforar pozos poco profundos y de profundidad media. La tasa de penetración no es tan alta, y existe un mayor riesgo de pega de la tubería ya que se debe repasar varias veces el hueco para lograr el ángulo deseado.

2.1.3.3 Back Reaming

Es un procedimiento operacional que se hace rotando la mecha para asegurar la estabilidad del hoyo y evitar que el mismo se cierre una vez que se haya sacado la tubería. De esta forma se va repasando en el hoyo ya perforado circulando. Este procedimiento también permite volver a agrandar el hoyo para la instalación de revestidores, rejillas, etc, evitando de esta forma apoyos de tubería.

2.1.4 Tipos de pozos direccionales

Los pozos direccionales se diferencian esencialmente en su trayectoria:

2.1.4.1 Trayectoria Incrementar-Mantener (*Slant* o Tipo Tangencial)

La trayectoria tipo *Slant* consta de una sección vertical, seguida de una sección curva donde el ángulo de inclinación se incrementa hasta alcanzar el valor deseado, el cual es mantenido (sección tangente o sección de mantener) hasta alcanzar el objetivo. La trayectoria tipo “*Slant*” se ilustra en la Figura 2.1.

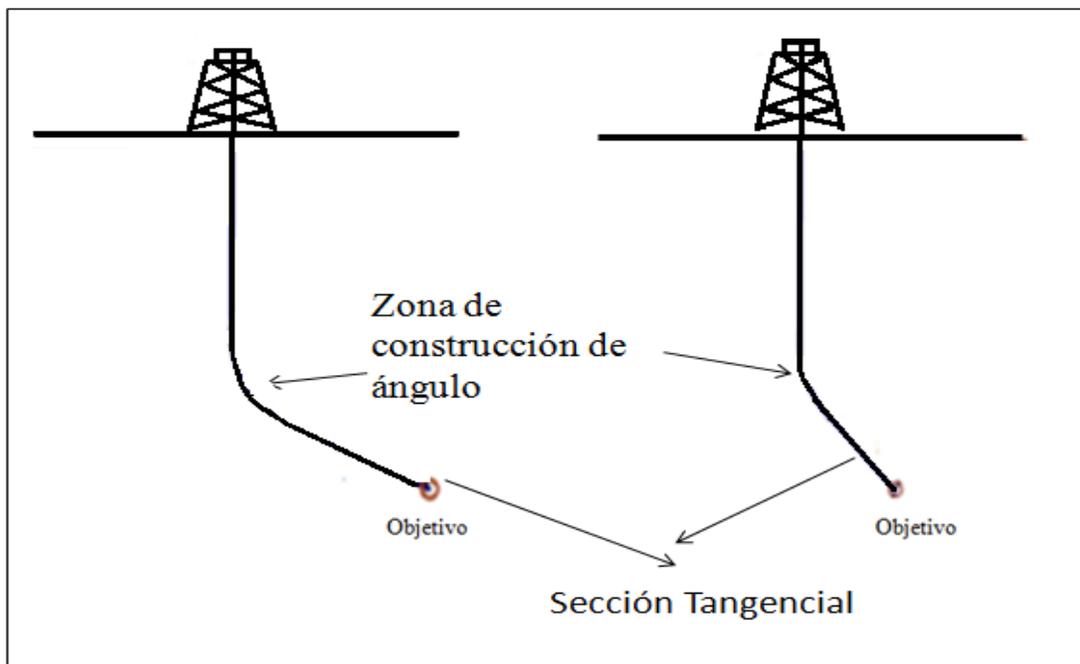


Figura 2. 1 Pozo tipo *Slant* o Tangencial.^[1]

2.1.4.2 Trayectoria Incrementar-Mantener-Disminuir (Tipo S)

La trayectoria tipo “S” esta formada por una sección vertical, seguida por un ángulo de inclinación que se incrementa hasta alcanzar el valor deseado, luego se tiene una sección recta (sección tangente o sección de mantener), y por último se tiene una sección en la que se disminuye el ángulo para entrar verticalmente al objetivo. Esta trayectoria se ilustra en la Figura 2.2.

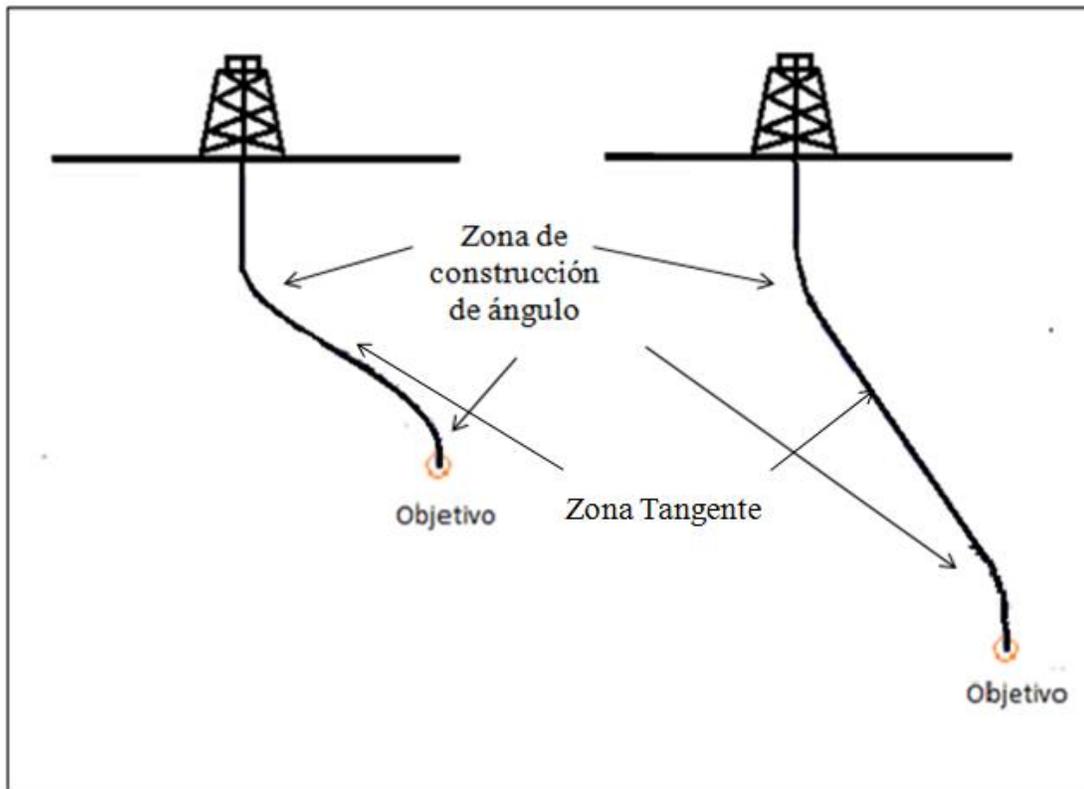


Figura 2. 2 Pozo Tipo S.^[1]

2.1.4.3 Trayectoria Incrementar-Mantener-Disminuir y/o Mantener (Tipo “S” modificada)

La trayectoria tipo “S” modificada está conformada por una sección vertical, un ángulo de inclinación que se incrementa hasta alcanzar el valor deseado, a continuación se tiene una sección recta (sección tangente o sección de mantener), seguida de una sección en la que se disminuye el ángulo parcialmente (menor al ángulo de incrementar) y por último se tiene una sección tangente o sección de

mantener con cual se logra entrar de forma inclinada al objetivo. Esta trayectoria se ilustra en la Figura 2.3.

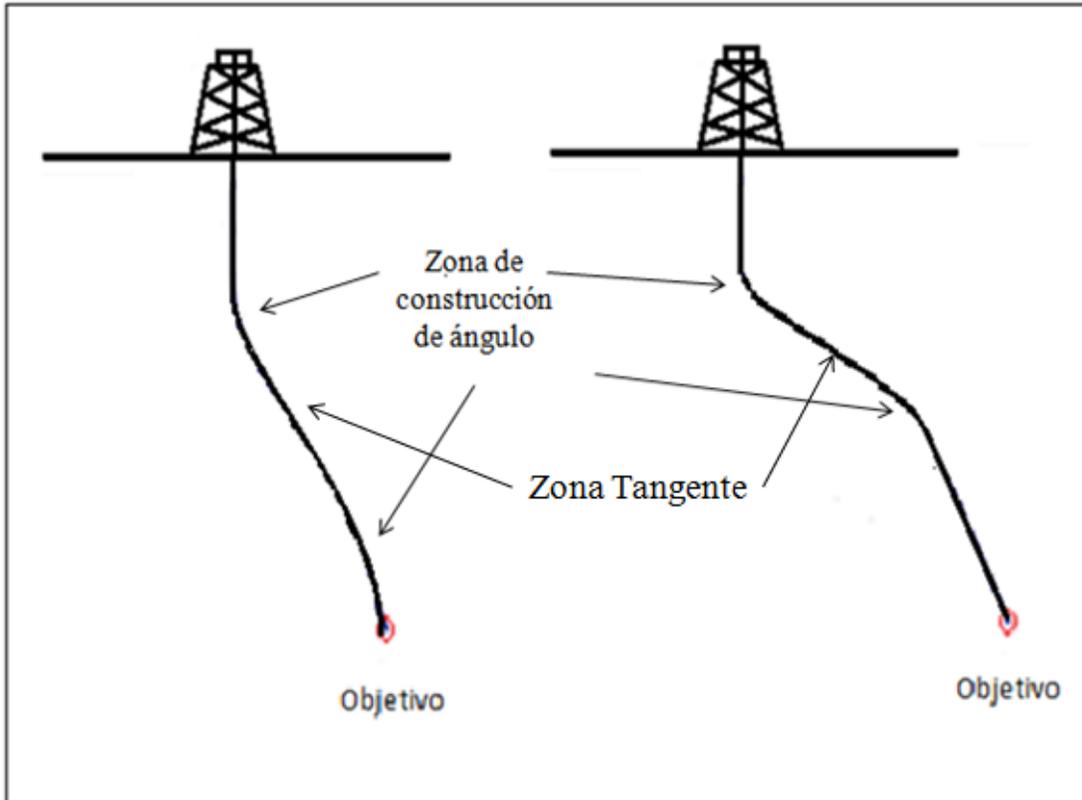


Figura 2. 3 Pozo Tipo S modificada.^[1]

2.1.4.4 Trayectoria de Incremento continuo (Tipo “J”)

La trayectoria de incremento continuo consiste de una sección vertical al, continúa con un ángulo de inclinación el cual se incrementa hasta alcanzar el objetivo. La trayectoria de incremento continuo se ilustra en la Figura 2.4.

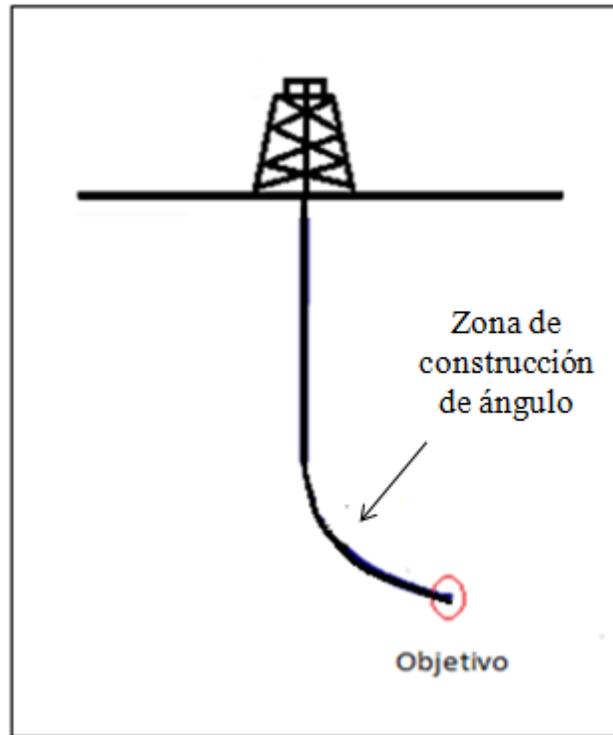


Figura 2. 4 Pozo Tipo “J”.^[1]

2.1.4.5 Trayectoria de incremento hasta 90° - mantener (Pozos Horizontales)

Muchos operadores están de acuerdo en definir un pozo horizontal como un hoyo que ofrece una sección abierta al flujo cuyo eje axial posee una inclinación entre 85° y 95° en el yacimiento de producción, (Ver Fig. 2.5) creando un cambio radical en las condiciones de flujo de los fluidos, ya que crea un área de forma elipsoidal mientras que la de un pozo vertical es de forma cilíndrica. ^[23]

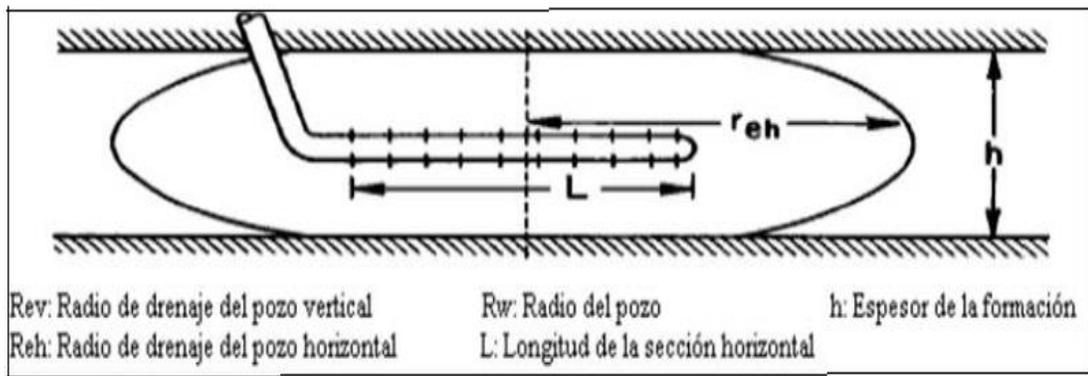


Figura 2. 5 Pozo Horizontal ^[23]

2.2 Reología

Es el estudio de los principios físicos que regulan el movimiento y la deformación de la materia cuando es sometida a esfuerzos externos, o lo que es igual, estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en materiales que son capaces de fluir; definiendo como flujo la deformación continua generada por la aplicación de una fuerza tangencial.

Las propiedades que dependen de esta relación se denominan parámetros reológicos y la forma como se relacionen se llama modelo reológico. ^[24]

2.2.1 Parámetros reológicos ^[24]

-Esfuerzo de Corte (τ): Resistencia del fluido al movimiento deslizante de sus capas cuando se aplica una fuerza en forma tangencial a su superficie laminar. Tiene unidades de fuerza sobre área.

-Tasa de Corte (γ): Diferencia entre las velocidades de dos capas dividida la distancia que las separa. Tiene unidades de velocidad sobre longitud.

-Viscosidad (μ): Resistencia que opone un fluido a ser deformado. En términos matemáticos es la relación de proporcionalidad entre el esfuerzo de corte y la tasa de corte. Cuando un fluido es no newtoniano y no lineal presenta una viscosidad diferente para cada tasa de corte, esta es llamada viscosidad absoluta. La viscosidad plástica es generalmente explicada como la parte de la resistencia al flujo causada por fricción mecánica.

-Punto de Cedencia (PC): Esfuerzo cortante mínimo requerido para que se dé la deformación del fluido. Representa el valor del esfuerzo de corte para una velocidad de deformación igual a cero. Su valor aumenta con el contenido de sólidos y disminuye con aumentos en el contenido de agua o dispersantes.

2.2.2 Modelos Reológicos

Los modelos reológicos son una relación matemática que nos permite caracterizar la naturaleza reológica de un fluido, estudiando la deformación dada a una tasa de corte específica.

La reología permite analizar la hidráulica en la perforación rotatoria. Para ello, se utilizan normalmente los modelos Plástico de Bingham y Ley de Potencia, por lo simple de las ecuaciones de flujo y la facilidad con la que se estiman los parámetros involucrados. Sin embargo, se considera que estos modelos no siempre tienen la capacidad de caracterizar el fluido en un rango amplio de tasas de corte y extienden el análisis a otros modelos reológicos. En este estudio se seleccionan un modelo adicional a los tradicionalmente usados, para analizar el comportamiento de los lodos en rangos de trabajo más amplios, el mismo es Ley de Potencia Modificada (Herschel-Bulkley). A continuación se describe cada uno de ellos.

2.2.2.1 Modelo plástico de Bingham ^[24]

Es un modelo de dos parámetros muy usado en la industria. La ecuación que lo define es:

$$\tau = PC + \mu_p \cdot \gamma \quad (2.1)$$

Donde

τ : Esfuerzo de corte, lb/100ft²,

PC: Punto cedente, lb/100ft²,

μ_p : Viscosidad plástica, Centipoise,

γ : Tasa de corte, RPM

2.2.2.2 Modelo Ley de Potencia ^[24]

Es un modelo de dos parámetros para el cual la viscosidad absoluta disminuye a medida que la tasa de corte aumenta. La relación entre la tasa de corte y el esfuerzo de corte está dada por la siguiente ecuación:

$$\tau = K * \gamma^n \quad (2.2)$$

Donde

τ : Esfuerzo de corte, lb/100ft²,

K: Índice de consistencia,

N: Índice de comportamiento, adimensional,

γ : Tasa de corte, RPM

No existe un término para el punto de cedencia, por lo tanto, bajo este modelo los fluidos comienzan a fluir a una tasa de corte cero.

2.2.2.3 Modelo Ley de Potencia Modificado (Herschel-Bulkley) ^[24]

Es el resultado de la combinación de aspectos teóricos y prácticos de los modelos Plástico de Bingham y Ley de Potencia. La siguiente ecuación describe el comportamiento de un fluido regido por este modelo:

$$\tau = PC + K\gamma^n \quad (2.3)$$

Donde

τ : Esfuerzo de corte, lb/100ft²,

K: Índice de consistencia,

n: Índice de comportamiento, adimensional,

γ : Tasa de corte, RPM

PC: Punto Cedente, lb/100ft²

2.2.3 Regímenes de flujo

El régimen de flujo tiene un impacto directo sobre el transporte de recortes, y el flujo puede ser laminar o turbulento. El régimen de flujo depende de la velocidad del fluido, el tamaño, y la forma del área anular, la densidad del fluido, y viscosidad. La región de flujo de fluido entre laminar y turbulento se conoce como una zona de transición. En esta región, el fluido tiene tanto características laminar y turbulento. Durante la perforación, el giro de la tubería de perforación puede crear un flujo turbulento. Cuando la velocidad del flujo es baja o cuando el fluido tiene una alta

viscosidad, se crea un flujo laminar. En contrario, el flujo turbulento se produce cuando la velocidad de flujo es alta o cuando el fluido tiene una baja viscosidad. Además, los tubos de perforación o de la pared rugosidad aumenta la turbulencia del flujo. En general, se requiere una mayor presión de la bomba, para alcanzar regímenes turbulentos. ^[25].

La relación de fuerzas de inercia a fuerzas viscosas se conoce como el número de Reynolds. Para números de Reynolds por debajo de 2100 se podría considerar un flujo laminar, por arriba del mismo valor estaríamos en la presencia de un régimen turbulento.

2.3 Hidráulica

La hidráulica en la perforación de pozos petroleros tiene que ver con la manera en que el flujo de fluidos crea y utiliza presiones durante el proceso de perforación, con el fin de hacer una distribución de las pérdidas de presión y un aprovechamiento máximo de las mismas para optimizar la tasa de penetración y minimizar los caudales de fluido, incrementando con esto las ganancias de la industria.

Una vez determinadas las propiedades reológicas definidas anteriormente, los cálculos de hidráulica son realizados para determinar el efecto que este fluido en particular tendrá sobre las presiones del sistema. Las presiones críticas son la presión total del sistema (presión de bombeo), la pérdida de presión a través de la mecha y la pérdida de presión anular (convertida en densidad equivalente de circulación); las mismas tienen relación directa con las condiciones de operación de los equipos de perforación. Las presiones nominales de las camisas de las bombas así como también el número de bombas, limitan al sistema a una presión máxima permisible; la cual a su vez impone un límite teórico sobre el caudal a utilizar, independientemente de las condiciones del pozo a perforar. ^[25]

Es importante el concepto de *Total Flow Area* (TFA), en la hidráulica, la misma es definida como la sumatoria de las áreas de los jets de la mecha, esta área es mucho

menor a la de la mecha, por lo que ocasiona un aumento de la velocidad del fluido en este punto, ocasionando que el fluido impacte la formación con mayor fuerza.

Debido a la complejidad de los pozos, es necesario realizar un análisis hidráulico que involucre el efecto de parámetros que influyen, y normalmente no son tomados en cuenta en su estudio, es por eso que surge el concepto de Hidráulica Avanzada.

2.4 Hidráulica Avanzada ^[26]

Durante años fue aceptado en los pozos, las diferencias entre las lecturas de presión obtenidas con los manómetros del equipo de perforación y los valores calculados con los programas de hidráulica. Algunas modificaciones fueron introducidas por los operadores y las compañías de servicios, buscando disminuir estas diferencias en los valores de presión. La perforación horizontal, los pozos de largo alcance y la introducción de herramientas como el PWD (*Pressure While Drilling*), mostraron como los cálculos tradicionales de hidráulica, otorgaban valores diferentes a los que realmente sucedían en el pozo.

2.4.1 Factores a considerar en la simulación avanzada de Hidráulica ^[26]

La complejidad de los pozos ha incrementado con el tiempo y por ende los factores a considerar al momento de modelar un cálculo de hidráulico. Estos factores a considerar son:

- Geometría del área anular.
- Trayectoria del pozo
- Excentricidad
- Carga de Recortes en el anular

2.4.1.1 Geometría de Hidráulica

Tuberías, Revestimientos, longitudes de secciones, etc. Fueron siempre involucradas en la determinación de las pérdidas de presión en un pozo, sin embargo el uso de tuberías más grandes de perforación (6 5/8" y 5 7/8") han cambiado estos conceptos por el notable aumento en el área interna de circulación y por la disminución en el

diámetro hidráulico, Figura 2.6, siendo este último altamente influenciado por la presencia de las uniones de cada tubo de perforación, los cuales hasta la fecha eran voluntariamente ignorados.

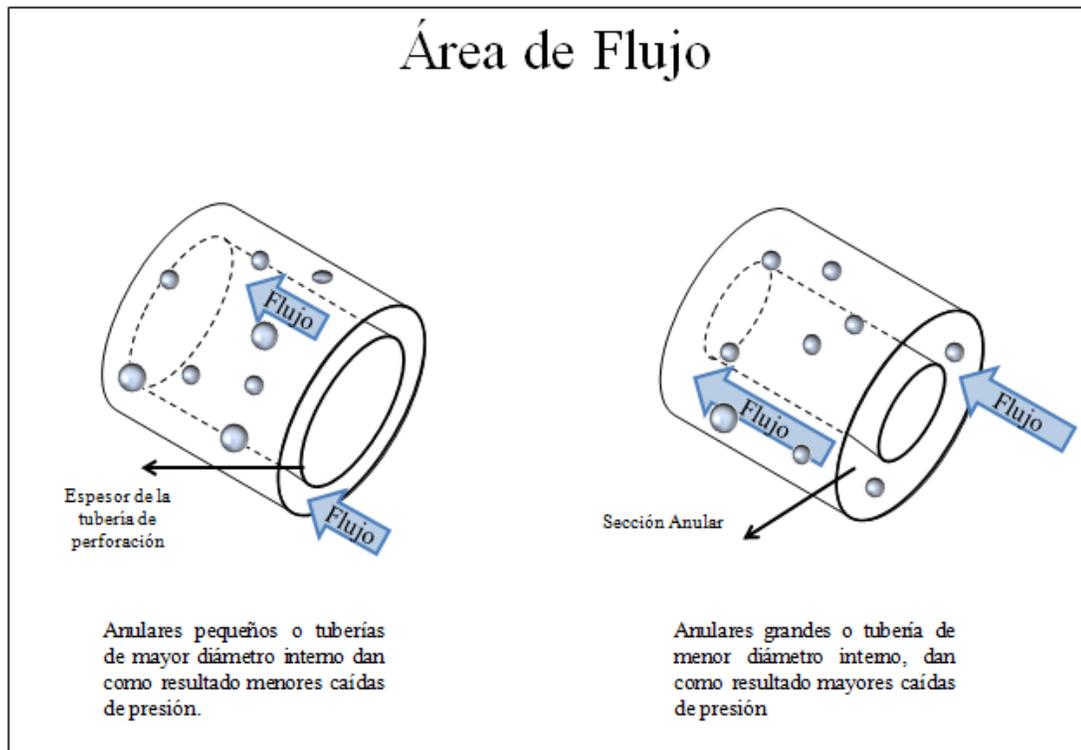


Figura 2. 6 Variación de los espacios anulares.^[26]

El volumen del pozo y los tiempos de circulación son también grandes protagonistas de los análisis de hidráulica, Pequeñas variaciones en los diámetros de los pozos, representan grandísimas variaciones en los volúmenes de fluido en el pozo. Pozos inestables o alargados. Que no son tenidos en cuenta para los cálculos, afectan notablemente las pérdidas de presión en el anular.

2.4.1.2 Trayectoria del pozo

Existen distintos tipos de pozos, debido a la complejidad de sus trayectorias, es necesario determinar ciertos puntos que nos definan la misma, en la figura 2.7, cada punto se describe por profundidad vertical verdadera o más conocida como *True Vertical Depth* (TVD) y por la profundidad medida o *Measured Depth* (MD), de estas dependerán las fuerzas que actúen sobre los recortes al momento de caer dentro del

fluido y el pozo. Así mismo, la trayectoria será un aspecto importante al momento de definir la excentricidad.

Trayectoria

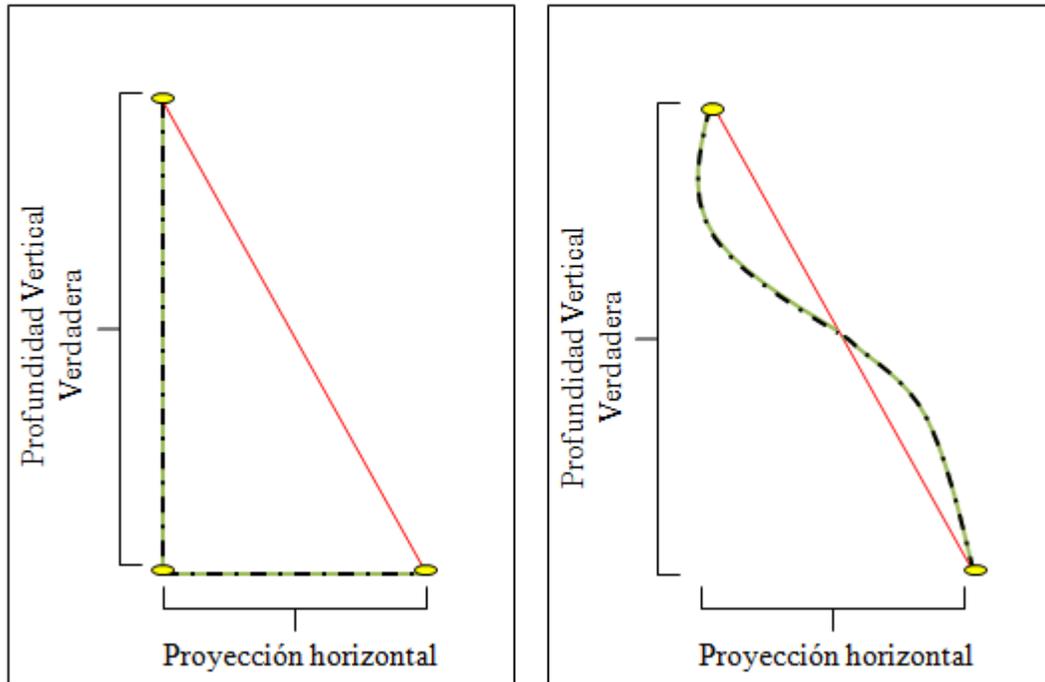


Figura 2. 7 Trayectorias de pozo.^[26]

2.4.1.3 Excentricidad

La excentricidad en la industria petrolera es definida como la fracción del porcentaje que se aleja el centro del hoyo, con el centro del tubería de perforación, siendo Excentricidad=0, cuando ambos están concéntricos, y Excentricidad=-1 ó 1, cuando se encuentra recostada a alguno de las paredes del pozo Figura 2.8. La flexibilidad de la tubería de perforación dentro del pozo ha sido aceptada por siempre en la industria, pero muy poca tenida en cuenta para cálculos de presiones e hidráulica. Con la creación del concepto de excentricidad, aparecieron conceptos nuevos como: Flujo Concéntrico, Flujo Excéntrico, Simulación del patrón de flujo y por ende se pensó en su efectos en la Densidad Equivalente de Circulación (ECD), por sus siglas en inglés.

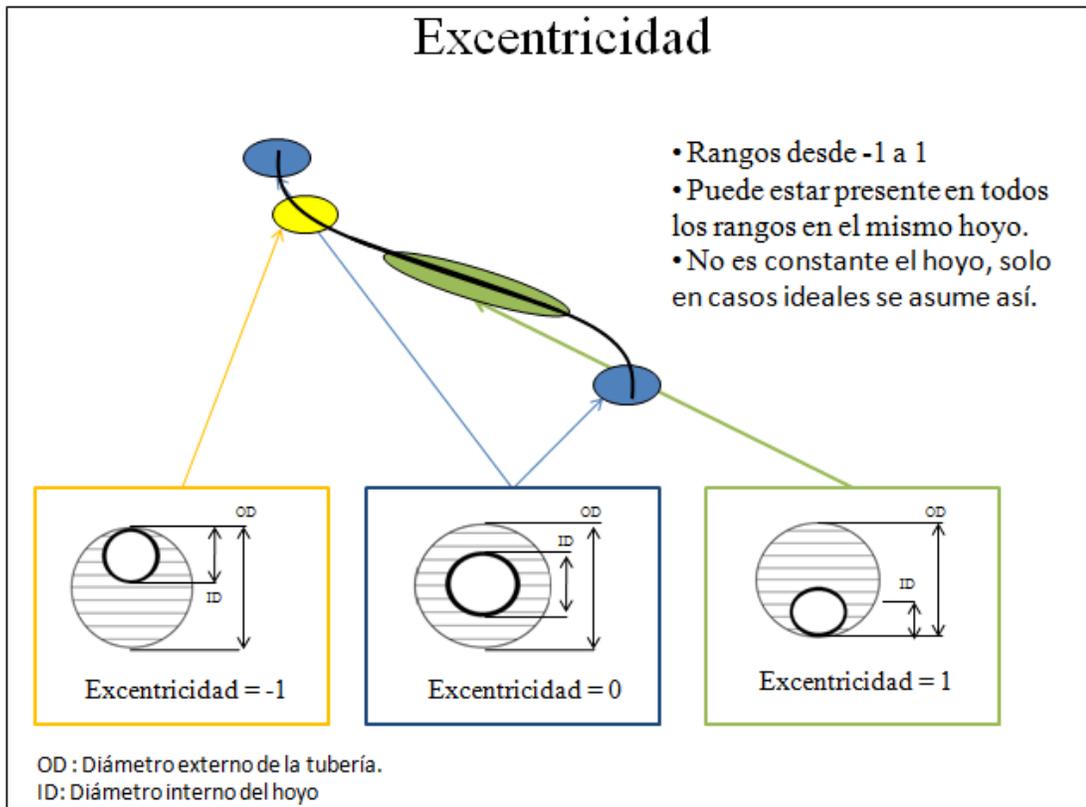


Figura 2. 8 Excentricidad en diferentes puntos de un pozo.^[26]

Asociado a excentricidad aparece el tema de la cama de recortes, otro asunto que aparece a medida que se desarrolla la perforación horizontal y que día a día cobra vigencia, se evalúa y se estudia. No puede existir un análisis de hidráulica sin tener en cuenta la altura de la cama de los recortes, y así tener presente las restricciones que se generan en el pozo por la acumulación de recortes y por la existencias de zonas donde, independientemente de la reología o el caudal de bombeo, jamás será posible llevar fluido a esos lugares. Figura 2.9.

