

**DISEÑO DE UNA “MEZCLA DE UNA LECHADA ESPUMOSA” PARA LA CEMENTACIÓN
DE POZOS PETROLEROS EN CAMPO LA CIRA EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER
(COLOMBIA)**

Autor:

Gustavo Adolfo Urbina Gutiérrez
Químico Industrial
Supervisor de laboratorio, Tucker Energy Services
Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá D.C Colombia
gurbina@tuckerenergy.com

Tutor:

Fernando Ortiz Cárdenas
Profesional Especializado
División de Investigación científica
Vicerrectoría de Investigaciones
Universidad Militar Nueva Granada
fernando.ortiz@unimilitar.edu.co
www.umng.edu.co

ESPECIALIZACION GERENCIA DE LA CALIDAD.

FACULTAD DE INGENIERIA.

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

2016



**UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA**

DISEÑO DE UNA “MEZCLA DE UNA LECHADA ESPUMOSA” PARA LA CEMENTACIÓN DE POZOS PETROLEROS EN CAMPO LA CIRA EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER (COLOMBIA)

DESING OF A FOAM SLURRY FOR CEMENTING OIL WELLS IN THE FIELD CIRA IN SANTADER (COLOMBIA)

Gustavo Adolfo Urbina Gutiérrez
Químico Industrial
Supervisor de laboratorio, Tucker Energy Services
Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá D.C Colombia
gurbina@tuckerenergy.com

RESUMEN

En el siguiente trabajo de grado, se puede encontrar una breve descripción de los requerimientos para la cementación de pozos petroleros en el campo La Cira ubicada en el departamento de Santander en Colombia. Posteriormente mediante una matriz de mezcla de aditivos se realizaron 12 diseños de lechadas espumosas teniendo en cuenta que para cada diseño se tuvieron que determinar las variables de resistencia a la compresión tiempo de bombeabilidad, viscosidad plástica y su densidad, esta matriz de prueba determino la variación de aditivos, según su aplicabilidad. La selección del diseño fue el resultado de las pruebas de laboratorio realizadas según la norma API 10A y API 10B.

La validación de la lechada espumosa que fue elegida se le debe realizar una simulación Hidráulica donde determino la incidencia que tienen todos los fluidos sobre la formación Tenerife, el cual su ECD para la presión de poro no debe ser menor a 8,4ppg y la presión final no mayor a 10 ppg para evitar que una fractura de la formación.

Finalmente, se desarrolla el capítulo financiero teniendo en cuenta la rentabilidad del proyecto.

Palabras Clave: Revestimiento de producción, Lechada, Cementación, Espumosa, Tiempo de Bombeabilidad, Resistencia a la compresión, Perdida de Filtrado, Propiedades Reologicas.

ABSTRACT

In the following work of degree, a brief description of the requirements for the cementation of oil wells in the field La Cira located in the department of Santander in Colombia can be found. Then, through a matrix of mixtures of additives, 12 designs of foamed slurries were made taking into account that for each design the variables of compressive strength, time of pumpability, plastic viscosity and its density had to be determined, this test matrix determined the variation of additives, according to their applicability. The design selection was the result of the laboratory tests performed according to API 10A and API 10B standards.

A Hydraulic simulation should be performed on the foamed slurry that was chosen, where the influence of all fluids on the Tenerife formation was determined, which ECD for the pore pressure should not be less than 8.4ppg and the final pressure should not be greater than 10 ppg, to avoid a fracture of the formation.

Finally, the financial chapter is developed taking into account the profitability of the project.

Keywords: Casing, Slurry, Cementing, Foam, Thickening Time, Compressive Strength, fluid loss, Rheological Properties.

INTRODUCCIÓN

La idea de diseñar una lechada de cementación espumosa para la sección de producción, surge de la necesidad de desarrollar nuevas técnicas para la cementación primaria y la búsqueda continua del buen servicio al cliente, esto implica calidad en las operaciones y en los resultados de las mismas.

En los últimos años, se han implementado lechadas de cementación con aditivos específicos en pozos productores de petróleo, con el fin de asegurar un diseño de lechada estable, adicionalmente evitar cualquier tipo de derrumbe en formaciones no consolidadas, evitar tener fluidos atrapados en el espacio anular y generar una buena adherencia a la formación, para este caso las condiciones de gradiente de fractura sean menores a 10ppg, estos datos están soportados por registros de evaluación de cemento que son prueba contundente de los buenos resultados obtenidos y se traduce en la disminución de costos adicionales al no realizar cementaciones remediales.

En el artículo realizado por Christian Hun y Abdullah Al Suwaidi por título *Ligero como una pluma duro como una roca* (2015), se puede concluir que:

Efectivamente a una determinada concentración de aditivos, produce un cemento resistente a una densidad cercana al agua. Por otro lado en base al registro eléctrico de calidad de cemento se observa que se tiene un buen cemento esto nos indica que el diseño de lechada espumada fue efectivo, sin embargo se presentan ciertas malas adherencias pero esto es debido a la presencia de gas que afecta las propiedades de diseño de la lechada. Por lo que se debe tomar en cuenta el uso de aditivos antimigratoria de gas [1].

En el transcurso de los años ha evolucionado las técnicas de cementación y sus características, por esta razón Tucker Energy Services ve la necesidad de sobresalir entre las otras empresas con altos estándares de calidad, con el fin de satisfacer la necesidad de sus clientes. Motivo por el cual, se ha tomado la decisión de diseñar mejores lechadas de cementación a partir de pruebas de laboratorio bajo las normas API 10A [2] y API 10B[3]

El diseño de nuevas lechadas que mejoren la cementación primaria ayudara a futuras operaciones con características similares a las ya realizadas en los pozos de producción de crudo, con el fin de evitar costos adicionales y dar cumplimiento a los estándares de calidad.

En la actualidad, la industria petrolera es una de las más importantes en el mundo, por lo que es indispensable establecer altos niveles de calidad, razón por la cual, la empresa Tucker Energy Services ha estado en el desarrollo de nuevas tecnologías como ha sido el desarrollo de cementos expansivos, resistentes a combustión in situ y otra técnicas de cementación que han mejorado su posicionamiento en el mercado.

Recientemente la empresa ejecuta las normas API 10A y API 10B en sus laboratorios, las normas establece los parámetros para medir las características de lechadas espumosas de cemento al momento de fraguar, todo esto con el fin de satisfacer las necesidades de sus clientes y mejorar el control en el comportamiento del aislamiento de las zonas de interés para la extracción de crudo.