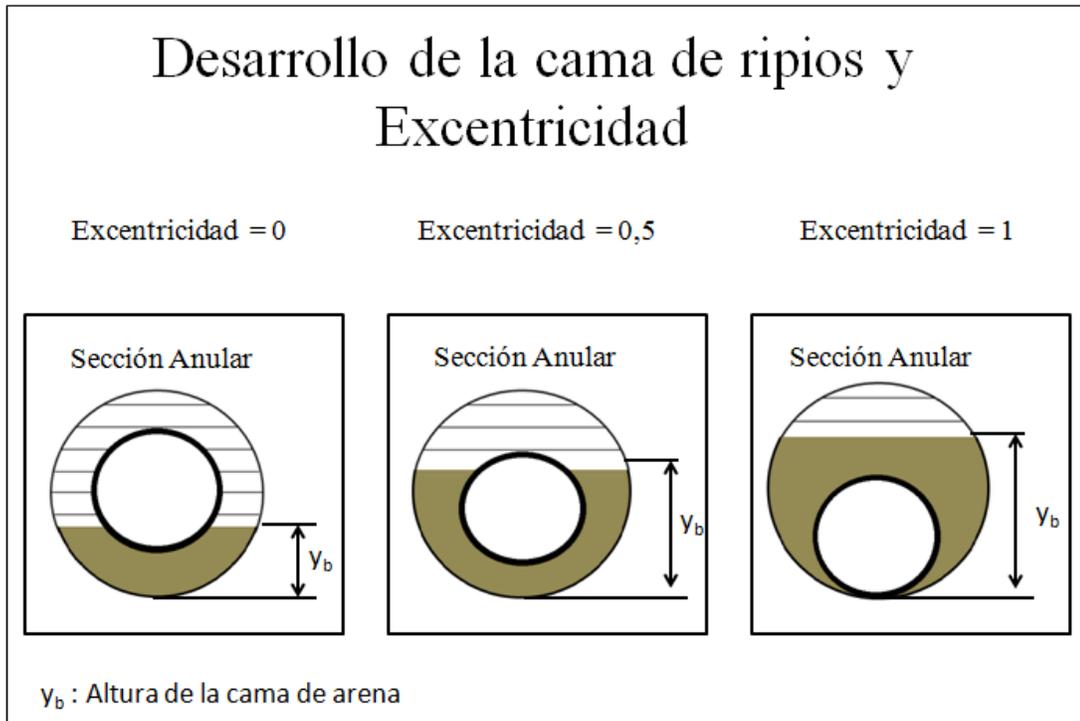


Figura 2. 9 Cama de recortes y excentricidad.^[26]

2.4.1.4 Carga de recortes en el anular ^[26]

La carga de recortes en el anular hace referencia a que porcentaje de los recortes perforados que se pueden dejar en el anular, sin que representen un peligro y pongan en riesgo la vida del pozo por una deficiente limpieza del hueco. Este valor está basado en velocidades de penetración, capacidad de arrastre del lodo, velocidades de ascenso y descenso de las partículas, tamaño, forma y densidad de los recortes, de la excentricidad y de la geometría del pozo. La experiencia ha mostrado que un promedio máximo de 3% de recortes, (para todo el pozo) debe permanecer en el anular. Por cada intervalo (sección de diámetro) un máximo de 10% puede ser manejado sin comprometer la limpieza del pozo (figura 2.10). Muestra las diferentes formas como se depositan los recortes, de acuerdo con el diseño del pozo.

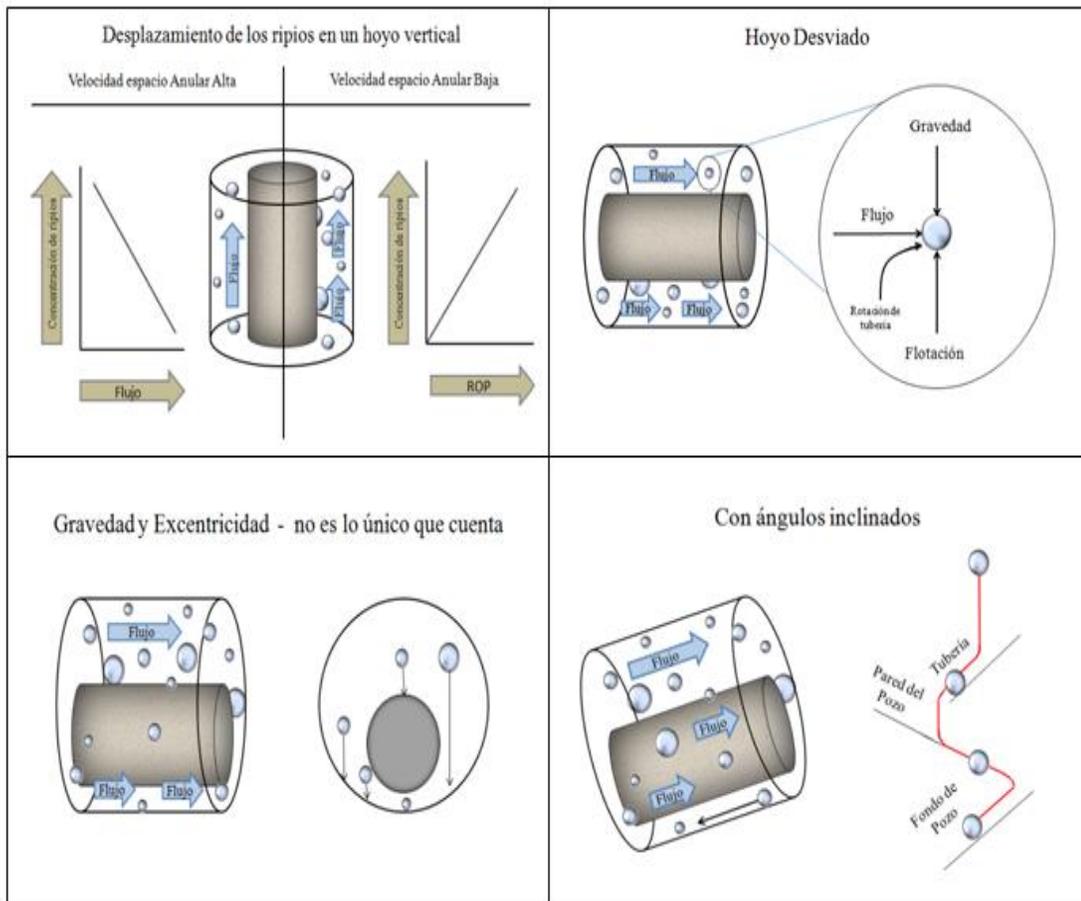


Figura 2. 10 Acumulación de recortes de acuerdo a diseños de pozos.^[26]

Esta acumulación de recortes, como dijimos antes, se refleja directamente en las presiones dentro del pozo y cada una de las operaciones realizadas, como perforar, deslizar, circular o rotar, traen un efecto de los recortes sobre la presión de fondo. Una vez más el PWD permitió reconocer este fenómeno, evaluarlo e involucrarlo en los cálculos avanzados de hidráulica. Este parámetro ha sido el secreto del éxito de las dos operaciones más grandes de pozos de largo alcance realizadas en el mundo.

2.5 Transporte de partículas

El acarreo de ripios o transporte de partículas consiste en vencer la caída por gravedad de los ripios generados en la perforación con la corriente ascendente del fluido en el espacio anular.

Los elementos que determinan la limpieza del hoyo son:

- Reología del fluido de perforación.
- Tamaño de la partícula.
- Gravedad específica de la partícula.
- Hidráulica.

La importancia de la limpieza del hoyo es indiscutible y de hecho es una de las funciones más importantes del fluido de perforación.

Una limpieza pobre en el hoyo podría ocasionar los siguientes problemas:

- Aumenta el torque y arrastre en la sarta, el torque es definido como la fuerza necesaria a ser aplicada por el top drive para hacer girar la sarta, mientras que el arrastre, es la fuerza de que se produce por el contacto entre la tubería y las paredes del pozo.
- Reducción de la tasa de penetración.
- Atascamiento de tubería.
- Dificultad en la corrida de revestidores.

Los ripios por la acción de la gravedad tienden a caer en el fondo del hoyo. La velocidad de caída de los ripios se denomina velocidad de asentamiento. Por otra parte, el fluido tiene una velocidad ascendente en el espacio anular que está determinada por el caudal y por el área transversal, la cual se denomina velocidad anular. Al contraponer estas velocidades se logra un efecto de transporte del ripio hacia la superficie. Este efecto está asociado a un tiempo de viaje del ripio y mientras menor sea ese tiempo, mayor será la limpieza del hoyo.

2.5.1 Influencia de la rotación de la tubería en el transporte de partículas

Basándonos en los resultados obtenidos por Peden, Ford, y Oyenein ^[21], en una investigación experimental de transporte de ripios en pozos inclinados que incluyó el efecto de la rotación de la tubería, del cual concluyeron que la misma tiene un efecto insignificante para áreas anulares grandes, sin embargo para espacios anulares pequeños tiene un efecto considerable. Tomando esto en cuenta y debido a que el modelo será desarrollado para hoyo 12 1/4", el efecto de rotación de la tubería de

perforación, no será incluido. Zeidler ^[27] también mostro un resultado experimental, en el cual el torque nos afectaba la limpieza de hoyo a bajos caudales, pequeños tamaños de granos y bajos ROP, para otros rangos, el efecto del mismo se considera despreciable.

2.5.2 Fuerzas Fluido-partícula

Para comprender el transporte de partículas, es necesario, conocer principalmente las fuerzas que ejercen una influencia sobre la partícula en el fluido. Existen dos tipos principales de fuerzas que influyen sobre la partícula:

-Las fuerzas, que obligan a las partículas a mantenerse asentadas a la parte baja del hoyo. El efecto de la gravedad, que fuerza a la partícula a asentarse para así formar una cama de ripios y una fuerza denominada normal, la cual es aplicada por el grupo de partículas, que se encuentran sobre la partícula a estudio.

-Las fuerzas que obligan a desplazar la partícula fuera de la cama de ripios. Estas son la fuerza de levantamiento, de arrastre y flotación.

En la figura 2.11 se muestra un grupo de partículas que se ha depositado en la zona inferior de la pared de un hoyo inclinado, con un ángulo α .

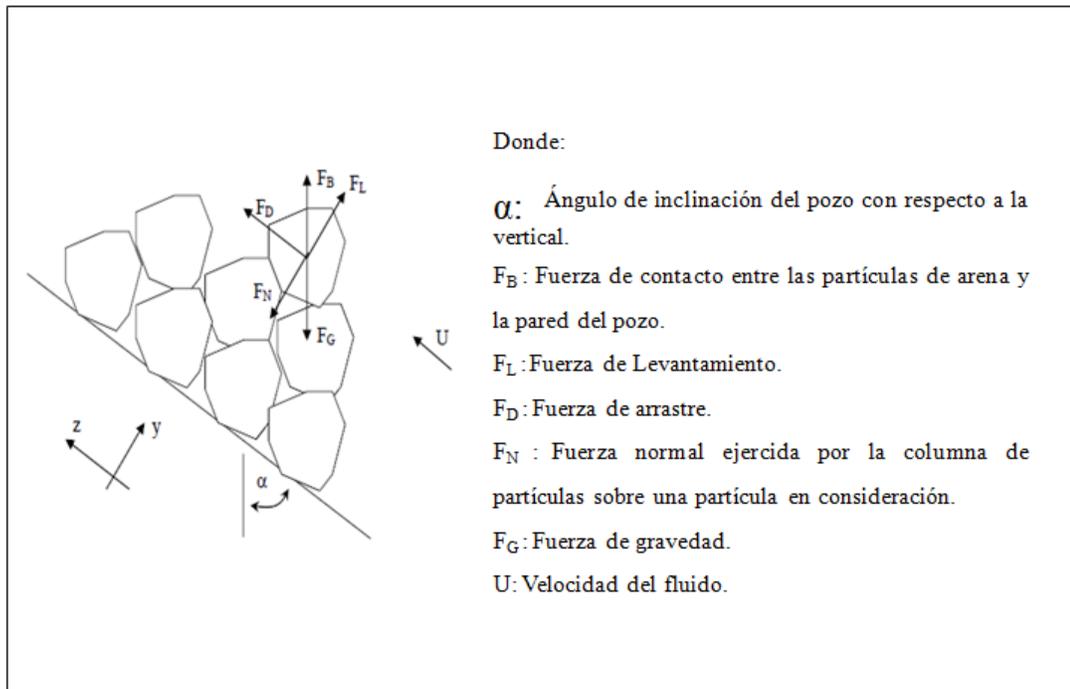


Figura 2. 11 Fuerzas que actúan sobre una partícula en el seno de un flujo. ^[20]

2.5.1.1 Fuerza de Gravedad (F_G)

Esta fuerza siempre tiende a obligar a asentarse o mantenerse asentada a las partículas en la parte baja del hoyo, la misma puede ser expresada como:

$$F_G = \left(\frac{\pi(d_p)^3}{6} \right) \rho_s g \quad (2.4)$$

Dónde:

F_G : Fuerza de gravedad, dina.

d_p : Diámetro de las partículas de arena, cm.

ρ_s : Densidad de la partículas de arena, gr/cm^3 .

g : Aceleración de gravedad, cm/s^2 .

En un pozo inclinado, la fuerza se separa en dos componentes:

$$F_{Ga} = F_G \cos \alpha \quad (2.5)$$

$$F_{Gva} = F_G \sin \alpha \quad (2.6)$$

Dónde:

F_{Ga} : Fuerza de gravedad paralela al eje del pozo, dina.

F_{Gva} : Fuerza en dirección normal ejercida por la gravedad, dina.

α : Ángulo de inclinación del pozo con respecto a la vertical, grados.

Bajo la acción de la componente vertical de la fuerza de gravedad (F_{Gva}), las partículas son mantenidas en la parte inferior de la pared anular. Pero bajo la acción de la componente horizontal de la fuerza de gravedad (F_{Ga}), las partículas se deslizan al fondo del hoyo.

2.5.1.2 Fuerza de Flotación (F_B)

Esta es la fuerza que se genera por el fluido para intentar mantener a las partículas en suspensión, la misma actúa de manera perpendicular con respecto al eje horizontal y es opuesta a la fuerza de gravedad ^[8]. Esta fuerza viene representada por la siguiente ecuación:

$$F_B = \left(\frac{\pi(d_p)^3}{6} \right) \rho_f g \quad (2.7)$$

Dónde:

F_B = Fuerza de flotación, dinas.

ρ_f : Densidad del fluido, gr/cm³.

g : Aceleración de gravedad, cm/s².

d_p : Diámetro de las partículas de arena, cm.

2.5.1.3 Fuerza de Levantamiento (F_L)

Esta fuerza levanta las partículas de arena. Esta es definida como la fuerza aplicada sobre un cuerpo en dirección normal por un fluido. Esta fuerza puede surgir por dos motivos. La primera es por la velocidad del fluido alrededor de la partícula. La segunda es si estamos en presencia de un régimen de flujo turbulento y es siempre normal a la dirección del flujo ^[8]. La fuerza viene expresada de la siguiente forma:

$$F_L = C_L \frac{\pi(d_p)^2}{8} \rho_f (U_f)^2 \quad (2.8)$$

Dónde:

F_L : Fuerza de levantamiento, dinas.

C_L : Coeficiente de levantamiento, adimensional.

d_p : Diámetro de las partículas de arena, cm.

ρ_f : Densidad del fluido, gr/cm³.

U_f : Velocidad del fluido, cm/s.

Para determinar el valor del coeficiente de levantamiento (C_L), han sido realizados gran número de experimentos. Para flujo laminar Saffman ^[28] desarrollo una ecuación para determinar la fuerza de levantamiento, donde el coeficiente de levantamiento está implícito en la misma:

$$F_L = 1,615 \mu^{0,5} d_p^2 \rho_f^{0,5} U_f \gamma^{0,5} \quad (2.9)$$

Dónde:

μ : Viscosidad efectiva, poise.

d_p : Diámetro de las partículas de arena, cm.

ρ_f : Densidad del fluido, gr/cm³.

γ : Velocidad de corte, RPM.

U_f : Velocidad del fluido, cm/s.

Clark y Binckman ^[10] encontraron un coeficiente de levantamiento para flujos turbulentos. Ellos presentaron las fuerzas dinámicas, ocasionadas por un flujo actuando sobre una corriente turbulenta de agua fluyendo sobre una cama de partículas. El coeficiente viene dado por el siguiente valor:

$$C_L = 0,09 \quad (2.10)$$

2.5.1.4 Fuerza de Arrastre (F_D)

Esta fuerza es generada por el arrastre de la viscosidad del fluido, es decir la resistencia que opone el fluido contra la partícula ^[8]. Para números de Reynolds de la partícula bajos (inferiores a 10) resulta en fuerzas viscosas elevadas, y una gran parte de la fuerza de arrastre es usada para vencer la resistencia viscosa del fluido. Para valores elevados de número de Reynolds de la partícula (superiores a 50), la densidad del fluido y el diámetro de la partícula afectan la fuerza de arrastre. Para número de Reynolds superiores a 100, el coeficiente de arrastre empieza a tomar un valor prácticamente constante ^[30]. La fuerza de arrastre viene expresada por:

$$F_D = C_D \frac{\pi(d_p)^2}{8} \rho_f (U_f)^2 \quad (2.11)$$

Dónde:

F_D : Fuerza de arrastre, dinas.

U_f : Velocidad del fluido, cm/s.

ρ_f : Densidad del fluido, gr/cm[^].

d_p : Diámetro de las partículas de arena, cm.

C_D : Coeficiente de arrastre, adimensional.

Para obtener el valor de coeficiente de arrastre usaremos la correlación desarrollada por Chien ^[30] la cual se basó en datos experimentales y es relacionada al número de Reynolds de la partícula y la esfericidad de la misma.

$$C_D = \left(\frac{30}{Re_p} \right) + \left(\frac{67,289}{e^{5,030 \psi}} \right) \text{ Para } 0,2 \leq \psi \leq 1,0 \quad (2.12)$$

Dónde:

C_D : Coeficiente de arrastre, adimensional.

ψ : Esfericidad de la partícula, cm.

Para casi la totalidad de las partículas de arena el valor de esfericidad está muy cercano a 0,8, por lo que para el desarrollo del modelo, asumiremos dicho valor. Reduciendo la ecuación 2.12 con esta suposición, obtenemos:

$$C_D = \left(\frac{30}{Re_p} \right) + 1,25 \quad (2.13)$$

Dónde:

C_D : Coeficiente de arrastre, adimensional.

Re_p : Numero de Reynolds de la partícula, adimensional.

Esta ecuación es solo válida para partículas con esfericidad aproximada de 0,8 en fluidos Newtonianos y no Newtonianos y para números de Reynolds entre 0.001 y 10000 ^[30]. El número de Reynolds de la partícula viene definido por:

$$Re_p = \frac{d_p v_s \rho_f}{\mu_e} \quad (2.14)$$

Dónde:

d_p : Diámetro de las partículas de arena, cm.

ρ_f : Densidad del fluido, gr/cm³.

μ_e : Viscosidad efectiva, poise.

v_s : Velocidad de asentamiento de la partícula, cm/s.

2.5.1.5 Fuerza Normal (F_N)

Es la fuerza ejercida por el grupo de partículas, que se encuentran sobre la partícula a estudio ^[29]. Esta no es más que el efecto que tiene las partículas superiores de la cama de arena cuando se encuentra en movimiento, presionando a las partículas que se encuentran debajo. Doron ^[29] desarrollo la siguiente ecuación para determinar el efecto de esta fuerza:

$$F_N = F_A \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) N \quad (2.15)$$

Dónde:

F_N : Fuerza normal ejercida por la columna de partículas sobre una partícula en consideración.

F_A : Fuerza de Arquímedes, dinas.

N : Promedio de partículas de la columna, adimensional.

Donde esta representa la componente en el eje “y” de la fuerza de Arquímedes multiplicado por el promedio de partículas en la columna (N), la cual fue definida por Doron ^[29]:

$$N = C_b \frac{y_b - d_p}{d_p} \quad (2.16)$$

y_b : Altura de la cama de arena, cm.

d_p : Diámetro de las partículas de arena, cm.

C_b : Concentración de la cama de arena, adimensional.

La resta de la fuerza de gravedad con la fuerza de flotación es la fuerza de Arquímedes y está definida por:

$$F_A = \frac{\pi(d_p)^3}{6} (\rho_s - \rho_f)g \quad (2.17)$$

Dónde:

d_p : Diámetro de las partículas de arena, cm.

ρ_s : Densidad de las partículas de arena, gr/cm³.

ρ_f : Densidad del fluido de perforación, gr/cm³.

g : gravedad, cm/s².

Si sustituimos 2.16 y 2.17 en 2.15, obtenemos:

$$F_N = \left(\frac{\pi(d_p)^3}{8} \right) (\rho_s - \rho_f)g \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) C_b \frac{y_b - d_p}{d_p} \quad (2.18)$$

Dónde:

d_p : Diámetro de las partículas de arena, cm.

ρ_s : Densidad de las partículas de arena, gr/cm³.

ρ_f : Densidad del fluido de perforación, gr/cm³.

g : gravedad, cm/s².

α : Ángulo del pozo, radianes.

C_b : Concentración de la cama de arena, adimensional.

y_b : Altura de la cama de arena, cm.

2.5.3 Mecanismos de asentamiento de la partícula. ^[25]

El proceso de limpieza de hoyo debe contrarrestar las fuerzas gravitatorias que actúan en los recortes para minimizar el asentamiento durante los períodos dinámicos y estáticos. Existen tres mecanismos básicos de asentamiento: libre, impedido y

asentamiento Boycott. Los primeros dos se relacionan con los pozos verticales, mientras que todos pueden existir en pozos direccionales.

2.5.3.1 Asentamiento libre

Ocurre cuando una sola partícula cae a través de un fluido sin interferencia de otras partículas o paredes contenedoras, similar a la que pudiera ocurrir en el centro de una presa de agua grande. La así llamada “velocidad de asentamiento terminal” depende de la diferencia de densidad entre fluido y partícula, reología del fluido, tamaño y forma de la partícula y el régimen de flujo alrededor de la partícula. En flujo turbulento, la velocidad de asentamiento es independiente de la reología. En flujo laminar alrededor de la partícula, la Ley de Stokes aplica para el asentamiento libre, y fue desarrollado para partículas esféricas, los fluidos Newtonianos y un fluido inmóvil.

2.5.3.2 Asentamiento impedido

Es un modo más realista de asentamiento para intervalos casi verticales y casi horizontales, particularmente en agujeros de diámetro pequeño y donde están presentes altas concentraciones de recortes con alta Tasa de Penetración. El asentamiento impedido ocurre cuando las partículas que se asientan más rápido crean fuerzas ascendentes en las partículas adyacentes, por medio de eso disminuyendo su ritmo de deslizamiento. El resultado neto es todavía un movimiento descendente total, pero el ritmo de asentamiento es siempre menor (impedido) que para partículas solas, individuales. La interferencia de las paredes del hoyo y tubería de perforación también disminuyen el ritmo de asentamiento de partículas cercanas.

El asentamiento impedido es el más importante en los pozos verticales. Acoplado con la distancia de asentamiento larga, ayuda a explicar por qué la limpieza del agujero es menos problemática en pozos verticales.

2.5.3.3 Asentamiento de Boycott

Es un patrón acelerado de asentamiento el cual puede ocurrir en agujero inclinados, es llamado como el físico quien por primera vez reportó que las partículas en tubos de

prueba inclinados se asientan de 3 a 5 veces más rápido que en los verticales. El asentamiento de Boycott es la consecuencia de las diferencias de flujo en los lados altos y bajo de hoyos inclinados. Esto causa un desequilibrio de presión lo cual lleva al fluido más ligero, a la zona superior y cualquier recortes al lado bajo en forma descendente. Los ángulos de 40 a 60° son particularmente problemáticos. A tasas de flujo relativamente bajas (100 GPM), el lodo fluye principalmente a lo largo del lado alto del hoyo. Las tasas de flujo y rotación de la tubería de perforación altas pueden desorganizar el patrón y mejorar la limpieza del agujero.

2.5.3.4 Velocidad de asentamiento de la partícula

En 1994 Chien ^[30], introdujo una correlación para poder conocer la velocidad de asentamiento de partículas en fluidos tanto Newtonianos como no Newtonianos. Esta correlación incluye parámetros tanto de la partícula, como del fluido y la misma está representada por la siguiente ecuación:

$$v_s = 120 \left(\frac{\mu_e}{10d_p\rho_f} \right) \left[\sqrt{1 + 0,0727 d_p \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right) \left(\frac{10d_p\rho_f}{\mu_e} \right)^2} - 1 \right] \quad (2.19)$$

Dónde:

v_s : Velocidad de asentamiento de la partícula, cm/s.

d_p : Diámetro de las partículas de arena, cm.

ρ_s : Densidad de las partículas de arena, gr/cm³.

ρ_f : Densidad del fluido de perforación, gr/cm³.

μ_e : Densidad efectiva, poise.

Para predecir la velocidad de asentamiento en un régimen de flujo turbulento de resbalamiento, Chien ^[30] desarrollo la siguiente ecuación, tomando en cuenta una esfericidad de las partículas de arena de 0,8.

$$(v_s)_t = 32,355 \sqrt{d_p \left[\left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right) \right]} \quad (2.20)$$

Dónde:

v_s : Velocidad de asentamiento de la partícula, cm/s.

d_p : Diámetro de las partículas de arena, cm.

ρ_s : Densidad de las partículas de arena, gr/cm³.

ρ_f : Densidad del fluido de perforación, gr/cm³.

Esta ecuación nos lleva a pensar que la viscosidad efectiva, no tiene gran influencia, cuando estamos en regímenes de flujo turbulento.

2.5.4 Patrones de flujo en el transporte de partículas

Dependiendo del caudal, el ángulo del pozo y las propiedades del fluido, el flujo bifásico de arena-liquido en el anular, podría presentar diferentes patrones de flujo. Estos pueden ser analizados basándonos en el análisis de fuerzas previamente realizado:

- A) Suspensión heterogénea: en este patrón de flujo, la fuerza de levantamiento es mayor a la componente en dirección normal de la fuerza gravitacional, y así de esta manera las partículas pueden ser levantadas de la pared inferior del anular y se mantienen en suspensión.
- B) Cama de ripios estática: si se aumenta el ángulo del pozo y se disminuye la velocidad del fluido, la fuerza de levantamiento aún puede levantar algunas partículas, pero las partículas que se encuentran en la parte más baja de la cama de arena permanecen estática. A su vez la componente en dirección “x” de la fuerza de gravedad es mayor que la fuerza de arrastre ejercida por el fluido, la cual no es lo suficientemente grande para transportar las partículas de arena hacia afuera del pozo.
- C) Cama de arena en continuo movimiento: en este patrón de flujo la fuerza de levantamiento mantiene suspendidas algunas partículas, pero no en su totalidad, a su

vez la fuerza de arrastre es lo suficientemente grande para arrastrar las partículas de arena hacia arriba del hoyo. Este patrón de flujo es el resultado de la acción conjunta de la fuerza de arrastre y de levantamiento.

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DE LAS ÁREAS DE PRODUCCIÓN EN VENEZUELA

3.1 Faja Petrolífera Del Orinoco ^[31]

La Faja Petrolífera del Orinoco, fuente de reservas de hidrocarburos líquidos más grande del mundo, comprende una extensión de 55.314 km² y un área de explotación actual de 11.593 km², ubicada al sur de los estados Guárico, Anzoátegui y Monagas.

Este gran reservorio petrolero fue dividido en cuatro grandes áreas, siendo estas de oeste a este: Boyacá, Junín, Ayacucho y Carabobo, y a su vez segmentado en 29 bloques de 500 km² cada uno aproximadamente (Figura 3.1).



Figura 3. 1 Área de La Faja Petrolífera del Orinoco ^[31].

3.1.1 Bloque Junín

Una vasta reserva de crudo yace en el área Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco. En la zona se localiza un potencial energético de 459.000 millones de barriles en POES (Petróleo Original en Sitio) y volúmenes de hidrocarburos recuperables por el orden de los 90.600 millones de barriles, según datos manejados por Petróleos de

Venezuela (PDVSA). Las perspectivas se reflejan en un informe sobre la zona realizado por PDVSA indica corroboran el inmenso potencial de reservas recuperables, sólo el potencial de 90.600 millones de barriles está muy por encima del total de los volúmenes de crudo de todo el continente de América del Norte (Estados Unidos, Canadá y México) y que se ubican en 74.000 millones de barriles o de Asia y Pacífico (44.400 millones de barriles), respectivamente.

3.1.2 Localización Pozo

Desde la localización JA19-12 se propone perforar un pozo horizontal sencillo en la arena “D” (Fm Merecure) la cual se navegará en dirección Este franco, en un espesor promedio de 104 pies de arena neta petrolífera a lo largo del yacimiento MER SDZ0002 del Campo Zuata Principal de la Faja Petrolífera del Orinoco, con el propósito de drenar eficientemente parte de las reservas recuperables presentes en el yacimiento. A continuación se muestra la ubicación de la localización JA19-12 (Figura. 3.2).

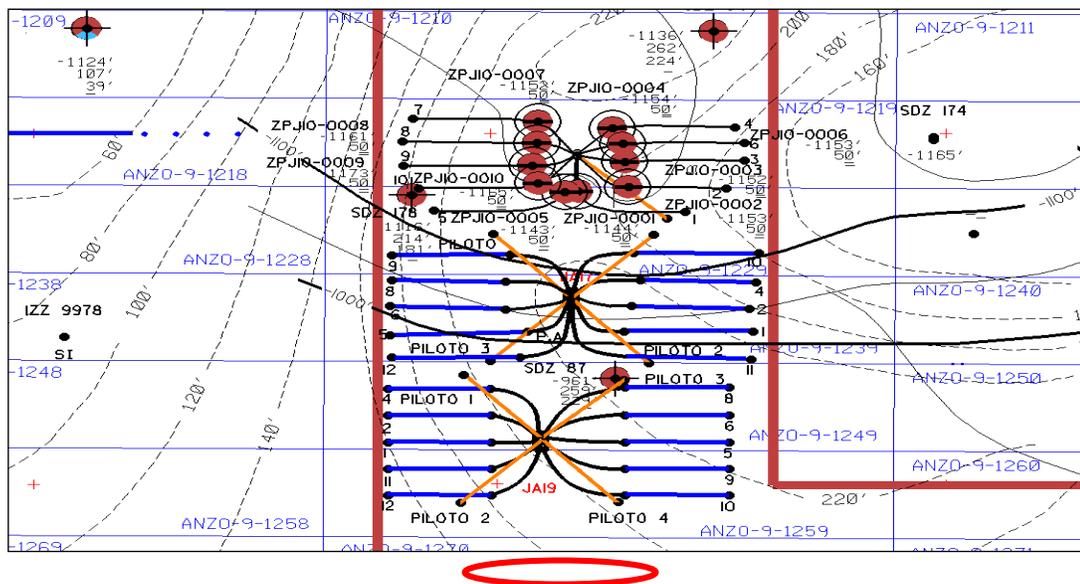


Figura 3. 2 Mapa Isópaco - Estructural del Yacimiento MER SDZ0002. Ubicación localización JA19-12. [32]

Esta propuesta de perforación está soportada por análisis estratigráficos basados en la información de pozos cercanos perforados en el área y por el modelo estructural, realizándose conjuntamente con la petrofísica e ingeniería de yacimiento una

interpretación multidisciplinaria del yacimiento MER SDZ0002.

De acuerdo a la planificación de perforación, la localización JA19-12 presenta las siguientes coordenadas UTM de superficie: N: 916.450,00 y E: 271.420,00 ; el pozo una vez perforado, finalizará con las siguientes coordenadas UTM de fondo: N: 917.070,00 y E:273.32,00 alcanzando aproximadamente 6006' pies de sección horizontal.

3.1.3 Yacimiento MER SDZ0002

Ubicado en el campo Zuata Principal, tiene las siguientes características: Presión inicial de 663 Lpc, temperatura 118 ° F, una gravedad del petróleo de 9.0 °API, una porosidad de 31%, una saturación de petróleo de 85%, una relación de solubilidad del gas de en petróleo de 58 PCN/BN y un factor de merma de 0,952 BN/BY.

Con la finalidad de realizar una correlación detallada y una definición de la extensión lateral y vertical de la arena objetivo, se realizó una serie de secciones estratigráficas, de las cuales, una de ellas se muestra en la Figura. 3.3. En la sección estratigráfica se puede observar la presencia del canal con buenos espesores, desde tope hasta la base del cuerpo sedimentario, además se aprecia su continuidad lateral.

El intervalo Oligoceno está compuesto por areniscas de grano muy grueso, moderado a pobremente escogidas con clastos de arcilla y variabilidad en el tamaño de los granos, sin bioturbación. El ambiente es de depósitos de canales entrelazados apilados. (Ambiente Fluvial). (Figura. 3.4).

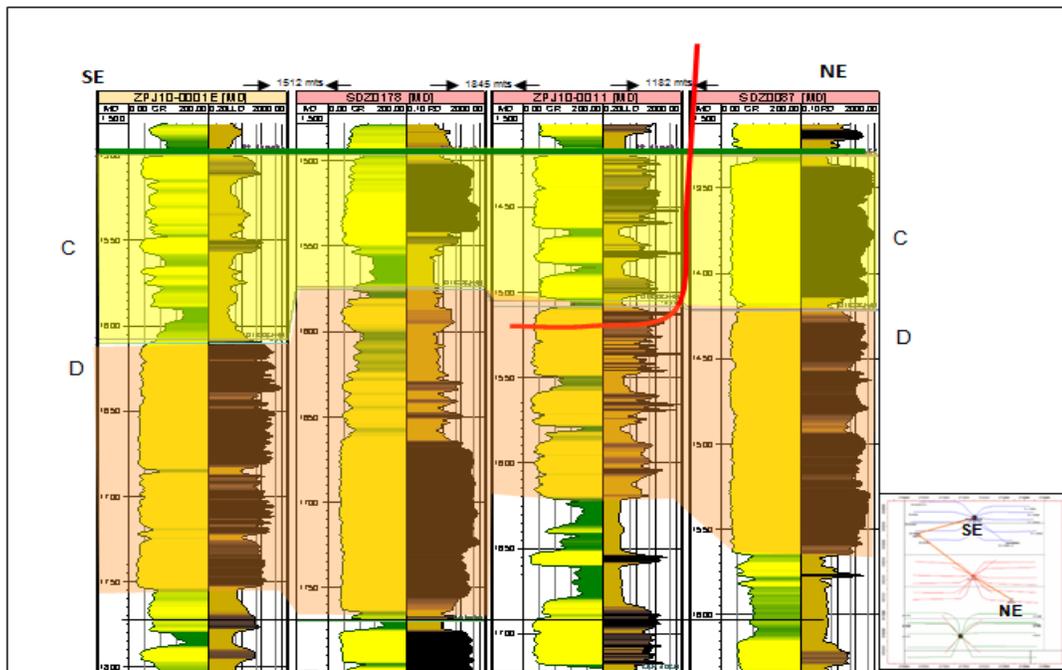


Figura 3. 3 Sección estratigráfica NE-SO, arena D, Yacimiento MER SDZ0002. Ubicación localización JA19-12.^[32]

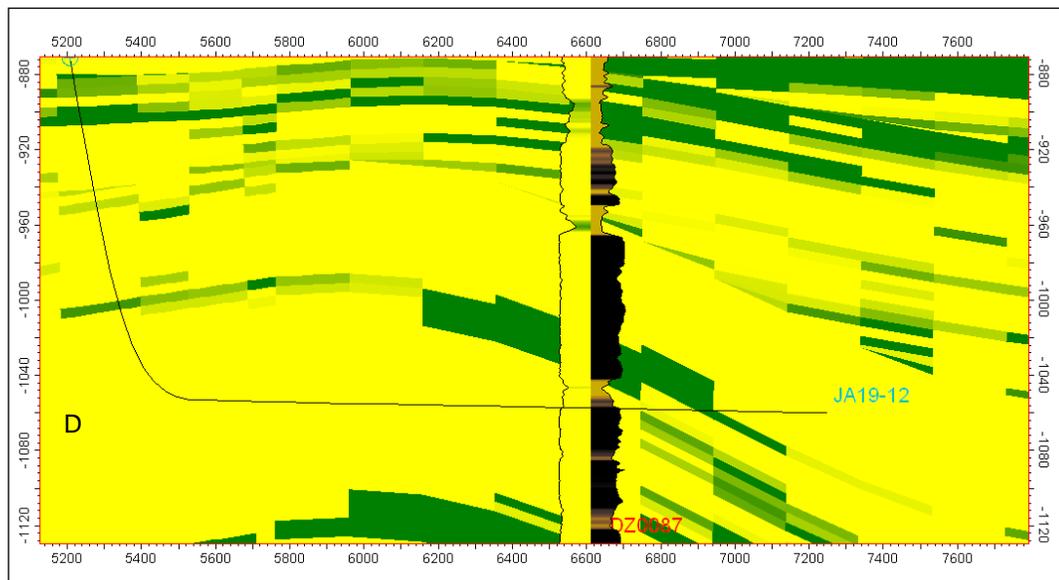


Figura 3. 4 Vista 2D Modelado Geoestadístico del Oligoceno Bloque Junín Sur ^[32].

Desde el punto de vista estructural, el campo Zuata Principal es un monoclinas con un buzamiento aproximado de 3° hacia el norte. La disposición de los horizontes sísmicos en el Bloque Junín 10 en dirección Norte – Sur muestran un acuñamiento

de la sección Cretácico y Paleozoica (Formación Carrizal) hacia el Sur. En la dirección Este – Oeste se aprecia una tendencia de casi paralelismo, con excepción del intervalo Discordancia del Oligoceno (Formación Merecure), el cual está erosionado hacia el Este del bloque Junín 10.

En la Figura 3.5 se muestra una línea sísmica (Crossline 80) interpretada de los datos Sísmico 3D de Petrocedaño, en ésta se puede observar que la disposición de los horizontes sísmicos es divergente con una separación entre los límites que decrece hacia el Sur, así como también, el acuñaamiento del intervalo Cretácico hacia el sector Sur contra el Paleozoico.

En ésta sección sísmica (Figura 3.5) también se muestra tres fallas normales de alto ángulo con buzamientos aparentes hacia el Norte, destacándose la localizada más hacia el Norte por estar asociada a la falla de Hato Viejo de carácter regional. Sin embargo, el salto vertical de estas fallas es casi despreciable en la zona de interés, siendo más notable en los horizontes sísmicos más profundos (Basamento y Discordancia del Paleozoico). Los buzamientos de estas fallas señalan la presencia de un sistema tensional en relación con las características estructurales regionales del área de Junín.

3.1.4 Modelo Petrofísico Mer Sdz0002 (Arena “D”)

Tabla 3. 1 Resumen del análisis petrofísico del pozo ZPJ10-0011 (Arena “D”)

POZ	TOP	BAS	VSH (%)	P	PERM (mD)	PERMEFE	SW (%)
JA17-	1509'	1549'	14	3	6093	4569,75	16

La tabla 1 muestra el sumario petrofísico del yacimiento MER SDZ0002 (Arena “D”-Oligoceno), donde el promedio de la porosidad es de 31 %, 4570 md y saturación de agua son 16 % respectivamente.

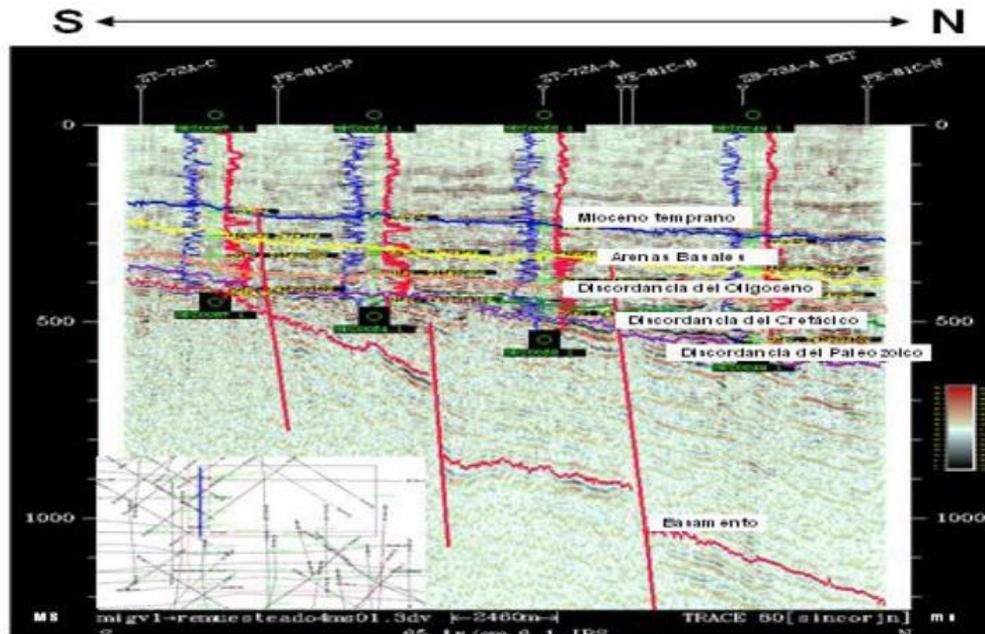


Figura 3. 5 Línea sísmica (“Crossline” 80) 3D Sísmico de Petrocedefo [32].

Para este estudio se utilizaron los siguientes parámetros de corte VSH <40%, 20 % <porosidad <36% y S_w <50 %, permeabilidad>1000 mDarcys y R_w 0,38 Ohm-m @118 °F, el cual fue tomado de estudios previos en el área, los cuales fueron representativos. En la figura 5 se resalta el intervalo del oligoceno y el en mismo se aprecia los datos rayos gamma, Resistividad, densidad, saturación de agua, saturación de crudo litología y permeabilidad de izquierda a derecha del registro. La profundidad esta en TVDSS.

3.1.5 Reservas Yacimiento Mer Sdz0002.

El yacimiento MER SDZ0002 presenta un área de 71.167 acres y un espesor promedio de arena neta petrolífera de 98 pies, que se traduce en un volumen de 6.184.478 acres-pies, un POES de 12.425 MMBN. A partir de un factor de recobro primario de 7.5 %, las reservas primarias se ubican en 932 MMBN, mientras que con un 16.5 % adicional por recobro suplementario, las reservas secundarias son de 5877 MMBN. El total de reservas recuperables es de 6809 MMBN. El estudio de Magna Reserva revela que en un intervalo de 50 años los pozos ubicados en este yacimiento

llegarían a acumular hasta 2,5 MMBNP de acuerdo con características del pozo, calidad de roca y fluido.

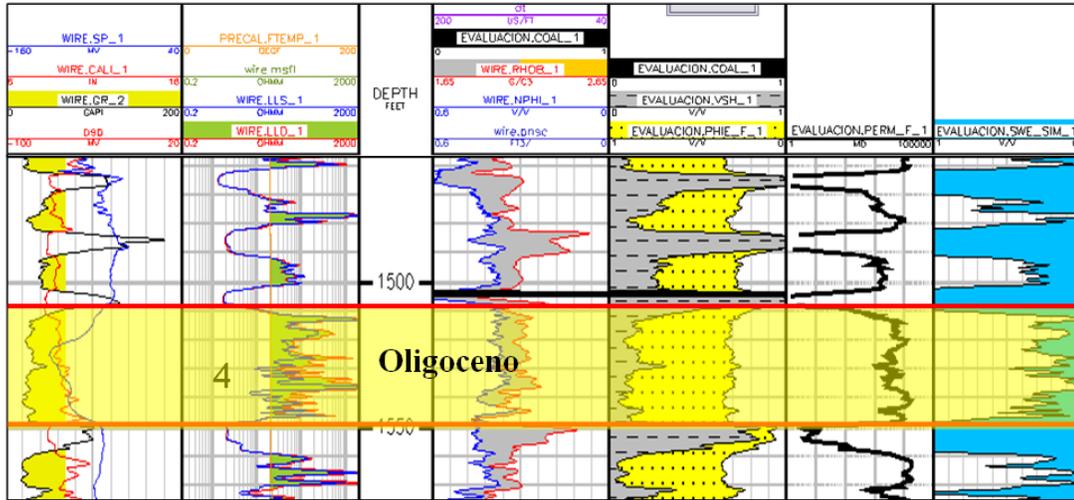


Figura 3. 6 Evaluación petrofísica del pozo ZPJ10-0011 [32].

3.1.6 Pronostico De Producción

Tomando en cuenta las propiedades petrofísicas y de los fluidos oficiales del Yacimiento MER SDZ0002, se realizó, mediante el simulador ResAct, el pronóstico de producción del pozo horizontal que se perforará desde la localización JA19-12, estimando un potencial de 562 BPPD.

3.1.7 Información General

Tabla 3. 2 Información general

LOCALIZACION: JA19-12	CAMPO: ZUATA PRINCIPAL	BLOQUE: JUNÍN 10
PARCELA: ANZO-9-1249	MUNICIPIO: MONAGAS	ESTADO: ANZOÁTEGUI
CLASIFICACIÓN: DESARROLLO (A-0)	TIPO DE PERFORACION: HORIZONTAL	
COORDENADAS DE SUPERFICIE:	U.T.M. REGVEN	N.- 916090.38 E.- 271229.17
	U.T.M. LA CANOA	N.- 916450.00 E.- 271420.00
COORDENADAS DE FONDO:	U.T.M. REGVEN	N.- 916710.39 E.- 273129.17
	U.T.M. LA CANOA	N.- 917070.00 E.- 273320.00
ORIGEN DE COORDENADAS:	1) CENTRO DE LA PUERTA DE LA IGLESIA SAN CRISTOBAL DE BARCELONA. 2) U.T.M. DATUM LA CAÑO A - ESTADO ANZOÁTEGUI 3) U.T.M. SIRGAS-REGVEN.	
REFERENCIA GEOGRAFICA:	A 1628 MTS AL SW DEL POZO SDZ0087	
PERFORACION TOTAL ESTIMADA	A: 8250'	ELEVACION DE TERRENO: 338.16'
LONGITUD HORIZ. PROGRAMADA:	A: 6006'	ELEVAC. MESA ROTARIA: 349.16'
		TALADRO: MODULAR 11.5'
POTENCIAL INICIAL:	562 BNPD	DIAS DE PERFORACION: 13

3.1.7.1 Información Geológica

Tabla 3. 3 Información Geológica

AGUA SUPERFICIAL:		150'	PROFUND. PRIMER PETROLEO:	676' (TVDSS)	
<u>OBJETIVO PRINCIPAL</u>		<u>PROFUNDIDAD</u>		<u>RESERVAS</u>	<u>PRESION</u>
<u>ARENA</u>	<u>YACIMIENTO</u>	<u>PLANO DE REFERENCIA</u>	<u>A DRENAR</u>	<u>ESPERADA</u>	<u>OBSERVACION</u>
"D"	MER SDZ0002	1100'(TVDSS)	1.013 MMBNP	663 LPC	MEDIDA
<u>TOPES FORMACIONALES ESTIMADOS</u>					
<u>FORMACION</u>		<u>PROFUNDIDAD (P.B.N.M.)</u>		<u>ESPEJOR</u>	
MESA - LAS PIEDRAS		SUPERFICIE		571'	
OFICINA		-571'		480	
MEREURE		-1050'		139'	
TOPE ARENA OBJETIVO		-1050'		-----	

3.1.7.2 Topes Formacionales Estimados

Tabla 3. 4 Topes Formacionales

<u>FORMACION</u>	<u>PROFUNDIDAD (P.B.N.M.)</u>	<u>ESPEJOR</u>
MESA - LAS PIEDRAS	SUPERFICIE	571'
OFICINA	-571'	480
MEREURE	-1050'	139'
TOPE ARENA OBJETIVO	-1050'	-----

3.1.7.3 Objetivo Principal Arena "D" Yacimiento Mer Sdz 0002

- **Límites Del Yacimiento:**

Se origina a partir del en el bloque Junín 4, extendiéndose hacia los bloques Junín 1, 2, 3, 5, 6, 7 y 10. Está ubicado en el campo Zuata Principal, de la formación Merecure de edad oligoceno.

- **Sedimentología:**

El intervalo oligoceno está compuesto por areniscas de grano muy grueso, moderado a pobremente escogidas con clastos de arcilla y variabilidad en el tamaño de los granos, sin bioturbación. El ambiente es de depósitos de canales entrelazados apilados. Ambiente fluvial.

- **Petrofísica:**

En el análisis petrofísico del yacimiento MER SDZ 0002, el promedio de la porosidad (%) entre 30 – 32 %, la permeabilidad (k) promedio en 7000 md y la saturación de agua (sw) en 15 % respectivamente.

- **Gravedad °Api:**

El valor correspondiente a este parámetro fue tomado de los pozos productores del yacimiento MER SDZ 0002, dando como resultado 9 °API.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO.

En este capítulo se exponen los aspectos metodológicos empleados para la consecución de los objetivos planteados en el proyecto. La metodología incluye el tipo y diseño de investigación, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos y etapas de la investigación.

4.1 Tipo y Diseño de la Investigación

De acuerdo Arias ^[33], este proyecto de investigación científica se puede clasificar de acuerdo al grado de profundidad como exploratorio, y en cuanto al diseño de la investigación como Documental y de Campo debido a :

Exploratorio: debido a que relacionar la Excentricidad con la velocidad critica en pozos horizontales, es un tema muy poco estudiado.

Documental: debido a que se buscará información y material bibliográfico por separado acerca de excentricidad e hidráulica.

Campo: debido a que el estudio será realizado con información de un pozo perteneciente a la Faja Petrolífera del Orinoco.

4.2 Población y Muestra

El área en estudio es la Faja Petrolífera del Orinoco. Durante la investigación se revisarán la información de un pozo perforado en el área.

4.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Durante la investigación los datos acerca de los pozos serán suministrados por el tutor industrial.

4.4 Procedimiento

Para lograr los objetivos planteados se realizó la metodología detallada a continuación:

Etapa 1: Revisión Bibliográfica

Se recolectó la información necesaria para realizar los procedimientos indicados en los objetivos específicos. Se emplearon para esto libros, páginas de internet y tesis relacionadas con el tema. Se realizó una amplia búsqueda y revisión bibliográfica de todo el material relacionado a las operaciones de perforación direccional y horizontal, excentricidad e hidráulica en pozos desviados y horizontales.

Etapa 2: Desarrollo, elaboración y revisión de procedimientos

Se procedió a la redacción de los procedimientos numerados en los puntos de los objetivos específicos.

Etapa 3: Discusión de resultados

Fueron discutidos los resultados directamente con los tutores con la finalidad de mejorar el análisis efectuado.

Etapa 4: Conclusiones y recomendaciones

Luego de realizado el cálculo de excentricidad en los pozos, realizada la simulación hidráulica y de velocidades óptimas, y analizados los resultados, se relacionaron ambas variables y se generaron las gráficas que sirven de soporte para cumplir el objetivo general planteado en este trabajo especial de grado.

Etapa 5: Redacción y Presentación del Trabajo Especial de Grado.

Esta etapa trata sobre la redacción del Trabajo Especial de Grado, considerando las normas de redacción, transcripción, estilo, organización y reglas de presentación de trabajos, establecidas por la Escuela de Petróleo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela.

4.5 Desarrollo Matemático

El desarrollo del modelo de matemático comenzo, teniendo como punto de partida los trabajos desarrollados por Martins y Santana^[19,33], en el cual se supone que durante el transporte de las pequeñas partículas de arena existen dos regiones o capas en la sección desviada del pozo. La primera región está definida como el fluido que se utiliza en la operación en conjunto con la arena suspendida en ella, la segunda es donde existe la cama de arena que dependiendo de sus características y condiciones del fluido puede estar estática o en movimiento. Por lo que afirman que si la velocidad del fluido es superior a la velocidad crítica de transporte de la partícula solo existirá una región de suspensión en el pozo^[20]. Pero por otro lado si dicha velocidad es menor, el transporte de arena en el pozo estaría representada por las dos regiones que se mencionaron anteriormente^[12], base principal de análisis de este Trabajo Especial de Grado.

Siguiendo los lineamientos de Rodolfo Larez^[20] en su Trabajo de Maestría. También se contarán con las suposiciones tales como:

Se está en presencia de un régimen permanente.

La mezcla sólido-líquido es incompresible.

La densidad del fluido y las propiedades reológicas son constantes en ambas regiones analizadas.

Se asumirá la distribución de las partículas como uniforme y con una esfericidad igual a 0.8^[20]

Entre la fase líquida y la fase sólida no existe transferencia de masa.

La altura de la interfaz entre las regiones será constante en las secciones estudiadas.

Para el desarrollo del modelo el sistema de unidades utilizado será el c.g.s.

4.5.1 Predicción De La Excentricidad

La excentricidad de la tubería de perforación se puede calcular a partir de la siguiente ecuación [5]:

$$Y_{max} = \frac{5.68EI}{W_b \cos \theta} \left(\left(\frac{0.176W_b \sin \theta (5.68EI)^{0.5}}{EI(W_b \cos \theta)^{0.5}} \right) \left(\sinh \left(\frac{X(0.176W_b \cos \theta)^{0.5}}{2(EI)^{0.5}} \right) - \frac{(0.176W_b \cos \theta)^{0.5}}{(EI)^{0.5}} \right) \right) + \frac{0.5X^2 q \sin \theta}{4EI} \quad (4.1)$$

Donde:

E: Modulo de elasticidad de la tubería, lpc.

I: Inercia de la tubería, pulgadas⁴.

W_b: Peso sobre la mecha, libras.

θ: Angulo de inclinación del pozo con respecto a la vertical, grados.

q: Peso lineal por unidad de longitud de la tubería, libras/pie.

X: proyección horizontal de la tubería, 1000 pulgadas.

A partir de esta ecuación, se muestra que el Y_{max} (distancia centro tubería de perforación y centro del hoyo), está relacionado con el peso sobre la mecha, ángulo de inclinación del hoyo, propiedades mecánicas de la tubería de perforación y la configuración del hoyo perforado (como el tamaño de orificio y la trayectoria de perforación).

El máximo grado de excentricidad de la tubería de perforación, EC, durante la perforación direccional se puede calcular de la siguiente manera [4].

$$EC = \frac{Y_{max}}{R_o - r_i} = \frac{2e}{D_h - D_p} \quad (4.2)$$

Donde:

EC: Excentricidad del tubería de perforación, %.

e: Y_{max}, pulgadas.

R_o : Radio interno del hoyo o revestidor, pulgadas.

r_i : Radio externo de la tubería de perforación, pulgadas.

D_h : Diámetro del hoyo o del revestidor, pulgadas.

D_p : Diámetro de la tubería de perforación, pulgadas.

4.5.2 Continuidad o Conservación De Masa

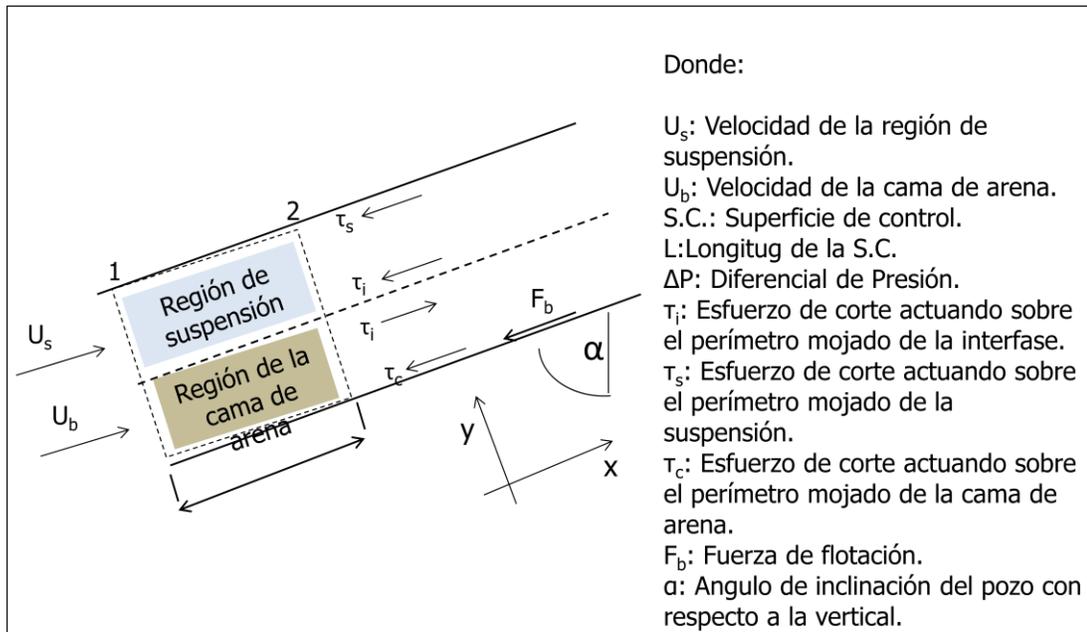


Figura 4. 1 Representación de las regiones de transporte, velocidades y esfuerzos de corte.^[20]

Partiendo de la suposición de que el régimen de flujo es permanente y el volumen de control del estudio es indeformable, la ley de continuidad queda expresada como sigue:

$$\int_{S.C.} \rho U \, dA = 0 \quad (4.3)$$

Así suponiendo que la densidad es constante entre los puntos 1 y 2 de la figura 4.1, tanto para la fase sólida como la líquida, se tiene:

$$\int_{S.C} U \, dA = 0 \quad (4.4)$$

Por lo que para las dos fases, la ecuación de continuidad o conservación de masa se puede expresar como:

Fase sólida:

Flujo de arena en suspensión + Flujo de arena en la cama = Flujo de arena total

$$U_s A_s C_s + U_b A_b C_b = A_t U_t C_t \quad (4.5)$$

Fase Líquida:

Flujo de fluido en suspensión + Flujo de fluido en la cama = Flujo de fluido total

$$U_s A_s (1 - C_s) + U_b A_b (1 - C_b) = A_a U_t (1 - C_t) \quad (4.6)$$

Y las áreas se relacionan como:

$$A_s + A_b = A_a \quad (4.7)$$

Donde:

U_s : Velocidad de la región de suspensión, cm/s.

U_b : Velocidad de la cama de arena, cm/s.

U_t : Velocidad media verdadera del fluido en el espacio anular, cm/s.

A_s : Área de la suspensión de arena, cm^2 .

A_b : Área de la cama de arena, cm^2 .

A_a : Área de la suspensión de arena, cm^2 .

C_s : Concentración de arena en el área de suspensión, adimensional.

C_b : Concentración de arena en la cama, adimensional.

C_t : Concentración total de arena en el sistema, adimensional.

Para el mejor entendimiento de las ecuaciones se utilizan los subíndices s y b para identificar las variables que están relacionadas a la región de suspensión y a la cama de arena respectivamente.

4.5.3 Concentraciones De Arena

4.5.3.1 Concentración total

El procedimiento utilizado para determinar la concentración total en el pozo, será el expuesto por Everen M. Ozbayoglu ^[21] en su artículo de investigación:

$$\text{Cripios} = \frac{\text{ROP} \cdot A_{\text{bit}}}{R_t \cdot Q_f} \quad (4.8)$$

Donde R_t , será asumido 1, debido a que los valores reportados por Luo y Bern ^[35], están entre 0,9 y 1,1.

$$R_t = 1 \quad (4.9)$$

Dónde:

R_t : el índice de transporte, desarrollad por Luo y Bern ^[35].

ROP: La tasa de penetración de la mecha, cm/s.

A_{bit} : Área de la mecha, cm^2 .

Q_f : Caudal del fluido, cm^3/s .

ρ_{lodo} : Densidad del lodo de perforación, gr/cm^3 .

4.5.3.2 Concentración de arena en la región de la cama de partículas

Esta concentración será trabajada bajo la premisa que el máximo empacamiento cúbico posible de unas partículas esféricas es de 52%, por lo que al referirse a este término se tomara como valor constante 0,52.

4.5.3.3 Concentración en la región de suspensión

La ecuación de difusividad (Ecuación 4.10) representa el modelo que gobierna la dispersión de sólidos en la región de suspensión ^[23].

$$\varepsilon_p = \frac{d^2C}{dy^2} + v_h \frac{dC}{dy} \quad (4.9)$$

Donde:

C: Concentración del volumen local de partículas, en la coordenada vertical.