En el campo LA CIRA en el departamento de Santander. Colombia. Durante las operaciones de perforación se pueden producir perdidas de circulación y por lo tanto se puede perder el control del pozo, lo que significan que los fluidos no retornan a la superficie, esto sucede cuando las formaciones débiles no se encuentran protegidas de las densidades de lodo o de las lechadas que superen el gradiente de fractura de la formación, en esos casos, los fluidos de perforación se pierden en la fisuras y no vuelven al sistema de circulación [9].

En varias de sus licitaciones es necesario tener un diseño de lechadas espumosas para la cementación de pozos petroleros. Tucker Energy Services desea diseñar mediante pruebas de laboratorio, una lechada de cementación espumosa para pozos petroleros que cumpla con los parámetros establecidos en el campo LA CIRA.

Desde el principio para realizar el diseño de una nueva fórmula de cementación se tiene que tener en cuenta los requerimientos del campo de perforación propiamente en LA CIRA, y con estos requerimientos se debe identificar los parámetros técnicos para el diseño de una lechada espumosa.

Mediante la aplicación de una matriz de pruebas y con la variación de la concentración de los aditivos principales, la idea es determinar la mejor composición de estos aditivos para dar cumplimiento a los requerimientos del campo, cumpliendo con la norma API 10A-API 10B. La lechada escogida será validada mediante una simulación hidráulica teniendo en cuenta los fluidos a bombear en el pozo.

Realizando una análisis de costo la empresa TUCKER ENERGY SERVICES desea determinar la viabilidad financiera del proyecto utilizando como indicador el Valor presente Neto(VPN).

1. MATERIALES Y MÉTODOS.

El diseño se realizó entre los meses de agosto y octubre de 2016, el primer mes se orienta a la realización de la matriz de ensayos y variación de los aditivos más importantes que determinan el número de diseños de lechadas de cementación, esto

con la finalidad de determinar del mejor diseño de lechada que se ajuste a los requerimientos descrito por la operadora OXY de Colombia

La metodología para el estudio consistió en cinco pasos. El primero de estos se encaminó a la determinación de los parámetros de una cementación para un Casing 7” en campo La Cira en el departamento de Santander (Colombia). Por otra parte, en segundo lugar se realizó una matriz de diseños y concentración de aditivos para cada una de las variables a calcular. El tercer momento será en la obtención de resultados de la matriz en cual consistirá en la aplicación de ANOVA(análisis de varianza y prueba de hipótesis) en cual se evaluará la incidencia que tienen las diferentes mezcla de aditivos sobre las variables a determinar, un momento definitivo es evaluar el diseño escogido mediante una simulación hidráulica donde se evaluara si la lechada puede fracturar la formación cementada. Y por último se hará un análisis financiero mediante el indicador VPN(Valor Presente Neto).

La investigación se desarrolló en centro de diseño de cementación de la empresa Tucker Energy Services. En la Ciudad de Cota (Colombia), la cual presta servicios de cementación, Bombeo de fluidos, Fracturamiento, completamiento, registro de producción.

La empresa es escogida para desarrollar la investigación por dos razones: En primer lugar, la empresa no contaba con un diseño de una lechada espumada para ofrecer a sus clientes cuando estos lo requerían. En segundo lugar, que el grupo Tucker aumente su portafolio en el establecimiento de técnicas de cementación en el contexto global.

1.1 Determinación de los parámetros de cementación para un Casing 7” en campo la Cira en Santander (Colombia).

Los parámetros establecidos por OXY de Colombia se ven consignados en la tabla 1. Se observa los requisitos que debe cumplir la lechada para que pueda ser bombeada al pozo.

Tabla 1. Requisitos de la operadora OXY para la lechada de cemento campo La Cira.

Requerimiento del cliente	Parámetros
Densidad de Lechada espumosa	9.4ppg +/- 0.5 ppg
Tiempo de Bombeabilidad	360minutos – 420 minutos
Resistencia a la compresión	>2000psi @ 24 horas
Viscosidad Plástica	100cp - 120 cp

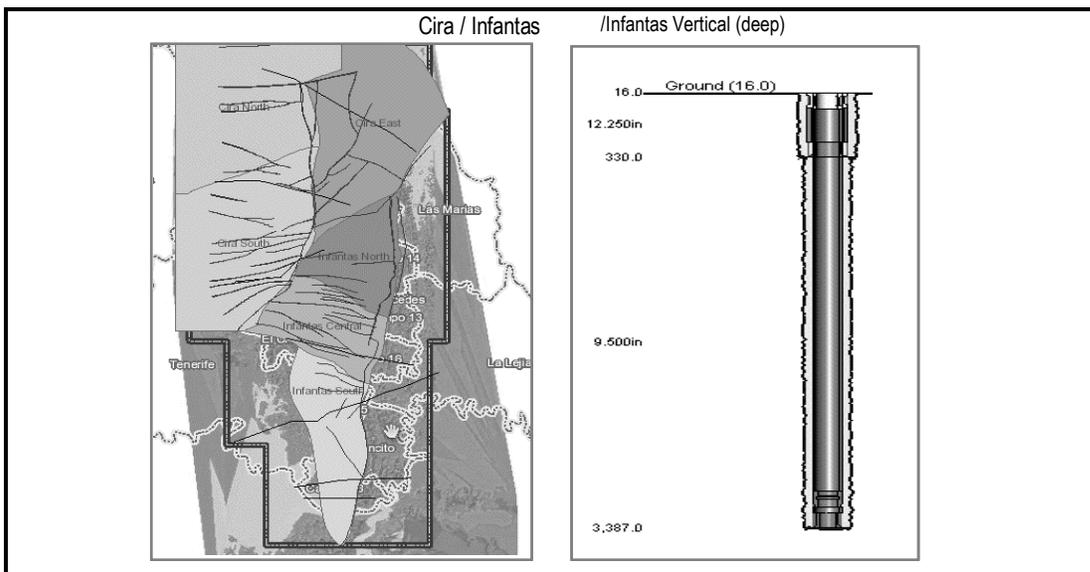
Fuente: OXY de Colombia, 2013 [4]

Estos requisitos son establecidos por la empresa OXY de Colombia, debido a que por años han venido cementando pozos en esta área, es por eso que por su experiencia hacen estas exigencias para la cementación en campo La Cira. Por otra parte es necesario conocer el esquema del pozo esto se puede observar en la figura 1.

1.1.1 Esquema del pozo suministrado por OXY de Colombia

En la figura 1. Se observa el estado mecánico del pozo, este estado mecánico informa que es un pozo vertical y que se va a perforar en dos secciones una superficial para el revestimiento de diámetro 9 5/8" a 330 ft de profundidad y una sección productora de diámetro de 7" a 3367 ft de profundidad. Aquí también comunica que la formación a intervenir es Tenerife.

Figura 1. Estado mecánico pozo La Cira



Fuente: Oxy de Colombia, 2013,[4]

Tabla 2. Condiciones de para perforar pozo para el campo La Cira.

Tipo de Pozo	Configuración del pozo	Área	Profundidad	Perfil de Pozo	Presión de Factura	Presión de poro	Gradiente de Temperatura
Cira	2 Secciones	Cira Este Cira Norte Cira Sur	0-3387 ft	Vertical.	10.5 ppg	8.34 ppg	1.2°F/100ft

Fuente: OXY de Colombia, 2013[4]

1.2 Matriz de diseños y concentración de aditivos para cada una de las variables.

La tabla 3. Presenta el número total de diseños a desarrollar, aquí expone la concentración de los componentes que hacen parte de la lechada espumada, y las variables a determinar por cada diseño.

Tabla 3. Matriz de Diseños para determinar cada variable.

VARIABLES	Resistencia a la compresión. Tiempo de Bombeabilidad Viscosidad Plástica. Densidad.			
[] Surfactante	0.05 gal/Sx		0.1 gal/Sx	
Glass Bubbles				
Cemento Clase "g"	30 %	60%	30%	60%
0 %	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3	Diseño 4
20 %	Diseño 5	Diseño 6	Diseño 7	Diseño 8
50 %	Diseño 9	Diseño10	Diseño 11	Diseño 12

Fuente: Elaboración Propia, 2016

Cada variable a determinar debe cumplir con los procedimientos de la norma API 10B. En el que se especifica los equipos y procedimientos a realizar en el laboratorio de cementación de la empresa TUCKER ENERGY SERVICES.

El aditivo para la perdida de filtrado (GM87), será de una concentración constante de 1% para cada uno de los diseños. Teniendo en cuenta que es la concentración sugerida por el fabricante, en la ficha técnica del producto suministrada por Tucker Energy Service [5]. Para el cumplimiento de propiedades antimigratorias.

Se llevó a cabo una intensa actividad en el laboratorio para determinar cada una de las variables expuestas en la tabla 3. El laboratorio permitió evidenciar los valores adquiridos para ejecutar la aplicación de la ANOVA (Análisis de Varianza y Prueba de hipótesis), el cual expresa el grado de incidencia que tiene la mezcla de los aditivos sobre cada una de las variables.

1.3 Aplicación de ANOVA (Análisis de Varianza y prueba de hipótesis). Para los resultados obtenidos de cada diseño.

Para una lechada de densidad 9.4ppg su principal dificultad es el desarrollo de resistencia de la compresión por encima de 2000 psi en 24 horas de fragüe, por lo tanto la meta es que la lechada pueda resistir las operaciones posteriores a la cementación, como lo son: Wireline, Cañoneo, Estimulación y producción.

Para la aplicación de ANOVA se debe realizar de antemano la prueba de hipótesis nula e hipótesis alternativa, evaluando la importancia de las medias de los factores obtenidos en cada uno de los diseños.[6].

1.3.1 Formulación de Hipótesis Nula (H_0) e Hipótesis alternativa(H_i) para la variable de la resistencia a la compresión.

H_0 = la mezcla de aditivos no hace diferencia en la resistencia a la compresión $\mu_1=\mu_2$.

H_i = la mezcla de aditivos si hace diferencia en la resistencia a la compresión $\mu_1\neq\mu_2$.

Ya Teniendo las hipótesis formuladas, continuamos con la determinación del cuadro ANOVA(Análisis de Varianza) con los resultados conseguidos.

Tabla 4. Resultados de Resistencia a la compresión de cada diseño

Surfactante Cto Clase "G" Bubbles Glass	0.05%		0.10%	
	30%	60%	30%	60%
0%	901	2130	503	1030
30%	502	1615	102	780
50%	235	803	50	505

Fuente: Elaboración Propia 2016.

En la tabla 4. Presenta los resultados obtenidos de resistencia a la compresión en cada uno de los diseños presentados en la Tabla 3. Estableciendo que el **diseño 2** es el único que cumple con el requisito de la operadora OXY para la cementación del Casing de 7". En el campo La Cira Departamento de Santander (Colombia).

Continuando con la caracterización de los diseños, la tabla 5 establece el grado de incidencia que tienen las concentraciones de los aditivos, sobre la resistencia a la compresión de las lechadas. Esto se realiza comparando el F calculado contra F Tabulado de la distribución F de Fisher.[8].

Tabla 5. ANOVA para los resultados de resistencia a la compresión

CUADRO ANOVA con 95% de significancia					
FUENTES DE VARIACION	suma de Cuadrados	grados de libertad	Cuadrados Medio	F calculado	F tabulado $\alpha=0.05$
Entre tratamiento SCE	2732504,667	3	910834,8889	5,27764247	4,066
dentro tratamiento SCD	1380669,333	8	172583,6667		
total	4113174	11			

Fuente: Elaboración Propia.2016.

Se tiene que tener en cuenta que cada variable determina la aprobación de la lechada de cementación por lo tanto se debe continuar con el análisis de tiempo de bombeabilidad.

1.3.2 Formulación de Hipótesis Nula(H_0) e Hipótesis alternativa(H_1) para el tiempo de bombeabilidad.

Uno de los factores más críticos en el diseño de una lechada es el tiempo de bombeabilidad el cual determina el tiempo que tiene el operador para preparar, bombear y desplazar la lechada diseñada, hay que tener en cuenta que los tiempos requeridos por la empresa OXY llevan 320 minutos de seguridad si en el momento surge algún tipo de imprevisto.

Es necesario formular la hipótesis nula (H_0) y la Hipótesis alterna (H_1) para determinar si los aditivos indican en el factor de tiempo de bombeabilidad.

H_0 = la mezcla de aditivos no hace diferencia en el tiempo de bombeabilidad $\mu_1=\mu_2$.

H_1 = la mezcla de aditivos si hace diferencia en el tiempo de bombeabilidad $\mu_1\neq\mu_2$.

Obteniendo las Hipótesis formuladas continuamos con la determinación de la suma total de cuadrados con los datos arrojados por el laboratorio.

Tabla 6. Resultados de tiempo de bombeabilidad de cada diseño.

Surfactante Cto Clase "G" Bubbles Glass	0.05%		0.10%	
	30%	60%	30%	60%
0%	445	391	452	490
30%	485	415	490	565
50%	502	440	502	525

Fuente. Elaboración Propia 2016.