ε_p : El coeficiente de difusión, adimensional.

v_h : La velocidad de colmena de partículas, cm/s.

y: La componente en la dirección, cm.

De esta forma, tal como aparece desarrollada en el trabajo de Rodolfo Larez ^[20] la concentración de las partículas en cualquier región de suspensión queda expresada por:

$$C(y) = C_b e^{\left(-\frac{v_h \sin \alpha}{\varepsilon_p} (y - y_b) \right)} \quad (4.11)$$

Dónde:

y_b : la altura de la cama de arena, cm.

α : inclinación del pozo con respecto a la vertical, grados.

C_b : Concentración de la cama de arena, adimensional.

$v_h \sin \alpha$: velocidad vertical de la colmena de partículas, cm/s.

A partir de aquí, la concentración promedio en la zona de suspensión C_s , puede ser determinada por medio de la integración de la ecuación 4.11, para un área transversal de la región, esta puede verse en el Apéndice A.

$$C_s = \frac{C_b}{2A_s} (ID^2_{\text{pozo}} \text{int 1} - OD^2_{\text{TP}} \text{int 2}) \quad (4.12)$$

Donde:

$$\text{int 1} = \int_{-\left(\frac{\pi}{2}-\theta_o\right)}^{\frac{\pi}{2}} (\cos \beta_o)^2 e^{\left(\frac{-v_h \sin \alpha}{\varepsilon_p} \frac{ID_{\text{pozo}}}{2} (\sin \beta_o - (1 - \cos \theta_o))\right)} d\beta_o \quad (4.13)$$

$$\text{int 2} = \int_{-\left(\frac{\pi}{2}-\theta_o\right)}^{\frac{\pi}{2}} (\cos \beta_i)^2 e^{\left(\frac{-v_h \sin \alpha}{\varepsilon_p} \left(\frac{OD_{\text{TP}}}{2} \sin \beta_i - \frac{ID_{\text{pozo}}}{2} (1 - \cos \theta_o)\right)\right)} d\beta_i \quad (4.14)$$

$$v_h = v_s (1 - 4C_s + 8C_s^2) \quad (4.15)$$

Donde:

β_i : Ángulo formado entre el centro de la tubería de perforación o el hoyo y los distintos puntos de la circunferencia de esta, grados.

β_o : Ángulo formado entre el centro de la tubería de revestimiento o el hoyo y los distintos puntos de la circunferencia de esta, grados.

θ_i : Ángulo formado entre el centro de la tubería de perforación y el contacto superior de la cama de arena, grados.

θ_o : Ángulo formado entre el centro de la tubería de revestimiento y el contacto superior de la cama de arena, grados.

C_s : Concentración de arena en el área de suspensión, adimensional.

v_s : Velocidad de asentamiento de la partícula, determinado mediante la correlación desarrollada por Chien^[30], cm/s.

Régimen laminar de resbalamiento:

$$v_s = 120 \left(\frac{\mu_e}{10d_p \rho_f} \right) \left[\sqrt{1 + 0,0727 d_p \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right) \left(\frac{10d_p \rho_f}{\mu_e} \right)^2} - 1 \right] \quad (4.16)$$

Régimen turbulento de resbalamiento:

$$(v_s)_t = 32,355 \sqrt{d_p \left[\left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right) \right]} \quad (4.17)$$

Donde:

v_s : Velocidad de asentamiento de la partícula, cm/s.

d_p : Diámetro de las partículas de arena, cm.

ρ_s : Densidad de las partículas de arena, gr/cm³.

ρ_f : Densidad del fluido de perforación, gr/cm³.

μ_e : Densidad efectiva, poise.

Las ecuaciones utilizadas para evaluar la viscosidad efectiva, para el comportamiento reológico son mostradas en el Apéndice C.

Se utilizará la Ecuación de Walton ^[36] para determinar el coeficiente de difusión de la partícula.

$$\epsilon_p = 0,014 \epsilon_o d_p U_s \text{Re}_s^{1/3} \quad (4.18)$$

Dependiendo del valor de C_s se tiene que:

$$\epsilon_o = \left(\frac{C_s}{0,12} \right)^{0,25} \quad \text{si } C_s > 0,05 \quad (4.19)$$

$$\epsilon_o = 1,24 \left(\frac{C_s}{0,12} \right)^{0,5} \quad \text{si } C_s \leq 0,05 \quad (4.20)$$

Dónde :

ϵ_p : Coeficiente de difusión de Eddy, adimensional.

ϵ_o : Coeficiente de difusividad de la partícula, adimensional.

U_s : Velocidad de la región de suspensión, cm/s.

C_s : Concentración de arena en el área de suspensión, adimensional.

4.5.4 Velocidad De La Cama De Arena, U_b

La velocidad de la cama de arena se obtiene mediante el balance de momento de una partícula de arena ubicada en la parte superior de la cama. En el punto A posee un momento generado por la acción de fuerzas, las cuales se representan en la figura. 4.2.

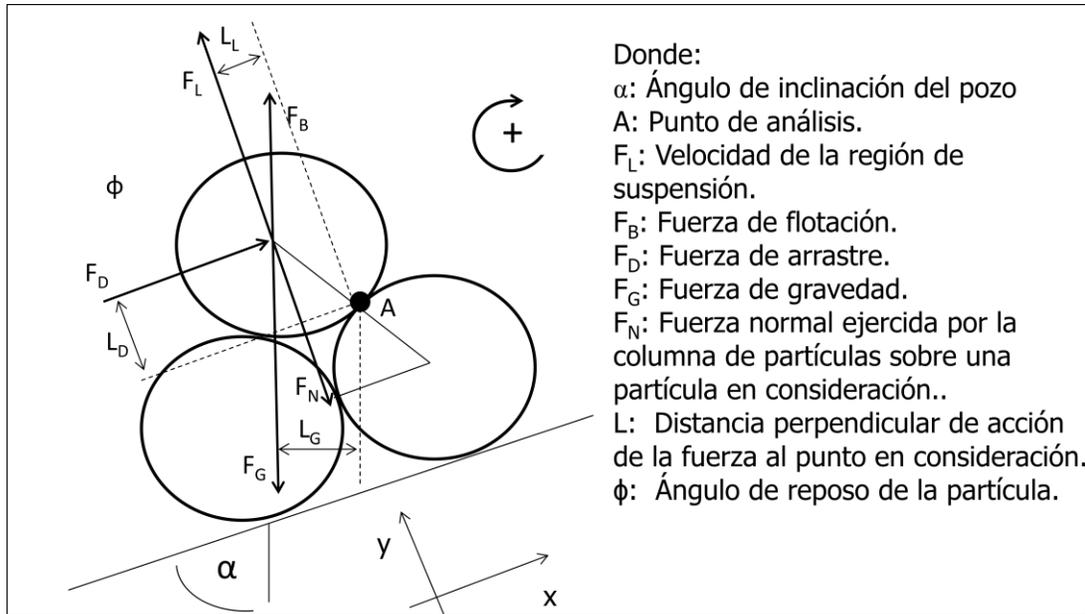


Figura 4. 2 Momento generado en A por efecto de las fuerzas que actúan sobre las partículas. ^[20]

Así el equilibrio de momento sobre el punto A queda:

$$F_D L_D + F_L L_L - F_N L_L - F_G L_G + F_B L_G = 0 \quad (4.21)$$

Donde:

L: Distancia perpendicular desde el punto de rotación "A" a la línea de acción de la fuerza aplicada.

$$\sin \phi = \frac{L_L}{\frac{d_p}{2}} \quad (4.22)$$

$$L_L = \frac{d_p}{2} \sin \phi \quad (4.23)$$

$$L_D = \frac{d_p}{2} \cos \phi \quad (4.24)$$

$$\sin(90 - \alpha + \phi) = \frac{L_G}{\frac{d_p}{2}} \quad (4.25)$$

$$L_G = \frac{d_p}{2} \sin(90 - \alpha + \phi) \quad (4.26)$$

Donde:

ϕ : Ángulo de reposo de la partícula, grados.

α : Ángulo de inclinación del pozo con respecto a la vertical, grados.

L_n : Distancia perpendicular de acción de la fuerza al punto en consideración, cm.

d_p : Diámetro de las partículas de arena, cm.

El ángulo ϕ representado en relaciones trigonométricas simples queda:

$$\sin \phi = \frac{\frac{d_p}{2}}{d_p} = \frac{1}{2} \quad (4.27)$$

$$\phi = 30^\circ \quad (4.28)$$

Por lo que ahora sustituyendo los valores de F_G , F_B , F_L , F_D y F_N en la Ecuación 4.21 que fueron definidos en el capítulo 2 (Ecuaciones 2.4, 2.7, 2.8, 2.11 y 2.15) y los valores de L_L , L_D y L_G , definidos respectivamente en las ecuaciones 4.23, 4.24 y 4.26:

$$\begin{aligned} & C_D \frac{\pi d_p^2}{8} \rho_f U_b^2 \frac{d_p}{2} \cos 30^\circ + C_L \frac{\pi d_p^2}{8} \rho_f U_b^2 \frac{d_p}{2} \sin 30^\circ \\ & - \left(\frac{\pi d_p^3}{6} \right) (\rho_s - \rho_f) g \cos(90 - \alpha) C_b \frac{y_b - d_p}{d_p} * \frac{d_p}{2} \sin 30^\circ - \left(\frac{\pi d_p^3}{6} \right) (\rho_s) g \sin(90 - \alpha + 30) \\ & + \left(\frac{\pi d_p^3}{6} \right) (\rho_f) g \frac{d_p}{2} \sin(90 - \alpha + 30) = 0 \end{aligned} \quad (4.29)$$

Acomodando los términos y eliminando variables:

$$\frac{1}{16} U_b^2 \rho_f \left(\frac{\sqrt{3}}{2} C_D + \frac{1}{2} C_L \right) = \frac{1}{12} g d_p (\rho_s - \rho_f) \sin(110 - \alpha) + \frac{1}{12} g d_p (\rho_s - \rho_f) \frac{1}{2} C_b \frac{y_b - d_p}{d_p} \cos(90 - \alpha) \quad (4.30)$$

Finalmente se agrupan términos y se despeja U_b :

$$U_b = \sqrt[2]{\left[\frac{4 g d_p (\rho_s - \rho_f) \left[\sin(110 - \alpha) + \frac{C_b}{2} \left(\frac{y_b}{d_p} - 1 \right) \cos(90 - \alpha) \right]}{3 \rho_f \left(\frac{\sqrt{3}}{2} C_D + \frac{1}{2} C_L \right)} \right]} \quad (4.31)$$

Donde:

d_p : Diámetro de las partículas de arena, cm.

ρ_s : Densidad de las partículas de arena, gr/cm³.

ρ_f : Densidad del fluido de perforación, gr/cm³.

α : inclinación del pozo con respecto a la vertical, grados.

C_b : Concentración de la cama de arena, adimensional.

C_D : Coeficiente de arrastre, adimensional.

C_L : Coeficiente de levantamiento, adimensional.

4.5.5 Ecuaciones De Momentum Para Flujo Permanente

La segunda ley de Newton estipula que el régimen de aumento de momentum de un cuerpo en cualquier dirección, es igual a la fuerza neta que actúa en esa dirección:

$$F_{\text{sup}} + \iiint_{V.C.} B(\rho dV) = \iint_{S.C.} U(\rho U) dA \quad (4.32)$$

Dependiendo de las condiciones del flujo, la región superior del pozo estaría constituida por un fluido relativamente limpio o por partículas de suspensión en forma heterogénea (Figura 4.1). Ahora, bajo un flujo permanente, de acuerdo con la Figura 4.3, la suma de las fuerzas que actúan en esta región debe ser igual a cero:

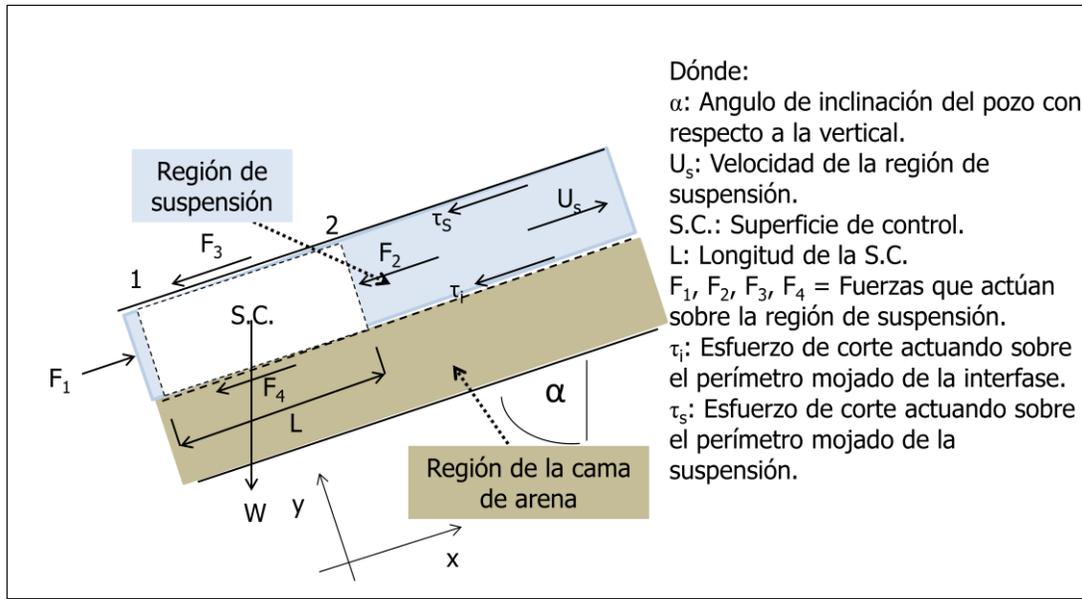


Figura 4. 3 Fuerzas que actúan sobre la región de suspensión.^[20]

Hay fuerzas que actúan sobre la región de la suspensión de partículas de arena en una superficie de control de longitud L (Figura 4.3)

$$F_1 - F_2 - F_3 - F_4 - W \cos \alpha = 0 \quad (4.33)$$

$$PA_s - \left(P + \frac{dP}{dz} L \right) A_s - \tau_s S_s L - \tau_i S_i L - \rho_{\text{sup}} g A_s L \cos \alpha = 0 \quad (4.34)$$

Así, eliminando términos y dividiendo entre L:

$$-A_s \frac{dP}{dz} - \tau_s S_s - \tau_i S_i - \rho_{\text{sup}} g A_s \cos \alpha = 0 \quad (4.35)$$

Donde:

τ_s : Esfuerzo de corte actuando sobre el perímetro mojado de la suspensión, grf/cm^2 .

τ_i : Esfuerzo de corte actuando sobre el perímetro mojado de la interfase, grf/cm^2 .

ρ_{sup} : Densidad de la suspensión, gr/cm^3 .

α : inclinación del pozo con respecto a la vertical, grados.

g: Aceleración de gravedad, cm/s^2 .

L: Longitud del pozo, cm.

S_b : Perímetro mojado de la cama de arena, cm.

S_i : Perímetro mojado de la suspensión en la interfaz entre la cama de arena y la suspensión, cm.

A_s : Área de la suspensión de arena, cm^2 .

dP/dz : Gradiente de presión, $\text{grf/cm}^2/\text{cm}$.

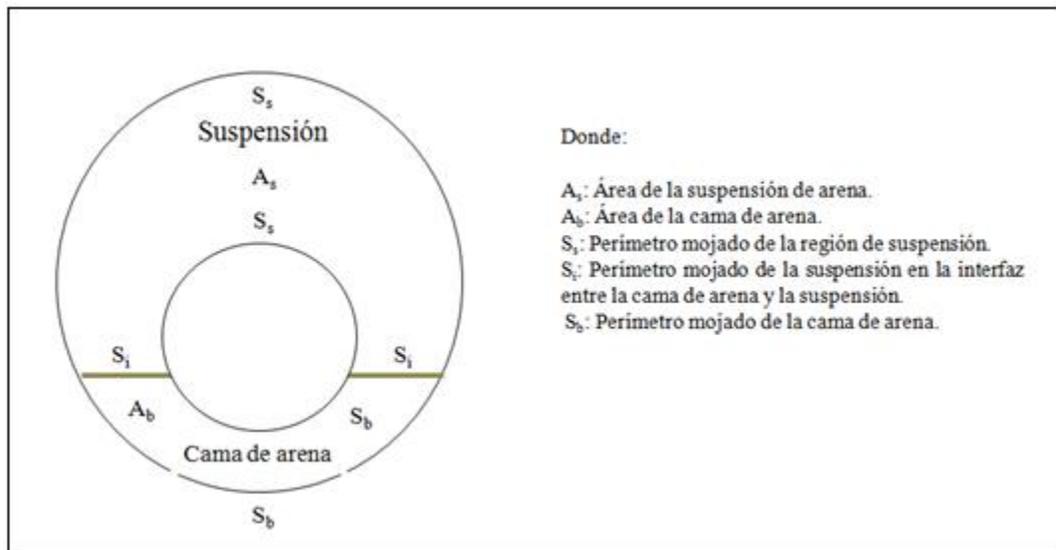


Figura 4. 4 Perímetros mojados de las regiones. ^[20]

En la Figura 4.4 se muestran los perímetros mojados de la suspensión con la pared de la tubería de revestimiento o el hoyo y la tubería de perforación, así el perímetro mojado de la suspensión con la cama de arena queda identificado como S_i , y el perímetro mojado de la cama de arena como S_b . También es posible observar en la Figura 4.5 las fuerzas que actúan sobre la región de la cama de arena en una superficie de control de la longitud L.

$$F_1 - F_2 - F_3 - F_4 - W \cos \alpha = 0 \quad (4.36)$$

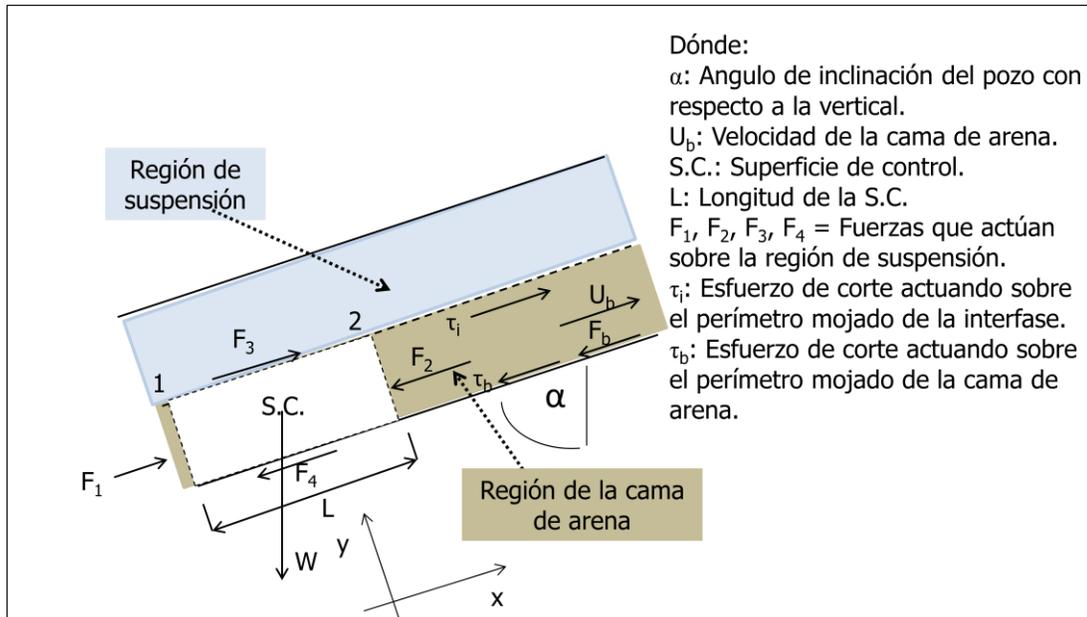


Figura 4. 5 Fuerzas que actúan sobre la región de la cama de arena. ^[20]

$$PA_s - \left(P + \frac{dP}{dz} L \right) A_b - \tau_s S_s L + \tau_i S_i L - F_b - \rho_b g A_b L \cos \alpha = 0 \quad (4.37)$$

Así eliminando términos y tomando el valor de L como unitario (1 cm) se tiene:

$$-A_s \frac{dP}{dz} - \tau_b S_b + \tau_i S_i - F_b - \rho_b g A_b \cos \alpha = 0 \quad (4.38)$$

Donde:

τ_s : Esfuerzo de corte actuando sobre el perímetro mojado de la suspensión, grf/cm².

τ_i : Esfuerzo de corte actuando sobre el perímetro mojado de la interfase, grf/cm².

ρ_b : Densidad de la cama de arena, gr/cm³.

α : inclinación del pozo con respecto a la vertical, grados.

g: Aceleración de gravedad, cm/s².

L: Longitud del pozo, cm.

S_b : Perímetro mojado de la cama de arena, cm.

S_i : Perímetro mojado de la suspensión en la interfaz entre la cama de arena y la suspensión, cm.

A_s : Área de la suspensión de arena, cm^2 .

A_b : Área de la cama de arena, cm^2 .

F_b : Fuerza de contacto entre las partículas de arena y la pared del pozo, dina.

dP/dz : Gradiente de presión, $\text{grf/cm}^2/\text{cm}$.

La fuerza de contacto F_b , es originada por el contacto entre la cama de arena y las paredes del pozo. Esta es proporcional a la fuerza normal impuesta sobre las paredes del pozo por el efecto de la cama de arena. Por lo tanto, su máximo valor será cuando la cama de recortes este en inminente movimiento y es directamente proporcional a la resultante de la fuerza normal ejercida por la cama de arena ^[37].

$$F_b = nF_{Nb} \quad (4.39)$$

Donde:

F_b : Fuerza de contacto entre las partículas de arena y la pared del pozo, dina.

F_{Nb} : Fuerza normal de la ejercida por la columna de arena sobre la pared del pozo, dina.

n : Coeficiente de resbalamiento, supuesto como 0,15 ^[8].

De acuerdo al trabajo de Santana ^[34], la máxima fuerza puede describirse así:

$$F_{bMAX} = 0,15 \left((\rho_s - \rho_f)gA_b C_b \sin \alpha + \frac{\tau_i S_i}{\tan \phi} \right) \quad (4.40)$$

Donde :

ρ_s : Densidad de las partículas de arena, gr/cm^3 .

ρ_f : Densidad del fluido de perforación, gr/cm^3 .

A_b : Área de la cama de arena, cm^2 .

C_b : Concentración de la cama de arena, adimensional.

α : Ángulo de inclinación del pozo con respecto a la vertical, grados.

τ_i : Esfuerzo de corte actuando sobre el perímetro mojado de la interfase, grf/cm^2 .

S_i : Perímetro mojado de la suspensión en la interfaz entre la cama de arena y la suspensión, cm .

ϕ : Ángulo de reposo de la partícula, grados.

El esfuerzo de corte, τ , puede ser determinado mediante la expresión ^[34]:

$$\tau_n = \frac{1}{2} f_n \rho_n U_n^2 \quad (4.41)$$

De la misma manera para la región de suspensión se expresaría como:

$$\tau_s = \frac{1}{2} f_s \rho_{\text{susp}} U_s^2 \quad (4.42)$$

Donde ρ_{susp} es la densidad de la región de suspensión y viene definida por:

$$\rho_{\text{susp}} = \rho_s C_s + \rho_f (1 - C_s) \quad (4.43)$$

Por otra parte el factor de fricción entre la región de la suspensión y la pared del pozo esta presentada como lo hizo Doron ^[29] en su trabajo:

$$f_s = 0,00454 + 0,65 \text{Re}_s^{-0,7} \quad (4.44)$$

Donde Re_s es el número de Reynolds en el área de suspensión.

Se puede definir el esfuerzo de corte en la interfaz entre las dos regiones como:

$$\tau_i = \frac{1}{2} f_i \rho_{\text{susp}} (U_s^2 - U_b^2) \quad (4.45)$$

Donde:

U_s : Velocidad de la región de suspensión, cm/s.

U_b : Velocidad de la cama de arena, cm/s.

ρ_{susp} : Densidad de la suspensión, gr/cm³.

f_i : Factor de Fricción.

El factor de fricción entre la interfaz, f_i , el cual fue resultado del trabajo de Martins [37], obtenido de experimentos en un tubo a escala y donde propuso la expresión.

$$f_i = 0,966368 \text{Re}_s^{-1,07116} n^{2,360211} \left(\frac{d_p}{D_{hs}}\right)^{-2,34539} \quad (4.46)$$

Donde:

D_{hs} : Diámetro hidráulico de la suspensión, cm.

d_p : Diámetro de las partículas de arena, cm.

n : Índice de comportamiento de flujo, adimensional.

Hay que tener presente que el diámetro hidráulico es definido como cuatro veces el área de flujo, dividido por la longitud del perímetro mojado.

$$D_h = \frac{4 \cdot A_{\text{trans}}}{S} \quad (4.47)$$

Por lo que:

$$D_{hs} = \frac{4 \cdot A_s}{S_s + S_i} \quad (4.48)$$

Se utilizará el mismo principio para calcular el esfuerzo de corte de la cama de arena contra la pared del pozo.

$$\tau_b = \frac{1}{2} f_b \rho_{\text{bed}} U_b^2 \quad (4.49)$$

Y la densidad de la cama de arena queda definida por:

$$\rho_{bed} = \rho_s C_b + \rho_b (1 - C_b) \quad (4.50)$$

Doron ^[38] obtuvo de manera experimental el factor de fricción de la cama de arena contra la pared del pozo:

$$f_b = 0,046 Re_b^{-0.2} \quad (4.51)$$

Donde:

Re_b : Número de Reynolds de la cama en movimiento, adimensional.

4.5.6 Número De Reynolds

Número de Reynolds total está determinada por la expresión:

$$Re = \frac{D_h U_t \rho_f}{\mu_e} \quad (4.52)$$

Reynolds de la cama de arena definida como:

$$Re_b = \frac{D_{hb} U_b \rho_{bed}}{\mu_e} \quad (4.53)$$

$$D_{hb} = \frac{4 * A_b}{S_b + S_i} \quad (4.54)$$

Donde:

D_{hb} : Diámetro hidráulico de la cama de arena, cm.

4.5.7 Cálculo de las Áreas y los Perímetros

Para el análisis de las regiones, tanto de suspensión como de la cama de arena, se hará partiendo de valores tales como la altura de la cama de arena (y_b), el diámetro interno del pozo (ID_{pozo}), el diámetro externo de la tubería de perforación (OD_{TP}), y la excentricidad de la tubería de perforación con respecto al pozo (e). Todo esto partiendo de relaciones trigonométricas que definirán los diferentes términos.

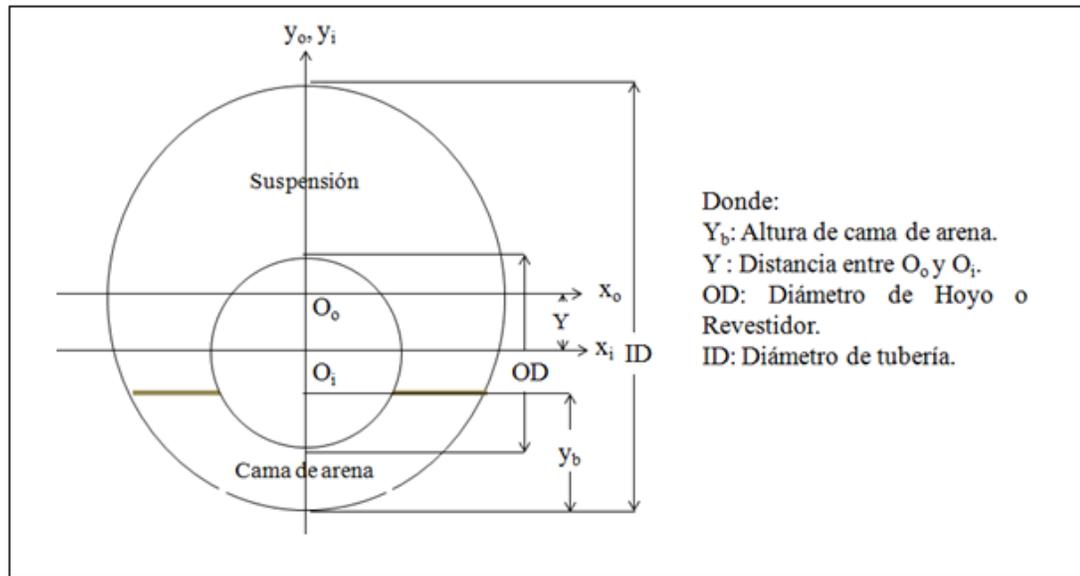


Figura 4. 6 Representación esquemática la excentricidad. [20]

Primero se va a definir la excentricidad que presenta la tubería de perforación con respecto al hoyo en un punto cualquiera del pozo, relacionando el desplazamiento entre los centros de las circunferencias que las describen.

$$e = \frac{2Y}{ID_{\text{pozo}} - OD_{\text{TP}}} \quad (4.55)$$

$$Y = \frac{1}{2}e(ID_{\text{pozo}} - OD_{\text{TP}}) \quad (4.56)$$

Donde Y es la distancia existente entre los centros de la circunferencias. El máximo valor que puede tomar el la diferencia entre los diámetros, y el mínimo lógicamente sería cero, que va asociado al momento en el cual las circunferencias son concéntricas.

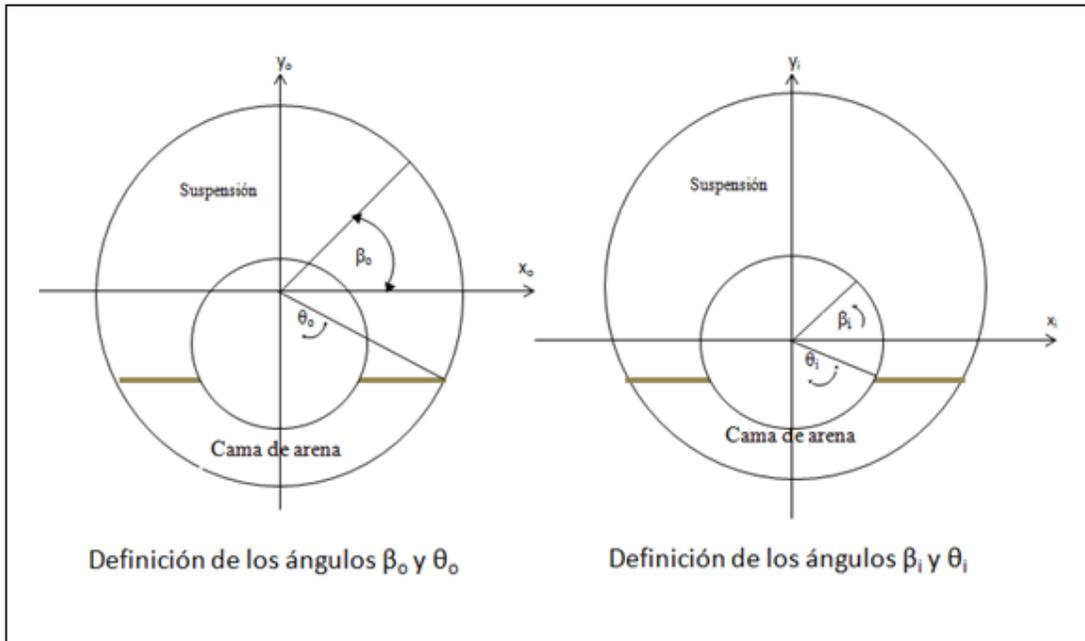


Figura 4. 7 Representación esquemática de la geometría del pozo y la tubería de perforación. [20]

Ahora hay que definir al ángulo θ_o , este se mide con respecto a la vertical y está formado por el centro del hoyo y punto de contacto entre la cama de arena y el hoyo. Su forma de desplazamiento es anti horario. Por medio de las relaciones trigonométricas se puede definir así:

$$\cos \theta_o = \frac{\frac{ID_{pozo}}{2} - y_b}{\frac{ID_{pozo}}{2}} \quad (4.57)$$

$$\cos \theta_o = 1 - \frac{2Y}{ID_{pozo}} \quad (4.58)$$

$$\theta_o = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2Y}{ID_{pozo}} \right) \quad (4.59)$$

De la misma manera, se define el ángulo θ_i , el cual está formado por el centro de la tubería de perforación y el punto de contacto entre la cama de arena y la tubería de perforación. Este ángulo también es medido en sentido anti horario.

$$\cos \theta_i = \frac{\frac{ID_{pozo} - Y - y_b}{2}}{\frac{OD_{TP}}{2}} \quad (4.60)$$

$$\cos \theta_i = \frac{ID_{pozo} - 2Y - 2y_b}{OD_{TP}} \quad (4.61)$$

$$\theta_i = \cos^{-1} \left(\frac{ID_{pozo} - 2Y - 2y_b}{OD_{TP}} \right) \quad (4.62)$$

Donde:

y_b : Altura de la cama de ripios, cm.

Y : distancia entre los centros de la tubería y el hoyo, cm.

ID_{pozo} : Diámetro interno del hoyo o de la tubería de revestimiento, cm.

OD_{TP} : Diámetro externo de la tubería de perforación, cm.

Para el caso en el que el eje y_o y el eje y_i no se encuentren uno sobre otro. Se definió un ángulo de desfase llamado ϕ (ϕ), el cual nos permitirá redefinir al ángulo θ_i y así trabajar la posibilidad tener el centro de la tubería fuera del eje y_o .

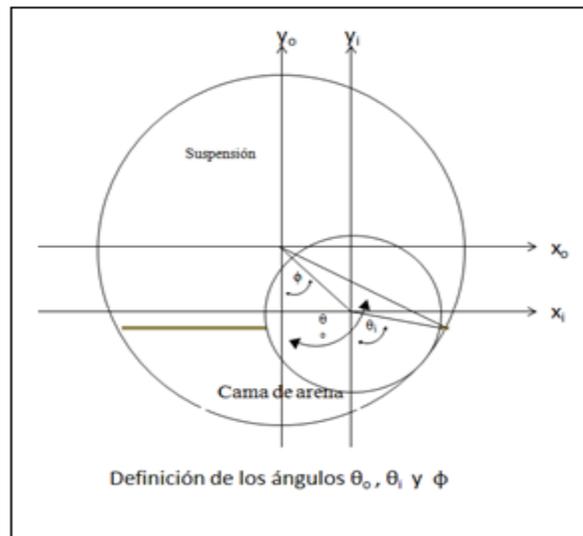


Figura 4. 8 Representación esquemática de la geometría del pozo y la tubería de perforación para un ángulo ϕ de desfase.

De esta manera se definiría al ángulo θ_i :

$$\cos \theta_i = \frac{\frac{ID_{pozo}}{2} - Y \cos \phi - y_b}{\frac{OD_{TP}}{2}} \quad (4.60a)$$

$$\cos \theta_i = \frac{ID_{pozo} - 2Y \cos \phi - 2 y_b}{OD_{TP}} \quad (4.61a)$$

$$\theta_i = \cos^{-1} \left(\frac{ID_{pozo} - 2Y \cos \phi - 2 y_b}{OD_{TP}} \right) \quad (4.62a)$$

Así, si se llega a trabajar con un ángulo de desfase $\phi = 0$, se tendría que el $\cos \phi = 1$, lo que nos dejaría nuevamente con la Ecuación 4.60 y así consecutivamente.

Ahora se definen los ángulos β_o y β_i , los cuales están medidos con respecto a la horizontal, y estos permiten representar puntos generales a lo largo de las circunferencias, el primero para el hoyo y el segundo para la tubería de perforación. Así se tienen los ejes coordenados, x_o y y_o , de la horizontal y vertical del hoyo. Y para la tubería de perforación se tendría a x_i , y_i respectivamente.

El área de suspensión ocupada está definida así:

$$A_s = 2 \int_{-\left(\frac{ID_{pozo}}{2} - y_b\right)}^{\frac{ID_{pozo}}{2}} \int_0^{x_o} dx_o dy_o - \int_{-\left(\frac{ID_{pozo}}{2} - y_b - Y\right)}^{\frac{OD_{TP}}{2}} \int_0^{x_i} dx_i dy_i \quad (4.63)$$

Si se desarrolla la integral de x , la expresión queda:

$$A_s = 2 \int_{\left(y_b - \frac{ID_{pozo}}{2}\right)}^{\frac{ID_{pozo}}{2}} x_o dy_o - 2 \int_{\left(y_b + Y - \frac{ID_{pozo}}{2}\right)}^{\frac{OD_{TP}}{2}} x_i dy_i \quad (4.64)$$

Donde:

$$\sin \beta_o = \frac{y_o}{\frac{ID_{pozo}}{2}} \quad (4.65)$$

$$y_o = \frac{ID_{pozo}}{2} \sin \beta_o \quad (4.66)$$

$$dy_o = \frac{ID_{\text{pozo}}}{2} \cos \beta_o d\beta_o \quad (4.67)$$

De la misma manera se puede definir β_i :

$$\sin \beta_i = \frac{y_i}{\frac{OD_{\text{TP}}}{2}} \quad (4.68)$$

$$y_i = \frac{OD_{\text{TP}}}{2} \sin \beta_i \quad (4.69)$$

$$dy_i = \frac{OD_{\text{TP}}}{2} \cos \beta_i d\beta_i \quad (4.70)$$

Así las distancias horizontales x_o y x_i se expresarían como:

$$x_o = \frac{ID_{\text{pozo}}}{2} \cos \beta_o \quad (4.71)$$

$$x_i = \frac{OD_{\text{TP}}}{2} \cos \beta_i \quad (4.72)$$

Ahora sustituyendo las expresiones 4.65, 4.68, 4.69 y 4.70 en 4.62 se obtiene:

$$A_s = \frac{ID_{\text{pozo}}^2}{2} \int_{-\left(\frac{\pi}{2}-\theta_o\right)}^{\frac{\pi}{2}} (\cos \beta_o)^2 d\beta_o - \frac{OD_{\text{TP}}^2}{2} \int_{-\left(\frac{\pi}{2}-\theta_i\right)}^{\frac{\pi}{2}} (\cos \beta_i)^2 d\beta_i \quad (4.73)$$

Por lo que resolviendo la integral, la expresión resultante nos define el área ocupada por la región de suspensión:

$$A_s = \frac{ID_{\text{pozo}}^2}{4} \left[\pi - \theta_o - \frac{1}{2} \sin \left(2 \left(\theta_o - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right] - \frac{OD_{\text{TP}}^2}{4} \left[\pi - \theta_i - \frac{1}{2} \sin \left(2 \left(\theta_i - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right] \quad (4.74)$$

Donde:

ID_{pozo} : Diámetro del hoyo, cm.

OD_{TP} : Diámetro externo de la tubería de perforación, cm.

θ_o : Ángulo formado entre el centro de la tubería de revestimiento o el hoyo y el contacto superior de la cama de arena, radianes.

θ_i : Ángulo formado entre el centro de la tubería de perforación y el contacto superior de la cama de arena, radianes.

Ahora la deducción del área de la cama de arena viene de la simple deducción de:

$$A_b = A_a - A_s \quad (4.75)$$

Partiendo de la Figura 4.6, también pueden ser determinados los perímetros de las aéreas de forma sencilla por medio de relaciones trigonométricas tanto para el perímetro mojado total como para el perímetro mojado de la cama de arena a la pared del pozo, el perímetro mojado del área de suspensión y el perímetro mojado de la interfaz.

$$S_t = \pi ID_{\text{pozo}} - \pi OD_{\text{TF}} = \pi (ID_{\text{pozo}} - OD_{\text{TP}}) \quad (4.76)$$

$$S_b = \theta_o ID_{\text{pozo}} - \theta_i OD_{\text{TP}} \quad (4.77)$$

$$S_s = \pi (ID_{\text{pozo}} - OD_{\text{TP}}) - S_b \quad (4.78)$$

$$S_i = ID_{\text{pozo}} \sin \theta_o - OD_{\text{TP}} \sin \theta_i \quad (4.79)$$

Donde:

S_t : Perímetro mojado total, cm.

S_b : Perímetro mojado de la cama de arena, cm.

S_s : Perímetro mojado de la región de suspensión, cm.

θ_o : Ángulo formado entre el centro de la tubería de revestimiento o el hoyo y el contacto superior de la cama de arena, grados.

θ_i : Ángulo formado entre el centro de la tubería de perforación y el contacto superior de la cama de arena, grados.

4.5.8 Solución Del Modelo

Para el modelo presentado por Rodolfo Larez⁽⁸⁾, se describe por un sistema de 5 ecuaciones principales las cuales con:

$$U_s A_s C_s + U_b A_b C_b = A_a U_t C_t \quad (4.5)$$

$$U_s A_s (1 - C_s) + U_b A_b (1 - C_b) = A_a U_t (1 - C_t) \quad (4.6)$$

$$C(y) = C_b e^{\left(\frac{-v_h \sin \alpha}{\varepsilon_p} (y - y_b) \right)} \quad (4.11)$$

$$-A_s \frac{dP}{dz} - \tau_s S_s - \tau_i S_i - \rho_{sup} g A_s \cos \alpha = 0 \quad (4.35)$$

$$-A_s \frac{dP}{dz} - \tau_b S_b + \tau_i S_i - F_b - \rho_b g A_b \cos \alpha = 0 \quad (4.38)$$

Donde las incógnitas serian:

U_s : Velocidad de la región de suspensión, cm/s.

U_b : Velocidad de la cama de arena, cm/s.

C_s : Concentración de arena en el área de suspensión, adimensional.

y_b : Altura de la cama de ripios, cm.

dP/dz : Gradiente de presión, grf/cm²/cm.

Resumiendo el procedimiento de resolución en diferentes casos:

Si la cama de arena es estacionaria: aquí la velocidad de la cama de arena U_b es cero, por lo que la solución del modelo está dado por las ecuaciones 4.5 y 4.6 para encontrar los valores de velocidad de la suspensión, U_s y la concentración de arena en el área de suspensión C_s . La altura y_b de la cama de arena se puede calcular iterando la ecuación 4.12. La caída de presión puede ser calculada por la ecuación 4.35, y la concentración de arena en la cama estacionaria C_b , es supuesta en 0,52 como el valor del máximo empacamiento cúbico de partículas esféricas.

Cama en movimiento: Se calcula primero la fuerza de contacto entre las partículas y la pared del pozo, F_b , con la ecuación 4.38 y si este valor es mayor que la fuerza de contacto máxima, F_{bmax} , obtenida de 4.40, se puede decir que la cama no está estacionaria, por lo que se debe resolver el sistema de 5 ecuaciones con 5 incógnitas.

No existe cama de arena: esto implica que todas las partículas de arena están totalmente suspendidas así que $y_b = 0$, $U_b = 0$, $U_s = U_t$, $C_b = 0$ y $C_s = C_t$.

4.5.9 Validación Por Ecuación Empírica de Evren ^[39]

Evren ^[39], introdujo una correlación, la cual nos permite calcular la fracción que ocupa la cama de arena en el pozo, para eso desarrollo estas ecuaciones con un error aproximado del 10%, dependiendo del índice de comportamiento del fluido (n), la cual es solo valida para pozos con ángulos superiores a los 65°:

Para $n > 0,9$

$$\frac{A_{bed}}{A_{well}} = 4,1232 * (Ct)^{0,0035} * (Nre)^{-0,2198} * (Nfr)^{-0,2164} \quad (4.80)$$

Para $0,6 < n < 0,9$

$$\frac{A_{bed}}{A_{well}} = 0,7115 * (Ct)^{0,0697} * (Nre)^{-0,0374} * (Nfr)^{-0,0681} \quad (4.81)$$

Para $n < 0,6$

$$\frac{A_{bed}}{A_{well}} = 1,0484 * (Ct)^{0,0024} * (Nre)^{-0,1502} * (Nfr)^{-0,0646} \quad (4.82)$$

Donde:

Ct: Concentración total, adimensional.

Nre: Número de Reynolds total, adimensional.

Nfr: Número de Froud, adimensional.

n: índice de comportamiento del fluido, adimensional.

El número de Reynolds viene representado por la ecuación 4.52, y el número de Froud puede ser calculado por la siguiente ecuación ^[39]:

$$Nfr = \frac{(Ut)^2}{g*dh} \quad (4.81)$$

Donde:

Nfr: número de Froud, adimensional.

Ut: Velocidad anular, cm/s.

g: gravedad, cm/s².

dh: diámetro hidráulico, cm.

El diámetro hidráulico puede ser obtenido por la ecuación 4.47.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Partiendo de los ajustes que se realizaron a las ecuaciones propuestas por Rodolfo Larez ^[20], en conjunto con la aplicación de la ecuación de excentricidad desarrollada por Elsayed Salem ^[5], y los datos suministrados del pozo JA19-12, se generaron un conjunto de gráficas que nos permitieron realizar un análisis de la influencia que presenta la excentricidad de la tubería de perforación en el hoyo con diferentes parámetros tales como la altura de la cama de arena del hoyo, el ángulo de inclinación del pozo y la velocidad de transporte de ripios del fluido.

Tabla 5. 1 Parámetros de entrada para el modelo matemático

<i>Parámetros</i>	<i>Valores</i>
Ángulos(grados)	Entre 40°-90°
Excentricidad (adim)	De -1 a 1
ROP(ft/hr)	400
Caudal(GPM)	200-700
Diámetro Hoyo(pulg)	12 ¼”
Diámetro de tubería de perforación(pulg)	3 ½”, 5”, 6 5/8”
Diámetro partícula (mm)	2,54
Densidad de la arena(gr/cm3)	2,62
Densidad del fluido(gr/cm3)	1,234

Tabla 5. 2 Continuación Parámetros de entrada para el modelo matemático

<i>Parámetros</i>	<i>Valores</i>
n	0,68765
K	0,3563527
Peso sobre la mecha (klb)	15

5.1 Comportamiento de la excentricidad de la tubería en el pozo de estudio JA19-12.

Aplicando la ecuación desarrollada por Elsayed Salem ^[5] y los datos suministrados del pozo JA19-12 se procedió a desarrollar una gráfica que permitió observar el comportamiento de la excentricidad a medida que se iba aumentando progresivamente el ángulo de inclinación del pozo. Hay que tener presente que la excentricidad obtenida para un ángulo determinado, hace referencia a la máxima excentricidad estimada a la altura propuesta para la predicción usada en la Ecuación 4.1.

En la Figura 5.1 se presenta la variación de la excentricidad a medida que aumenta el ángulo de inclinación del pozo. Desde que se empieza a perforar hasta aproximadamente 35 grados, la excentricidad de la tubería de perforación se mantiene cercana un valor de cero, los valores negativos hacen referencia al encontrarse sobre el plano horizontal de referencia del corte transversal de la tubería en un punto determinado, sin embargo estos valores son muy cercanos a cero (excentricidad menores al 5%).

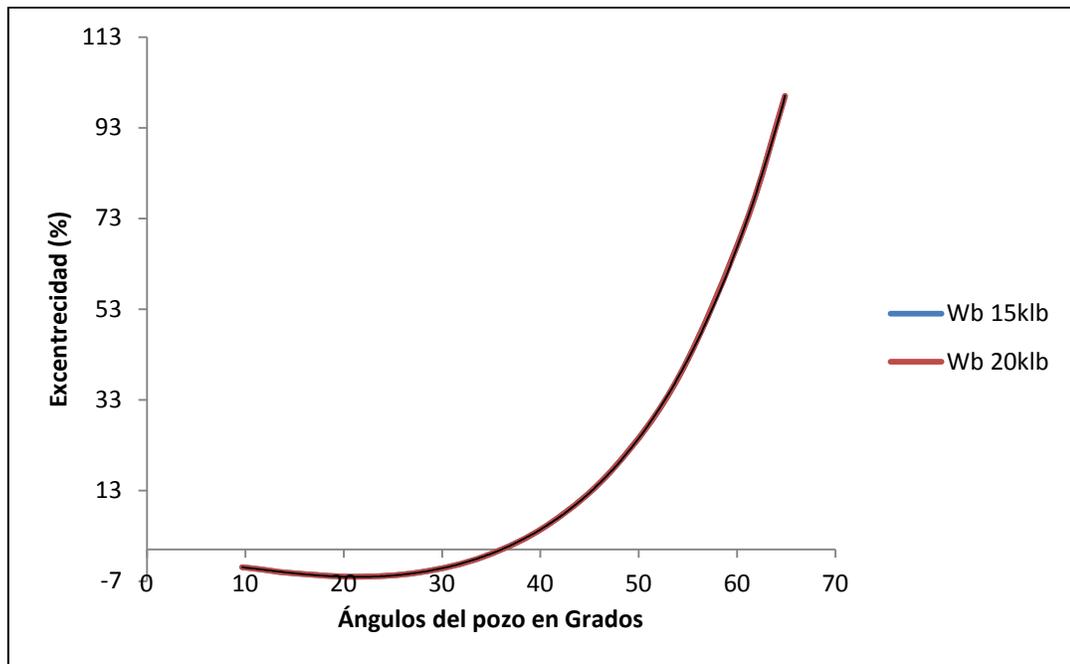


Figura 5. 1 Excentricidad Versus Ángulo

Para ángulos mayores a 35° la excentricidad exhibe un aumento drástico, alcanzando su punto máximo cerca de los 70° en el cual posee un valor aproximado de $e = 1$. Analizando la Ecuación 4.1 que nos permite predecir la excentricidad de un pozo a unas condiciones de peso sobre la mecha y inclinación dadas, se aprecia que al aumentar el ángulo de inclinación la excentricidad también crece, esto debido a la componente vertical del peso sobre la mecha ($w_b \cos \theta$) se va haciendo más pequeña y la componente horizontal del peso lineal de la tubería ($q \sin \theta$) se va haciendo mayor en conjunto con la proyección horizontal del pozo. Así para ángulos menores de 35° en el pozo las variaciones de excentricidad son mínimas comparadas con el resto de los ángulos superiores. El aumento del ángulo genera que el peso por unidad de longitud de la tubería tienda a recaer sobre la parte baja del hoyo, como se aprecia entre los ángulos 40 y 60, hasta alcanzar un valor teórico máximo de $e=1$, lo que implica que la tubería a partir de este ángulo en adelante esta acostada.

Una vez determinada la excentricidad teórica para una profundidad, un peso sobre la mecha y diferentes ángulos de inclinación obtenidos del *survey* del pozo, se resolvió

el modelo matemático para el transporte de ripios en pozos inclinados con el fin de obtener el espesor de la cama de arena (y_b), Concentración de arena en suspensión (C_s) y las velocidades promedios de la región de suspensión y la cama de arena (U_s , U_b) relacionado con cada uno de estos ángulos.

5.2 Comportamiento Del Pozo.

En la Figura 5.2 se presenta la gráfica de espesor de la cama de arena (y_b) contra la variación del ángulo de inclinación del pozo. A partir de 40° se observa un aumento significativo del y_b hasta alcanzar aproximadamente los 70° en el cual a partir de ahí se comporta de manera casi constante. Este comportamiento coincide con el presentado en la Figura 5.1, donde los aumentos drásticos de excentricidad se dan entre 35° y 70° . Para la sección entre 70° y 90° , el comportamiento casi constante de y_b a pesar de que nos disminuye el área de flujo y por consiguiente un aumento de la velocidad del fluido en el área de suspensión (U_s), la componente vertical de la misma no es suficiente para remover eficientemente la y_b . Con los resultados de la evaluación en el pozo se observa que el espesor de la cama de arena (y_b) es de aproximadamente un 60% del área anular total, ya que el diámetro de hoyo intermedio es de 12 1/4 pulgada (31,115 cm).

En la figura 5.2 se va a realizar el análisis aplicando el ángulo de desfase ϕ , el cual es generado por la recta que une los centros tanto del hoyo como de la tubería y la vertical. Para un ϕ que tendrá un valor arbitrario de 45° . Se puede apreciar que la cama de arena entre 40° y aproximadamente 50° tiene la misma tendencia de crecimiento que el caso anterior, esto se considera que es debido a que mientras la tubería se encuentra más cercana a la pared inferior del pozo, se hace difícil la remoción de la cama de arena, ya que el flujo es obligado a pasar por la zona superior del hoyo. Así es posible observar que el comportamiento de y_b se ve influenciado por el ángulo de desfase de tal forma que limita la formación de la cama de arena.

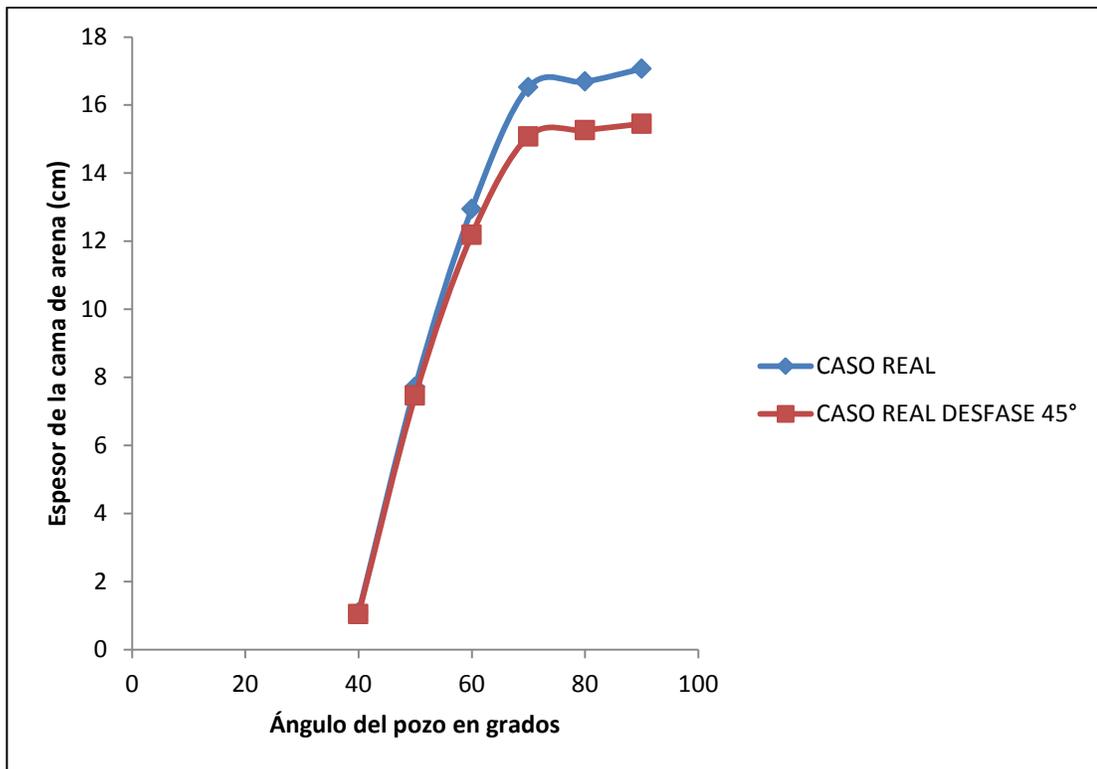


Figura 5. 2 Comportamiento del pozo JA19-12. Caudal Constante 210 GPM

5.3 Efecto De La Excentricidad De La Tubería De Perforación Respecto Al Hoyo En La Formación De La Cama De Arena.

La Figura 5.3 similar a la Figura 5.2, que fue desarrollada para un caudal constante de 210 GPM, en este caso se analizó el comportamiento ideal si la tubería estuviera totalmente recostada a la zona inferior del anular a lo largo de toda la perforación ($e=1$), si estuviera concéntrica ($e=0$) o si estuviera totalmente recostada a la zona superior del hoyo ($e= -1$) y en el caso de $e = 1$ con un ángulo de desfase $\varphi = 45^\circ$. Al observar las tres primeras condiciones de excentricidad, en conjunto con la línea punteada que representa la condición real del pozo a medida que varía la excentricidad a lo largo de su construcción. Se aprecia que para una tubería con $e = 1$, los valores de y_b son muy altos en comparación con los casos de $e = 0$, $e = -1$ y $e = 1$ para $\varphi = 45^\circ$. Analizándolas también se tiene que a partir de 50° si se mantuviese la tubería totalmente concéntrica ($e=0$), se obtendría una disminución considerable de y_b , el cual está entre 20 y 25% menos. Así, en la rango entre 70° y 90° cuando se

presenta un ángulo de desfase de 45° el y_b es menor que en el caso de utilizar excentricidades variables, y superior al tener la tubería concéntrica., A partir de estos resultados, se aprecia la necesidad y la importancia de al superar los 60° utilizar estabilizadores, para mantener la tubería lo más concéntrica posible y limitar la altura de y_b manteniendo un caudal constante.

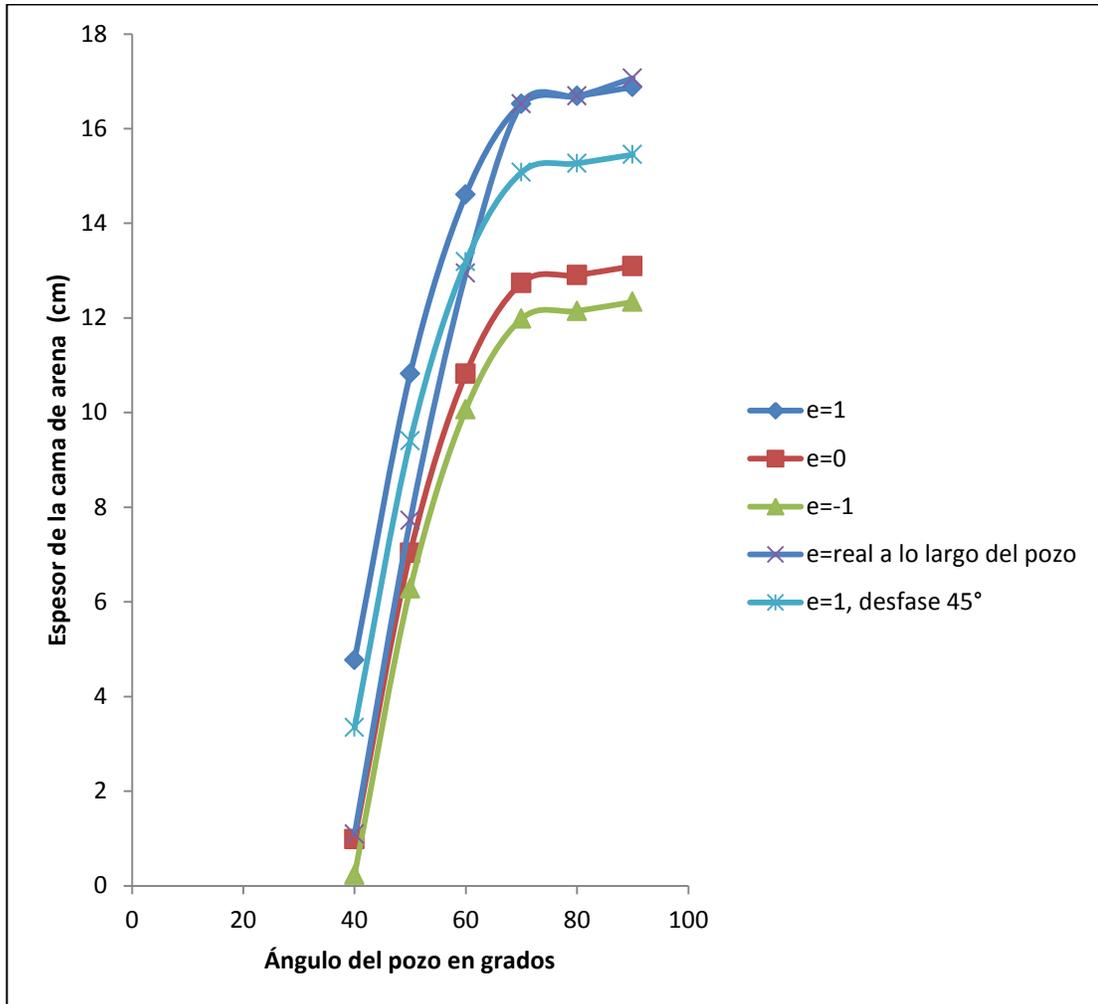


Figura 5. 3 Influencia de la excentricidad en la cama de arena

5.4 Influencia de la variación del ángulo de inclinación del pozo JA19-12 en la formación de la Cama de Arena.

El ángulo del pozo es uno de los parámetros más importantes a la hora de perforar y tener en cuenta en la limpieza de hoyo, pero en cambio a muchas otras variables, este no puede ser controlado completamente y depende de nuestro yacimiento objetivo y las condiciones del pozo necesarias para alcanzar el mismo. A medida que aumenta el ángulo aumenta el y_b considerablemente hasta llegar a 70° . Si comparamos la formación de la y_b entre $40^\circ - 60^\circ$ y $70^\circ - 90^\circ$ hay una diferencia significativa a pesar que el rango de análisis es de 20° . Así, cuando el ángulo aumente, la mayor parte de las partículas son forzadas contra la pared inferior del anular, donde se formará una cama de ripios la cual viajará a velocidades inferiores. Esto causa una reducción en el área anular por el cual el fluido atraviesa, resultando en un aumento en la velocidad del fluido y en consecuencia causando que las partículas se muevan más rápido y disminuyendo su tasa de depositación.