En la tabla 6 presenta que los **diseños 2 y 6** cumplen con los requerimientos de la operadora OXY de Colombia, con el tiempo de realizar la cementación completa hay que analizar que en la tabla 7. Enseña como las diferentes concentraciones de aditivos influyen sobre la variable de tiempo de bombeabilidad.

Tabla 7..ANOVA para los resultados de tiempo de bombeabilidad

CUADRO ANOVA con 95% de significancia					
FUENTES DE VARIACION	suma de Cuadrados	grados de libertad	Cuadrados Medio	F calculado	F tabulado $\alpha=0.05$
Entre tratamiento SCE	18825	3	6275	7,07773287	4,07
dentro tratamiento SCD	7092,666667	8	886,5833333		
total	25917,66667	11			

Fuente. Elaboración Propia 2016.

1.3.3 Formulación de Hipótesis Nula e Hipótesis alternativa para la viscosidad plástica del fluido.

La viscosidad plástica es el ítem que me determina las interacciones de energía internas que están sucediendo en el momento de realizar la cementación, los valores calculados para la Tabla 8. Estos valores son determinados aplicando el método de la ley de Bingham.

Para observar el comportamiento de los diseños teniendo en cuenta las concentraciones de cada aditivo formularemos la hipótesis nula (H_0) y la hipótesis alternativa (H_i).

H_0 = la mezcla de aditivos no hace diferencia en la viscosidad plástica $\tau_1=\tau_2$.

H_i = la mezcla de aditivos si hace diferencia en la viscosidad plástica $\tau_1\neq\tau_2$.

Como se observa en la tabla 8. Se puede decir que el **diseño 2** cumple con los requisitos del cliente OXY. Teniendo las Hipótesis formuladas se debe continuar con la determinación de la suma total de cuadrados con los datos obtenidos en el laboratorio.

Tabla 8. Resultados de Viscosidad Plástica para cada Diseño.

Surfactante	0.05%		0.10%	
	30%	60%	30%	60%
Cto Clase "G" Bubbles Glass				
0%	95	118	202	275
30%	150	165	261	301
50%	235	235	241	356

Fuente: Elaboración Propia.

En el cuadro ANOVA de la Tabla 9. Indican que el F tabulado es menor que el F calculado queriendo decir que la viscosidad plástica si sufre de cambios significativos en una mala mezcla de los aditivos calculados para el diseño 2.

Tabla 9. ANOVA para los resultados de Viscosidad Plástica

CUADRO ANOVA con 95% de significancia					
FUENTES DE VARIACION	suma de Cuadrados	grados de libertad	Cuadrados Medio	F calculado	F tabulado l=0.05
Entre tratamiento SCE	42825	3	14275	5,166485704	4,07
dentro tratamiento SCD	22104	8	2763		
total	64929	11			

Fuente: Elaboración Propia

1.3.4 Formulación de Hipótesis Nula e Hipótesis alternativa para la densidad.

La densidad es el factor que va a evitar que pueda fractura la formación de producción, es el motivo por el cual la densidad estándar y exigida por la operadora es de 9.4 ppg +/- 0.5ppg, es el mayor control que se debe tener en la cementación de los pozos petroleros ubicados en el campo LA CIRA.

Para determinar la relevancia que tiene la mezcla de los aditivos sobre la densidad de la lechada espumada la idea es formular la hipótesis Nula(H_0) y la hipótesis alterna(H_i).

H_0 = la mezcla de aditivos no hace diferencia en la densidad $\mu_1=\mu_2$.

H_i = la mezcla de aditivos si hace diferencia en la densidad $\mu_1\neq\mu_2$.

En la tabla 10. demuestra que todos los diseños cumplen con los requisitos del pozo para la cementación. Por lo tanto se evitará que en algún momento la fracturación del pozo sea posible

Tabla 10. Resultados para la Densidad en cada Diseño

Surfactante	0.05%		0.10%	
Bubbles Glass	30%	60%	30%	60%
Cto Clase "G"				
0%	9.41	9.4	9.43	9.45
30%	9.4	9.42	9.41	9.42
50%	9.39	9.41	9.42	9.42

Fuente: Elaboración Propia.

Los diferentes diseños de laboratorio consignados en la tabla 2. No tienen ninguna incidencia sobre la densidad esto se puede observar en la tabla 11.

Tabla 11. ANOVA para los resultados de densidad.

CUADRO ANOVA con 95% de significancia					
FUENTES DE VARIACION	suma de Cuadrados	grados de libertad	Cuadrados Medio	F calculado	F tabulado l=0.05
Entre tratamiento SCE	0,0015	3	0,0005	3,333333333	4,066
dentro tratamiento SCD	0,0012	8	0,00015		
total	0,0027	11			

Fuente: Elaboración Propia.

2. DISCUSIÓN Y RESULTADOS.

Para cementar pozos es necesario utilizar una lechada de cementación que se adapte al pozo y resulte en una cementación que cumpla con los requisitos de calidad de la empresa Oxy de Colombia, es por ello que las lechada deben pasar por un proceso de selección y validación donde se evalúan sus propiedades más relevantes en la operación.

A continuación en la tabla 12. Se describirán los resultados adquiridos de los diferentes diseños de las lechadas de cementación espumadas para ser utilizadas en la cementación de la sección del Casing de 7" en pozo del Campo La Cira y se realizara la selección de la lechada que mejor se adapte a dichos requerimientos.

2.1 SELECCIÓN DE DISEÑO.

En la Tabla 12. Se observa la compilación de los resultados de las pruebas, y se encuentran resaltados los valores que cumplen o no cumplen con los parámetros establecidos anteriormente.

Tabla 12. Compilación de resultados obtenidos en laboratorio.

Diseño	Resistencia a la compresión(psi)	Tiempo de Bombeabilidad(min)	Viscosidad Plástica(Cp)	Densidad(ppg)
1	901	445	95	9.41
2	2130	391	118	9.4
3	503	452	202	9.43
4	1030	490	275	9.45
5	502	485	150	9.4
6	1615	415	165	9.42
7	102	490	261	9.41
8	780	565	301	9.42
9	235	502	235	9.39
10	803	440	235	9.41
11	50	502	241	9.42
12	505	525	356	9.42

Fuente: Elaboración Propia.(2016).