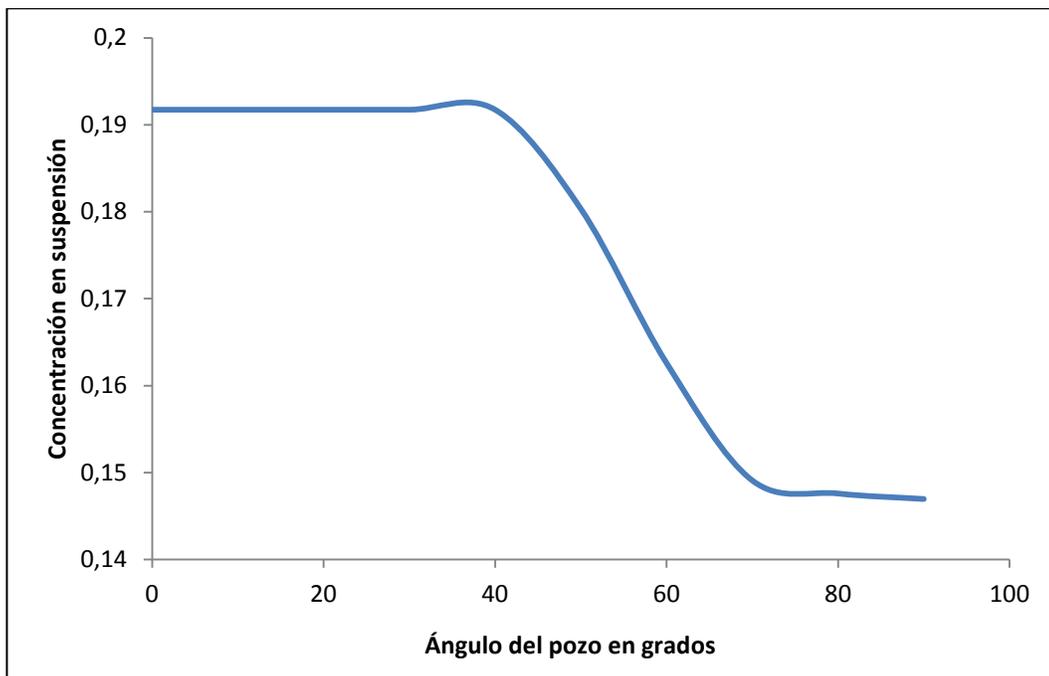


Figura 5. 4 Concentración en Suspensión Vs Ángulo

Por otra parte el ángulo de inclinación del pozo tiene un efecto significativo en la concentración de las partículas de suspensión (C_s), como se muestra en la Figura 5.4, el C_s es máximo hasta los 40° de inclinación porque al no haber cama de arena ($y_b = 0$) el C_s es igual a la concentración total (C_t). Para luego disminuir gradualmente con el incremento del ángulo hasta alcanzar los 70° , donde toma C_s un valor casi constante. Este efecto se puede observar también en la Figura 5.2, en la cual al disminuir concentración de las partículas de suspensión, aumenta la concentración de la cama de arena y por ende aumenta el y_b .

5.5 Influencia del Caudal del Fluido en la Formación de la Cama de Arena.

Analizando los comportamientos diferentes caudales, se llega a la conclusión que el parámetro más relevante para la correcta limpieza del hoyo y así prevenir la formación de la cama de arena, es el caudal del fluido, en otras palabras, la velocidad anular del mismo. La Figura 5.5 se muestra el comportamiento de espesor de la cama de arena (y_b) y el ángulo de pozo, sensibilizada para varios caudales Q_f (210, 300, 400 y 500 GPM). Se observa que para erosionar por completo la cama de arena bajo las condiciones del pozo JA19-12 (Tabla 5.1) y la predicción de excentricidad (Ecuación 4.1) entre 40° y 60° , son necesarios caudales superiores a los 500 GPM. Dicho de otra forma, mientras mayor sea el caudal, más eficiente será la limpieza de hoyo, y la cama de arena tendrá un espesor menor. Si se quisiera remover la cama de arena entre 60° - 90° , se requerirían caudales superiores a las 500 GPM.

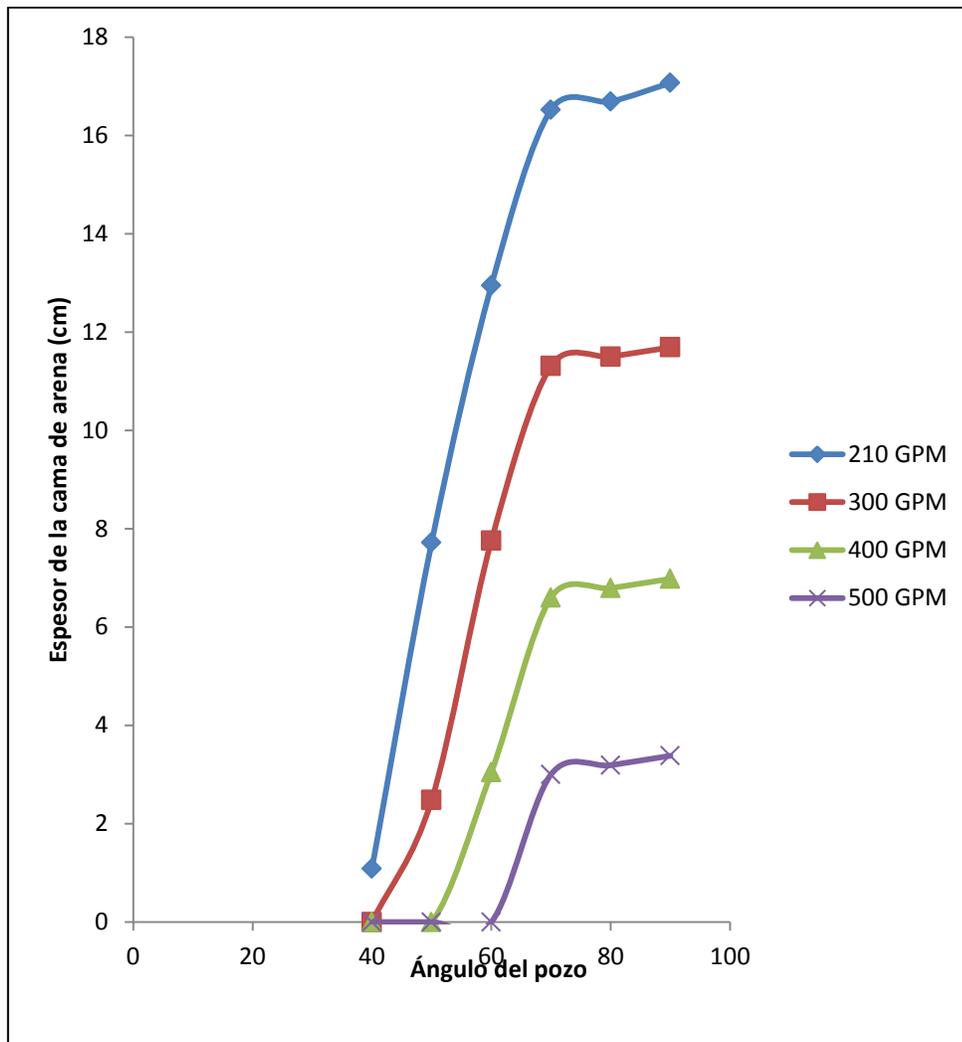


Figura 5. 5 Efecto de diferentes Caudales en el espesor de la cama de arena.

Análisis similar se realizó en la figura 5.6, pero con las excentricidades variando con un desfase de 45°, comparando el comportamiento cuando el pozo se desplaza solo en dos dimensiones (Figura 5.5) con estos resultados, se observa que cuando se está desfasados, la cama de arena tiende a tener una pequeña disminución, este comportamiento se podría deber a que la tubería se encuentra más alejada del fondo del pozo, lo cual, a pesar de que la tubería de perforación al estar recostada entre 70° y 90°, con un desfase, la misma no descansa sobre el fondo del pozo, sino se recuesta hacia los lados del mismo.

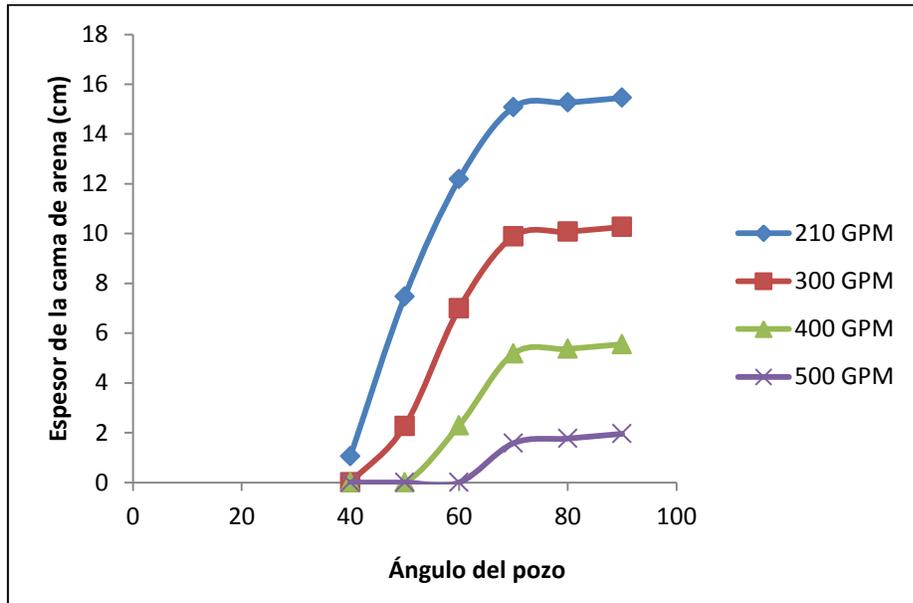


Figura 5. 6 Efecto de diferentes Caudales en el espesor de la cama de arena con desfase de 45°.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos por medio de las ecuaciones desarrolladas, en la Figura 5.7 se muestra los resultados de una simulación de torque, arrastre e hidráulica con el simulador WELLPLAN para nuestro pozo en la sección intermedia, en la cual se muestran resultados cercanos a los obtenidos mediante la relación del método matemático y la ecuación de predicción de excentricidad, resaltando principalmente que a partir de 60° se necesitan caudales superiores a 500 GPM para mantener el espesor de la cama de arena por debajo de 1 pulgada.

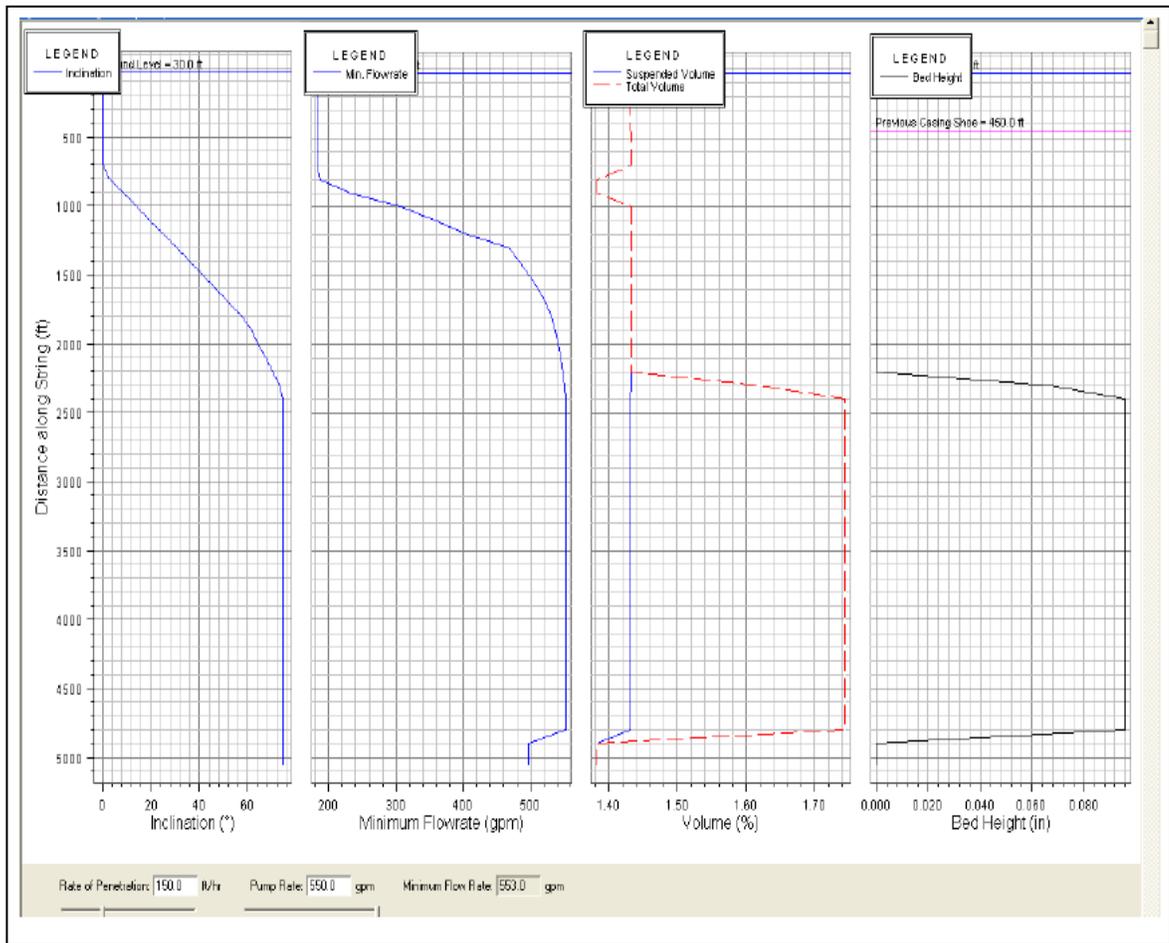


Figura 5. 7 Hidráulica simulación WELLPLAN.

Nótese que la primera curva azul representa, el ángulo de inclinación versus la distancia a lo largo de la sarta, la siguiente curva azul representa los caudales, la curva roja y la negra representan a el volumen de ripios y al espesor de la cama respectivamente de la arena presente a estos caudales.

5.6 Efecto Del Régimen De Flujo En La Formación De La Cama De Arena.

Dado que el caudal del fluido es importante al momento de realizar una limpieza de hoyo óptima, se analizó el comportamiento del régimen de flujo y su indicador el Numero de Reynolds (N_{Re}). En la Figura 5.8 se presenta que al aumentar el Número de Reynolds hay una disminución del espesor de la cama de arena (y_b) donde el régimen de flujo es dependiente de la velocidad del fluido, el diámetro hidráulico, la densidad y viscosidad efectiva del fluido. De esta figura se tiene que para obtener limpiezas de ripios más óptimas es necesario alcanzar un régimen de flujo turbulento ($N_{Re} > 2000$), sin embargo se pudo observar que para alcanzar este régimen de flujo para las condiciones de pozo entre 60° y 90° era necesario trabajar con caudales superiores a los 500 GPM, por lo que habría que tener en cuenta las condiciones operacionales establecidas previamente.

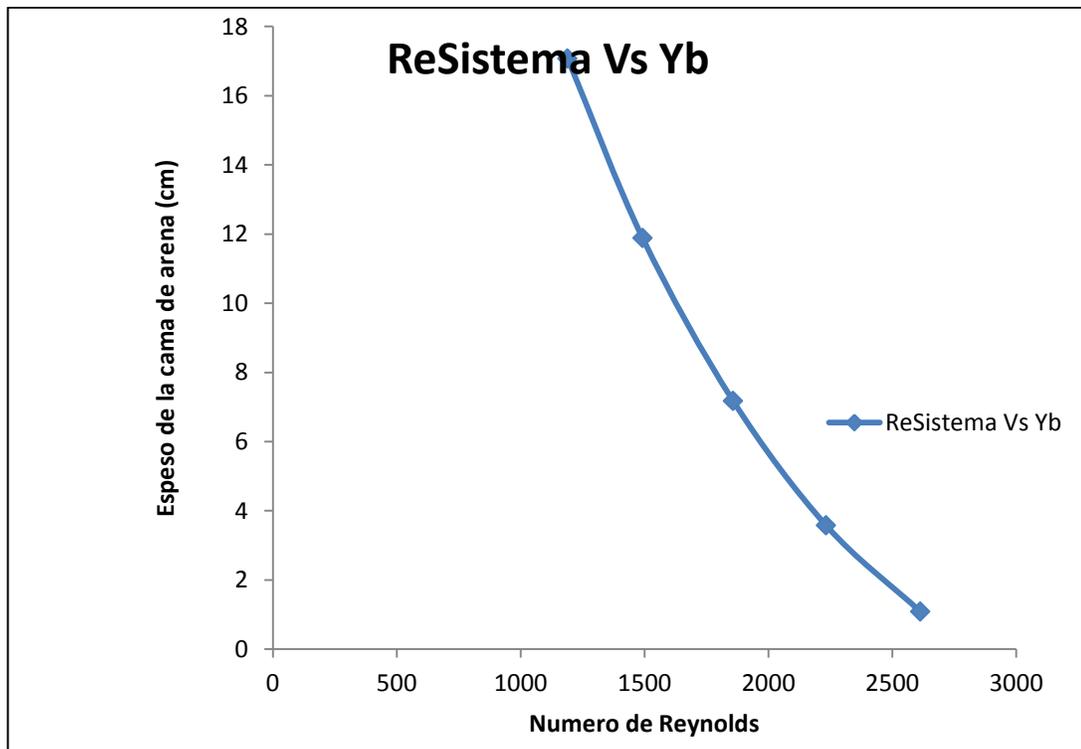


Figura 5. 8 Efecto del régimen de flujo

5.7 Influencia De La Excentricidad De La Tubería En La Velocidad De La Cama De Arena Y La Velocidad Del Área De Suspensión.

Para analizar la influencia de la excentricidad (e) en la velocidad de la cama de la cama de arena (U_b) y la velocidad del área de suspensión (U_s) se desarrollaron las gráficas para tres condiciones de excentricidad ($e=1$, $e=0$, $e=-1$) (Figura 5.9). El primer caso, para cuando la tubería está totalmente recostada en la zona inferior del hoyo ($e=1$), la velocidad de la cama de arena aumenta hasta alcanzar los 50° para luego disminuir su velocidad y llegar a estar estática entre 60° y 70° , para comenzar a moverse gradualmente hasta los 90° . Esto se podría atribuir a que la componente vertical de la velocidad de desplazamiento (U_s) no logra superar la velocidad de resbalamiento de la cama de arena, entre 60° y 70° , sin embargo este trabajo especial de grado no toma en cuenta estas variables por lo que el análisis de este comportamiento se sale de su alcance. También en esta figura se observa que la cama de arena al estar estática ($U_b = 0$) conlleva a un aumento de la velocidad de suspensión, lo cual es debido a que la totalidad del caudal (Q_f) es obligado a pasar por un área anular menor, ya que una parte está siendo ocupada por la cama de arena. Se observa un comportamiento de velocidades similares cuando la tubería está totalmente concéntrica ($e = 0$) y cuando esta recostada de la zona superior ($e = -1$), donde la cama de arena estará siempre en constante movimiento por lo que se puede predecir, una mejor remoción de los ripios y una eficiente limpieza de hoyo.

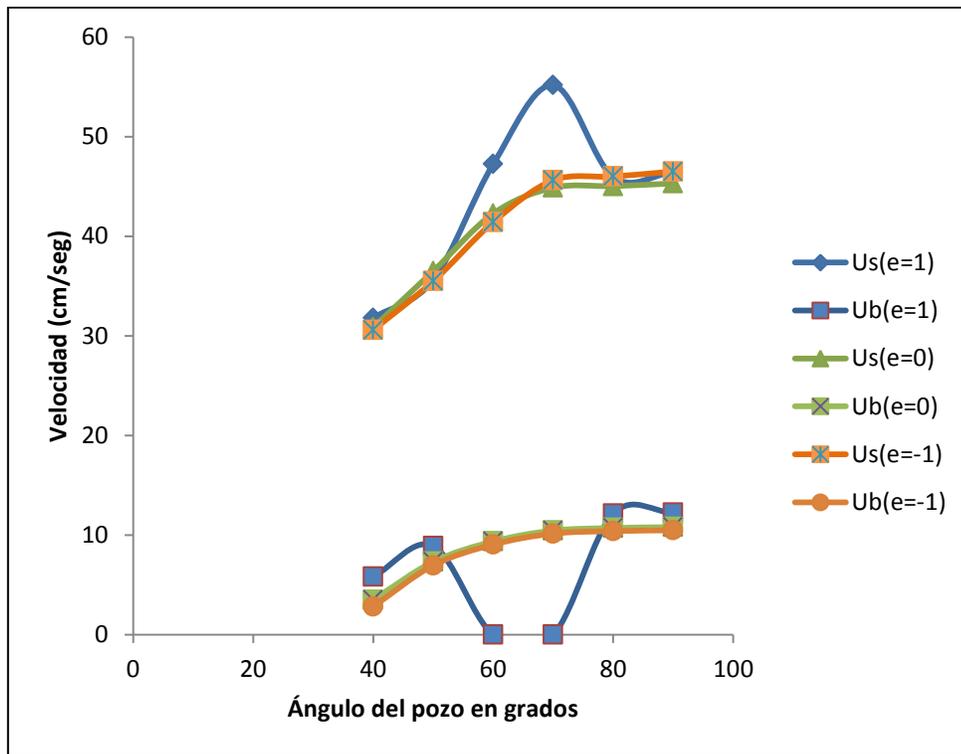


Figura 5. 9 Comportamiento de la velocidad en suspensión y en la cama de arena.

A su vez se realizó un análisis del comportamiento de U_b y U_s cuando se tiene un ángulo de desfase $\varphi=45^\circ$ (Figura 5.10) en la cual se obtiene que la velocidad de $U_b = 0$ aproximadamente a los 50° y que tiende a aumentar progresivamente, lo que implicaría movimiento continuo de la cama de arena a lo largo de la construcción del pozo, siendo esta una de las razones por la que se genera una diferencia en los y_b de la Figura 5.2, dado que esto implicaría que en el caso de presentar un desfase se alcanza cierto grado de eficiencia en la limpieza evitando así la continua acumulación de los rípios y el aumento constante de y_b .

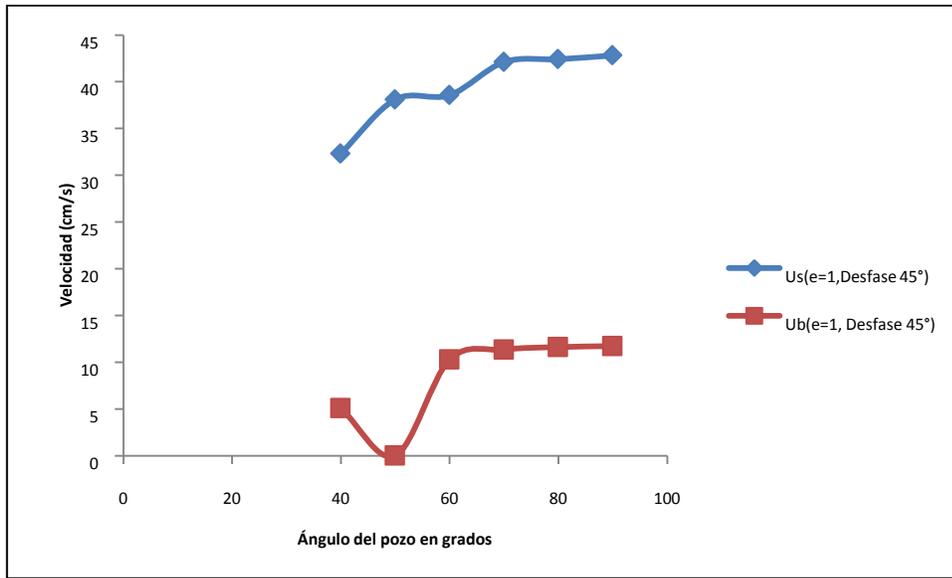


Figura 5. 10 Comportamiento de la velocidad en suspensión y en la cama de arena. Con $e=1$ y $\varphi=45^\circ$

5.8 Influencia Del Diámetro De La Tubería De Perforación En La Formación De La Cama De Arena.

El aumento en el diámetro de la tubería de perforación, conlleva a una reducción del espacio anular, lo que traerá como consecuencia una disminución en la cama de arena, ya que se obtendrán mayores velocidades en el espacio anular a un mismo caudal. Como se observa en la Figura 5.11, el diámetro de tubería con el cual se obtendría una mejor limpieza de hoyo sería 6 5/8", sin embargo la diferencia no es muy grande en comparación a la tubería de 5", la cual es usada en nuestro pozo a estudio.

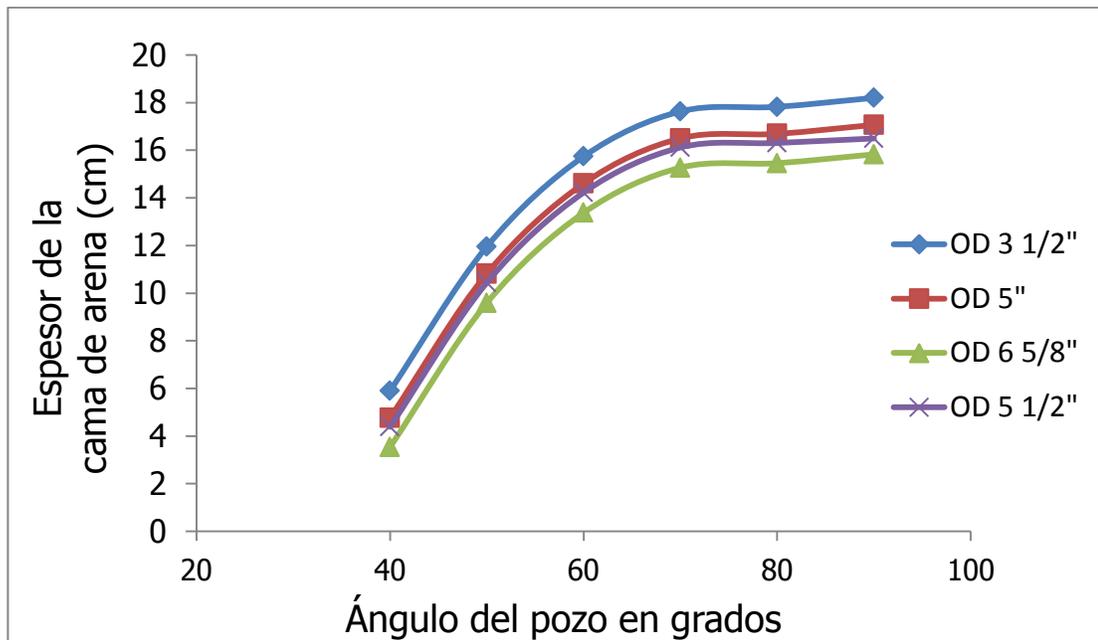


Figura 5. 11 Efecto del diámetro de la tubería de perforación.

5.9 Influencia De La Excentricidad De La Tubería De Perforación En La Velocidad Crítica De Transporte.

Para el análisis de la influencia de la excentricidad de la tubería de perforación en la velocidad crítica de transporte en el pozo JA19-22 en la sección horizontal (entre 70° y 90°) se tomaron los datos obtenidos en la ecuación de predicción de excentricidad los cuales arrojaron que la tubería está acostada ($e = 1$) para ese rango, por lo que la velocidad crítica de transporte es aproximadamente 76 cm/s que es el punto de corte con el eje X, lo cual representa la velocidad mínima necesaria para no tener cama de arena. Pero para alcanzar esta velocidad se requeriría un caudal mayor a 600 GPM, lo que operacionalmente está fuera de alcance. Mientras que si se mantiene la tubería totalmente concéntrica ($e = 0$), la velocidad crítica de transporte es aproximadamente 58 cm/s, la cual se alcanza con un caudal de cercano a los 500 GPM.

Esto presentaría una disminución considerable del caudal necesitado para disolver la cama de arena totalmente, sin embargo, no es posible al no poderse mantener completamente concéntrica la tubería en el hoyo a lo largo de la perforación, lo cual

implicaría la utilización de centralizadores en profundidades críticas que disminuyan el efecto de la excentricidad en la formación de camas de arena.

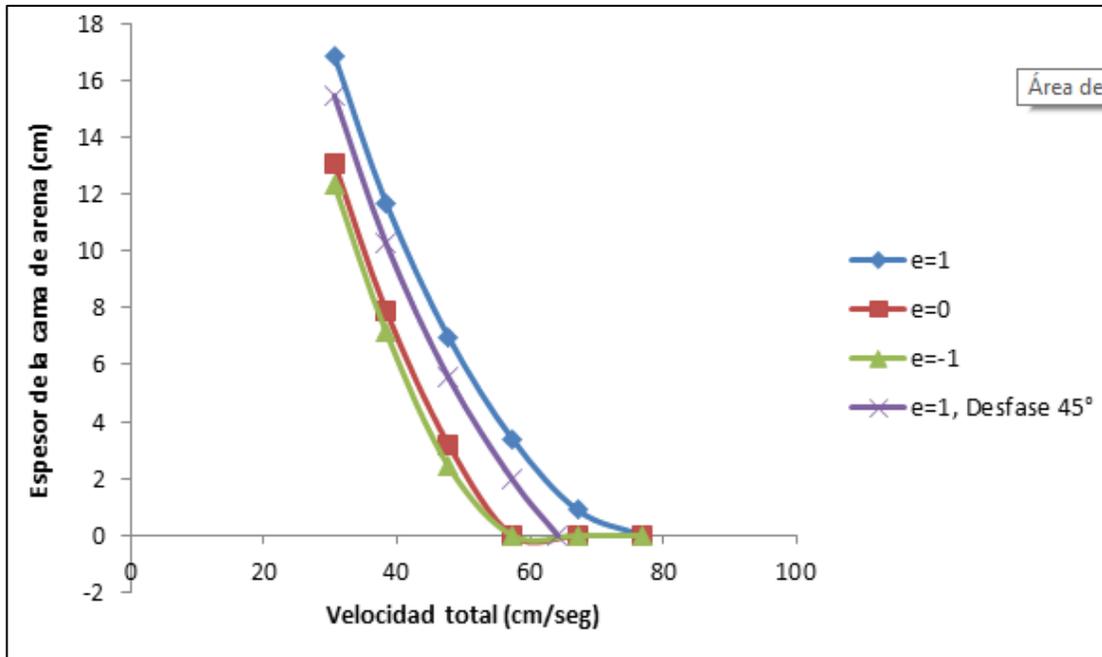


Figura 5. 12 Efecto de la Excentricidad a la Velocidad Crítica de Transporte.

También se observa en la figura 5.12 que la velocidad necesaria para disolver totalmente la cama de arena para cuando estamos desfasados 45° es 66,14 cm/s, la cual es mayor a la necesaria si estuviera la tubería concéntrica pero menor al caso de estar totalmente recostada en el fondo ($e=1$).

5.10 Validación Por Ecuación Empírica de Evren ^[39]

Por medio de una ecuación desarrollada por Evren ^[39], que calcula el porcentaje que ocupa el área de la cama de arena, se coparan con los valores obtenidos mediante el modelo matemático aquí usado y se obtienen valores de espesor de cama de arena similares para las condiciones de estudio, esta correlación empírica es solo válida para pozos entre $65-90^\circ$ y posee un error aproximado del 10% entre ambos resultados como se muestra en la Figura 5.12.

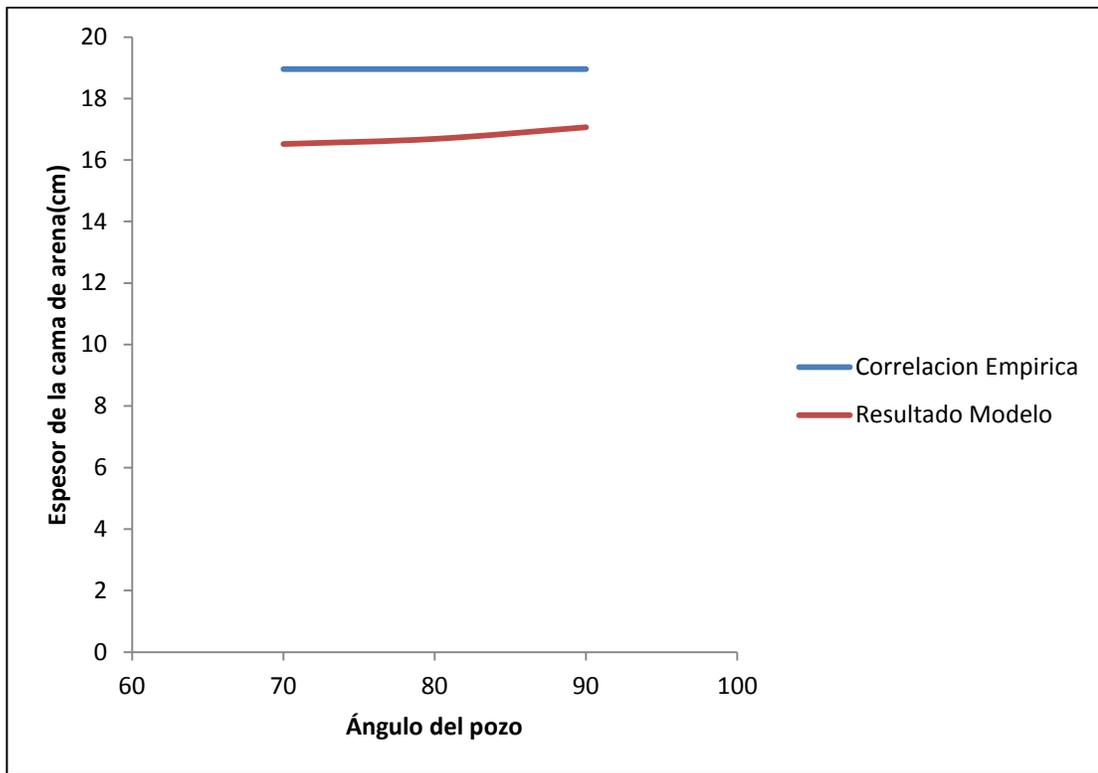


Figura 5. 13 Validación del modelo.

Así se puede corroborar la validez de los resultados obtenidos por el desarrollo matemático, por medio de las correlaciones desarrolladas por Evren, apreciando la congruencia de los resultados obtenidos.

5.11 Análisis del comportamiento de torque del pozo JA19-22.

A pesar de que el modelo no tomó en cuenta la influencia que tiene el aumento de la velocidad de rotación de la tubería en el transporte de los ripios, basándose en el resultado presentado por Zeidler ^[27], en el cual el torque afectaba la limpieza de hoyo a bajos caudales, pequeños tamaños de granos y bajos ROP, para otros rangos, el efecto del mismo se considera despreciable. Se analizó la figura 5.14, intentando relacionar el torque, con los parámetros estudiados en el modelo matemático. Si se observa las tendencias, se aprecia que no hay torque cuando se está haciendo viajes (*Tripping in*) porque estos se hacen sin rotar la sarta de perforación, en este caso solo influye el arrastre. El torque presente mientras se rota tocando el fondo y sin tocar el mismo, presentan la misma tendencia, sin embargo cuando se toca el fondo, hay un mayor torque, debido a que a la mecha la cuesta más rotar, al estar en contacto con la formación, el aumento progresivo del torque, a medida de que aumenta la profundidad, se atribuye al hecho de que al aumentar el ángulo, aumentamos la excentricidad de la tubería (figura 5.1), ya que el torque se ve influenciado principalmente por la excentricidad, es decir entre más se encuentre recostada la tubería, mayor será la resistencia a rotar.

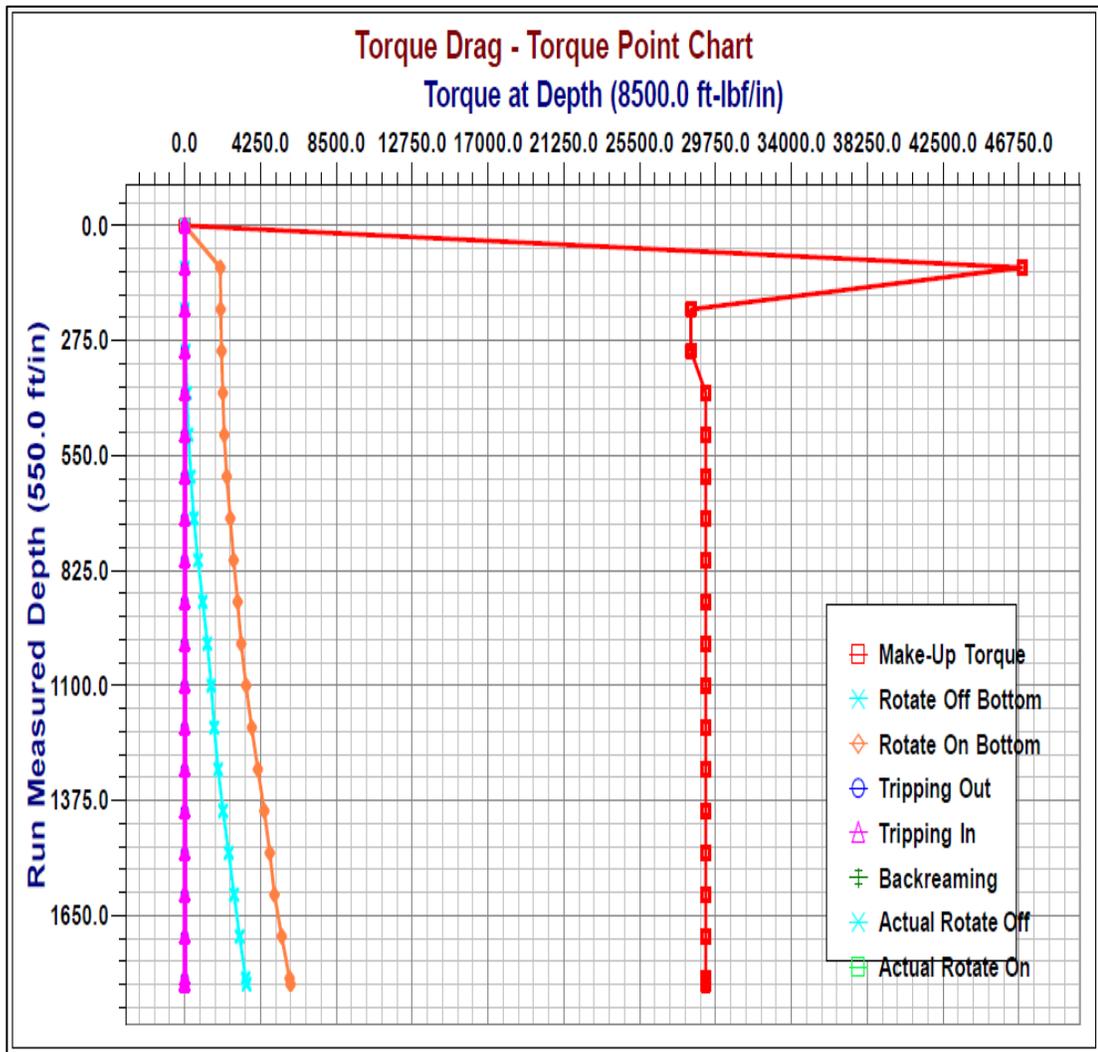


Figura 5. 14 Simulación de torques

5.12 Análisis del comportamiento del arrastre del pozo JA19-22.

El análisis de la figura 5.15, se basó principalmente en las curvas de rotando tocando el fondo (*rotate on bottom*) y perforación por deslizaje (*Sliding Drilling*), debido a que son las basadas en el comportamiento del arrastre en perforación. Las lecturas que se presentan son el peso leído en superficie sostenido por el gancho, el cual es un indicador del arrastre, para el caso de la curva de *slide drilling*, se observa un aumento progresivo del arrastre a medida que aumenta el ángulo esto se considera debido a que el peso sobre la mecha necesario para la perforacion es alcanzado e

inclusive sobrepasado por el peso de la sarta, hasta llegar a un punto en el que el ángulo es muy grande, y el peso recae en la pared inferior, por lo que el peso que sostiene el gancho disminuye, además de que para alcanzar el peso sobre la mecha necesitado, es necesario soltar peso del gancho, por lo que disminuiría la lectura, así explicando la tendencia a devolverse en la gráfica.

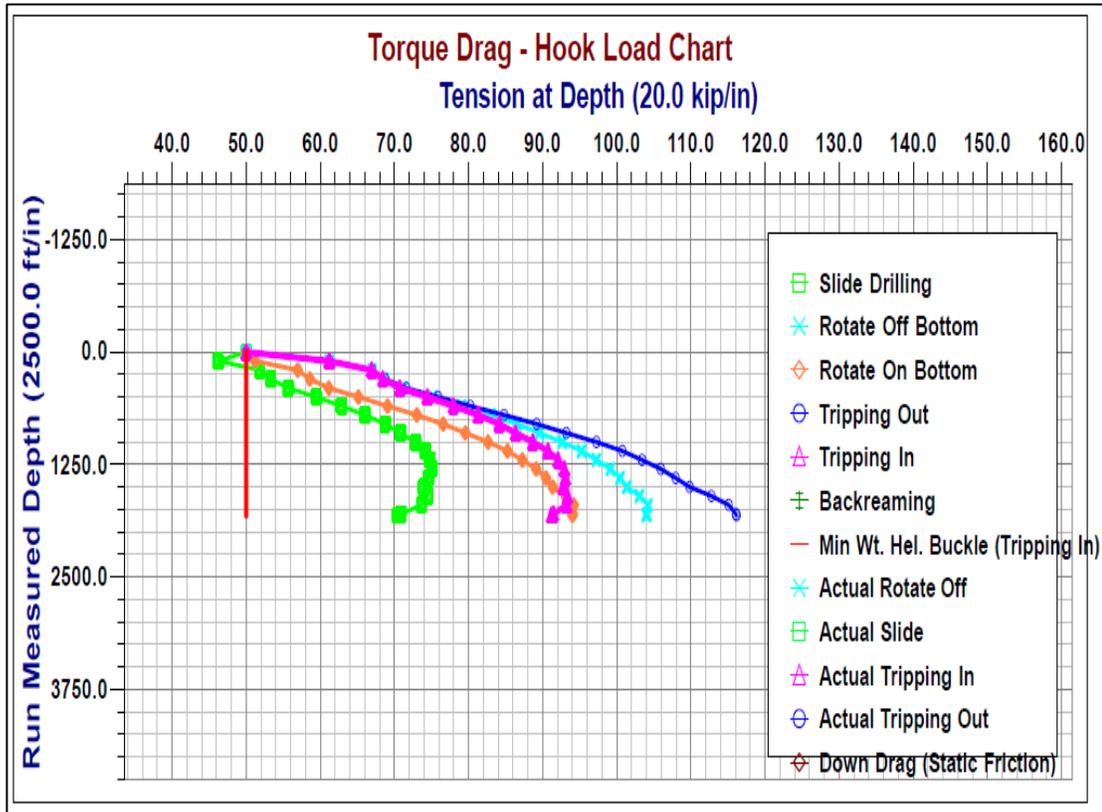


Figura 5. 15 Simulación de arrastre

Observando la tendencia de la curva de *rotate on bottom*, se observa que el arrastre aumenta a medida que profundizamos, esto podría atribuirse a la excentricidad y la formación de cama de arena, ya que al estar recostada la tubería sería más difícil su desplazamiento, y por consiguiente aumenta el arrastre, y al haber mayor cama de arena, la misma pondrá una resistencia mayor a que la tubería se desplace únicamente dentro del fluido.

CONCLUSIONES

En los resultados obtenidos en nuestro estudio las siguientes conclusiones fueron obtenidas:

-Las variaciones de excentricidad dependen principalmente de parámetros mecánicos y geométricos del pozo, como peso sobre la mecha, proyección horizontal de la trayectoria del pozo y peso lineal de la tubería. Los principales cambios de la misma para el pozo JA19-00 se dan entre 40° y 70° .

-El espesor de la cama de arena tiene un aumento exponencial entre 40° y 60° , de ahí en adelante el aumento es mínimo hasta mantenerse prácticamente constante hasta alcanzar aproximadamente 90° .

-Mantener la tubería de perforación concéntrica fue hallado como una opción óptima en lo que respecta a limpieza de hoyo. A pesar de este ser un parámetro difícil de controlar.

-El ángulo del pozo, es uno de los parámetros más importantes a la hora de perforar y tener en cuenta en la limpieza de hoyo, pero en comparación a muchas otras variables, este no puede ser controlado y depende del yacimiento objetivo y las condiciones del pozo necesarias para alcanzar el mismo.

-La concentración de las partículas en suspensión, fue encontrado como un factor indicador de la limpieza de hoyo, siendo esta variable dependiente directa de la eficiente limpieza del hoyo puede ser tomada como punto de partida en una evaluación de limpieza.

-El parámetro más relevante para la correcta limpieza del hoyo y prevenir la formación de la cama de arena, es el caudal del fluido, en otras palabras, la velocidad anular del mismo.

-Para pozos mediana y altamente inclinados, el régimen de flujo turbulento, es lo más óptimo para erosionar en gran parte o totalmente la cama de arena, pero siempre teniendo en cuenta los límites operacionales del pozo para no generar problemas de socavamiento.

-Al aumentar el diámetro de la tubería de perforación, se disminuye el área anular y por consiguiente hay un aumento de la velocidad y una disminución en el espesor de la cama de arena, esto es solo posible en algunas secciones de la construcción del hoyo donde se requiera un ensanchamiento del hoyo. Aunque en teoría es posible en la práctica solo aplica a zonas específicas de la construcción del pozo.

-La velocidad crítica de transporte es afectada en gran parte por la excentricidad de la tubería, observando que al mantener la tubería concéntrica los caudales necesarios para disolver la cama totalmente disminuyen considerablemente.

-Controlando efectivamente parámetros como las características reológicas del fluido de perforación se puede optimizar los tiempos de perforación, y por lo tanto disminución de costos.

RECOMENDACIONES

Este modelo matemático es solo válido para flujo bifásico (sólido-líquido), por lo que se recomienda la ampliación del mismo para un flujo trifásico con la presencia de gas.

-Se recomienda alcanzar regímenes de flujos turbulentos para pozos mediana y altamente inclinados, teniendo presente las limitaciones operacionales del pozo para no caer en problemas de hoyo, tales como el socavamiento de las paredes del mismo por el fluido de perforación.

-Se recomienda para nuestro pozo de estudio, la utilización de centralizadores a partir de 50° de inclinación.

-Incluir en el modelo correlaciones que permitan predecir el comportamiento de fluidos compresibles (tipo espuma, gas o aire).

-Se recomienda incluir el factor tiempo, y su influencia en cada uno de los parámetros estudiados.

BIBLIOGRAFÍA

- 1- PEMEX Perforación y Mantenimiento de pozos (s.f). Guía Práctica para el Diseño de la Perforación Direccional y Control de la Desviación.
- 2- Peden, J.M., Ford J.T. y Oyenyin M.B.: "Comprehensive Experimental Investigation of Drilled Cuttings Transport in Inclined Wells Including the Effects of Rotation and Eccentricity". Artículo SPE 20925. Presentado en Europe 90, The Hague, Netherlands, Octubre 22-24, 1990.
- 3- Abdullah M. Qahtani and Dr. Md Amanullah. "Prediction of Hole Cleaning Efficiency Using a Simple, User Friendly and Better Performing Simulation Model". The Saudi Aramco Journal of Technology. 2010
- 4- Wampler, David. "The Basics of Environmental Remediation Utilizing Horizontal Wells", USA, 1990.
- 5- S.K. Elsayed Salem, M.A. Nasr El-Din. "Drillpipe Eccentricity Prediction During Drilling Directional Wells". Artículo SPE 2006-047, June 2006.
- 6- T. Nazari, G. Hareland, University of Calgary and J.J. Azar, University of Tulsa. "Review of Cuttings Transport in Directional Well Drilling: Systematic Approach" Artículo SPE 132372. Presentado en Anaheim, California. May 27-29, 2010.
- 7- Tomren, Petter. "The Transport of Drilled Cuttings in an Inclined Eccentric Annulus". University of Tulsa, 1979.
- 8- Martins, A.L. y Santana, C.: "Evaluation of Cuttings Transport in Horizontal and Near Horizontal Wells - A Dimensionless Approach". Artículo SPE 23643. Presentado en la Second Latin American Petroleum Engineering Conference of the SPE, Caracas, Venezuela, Marzo 8-11, 1992.
- 9- Larsen, T.I., Pilehvari, A.A. y Azar, J.J.: "Development of a New Cuttings Transport Model for High-Angle Wellbores Including Horizontal Wells". Artículo SPE 25872. Presentado en la SPE Rocky Mountain Regional/Low Permeability Symposium, Denver, Colorado, Abril 12-14, 1993.

- 10- Clark, R.K. y Bickham, K.L.: "A Mechanistic Model for Cuttings Transport". Artículo SPE 28306. Presentado en la SPE 69th Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, L.A., Septiembre 25-28, 1994.
- 11- Martins, A.L.; Lourenco A.M.F., y Campos, W.: "Optimizing Cuttings Circulation in Horizontal Well Drilling". Artículo SPE 35341. Presentado en la Internacional Petroleum Conference and Exhibition of Mexico, Villahermosa, Mexico, Marzo 5-7, 1996.
- 12- Santana, M. y Martins, L.: "Advances in the Modeling of the Stratified Flow of Drilled Cuttings in High Angle and Horizontal Wells". Artículo SPE 39890. Presentado en la Conferencia Internacional Petroleum Conference and Exhibition of Mexico, Villahermosa, Marzo 3-5, 1998.
- 13- Rubiandini, R.: "Equation for Estimating Mud Minimum Rate for Cutting Transport in an Inclined-Until-Horizontal well". Artículo SPE 57541. Presentado en la 1999 SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, L.A., Febrero 18-12, 1992.
- 14- Kamp, A.M. y Rivero M.: "Layer Modeling for Cutting Transport in Highly Inclined Wellbores". Artículo SPE 53942. Presentado en la 1999 SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Caracas, Venezuela, Abril 21-23, 1999.
- 15- Cho, H., Shah, N. y Osisanya, O.: "A Three-Segment Hydraulic Model for Cutting Transport in Horizontal and Deviated Wells". Artículo SPE 65488. Presentado en la 2000 SPE/Petroleum Society of CIM International Conference on Horizontal Well Technology, Calgary, Canada, Noviembre 6-8, 2000.
- 16- Nazari, T. Hareland G., Azar J.J. "Review of Cuttings Transport in Directional Well Drilling Systematic Approach". Artículo SPE 132372. Presentado Anaheim, California, USA. Mayo 27-29, 2010.
- 17- Cayeux E. , Mesagan T., Tanripada S., Zidan M. Fjelde K.K. "Real-Time Evaluation of Hole Cleaning Conditions Using a Transient Cuttings Transport Model". Artículo SPE/IADC 163492. Presentado en Amsterdam, Holanda. Marzo 5-7, 2013.

- 18- Ogunrinde J.O. "Hydraulics Optimization For Efficient Hole Cleaning in Deviated and Horizontal Wells". Artículo SPE 162970. Presentado en Abuja, Nigeria. Agosto 6-8 , 2012.
- 19- Fadairo Adesina, Orodu David. "Investigating the Carrying Capacity and the Effect of Drilling Cutting on Rheological Properties of Jatropha Oil Based Mud" Artículo SPE 167551. Presentado en Lagos, Nigeria. 30 Julio - 1 Agosto, 2013.
- 20- Larez V. Rodolfo, Universidad Autónoma de México. "Desarrollo de un Modelo Mecánico para Predecir la Eficiencia de la Limpieza de Arena con Tubería Flexible en Pozos Inclinados". Presentado para Optar por el Grado de Maestro en Ingeniería. México. 2005.
- 21- Evren M. Ozbayoglu. "Estimating Critical Velocity to Prevent Bed Development for Horizontal-Inclined Wellbores" Artículo SPE/IADC 108005. Presentado en el Cairo, Egypt. Octubre 22-24, 2007.
- 22- F.B. Soepyan, S. Cremaschi, and C. Sarica. "Selection of the Optimal Critical Velocity for Sand Transport at Low Concentrations for Near-Horizontal Flow". OTC 23075, 2012.
- 23- JOSHI, S.D., Horizontal Well Technology; Penn Well Publication, Tulsa OK,1991.
- 24- Jiménez Mejía, José Fernando and Agudelo Durango, Walter Mario. Reología de Fluidos Newtonianos y No Newtonianos. 1996.
- 25- Jiménez, J y Rivera, C. "Mejoramiento de la Hidráulica de Pozos Verticales y Direccionales Durante su Construcción" Trabajo Especial de Grado, Universidad de Oriente, Anzoátegui, (2009).
- 26- Christian Ferreira, SPE, Mario Serrano, SPE. Baroid Drilling Fluids, HALLIBURTON, Isla de Margarita, Venezuela.
- 27- Zeidler, H. U.: " Fluid and Drilled Particle Dynamics Related to Drilling Mud Carrying Capacity", Ph. D. Dissertation, U. of Tulsa (OK), 1974.
- 28- Saffman, P.G.: "The Lift on a Small Sphere in a Shear Flow". Journal Fluids Mechanics, (1965) vol. 22, parte 2, pp. 385-400.

- 29- Doron, P., Simkhis M. y Barnea D.: "Flow of Solid-Liquid Mixtures in Inclined Pipes". International Journal Multiphase Flow, vol. 23, No 2, pp. 313-323, 1997.
- 30- Chien, S.F.: "Settling Velocity of Irregularly Shaped Particles". Artículo SPE 26121. Presentado en la SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Septiembre 25-28, 1994.
- 31- PDVSA. (2010). Petróleo y otros datos estadísticos. Editorial PDVSA, Venezuela.
- 32- PDVSA. (2013). "Programa de Perforación JA19-12 Direccional (WDI-731)". Venezuela.
- 33- Arias, F. G. (1999). El proyecto de investigación, guía para su elaboración. Caracas: EPISTEME C.A. / ORIAL EDICIONES.
- 34- Santana, M. y Martins, L.: "Advances in the Modeling of the Stratified Flow of Drilled Cuttings in High Angle and Horizontal Wells". Artículo SPE 39890. Presentado en la Conferencia Internacional Petroleum Conference and Exhibition of Mexico, Villahermosa, Marzo 3-5, 1998.
- 35- Lou, Y. y Bern, P.A.: "Flow-Rate Predictions for Clearing Deviated Wells", Artículo SPE 23884. Presentado en la 1992 IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, L.A., Febrero 18-21, 1992.
- 36- Walton, I.C.: "Computer Simulator of Coiled Tubing Wellbore Cleanouts in deviated Wells Recommends Optimum Pump Rate and Fluid Viscosity". Artículo SPE 29491. Presentado en el Production Operations Symposium, Oklahoma City, O.K., Abril 2-4 de 1995.
- 37- Martins A.L., Sá, C.H.M., Lourenco, A.M.F. y Campos, W.: "Experimental Determination of Interfacial Friction Factor in Horizontal Drilling With a Bed of Cuttings". Artículo SPE 36075. Presentado en la Fourth SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Puerto España, Trinidad y Tobago, Abril 23-26, 1996.

- 38- Doron, P., Granica, D. y Barnea, D.: “Slurry Flow in Horizontal Pipes – Experimental and Modeling”. *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 13, No. 4, pp. 535-547, 1987.
- 39- Evren M. Ozbayoglu.: “Analysis of Bed Height in Horizontal and Highly-Inclined Wellbores by Using Artificial Neural Networks”. SPE 78939. Presentado en Alberta, Canada, 2002.

APÉNDICE A

SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE DIFUSIÓN Y AJUSTE DE LA ECUACIÓN

La ecuación que gobierna la dispersión de sólidos en la región de suspensión está dada por la siguiente ecuación de difusión.

$$\varepsilon_p * \frac{d^2 C}{dy^2} + v_h * \frac{dC}{dy} = 0 \quad (\text{A.1})$$

Tenemos una ecuación diferencial homogénea de segundo orden.

$$\varepsilon_p * C'' + v_h * C' = 0 \quad (\text{A.2})$$

Dividimos todo entre ε_p , y obtenemos.

$$C'' + \frac{v_h}{\varepsilon_p} * C' = 0 \quad (\text{A.3})$$

Por lo tanto queda reducida la ecuación diferencial homogénea a la siguiente expresión.

$$m^2 + \frac{v_h}{\varepsilon_p} * m = 0 \quad (\text{A.4})$$

$$m = -\frac{v_h}{\varepsilon_p} \quad (\text{A.5})$$

Como sabemos v_h , es la componente en la dirección “y” de la velocidad de asentamiento de las partículas en suspensión agrupadas ($v_h * \text{sen } \alpha$). Resolviendo la ecuación diferencial y sustituyendo obtenemos.

$$C(y) = B * \exp\left(\frac{-v_h * \text{sen } \alpha}{\varepsilon_p} * y\right) \quad (\text{A.6})$$

Para hallar el valor de la constante B, en nuestra ecuación diferencial resuelta, es necesario conocer un punto, para esto se evaluara en la condición de frontera, es decir

en la interfaz entre la cama de arena y la región de suspensión, donde el $C = C_b$ en $y = y_b$, obteniendo.

$$Cb = B * \exp\left(\frac{-v_h * \text{sen}\alpha}{\varepsilon_p} * y_b\right) \quad (\text{A.7})$$

$$B = \frac{Cb}{\exp\left(\frac{-v_h * \text{sen}\alpha}{\varepsilon_p} * y_b\right)} \quad (\text{A.8})$$

Sustituyendo A.8 en A.6 obtenemos

$$C(y) = C_b * \exp\left(\frac{-v_h * \text{sen}\alpha}{\varepsilon_p} * (y - y_b)\right) \quad (\text{A.9})$$

Para hallar la concentración promedio en la región de suspensión, se realizara de la misma forma en que hallamos el área de suspensión.

Tenemos que:

$$y_o = \frac{ID_{\text{pozo}}}{2} * \text{sen}(\beta_o) \quad (\text{A.10})$$

$$y_i = \frac{OD_{\text{tuberia}}}{2} * \text{sen}(\beta_i) \quad (\text{A.11})$$

Sustituyendo en A.9, en función de β_o y β_i .

$$C(\beta_o) = Cb * \exp\left(\frac{-v_h * \text{sen}\alpha}{\varepsilon_p} * \left(\frac{ID_{\text{pozo}}}{2} * \text{sen}(\beta_o) - y_b\right)\right) \quad (\text{A.12})$$

$$C(\beta_i) = Cb * \exp\left(\frac{-v_h * \text{sen}\alpha}{\varepsilon_p} * \left(\frac{OD_{\text{tuberia}}}{2} * \text{sen}(\beta_i) - y_b\right)\right) \quad (\text{A.13})$$

La ecuación común de integral del área de suspensión viene dada por:

$$A_s = \frac{ID_{pozo}^2}{2} * \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (\frac{\pi}{2} - \theta_o) \cos(\beta_o)^2 d\beta_o - \frac{OD_{tuberia}^2}{2} * \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (\frac{\pi}{2} - \theta_i) \cos(\beta_i)^2 d\beta_i \quad (A.14)$$

Integrando en función de las concentraciones obtenemos:

$$A_s * C_s = \frac{ID_{pozo}^2}{2} * \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (\frac{\pi}{2} - \theta_o) \cos(\beta_o)^2 C(\beta_o) d\beta_o - \frac{OD_{tuberia}^2}{2} * \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (\frac{\pi}{2} - \theta_i) \cos(\beta_i)^2 C(\beta_i) d\beta_i \quad (A.15)$$

Sustituyendo $C(\beta_o)$ y $C(\beta_i)$.

$$A_s * C_s = \frac{ID_{pozo}^2}{2} * \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (\frac{\pi}{2} - \theta_o) \cos(\beta_o)^2 * C_b * \exp\left(\frac{-v_h * \text{sen}\alpha}{\epsilon_p} * \left(\frac{ID_{pozo}}{2} * \text{sen}(\beta_o) - y_b\right)\right) d\beta_o - \frac{OD_{tuberia}^2}{2} * \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (\frac{\pi}{2} - \theta_i) \cos(\beta_i)^2 * C_b * \exp\left(\frac{-v_h * \text{sen}\alpha}{\epsilon_p} * \left(\frac{OD_{tuberia}}{2} * \text{sen}(\beta_i) - y_b\right)\right) d\beta_i \quad (A.16)$$

Despejando C_s y agrupando términos, nos queda:

$$C_s = \frac{C_b}{2 * A_s} * (ID_{pozo}^2 * \text{int1} - OD_{tuberia}^2 * \text{int2}) \quad (A.17)$$

Donde int1 e int2 representan las siguientes ecuaciones:

$$\text{int1} = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (\frac{\pi}{2} - \theta_o) \cos(\beta_o)^2 * \exp\left(\frac{-v_h * \text{sen}\alpha}{\epsilon_p} * \left(\frac{ID_{pozo}}{2} * \text{sen}(\beta_o) - y_b\right)\right) d\beta_o \quad (A.18)$$

$$\text{int2} = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (\frac{\pi}{2} - \theta_i) \cos(\beta_i)^2 * \exp\left(\frac{-v_h * \text{sen}\alpha}{\epsilon_p} * \left(\frac{OD_{tuberia}}{2} * \text{sen}(\beta_i) - y_b\right)\right) d\beta_i \quad (A.19)$$

Debido a que no se obtenían con esta misma ecuación, los valores reportados por Rodolfo Larez ^[20] se debió ajustar esta ecuación, para poder reproducir los resultados reportados en su trabajo, dicho ajuste se realizó de la siguiente forma:

Se tomó la Ecuación A.17 y se dividió por un factor A, el cual sería estudiado su valor para cada valor de ángulo.

$$Cs = \frac{Cb}{A*2*As} * (IDpozo^2 * int1 - ODtp^2 * int2) \quad (A.20)$$

Para cada ángulo se obtuvo el valor de “A” necesario para ajustar la ecuación a los valores reportados, obteniendo así la siguiente tabla.