Como se observa en la tabla 12, el diseño 2 cumple con todos los parámetros exigidos para la cementación de una revestimiento productor para el campo La Cira. Sin embargo hay que validarlo mediante una simulación hidráulica CEMPRO[7], para analizar el grado en que la lechada selecciona pueda influir sobre la formación productora

Hay que tener en cuenta que una vez establecidos los resultado a continuación en la tabla 13. se encuentra la evaluación de análisis de varianza para las variables dando a conocer la influencia que los aditivos tienen sobre la variables determinadas esto se logro comparando el Fo Calculado contra el Fo Tabulado[8]

Tabla 13. El Fo Calculado vs. Fo Tabulado para cada Variable

Variable	Fo Calculado	Fo Tabulado
Resistencia a la compresión	5.2776	4.066
Tiempo de Bombeabilidad	7.07	4.066
Viscosidad Plástica	5.18	4.066
Densidad	3.333	4.066

Fuente: Elaboración Propia.(2016).

En la Tabla 13. Se expone la comparación de la Fo. Calculado con los tabulados, si los Fo calculados son mayores indican que hay un efectos en la variables, de lo controlario si el Fo. Tabulado es mayor que el Fo. Calcula quiere decir que no hay efecto sobre las variables determinadas.

Hay que tener en cuenta que la variable más afectada por la interacción de los aditivos es el tiempo de bombeabilidad, esto quiere decir que al momento de realizar la mezcla en campo cualquier irregularidad en la proporción de los aditivos directamente afectara en el tiempo de bombeabilidad, en segundo término la resistencia a la compresión y por último a la viscosidad plástica.

Observando la tabla 13. La densidad no es afectada por la proporción de los aditivos esto es debido a que campo la densidad se mantiene de una vez es alcanzada a su valor requerido. Por tal motivo cuando estemos bombeando el fluido en campo la densidad no afectará la formación de producción.

Como se observa en la Figura 2 Para validar la lechada elegida se realiza una simulación hidráulica de los fluidos mediante el programa de simulación Cempro, En este programa de simulación debemos consignar los fluidos que se van a bombear al pozo, en esta simulación estamos determinando la cantidad total de los fluidos a bombear teniendo en cuenta los volúmenes del pozo.

Figura 2. Simulación de la cementación Csg 7.

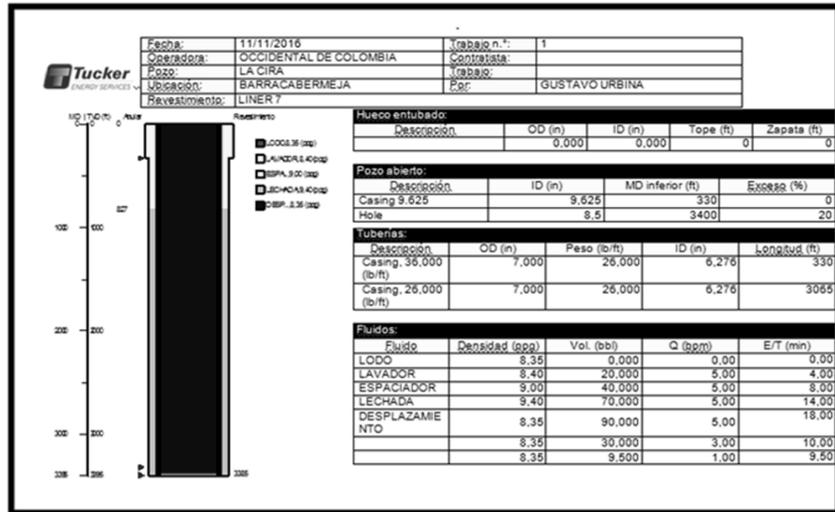


Figura 2. Cempro,2016.[7]

En la Figura 3. Se observa el comportamiento de los fluidos mientras estamos bombeando el pozo, esto demuestra que en ningún momento la formación puede llegar a sufrir algún tipo de fractura por tal razón el diseño escogido No.2 como lo indica el simulador está cumpliendo con los requisitos establecidos.

Figura 3. Simulación del comportamiento de fluidos tiempo de bombeo y ECD.

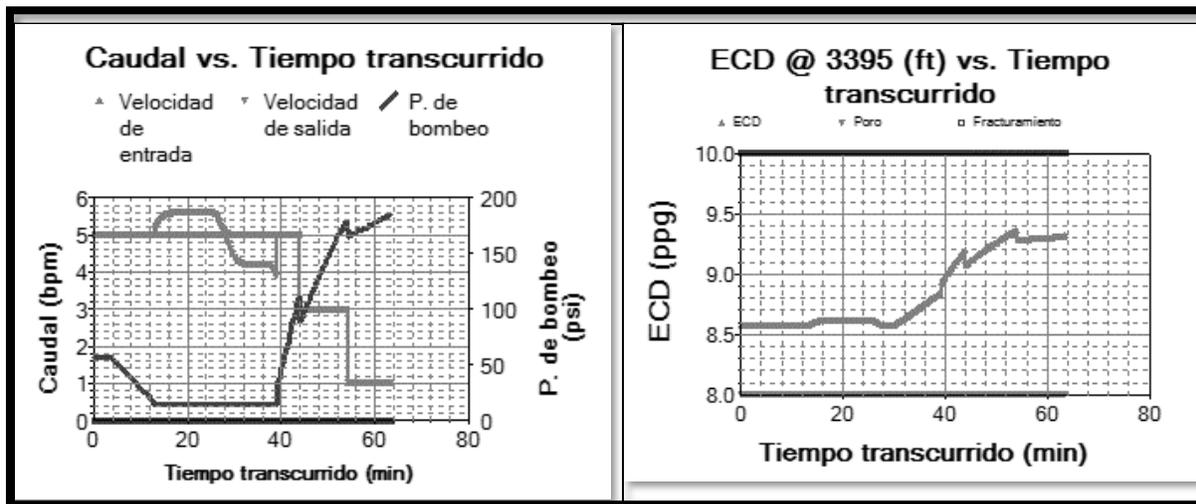


Figura 3.Cempro, 2016,[7]

Para entender la información suministrada por el simulador en la figura 3. Se tiene que tener pensar que el tiempo total de bombeo es de 63 minutos por lo tanto contamos con 328 minutos de seguridad en caso de que tengamos algún tiempo de inconveniente en el momento de la operación de bombeo de los fluidos al pozo.

El ECD(Densidad Circulante Equivalente) entiéndase como la densidad efectiva ejercida por un fluido en circulación contra la formación que tiene en cuenta la caída de

presión en el espacio anular arriba del punto de consideración[9]. La ECD es importante para evitar golpes de presión y pérdidas en particular en pozos que tienen una venta estrecha entre el gradiente de fractura y el gradiente de presión de poro. En la Figura 3 se observa que en no hay incidencia entre la lechada y el gradiente de fractura.

2.2 EVALUACIÓN FINANCIERA

La empresa Tucker Energy Services se ha mantenido como una empresa innovadora en el área de servicios petroleros, especialmente en el servicio de cementación; sin embargo le faltaban procedimientos para la mezcla de una lechada espumada. Es por ello que en busca de prestar un mejor servicio a sus clientes, implementa este tipo de lechada. Por tal motivo, es necesario realizar la investigación respectiva con el fin de mejorar sus diseños de lechadas, la calidad del servicio prestado, y la rentabilidad para la empresa que generaría la implementación de un diseño elaborado siguiendo estos procedimientos.

Aquí se evalúan los costos que conlleva utilizar una lechada espumosa de la empresa Tucker Energy Services para cementar la secciones de Casing de 7" en el Campo La Cira; la evaluación financiera tiene en cuenta los costos de operación necesarios para cementar la sección de Casing 7".

Para llevar esto a cabo la evaluación financiera se contempló el diseño del pozo, el análisis de costos, el análisis de ingresos y el margen de ganancia. La unidad monetaria utilizada es el Dólar Norte Americano (USD), el tiempo de análisis es de cinco años.

Tucker Energy Services estima que se puede cementar mínimo un pozo por mes en el Campo, que cumpla las condiciones necesarias para ser cementado con lechada de cementación espumosa y que posea una sección de 7"; el periodo de evaluación será de cinco años, donde se estima que la compañía cementara 12 pozos anuales.

2.2.1 ANÁLISIS DE COSTOS

El análisis de costos se centra en los costos CAPEX y OPEX; con estos se definen el costo total de la operación y de inversión para cementar la sección del Casing del Campo La Cira.

- **Capex.** Son las inversiones realizadas para adquirir o mejorar los bienes físicos, tales como tierras, construcciones, y equipamiento, o para incrementar la escala de operaciones. Son utilizados para que la compañía obtenga beneficios a largo plazo e incrementar la ganancia o disminuir los costos al hacer negocios.[10]

Para realizar el diseño de la lechada de cementación espumosa y cementar la sección de Casing de 7", se debe conocer el total del aditivo especial Glass Bubbles. Para calcularla es necesario conocer la cantidad de cemento para cementar dicha sección.

Ecuación 1. Cantidad de aditivo para cementar la sección Casing de 7"[11].

$$\text{Cantidad de aditivo} = \text{Concentración de aditivo} * \text{Cantidad de cemento} * 94\text{lbsx}$$

Dónde:

- ✓ Cantidad de aditivo esta expresado en lb o en gal.
- ✓ Concentración de aditivo esta expresado en porcentaje o en gal/Sx.
- ✓ Cantidad de cemento esta expresado en Sx.
- ✓ 94 lb/Sx es la conversión de sacos a libras.

La cantidad de cemento puede ser calculada mediante la relación entre el volumen total de lechada necesaria para la operación y el requerimiento de cemento.

Para calcular la . Cantidad de cemento para cementar la sección del Casing 7 para el campo LA CIRA. Se ejecutara de la siguiente la ecuación 2.

Ecuación 2. Cantidad de cemento para la operación de la sección Casing de 7"[13]

$$\text{Cantidad de cemento} = \frac{\text{Volumen total de lechada de cemento}}{\text{Requerimiento de cemento}}$$

Donde:

- ✓ Cantidad de cemento esta expresado en Sx.
- ✓ Volumen total de lechada de cemento esta expresado en ft³.
- ✓ Requerimiento de cemento esta expresado en ft³/Sx.

El volumen total de la lechada es de 392 ft³ y el requerimiento es igual a 1.57 ft³/Sx

Calculo 1. Cantidad de cemento para la lechada espumosa.

$$\text{Cantidad de cemento} = \frac{392 \text{ ft}^3}{1.70 \text{ ft}^3/\text{Sx}} = 230 \text{ Sx}$$

Una vez calculado la cantidad de cemento se determina el la cantidad del aditvio Glass Bubble, Surfactate, cemento Clase G y GM87. En la tabla 14. Se observa las cantidades y los costos de inversión para cementar la sección de 7" en el campo La Cira.

Tabla 14. Cantidad de aditivos y costos inversión

Descripción	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total (USD)
Aditivo Glass bubble	77832 lb	0.5 UDS/Lb	\$ 38,916.00
Aditivo Surfactante	144 gal	2 USD/gal	\$ 288.00
Aditivo GM87	31133 lb	1 USD/Lb	\$ 31,133.00
Ingeniero de laboratorio	1	12000 USD/año	\$ 12,000.00
Gastos de laboratorio	N/A	5900 USD	\$ 5,900.00
TOTAL			\$ 88,237.00

Fuente : Elaboración propia.(2016).

- **Opex:** Son los gastos regulares como resultado de las operaciones normales de los negocios. Son constantes y necesarios[14].

En el caso de una operación de cementación, se presentan la compra de materia prima, el pago de los salarios del personal utilizado y los gastos necesarios para el desarrollo del proyecto.

- **Costos de materias primas y equipos** Para calcular los costos de operación es necesario conocer la cantidad de lechada de cemento y aditivo que se requiere para llevar a cabo la cementación de la sección del Casing 7" para campo La Cira.

La cantidad de aditivo depende de la concentración de cada aditivo dada en la Tabla 3. Donde se escogió el **diseño 2** de la tabla.

Una vez conocida la cantidad de cemento, agua y aditivos requeridos según el diseño, se puede conocer el costo individual y el costo total de la lechada como se observa en la tabla 15.

Tabla 15. Costos de la lechada espumada

Descripción	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total(USD)
Cemento	230 Sx	30 USD/SX	6900
Agua	32 Bbl	No aplica	
Glass Bubble	6486Lb	2,3 USD/LB	14918
Surfactante	12 Gal	2 USD/GAL	24
GM87	216 Lb	1 USD/LB	216
Total			22057.8

Fuente Elaboración Propia.(2016).

Como se observa en la gráfica 2. Es necesario el uso de un lavador[13] que está compuesto por agua, pirofosfato ácido de sodio(SAAP) y un surfactante; el espaciador[13] está compuesto por agua, carbonato de calcio y Biozan.

La cantidad de cada compuesto está establecido por la empresa Tucker Energy Services para cada densidad que se desee obtener. A continuación se muestra la Tabla 16 con las cantidades y precios para una preparación de lavador y espaciador donde este último posee una densidad de 9 lb/gal.

Tabla 16. Cantidad y Costos de los preflujos para la cementación

Descripción	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total(USD)
Lavador Sufactante	20Bbl	20 USD/Bbl	400
Espaciador Base Carbonato	40Bbl	30 USD/BbL	120
Total			520.0

Fuente: Elaboración propia.(2016).