Tabla A. 1 Factor de corrección A

Angulo	Factor Corrección A necesario	Factor Corrección A obtenido por ecuación construida
40	31,6366056855073	31,63578302
50	55,6127595805281	55,61022304
60	89,7553976830204	89,74904176
70	139,499810652204	139,4860036
80	164,2415908	164,2145689
90	172,31433380248	172,2654941

La ecuación de A, viene expresada en función de los ángulos, y logramos reproducir los resultados obtenidos por Larez ^[20], con un R²=1. La ecuación de “A” obtenida fue la siguiente:

$$A = (0,0000079148 * \alpha^5 - 0,0025662746 * \alpha^4 + 0,3240846394 * \alpha^3 - 19,9024975565 * \alpha^2 + 597,3713031471 * \alpha - 7001,4497180617)(A.21)$$

Donde:

α = Angulo del pozo, grados.

APÉNDICE B

ÁREA DE LA REGIÓN DE SUSPENSIÓN

Tomando la Ecuación 4.73

$$A_s = \frac{ID_{pozo}^2}{2} \int_{-\left(\frac{\pi}{2}-\theta_o\right)}^{\frac{\pi}{2}} (\cos \beta_o)^2 d\beta_o - \frac{OD_{TP}^2}{2} \int_{-\left(\frac{\pi}{2}-\theta_i\right)}^{\frac{\pi}{2}} (\cos \beta_i)^2 d\beta_i \quad (B.1)$$

La solución a la integral de $(\cos \beta_o)^2$ viene dada por:

$$\cos(\beta)^2 = \frac{1}{2} * (1 + \cos(2\beta)) \quad (B.2)$$

$$\int \cos(\beta)^2 d\beta = \frac{1}{2} * \int d\beta + \frac{1}{2} * \int \cos(2\beta) d\beta \quad (B.3)$$

$$\int \cos(\beta)^2 d\beta = \frac{1}{2} * \beta + \frac{1}{4} * \text{sen}(2\beta) \quad (B.4)$$

Sustituimos B.4 en B.1

$$A_s = \frac{ID_{pozo}^2}{2} * \left\{ \frac{1}{2} * \beta_o + \frac{1}{4} * \text{sen}(2\beta_o) \right\}_{-\left(\frac{\pi}{2}-\theta_o\right)}^{\frac{\pi}{2}} - \frac{OD_{TP}^2}{2} * \left\{ \frac{1}{2} * \beta_i + \frac{1}{4} * \text{sen}(2\beta_i) \right\}_{-\left(\frac{\pi}{2}-\theta_i\right)}^{\frac{\pi}{2}} \quad (B.5)$$

$$A_s = \frac{ID_{pozo}^2}{4} * \left(\frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} * \text{sen} \left(2 \frac{\pi}{2} \right) + \frac{\pi}{2} - \theta_o - \frac{1}{2} * \text{sen} 2 \left(\theta_o - \frac{\pi}{2} \right) \right) - \frac{OD_{tuberia}^2}{4} * \left(\frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} * \text{sen} \left(2 \frac{\pi}{2} \right) + \frac{\pi}{2} - \theta_i - \frac{1}{2} * \text{sen} 2 \left(\theta_i - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (B.6)$$

Simplificando y reordenando términos, obtenemos:

$$As = \frac{ID_{poz}o^2}{4} * (\pi - \theta_o - \frac{1}{2} * \text{sen}2\left(\theta_o - \frac{\pi}{2}\right)) - \frac{OD_{tuberia}^2}{4} * (\pi - \theta_i - \frac{1}{2} * \text{sen}2\left(\theta_i - \frac{\pi}{2}\right)) \quad (\text{B.7})$$

APÉNDICE C

CÁLCULO DE PARÁMETROS REOLOGICOS

Modelo Newtoniano: La relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte está dada por:

$$\tau = \mu_p * \gamma \quad (C.1)$$

Donde:

τ : esfuerzo de corte, lb/100*ft²,

γ : Velocidad de corte, rpm.

En un fluido Newtoniano la viscosidad efectiva es igual a la viscosidad plástica. La expresión es Poise está dada por:

$$\mu_p = R_{600} - R_{300} \quad (C.2)$$

Donde:

μ_p : viscosidad plástica, centipoise.

R_{600}, R_{300} : Esfuerzos de corte (lb/100ft²)

Modelo de Ley de potencia modificado o de Herschel-Bulkley: La relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte está dada por:

$$\tau = \tau_o + K * \gamma^n \quad (C.3)$$

Donde:

$$n = 3,32 * \log \left(\frac{R_{600} - R_{300}}{R_{300} - R_3} \right) \quad (C.4)$$

$$K = \frac{R_{300} - R_3}{300^n} \quad (C.5)$$

Donde la viscosidad efectiva en el anular viene dada por:

$$\mu_e = 10 * K * \left(\frac{U_t}{(D_{hoyo} - D_{tuberia})} \right)^{n-1} \quad (C.6)$$

μ_e : viscosidad efectiva, poise.

K: constante K ley de potencia modificada

U_t : velocidad total en el anular, cm/s.

D_{hoyo} : diámetro del hoyo, cm.

$D_{tuberia}$: diámetro externo de la tubería de perforación, cm.

N: n de ley de potencia modificada.

APÉNDICE D

CALCULO TIPO DEL MODELO

Datos de entrada:

$$Q_{\text{fluido}} = 210 \text{ GPM}$$

$$\text{ROP} = 400 \text{ ft/hr}$$

$$\text{OD}_{\text{tubería}} = 5 \text{ pulg}$$

$$\text{ID}_{\text{tubería}} = 4,28 \text{ pulg}$$

$$\text{ID}_{\text{hoyo}} = 12 \frac{1}{4}'' \text{ pulg}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$\rho_s = 2,62 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_f = 1,234 \text{ g/cm}^3 = 10,298 \text{ lb/gal}$$

$$g = 9,81 \text{ m/seg}^2$$

$$d_p = 0,1 \text{ pulg}$$

Modelo Reológico = Modelo plástico de Bringham

$$W_b = 15000 \text{ lb.}$$

$$E = 30 \cdot 10^6 \text{ lb/pulg}^2.$$

$$Q_{\text{(peso lineal de la tubería)}} = 19,5 \text{ lb/pie}$$

Y la tabla de propiedades de fluido obtenida del programa de explotación

Tabla D.1 Propiedades Fluido de Perforación.

Propiedades	Valor
Densidad del fluido lbs/gal	10,1-10,5
R3 lbs/100ft ²	8-9
R6 lbs/100 ft ²	9-10
R100 lbs/100 ft ²	16,45
R200 lbs/100 ft ²	21,62
R300 lbs/100 ft ²	26
R600 lbs/100 ft ²	37

1) Convertir unidades al sistema CGS

$$Q_{\text{fluido}} (\text{cm}^3/\text{s}) = 210 \text{ GPM} * 63 = 13230 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

$$OD_{\text{tuberia}} (\text{cm}) = 5 * 2.54 = 12,7 \text{ cm}$$

$$ID_{\text{hoyo}} (\text{cm}) = 12,25 * 2.54 = 31,115 \text{ cm}$$

$$ROP(\text{cm/s}) = 400 * 0,008466 = 3,386 \text{ cm/s}$$

$$d_p (\text{cm}) = 0.1 * 2,54 = 0,254 \text{ cm}$$

$$\alpha (\text{rad}) = 60 * \pi / 180 = 1,0471$$

$$g (\text{cm/s}) = 9.81 * 100 = 981 \text{ cm/s}$$

2) Cálculos Iniciales A_a , C_t y U_t

$$A_a = \frac{\pi}{4} (31,115^2 - 12,7^2) = 633,7025 \text{ cm}^2$$

$$C_t = \frac{\pi}{4} \frac{3,386 * 31,115^2}{13230} = 0,194644999$$

$$U_t = \frac{13230}{633,7025 * (1 - 0,19464499)} = 25,923 \text{ cm/seg}$$

3) Cálculos reológicos

¿Fluido newtoniano?, Si

$$\mu_e = R_{600} - R_{300} = 37 \frac{lb}{100ft^2} - 26 \frac{lb}{100ft^2} = 11 \text{ centipoise} = 1,1 \text{ poise}$$

$$n = 1$$

4) Velocidad de asentamiento

$$V_s = 120 * \left(\frac{\mu_e}{10 * d_p * p_f} \right) * \left(\sqrt{1 + 0,0727 * d_p * \left(\frac{p_s}{p_f} - 1 \right) * \left(\frac{10 * d_p * p_f}{\mu_e} \right)^2} - 1 \right)$$

$$V_s = 3,4074 \text{ cm/s}$$

5) Numero de Reynolds de la partícula

$$Rep = \frac{d_p * V_s * p_f}{\mu_e} = \frac{0,254 * 3,4074 * 1,234}{1,1} = 0,9710$$

Como el número de Reynolds de la partícula es menor a 100, tomamos este valor de velocidad de asentamiento.

Ahora se procede a calcular los parámetros que están incluidos del sistema de ecuaciones:

$$C_D = \left(\frac{30 * \mu_e}{d_p * V_s * p_f} \right) + 1,25$$

$$C_D = \left(\frac{30 * 1,1}{0,245 * 3,4074 * 1,234} \right) + 1,25$$

$$C_D = 32,1409$$

$$C_L = 0,09$$

Se tomara un valor de $C_b=0,52$, ya que es el empaquetamiento máximo de partículas esféricas.

$$C_b = 0,52$$

6) Predicción de la excentricidad

Se utilizara la siguiente expresión para calcular el Y_{max} :

$$Y_{max} = \frac{5.68EI}{W_b \cos \theta} \left(\left(\frac{0.176W_b \sin \theta (5.68EI)^{0.5}}{EI(W_b \cos \theta)^{0.5}} \left(\operatorname{seno}_H \left(\frac{X(0.176W_b \cos \theta)^{0.5}}{2(EI)^{0.5}} \right) \right) - \frac{(0.176W_b \cos \theta)^{0.5}}{(EI)^{0.5}} \right) \right) + \frac{0.5X^2 q \sin \theta}{4EI}$$

Donde se procederá a calcular la inercia por la siguiente ecuación:

$$I = \frac{\pi}{4} * \left(\left(\frac{OD_{tuberia}}{2} \right)^4 - \left(\frac{ID_{tuberia}}{2} \right)^4 \right)$$

$$I = \frac{\pi}{4} * \left(\left(\frac{5}{2} \right)^4 - \left(\frac{4,28}{2} \right)^4 \right)$$

$$I = 14,207663 \text{ pulg}^4$$

Donde todos los demás parámetros son conocidos, a excepción del X, el cual representa la proyección horizontal de la tubería de perforación, para cuando el pozo este a 60°. Este valor de X será tomado del survey.

$$X = 405,8 \text{ pies}$$

Como el valor de X para nuestra ecuación debe ser introducido en 1000 pulg, se procede a convertir.

$$X = 405,8 \text{ pies} * \frac{12}{1000} = 4,8696 \text{ 1000pulg}$$

Ahora se procede a hallar el Y_{max} :

$$Y_{max} = \frac{5,68*(30*10^6)*(14,2076)}{(15000)*\cos 1,0471} \left(\frac{0,176*15000*\sin 1,0471(5,68*(30*10^6)*(14,2076))^{0,5}}{(30*10^6)*(14,2076)*((15000)*\cos 1,0471)^{0,5}} * \right. \\ \left. (\operatorname{senOH} \left(\frac{4,8696(0,176*(15000)*\cos 1,0471)^{0,5}}{2((30*10^6)*(14,2076))^{0,5}} \right) - \frac{(0,176*(15000)*\cos 1,0471)^{0,5}}{((30*10^6)*(14,2076))^{0,5}} \right) + \right. \\ \left. \frac{0,5*4,8696^2*(19,5)\sin 1,0471}{4*(30*10^6)*(14,2076)} \right)$$

$$Y_{max} = 2,599689 \text{ pulg}$$

A partir de la Y_{max} , podemos calcular la excentricidad para nuestro pozo a 60° .

$$e = \frac{(Y_{max})}{\frac{ID_{hoyo}}{2} - \frac{OD_{tuberia}}{2}}$$

$$e = \frac{2,599689}{\frac{12,25}{2} - \frac{5}{2}}$$

$$e = 0,7171$$

Antes de proceder a resolver el sistema de ecuaciones, es necesario conocer como vienen expresados los ángulos θ_o y θ_i .

$$\theta_o = \arccos\left(1 - \frac{2*y_b}{ID_{hoyo}}\right)$$

$$\theta_i = \arccos\left(\frac{ID_{hoyo} - (ID_{hoyo} - OD_{tuberia}) * e - 2*y_b}{OD_{tuberia}}\right)$$

Ahora procedemos a resolver el sistema de ecuación de la siguiente forma:

$$A_s = \frac{ID_{hoyo}^2}{4} * (\pi - \arccos(1 - \frac{2*y_b}{ID_{hoyo}}) - \frac{1}{2} * \text{sen} 2 \left(\arccos \left(1 - \frac{2*y_b}{ID_{hoyo}} \right) - \frac{\pi}{2} \right)) -$$

$$\frac{OD_{tuberia}^2}{4} * (\pi - \arccos \left(\frac{ID_{hoyo} - (ID_{hoyo} - OD_{tuberia}) * e^{-2*y_b}}{OD_{tuberia}} \right) - \frac{1}{2} *$$

$$\text{sen} 2 \left(\arccos \left(\frac{ID_{hoyo} - (ID_{hoyo} - OD_{tuberia}) * e^{-2*y_b}}{OD_{tuberia}} \right) - \frac{\pi}{2} \right))$$

$$A_s = \frac{31,115^2}{4} * (\pi - \arccos(1 - \frac{2*y_b}{31,115}) - \frac{1}{2} * \text{sen} (2 * \arccos(1 - \frac{2*y_b}{31,115}) - \pi)) -$$

$$\frac{12,7^2}{4} * (\pi - \arccos \left(\frac{31,115 - (31,115 - 12,7) * 0,7171 - 2*y_b}{12,7} \right) - \frac{1}{2} *$$

$$\text{sen} 2 \left(2 * \arccos \left(\frac{31,115 - (31,115 - 12,7) * 0,7171 - 2*y_b}{12,7} \right) - \pi \right))$$

$$A_s = 242,03580625 * (\pi - \arccos(1 - 0,0642776 * y_b) - \frac{1}{2} * \text{sen}(2 * \arccos(1 -$$

$$0,0642776 * y_b) - \pi)) - 40,3225 * (\pi - \arccos \left(\frac{17,9096035 - 2*y_b}{12,7} \right) - \frac{1}{2} *$$

$$\text{sen} 2 \left(2 * \arccos \left(\frac{17,9096035 - 2*y_b}{12,7} \right) - \pi \right))$$

$$S_b =$$

$$ID_{hoyo} * \arccos \left(1 - \frac{2*y_b}{ID_{hoyo}} \right) - OD_{tuberia} * \arccos \left(\frac{ID_{hoyo} - (ID_{hoyo} - OD_{tuberia}) * e^{-2*y_b}}{OD_{tuberia}} \right)$$

$$S_b = 31,115 * \arccos(1 - 0,0642776 * y_b) - 12,7 * \arccos \left(\frac{17,9096035 - 2*y_b}{12,7} \right)$$

$$S_i = ID_{hoyo} * \text{sen} \left(\arccos \left(1 - \frac{2*y_b}{ID_{hoyo}} \right) \right) - OD_{tuberia} * \text{sen} \left(\arccos \left(\frac{ID_{hoyo} - (ID_{hoyo} - OD_{tuberia}) * e^{-2*y_b}}{OD_{tuberia}} \right) \right)$$

$$S_i =$$

$$31,115 * \text{sen}(\arccos(1 - 0,0642776 * y_b)) - 12,7 * \text{sen}(\arccos \left(\frac{17,9096035 - 2*y_b}{12,7} \right))$$

$$S_s = \pi * (ID_{hoyo} - OD_{tuberia}) - S_b$$

$$S_s = \pi * (31,115 - 12,7) - 31,115 * \arccos(1 - 0,0642776 * y_b) + 12,7 * \arccos\left(\frac{17,9096035 - 2 * y_b}{12,7}\right)$$

$$S_s =$$

$$57,8524 - 31,115 * \arccos(1 - 0,0642776 * y_b) + 12,7 * \arccos\left(\frac{17,9096035 - 2 * y_b}{12,7}\right)$$

$$\theta_o = \arccos\left(1 - \frac{2 * y_b}{ID_{hoyo}}\right)$$

$$\theta_o = \arccos(1 - 0,0642776 * y_b)$$

$$\theta_i = \arccos\left(\frac{ID_{hoyo} - (ID_{hoyo} - OD_{tuberia}) * e^{-2 * y_b}}{OD_{tuberia}}\right)$$

$$\theta_i = \arccos\left(\frac{17,9096035 - 2 * y_b}{12,7}\right)$$

Ahora procedemos a desarrollar cada una de nuestras ecuaciones en función a una única variable.

$$U_b = \sqrt[2]{\frac{4gd_p(\rho_s - \rho_f) \left[\sin(110 - \alpha) + \frac{C_b}{2} \left(\frac{y_b}{d_p} - 1 \right) \cos(90 - \alpha) \right]}{3\rho_f \left(\frac{\sqrt{3}}{2} C_D + \frac{1}{2} C_L \right)}}$$

$$U_b = \sqrt[2]{\frac{4 * 981 * 0,254(2,62 - 1,234) \left[\sin\left(\frac{11}{18} * \pi - 1,04\right) + \frac{0,52}{2} \left(\frac{y_b}{0,254} - 1 \right) \cos\left(\frac{\pi}{2} - 1,04\right) \right]}{3 * 1,234 * \left(\frac{\sqrt{3}}{2} 32,1409 + \frac{1}{2} 0,09 \right)}}$$

$$U_b = \sqrt[2]{\frac{1381,2084[0,546425 + 0,88277 * y_b]}{103,23557}}$$

$$U_b = \sqrt[2]{[7,310724 + 11,81074 * y_b]}$$

$$C_s = \frac{A_a * U_t * C_t - U_b * (A_a - A_s) * C_b}{A_a * U_t - U_b * (A_a - A_s)}$$

$$C_s = \frac{(633,7025) * (25,923) * (0,194644) - U_b * ((633,7025) - A_s) * 0,52}{(633,7025) * (25,923) - U_b * ((633,7025) - A_s)}$$

U_b y A_s , están en función de y_b , por lo que sustituimos U_b :

$$C_s = \frac{(633,7025) * (25,923) * (0,194644) - \sqrt{[7,310724 + 11,81074 * y_b]} * ((633,7025) - A_s) * 0,52}{(633,7025) * (25,923) - \sqrt{[7,310724 + 11,81074 * y_b]} * ((633,7025) - A_s)}$$

$$U_s = \frac{A_a * U_t - U_b * (A_a - A_s)}{A_s}$$

Sustituimos U_b en función de y_b

$$U_s = \frac{(633,7025) * (25,923) - \sqrt{[7,310724 + 11,81074 * y_b]} * ((633,7025) - A_s)}{A_s}$$

Ahora se procede a hallar el factor de corrección necesario para la ecuación de difusión, por la siguiente ecuación

$$A = (0,0000079148 * \alpha^5 - 0,0025662746 * \alpha^4 + 0,3240846394 * \alpha^3 - 19,9024975565 * \alpha^2 + 597,3713031471 * \alpha - 7001,4497180617)$$

$$A = (0,0000079148 * (60)^5 - 0,0025662746 * (60)^4 + 0,3240846394 * (60)^3 - 19,9024975565 * (60)^2 + 597,3713031471 * (60) - 7001,4497180617)$$

$$A = 89,74904$$

$$C_s = \frac{C_b}{A * 2 * A_s} * (ID_{pozo}^2 * int1 - OD_{tuberia}^2 * int2)$$

Donde int1 e int2 representan las siguientes ecuaciones:

$$int1 = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos(\beta_o)^2 * \exp\left(\frac{-V_s*(1-4*C_s+8C_s^2)*sen\alpha}{0.014 \left(\frac{C_s}{0.12}\right)^{0.25} d_p U_s \left(4*As*U_s * \frac{\rho_s C_s + \rho_f(1-C_s)}{(Ss+Si)*\mu e}\right)^{1/3}}\right) * \left(\frac{IDpozo}{2} * sen(\beta_o) -$$

yb)) dβo

$$int2 = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos(\beta_i)^2 * \exp\left(\frac{-V_s*(1-4*C_s+8C_s^2)*sen\alpha}{0.014 \left(\frac{C_s}{0.12}\right)^{0.25} d_p U_s \left(4*As*U_s * \frac{\rho_s C_s + \rho_f(1-C_s)}{(Ss+Si)*\mu e}\right)^{1/3}}\right) * \left(\frac{ODtp}{2} * sen(\beta_i) -$$

yb)) dβi

Si sustituimos los valores de las variables que conocemos.

$$C_s = \frac{0,52}{89,74904*2*As} * (31,115^2 * int1 - 12,7^2 * int2)$$

Donde int1 e int2 representan las siguientes ecuaciones:

int1 =

$$\int_{-\left(\frac{\pi}{2} - \arccos(1-0,0642776*yb)\right)}^{\frac{\pi}{2}} \cos(\beta_o)^2 * \exp\left(\frac{-3,4074*(1-4*C_s+8C_s^2)*sen1,04}{0.014 \left(\frac{C_s}{0.12}\right)^{0.25} *(0,254)*U_s * \left(4*As*U_s * \frac{2,62*C_s+1,234*(1-C_s)}{(Ss+Si)*1,1}\right)^{1/3}}\right) * \left(\frac{31,115}{2} * sen(\beta_o) - yb\right) d\beta_o$$

int2 =

$$\int_{-\left(\frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{17,9096035-2*yb}{12,7}\right)\right)}^{\frac{\pi}{2}} \cos(\beta_i)^2 * \exp\left(\frac{-3,4074*(1-4*C_s+8C_s^2)*sen1,04}{0.014 \left(\frac{C_s}{0.12}\right)^{0.25} *(0,254)*U_s * \left(4*As*U_s * \frac{2,62*C_s+1,234*(1-C_s)}{(Ss+Si)*1,1}\right)^{1/3}}\right) * \left(\frac{12,7}{2} * sen(\beta_i) - yb\right) d\beta_i$$

Si sustituimos Cs, As, Us y Ub, nos queda una sola ecuación en función de yb.

$$C_s = \frac{0,002896966}{As} * (31,115^2 * int1 - 12,7^2 * int2)$$

Donde int1 e int2 representan las siguientes ecuaciones:

int1 =

$$\int_{-\left(\frac{\pi}{2} - \arccos(1 - 0,0642776 * y_b)\right)}^{\frac{\pi}{2}} \cos(\beta_o)^2 * \exp\left(\frac{-3,4074 * (1 - 4 * C_s + 8 C_s^2) * \text{sen}1,04}{0,014 \left(\frac{C_s}{0,12}\right)^{0,25} * (0,254) * U_s * (4 * A_s * U_s * \frac{2,62 * C_s + 1,234 * (1 - C_s)}{(S_s + S_i)^{1,1}})^{1/3}} * \left(\frac{31,115}{2} * \text{sen}(\beta_o) - y_b\right)\right) d\beta_o$$

int2 =

$$\int_{-\left(\frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{17,9096035 - 2 * y_b}{12,7}\right)\right)}^{\frac{\pi}{2}} \cos(\beta_i)^2 * \exp\left(\frac{-3,4074 * (1 - 4 * C_s + 8 C_s^2) * \text{sen}1,04}{0,014 \left(\frac{C_s}{0,12}\right)^{0,25} * (0,254) * U_s * (4 * A_s * U_s * \frac{2,62 * C_s + 1,234 * (1 - C_s)}{(S_s + S_i)^{1,1}})^{1/3}} * \left(\frac{12,7}{2} * \text{sen}(\beta_i) - y_b\right)\right) d\beta_i$$

Iterando el valor de y_b que cumple esta ecuación obtenemos.

$$y_b = 12,9810 \text{ cm}$$

Hallando y_b , podemos conocer todas las variables que dependen únicamente de y_b .

$$A_s = 242,03580625 * (\pi - \arccos(1 - 0,0642776 * 12,9810) - \frac{1}{2} * \text{sen}(2 * \arccos(1 - 0,0642776 * 12,9810) - \pi)) - 40,3225 * (\pi - \arccos\left(\frac{17,9096035 - 2 * 12,9810}{12,7}\right) - \frac{1}{2} * \text{sen}(2 * \arccos\left(\frac{17,9096035 - 2 * 12,9810}{12,7}\right) - \pi))$$

$$A_s = 444,09268 \text{ cm}^2$$

$$C_s = \frac{(633,7025) * (25,923) * (0,194644) - \sqrt{[7,310724 + 11,81074 * 12,9810] * ((633,7025) - 444,09268) * 0,52}}{(633,7025) * (25,923) - \sqrt{[7,310724 + 11,81074 * 12,9810] * ((633,7025) - 444,09268)}}$$

$$C_s = 0,171581$$

$$U_s = \frac{(633,7025) * (25,923) - \sqrt{[7,310724 + 11,81074 * 12,9810] * ((633,7025) - 444,09268)}}{444,09268}$$

$$U_s = 31,57020 \text{ cm/s}$$

$$U_b = \sqrt{[7,310724 + 11,81074 * 12,9810]}$$

$$U_b = 12,6968 \text{ cm/seg}$$

$$S_s = 57,8524 - 31,115 * \arccos(1 - 0,0642776 * 12,9810) + 12,7 * \arccos\left(\frac{17,9096035 - 2 * 12,9810}{12,7}\right)$$

$$S_s = 42,8258 \text{ cm}$$

$$S_i = 31,115 * \sin(\arccos(1 - 0,0642776 * 12,9810)) - 12,7 * \sin\left(\arccos\left(\frac{17,9096035 - 2 * 12,9810}{12,7}\right)\right)$$

$$S_i = 30,6857 \text{ cm}$$

$$S_b = 31,115 * \arccos(1 - 0,0642776 * 12,9810) - 12,7 * \arccos\left(\frac{17,9096035 - 2 * 12,9810}{12,7}\right)$$

$$S_b = 15,0267 \text{ cm}$$

Ahora debemos verificar si la cama en realidad se encuentra en movimiento.

$$-A_s \frac{dp}{dz} - \tau_s S_s - \tau_i S_i - (\rho_s C_s + \rho_f (1 - C_s)) g A_s \cos \alpha = 0$$

Donde τ_s y τ_i son desconocidos pero serán calculados por las siguientes ecuaciones:

$$\tau_s = \frac{1}{2} * (0,00454 + 0,65 * \left(\left(4 * A_s * U_s * \frac{\rho_s C_s + \rho_f (1 - C_s)}{(S_s + S_i) * \mu e} \right) \right)^{-0,7} * (\rho_s C_s + \rho_f (1 - C_s)) * (U_s)^2$$

$$\tau_s =$$

$$\frac{1}{2} * (0,00454 + 0,65 * \left(\left(4 * 444,0926 * 31,57020 * \frac{(2,62 * 0,171581 + 1,234 * (1 - 0,171581))}{(42,8258 + 30,6857) * 1,1} \right) \right)^{-0,7} * (2,62 * 0,171581 + 1,234 * (1 - 0,171581)) * (31,57020)^2$$

$$\tau_s = 7,2743 \text{ gr f/cm}^2$$

$$\tau_i = \frac{1}{2} * 0,966368 * \left(\left(4 * A_s * U_s * \frac{\rho_s C_s + \rho_f (1 - C_s)}{(S_s + S_i) * \mu e} \right) \right)^{-1,07116} * n^{2,360211} * \left(\frac{dp * (S_s + S_i)}{4 * A_s} \right)^{-2,34539} * (\rho_s C_s + \rho_f (1 - C_s)) * ((U_s)^2 - (U_b)^2)$$

$$\tau_i =$$

$$\frac{1}{2} * 0,966368 * \left(\left(4 * 444,0926 * 31,57020 * \frac{(2,62 * 0,171581 + 1,234 * (1 - 0,171581))}{(42,8258 + 30,6857) * 1,1} \right) \right)^{-1,07116} * 12,360211 * \left(\frac{0,254 * (42,8258 + 30,6857)}{4 * 444,0926} \right)^{-2,34539} * (2,62 * 0,171581 + 1,234 * (1 - 0,171581)) * ((31,5702)^2 - (12,6968)^2)$$

$$\tau_i = 16880,5511 \text{ grf/cm}^2$$

Ahora procedemos a calcular dp/dz

$$\frac{dP}{dz} = \frac{-\tau_s S_s - \tau_i S_i - (\rho_s C_s + \rho_f (1 - C_s)) g A_s \cos \alpha}{A_s}$$

$$\frac{dP}{dz} =$$

$$\frac{-7,2743 * 42,8258 - 16880,5511 * 30,6857 - (2,62 * 0,171581 + 1,234 * (1 - 0,171581)) * 981 * 444,0926 * \cos 1,04}{444,0926}$$

$$\frac{dP}{dz} = -1889,11 \left(\frac{grf}{cm} \right)$$

Para conocer si la cama se encuentra en movimiento, calculamos F_b y F_{max} , si $F_b > F_{bmax}$, la cama se encuentra en movimiento, en caso contrario, se toma $U_b = 0$ y se procede a calcular nuevamente el sistema de ecuaciones.

$$\tau_b = \frac{1}{2} * 0,046 * ((4 * (A_a - A_s) * U_b * (\rho_s C_b + \rho_f (1 - C_b))) / ((S_b + S_i) * \mu_e))$$

$$\tau_b = \frac{1}{2} * 0,046 * ((4 * (633,7025 - 444,0926) * 12,6968 * (2,62 * 0,52 + 1,234 * (1 - 0,52))) / ((15,0267 + 30,6857) * 1,1))$$

$$\tau_b = 2,2159 \text{ } \frac{grf}{cm^2}$$

De la siguiente ecuación, despejamos F_b , y procedemos a calcularla

$$-A_s \frac{dP}{dz} - \tau_b S_b + \tau_i S_i - F_b - \rho_b g A_b \cos \alpha = 0$$

$$F_b = -A_s \frac{dP}{dz} - \tau_b S_b + \tau_i S_i - \rho_b g A_b \cos \alpha$$

$$F_b = -444,0926 * (-1889,11) - 2,2159 * 15,0267 + 16880,5511 * 30,6857 - (2,62 * 0,52 + 1,234 * (1 - 0,52)) * 981 * (633,7025 - 444,0926) * \cos 1,04$$

$$F_b = 632483,739 \text{ } \text{dinas}$$

$$F_{bMAX} = 0.15 \left((\rho_s - \rho_f) g A_b C_b \sin \alpha + \frac{\tau_i S_i}{\tan \phi} \right)$$

$$F_{bMAX} = 0.15 \left((2,62 - 1,234) * 981 * (633,7025 - 444,0926) * 0,52 \sin 1,04 + \frac{2,2159 * 15,0267}{\tan 0,5235} \right)$$

$F_{bMAX} = 151990,274 \text{ dinas}$

Como F_b es mayor a F_{bmax} , quiere decir que la cama se encuentra en movimiento, por lo que tomamos todos los valores calculados.