Para la operación se requieren equipos de cementación especiales en superficie y en fondo. Los costos de los equipos en superficie son constantes para cada trabajo y se cuentan día a día. El costo de los equipos de subsuelo suele variar según la profundidad y estado del pozo, y solo se da una vez para cada trabajo.

Para realizar una operación de cementación de Casing de 7" se requieren equipos de cementación especiales; también se incluye el costo de su transporte desde la base ubicada en Cota en la tabla. 15 se puede apreciar el valor de los equipos de superficie.

Tabla 17. Costos del uso de Equipos de Superficie

Descripción	Valor Diario	Número de Días	Valor Total(USD)
Unidad de Cementación	300 USD	3	900
Unidades Operativas con Combustible	570 USD	3	1710
Unidad de Mezcla	120 USD	3	360
Transporte de Equipos Cota- Campo La Cira y viceversa	980 USD	3	2940
Total			5910

Fuente: Elaboración Propia.(2016).

Los equipos de subsuelo o equipo de flotación[13] son necesario para las operaciones de cementación estos son equipos especiales que ayuda a que la cementación no presente microanillos en el momento de fraguar, también ayuda a controlar los flujos de bombeo debido a las válvulas incorporadas, para evitar un reclinado de la columna de cementación se requieren 20 centralizadores que son dispositivos encargados en mantener la tubería en el dentro del pozo con el fin de asegurar el emplazamiento del cemento alrededor de la tubería[12] que dependen de la profundidad y tipo de

pozo. En la tabla 18 se puede observar los equipos de flotación que se van a utilizar para la cementación de un Casing de 7", también se observa el costo de cada uno de estos equipos.

Tabla 18. Costo del equipo de flotación para la cementación espumada

Descripción	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Zapato Guía	1	2500 USD	2500
Collar Flotador	1	2000 USD	2000
Centralizador semirrígido tipo Centek de 7" x 8 ½"	20	60 USD	1200
Stop Collar (Collar de parada) de 7"	40	30 USD	1200
Total			6900

Fuente: Elaboración Propia.

Para todas las operaciones de cementación es necesario contar con personal capacitado para realizar los trabajos; el costo del personal se mantiene constante y depende de la cantidad de días que dure el trabajo esto se puede observa en la tabla 19. Donde se discrimina el costo de cada persona que interviene en la cementación.

Tabla 19. Costo de personal.

Cargo	Cantidd de Trabajadores	Cantidad de Días	Salario Base Diario (USD)	Bono Diario	Costo Total(USD)
Ingeniero de Campo	1	3	67	60	381
Supervisor	1	3	60	42	306
Operador	1	3	40	25	195
Auxiliares	2	3	27	No aplica	81
Total					963

Fuente: Elaboración Propia.(2016)

En la tabla 20 se observa el costo total esto será la suma de los costos individuales que fueron especificados anteriormente.

Tabla 20. Costo total de Operación

Descripción	Valor (USD)
Costo de La lechada Espumada	\$22,058.00
Costo de lavador y espaciador	\$ 520.00
Costo de equipos de superficie	\$ 5,910.00

Costo de los equipos subterranos	\$ 6,900.00
Costo de Persona	\$ 963.00
Total	\$36,351.00

Fuente: Elaboración Propia.(2016).

El costo total para la cementación de los 12 pozos, utilizando la lechada de cementación espumada es de \$ 436,212.00 USD.

2.2.2 ANÁLISIS DE INGRESO

El ingreso se obtiene mediante el precio de venta del servicio de cementación del Casing 7" con una lechada de cementación espumosa para el pozo referencia El ingreso será igual al valor del servicio con una tarifa de una cementación realizada con lechada especial. Tucker Energy Services cobra por el servicio de cementación teniendo en cuenta los pies cementados, el tipo de cementación, el tipo de lechada usada y las características del pozo.

Para el cálculo del precio de venta por el servicio de cementación con lechada espumosa, la compañía Tucker Energy Services toma como referente el costo del servicio incrementado en un 20%. El valor será de \$ 43,621.20USD como el la cantidad de pozos a cementar en el años son 12 son ingresos totales será de \$ 523,454.40 USD.

2.2.3 EVALUACIÓN FINANCIERA

Teniendo en cuenta la información expuesta en las secciones anteriores, se determinara la viabilidad financiera del diseño de la lechada de cementación espumada mediante la metodología de valor presente neto (VPN), considerando una tasa de interés de oportunidad (TIO) de la compañía Tucker Energy Services.

- **Gradiente geométrico.** Es una serie de pagos, en la cual cada pago es igual al anterior multiplicada por una constante representada por $(1+G)$; donde G , representa el gradiente de variación. Si G es positivo el gradiente será creciente, si G es negativo el gradiente será decreciente y, si $G=0$ el gradiente se convierte en una anualidad.[14].

La ecuación de gradiente geométrico describe el cambio de los pagos con respecto al primer periodo de evaluación.

$$R_m = R_1 * (1+G)^{n+1}$$

- ✓ R_m es el pago del periodo de evaluación.
- ✓ R_1 es el pago correspondiente al primer periodo.
- ✓ G es el gradiente de cambio
- ✓ n es el periodo de evaluación.

El valor del gradiente utilizado es la proyección más pesimista del IPC; igual al 3.59% anual, el cual es proyectado por el grupo Bancolombia[13]

Para la lechada de cementación espumosa, los costos se calculan sin incluir el costo del aditivo especial Glass Bubble, esto se debe a que la compra del aditivo se da al inicio del periodo de evaluación y no al final.

Tabla 21: Valores de los periodos calculados con gradiente geométrico.

periodos(Año)	0	1	2	3	4	5
Ingresos	\$ -	\$ 523,454.40	\$ 542,246.41	\$ 561,713.06	\$ 581,878.56	\$ 602,768.00
Egresos	\$ -	\$ 436,212.00	\$ 451,872.01	\$ 468,094.22	\$ 484,898.80	\$ 502,306.67
Egresos Costo Aditivos Glass Bubbles	\$ 38,916.00	\$ 40,313.08	\$ 41,760.32	\$ 43,259.52	\$ 44,812.54	\$ -

Fuente Elaboración Propia.(2016)

El costo del aditivo se convierte en costos operacionales luego del primer año, ya que la inversión solo se realiza al inicio del proyecto.

- **Tasa de interés de oportunidad (TIO).** Es la tasa de interés más alta que el inversionista sacrifica con el objetivo de realizar un proyecto.[15]

Sirve como herramienta comparativa en la selección de un proyecto de inversión dentro de un conjunto de posibilidades. El valor definido por la empresa Tucker Energy Services es del 17% efectiva anual (E.A).

- **Valor presente neto (VPN).** Es aquel que resulta de restar al valor presente de los futuros flujos de caja de un proyecto, el valor de la inversión inicial. Para descontar los flujos de caja futuros se utiliza la TIO, que sirve como marco de referencia para medir la rentabilidad.[16]

Ese cambio en el valor estimado puede ser positivo, negativo o continuar igual. Si es positivo significará que el valor de la firma tendrá un incremento equivalente al monto del Valor Presente Neto. Si es negativo quiere decir que la firma reducirá

su riqueza en el valor que arroje el VPN. Si el resultado del VPN es cero, la empresa no modificará el monto de su valor

$$VPN = \sum F_n * (1+i)^{-n} = F_0 + F_1 * (1+i)^{-1} + F_2 * (1+i)^{-2} + F_n * (1+i)^{-n}$$

- ✓ Dónde:
- ✓ F_n es el flujo neto.
- ✓ i es la tasa de interés de oportunidad.
- ✓ n es el periodo de evaluación.

En la Tabla 22. Se observa el cálculos de los flujos del proyecto cuando se usa la lechada de cementación espumosa.

Tabla 22. Cálculos de los flujos

Periodos	0	1	2	3	4	5
Ingreso		\$ 523,454.40	\$ 542,246.41	\$ 561,713.06	\$ 581,878.56	\$ 602,768.00
Egreso		\$ 476,525.08	\$ 493,632.33	\$ 511,353.74	\$ 529,711.33	\$ 548,727.97
Inversion	\$ 88,237.00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Flujo Netos	\$ (88,237.00)	\$ 46,929.32	\$ 48,614.08	\$ 50,359.32	\$ 52,167.22	\$ 54,040.03

Fuente: Elaboración Propia.(2016).

Como se observa en la Tabla 22, a pesar del costo de inversión para el desarrollo de la lechada, los ingresos superan los egresos a mediano y largo plazo, las ganancias se mantienen estables año tras año incrementando de forma constante.

Una vez se tiene el flujo de caja neto, es posible calcular el VPN para una lechada de cementación espumada aplicando la ecuación de VPN es de \$ 71,316.95. Este valor positivo esto indica que si se invierte en el proyecto usando una lechada de cementación espumosa, se aumentarían los ingresos de la compañía por el desarrollo de la lechada. El proyecto es aceptado.

3. CONCLUSIONES

Mediante la implementación del aditivo GLASS BUBBLE, se diseñó una lechada de cementación espumada para las secciones de 7" del campo La Cira capaz de proporcionar sello hidráulico y evitar la formación de microanillos que permitirá el flujo de compuestos indeseables en la producción de petróleo.

Mediante la construcción de una matriz, y teniendo en cuenta los ensayos realizados y la concentración de cada aditivo, se logró determinar que las concentraciones obtenidas de cada aditivo son los establecidos para el diseño de 12 lechadas espumosas

Como se puede observar en el diseño número 2, al combinar un 60% de Glass Bubble, el 0,05 gal/Sx con cemento microfino cumple con los requerimientos exigidos por la operadora OXY de Colombia.

Con base en las pruebas de integridad de presión, se define que para cementar las secciones del Casing de 7" en el Campo La Cira, la combinación del tren de fluidos no puede generar una ECD mayor a 10 lb/gal (DEC a la presión fractura), ni

encontrarse menor a 8.4 lb/gal (DEC a la presión de poro) al ser totalmente bombeado hacia el espacio anular.

Desde el punto de vista financiero para la compañía Tucker Energy Services Colombia, la opción de una lechada de cementación expansiva es viable, ya que tiene un valor presente neto positivo y es rentable, porque la TIR supera por un 63% a la TIO

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Critian Hun, Abdula Al-Suwald (2015). Ligero como una pluma, duro como una roca. Abu Dhabi Company for onshore oil operations.
- [2] Specification for Materials and Testing for Well Cements. API 10 A(2011). 4th ed. Pennsylvania State University: American Petroleum Institute, 1988.
- [3] Specification for Materials and Testing for Well Cements. API 10 B(2010). 4th ed. Pennsylvania State University: American Petroleum Institute, 1988.
- [4] Oxy de Colombia (2013). Invitación para la cementación de 60 pozos en Campo La Cira año 2014. Santander Colombia.
- [5] Brennam Jimmy (2012).Cementing Additives Technicals data sheets.[en línea].Houston: Tucker Energy Services. Disponible en: <http://mycop:4000/cemcop/tds/Cementing%20Additives/Gas%20Migration%20Control%20Additive/TES%20TDS-GM87.pdf> . [2016,11 de Noviembre].
- [6] Vilar Barrio, J. and Delgado Tejada, T. (2005). Control estadístico de los proceso(SPC). Madrid: Fundación CONFEMETAL.
- [7] CEMPRO (Modelo de desplazamiento de Lodo). (2013). Houston: Pegasus Vertex Inc.
- [8] Valdez, Patricia Irene. Valores F de la distribución Fisher.[en Línea].Madrid: Universidad autónoma de Madrid. Disponible en: https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/anabz/Prest/Trabajos/tabla-fisher.pdf. [2016,10 de Octubre].
- [9] Erik B, Nelson.(2006). Well Cementing. Sugar Land Texas: Schlumberger.Educational Services
- [10] TRIANTIS, John E.(2013). Navigating Strategic Decisions. Sound Park Way N.W. CRC press. Junio, 2013.
- [11] Suman George y Ellis Richard(1997).Cementing oil and gas well. Houston: World Oil.
- [12] Erik B, Nelson (2012) Fudamentos de la cementación de pozos. Oilfiled Revie Vol.; 24 .No 2. Enero 2012
- [13] Agmm y Gemr MC (2012). ABC de las cementaciones y estimulaciones en Mexico pp. 39-43.
- [14] Kadre, Shailendra(2011). Going Corporate: A Geek's Guide. Apress. Junio 2011.

[15] Baca, Guillermo.(2004). Ingeniería Económica.(8^a.ed).(Bogota):Educativa SAS.

[16] GRUPO BANCOLOMBIA. Informe anual de proyecciones económicas 2016[en línea]. Colombia: Disponible en:
<http://www.grupobancolombia.com/wps/portal/empresas/capital-inteligente/investigaciones-economicas/publicaciones/informe-anual-proyecciones/>.
[2016, 15 de Octubre]