

**ESTUDIO DEL FENÓMENO DE ELECTRO-ÓSMOSIS COMO SOLUCIÓN AL
PROBLEMA DE BIT BALLING EN FORMACIÓN ARCILLOSA**

JENNIFFER SOLANGE AYALA RIVERA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2012**

**ESTUDIO DEL FENÓMENO DE ELECTRO-ÓSMOSIS COMO SOLUCIÓN AL
PROBLEMA DE BIT BALLING EN FORMACIÓN ARCILLOSA**

JENNIFFER SOLANGE AYALA RIVERA

**Trabajo presentado como requisito para optar al título de
Ingeniera Química**

**Director:
Ing. Jaime Alberto Loza Castillo**

**Codirectores:
Dionisio Antonio Laverde Cataño Ph.D.**

Ing. Diego Fernando Suarez Arias

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2012**

*A Dios, quien día a día me llena de bendiciones y es mi compañero y guía en
cada paso que doy.*

*A mi mami Luz Nancy Rivera y abuelita Lola López, por ser el motor de mi vida,
brindarme todo su amor, apoyo incondicional y total confianza.*

*A mi familia quienes con sus voces de aliento me fortalecen y siempre han
estado presentes en cada uno de mis logros.*

Jennifer Solange Ayala Rivera.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos:

A la Universidad Industrial de Santander, la escuela de Ingeniería Química y el grupo de Investigación Estabilidad de Pozo por haberme permitido ser una profesional mucho más capacitada.

Al ingeniero Jaime Alberto Loza por apoyar esta investigación, su total confianza y constante motivación.

A los ingenieros Diego Suarez, Alexander Martínez, Dionisio Laverde, Helmut Portilla, William Villamizar, Alban Jaimes, Laura Galvis, Mario Roa, Juan Pablo Espinosa, Jaime Rodríguez y Karime Galvis, por su desinteresado soporte durante la ejecución de este trabajo de investigación.

Al Instituto Colombiano del Petróleo-Ecopetrol y los ingenieros del grupo de investigación por su apoyo técnico y valiosos aportes a lo largo de la realización del proyecto.

A mis amigas, Andrea, Hefzi, Conchis, Diana Chiqui, Dianis, Aleja y Silvis. Gracias por ser parte fundamental en mí formación como ingeniera y como persona.

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	11
1. MARCO REFERENCIAL.....	12
1.1 ESTABILIDAD DE POZO.....	12
1.2 LAS ARCILLAS	13
1.3 FLUIDOS DE PERFORACIÓN.....	14
1.4 BIT BALLING.....	15
1.5 ELECTRO-ÓSMOSIS.....	16
1.6 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS).....	16
2. DESARROLLO DEL PROYECTO.....	17
2.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA EN COLOMBIA	17
2.2 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA FORMACIÓN.....	17
2.3 DETERMINACIÓN DEL BIT BALLING	18
2.4 APLICACIÓN DE ELECTRO-ÓSMOSIS	21
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	22
3.1 BIT BALLING EN COLOMBIA.....	22
3.2 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA FORMACIÓN.....	24
3.3 RESULTADOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL BIT BALLING.....	25
3.4 RESULTADOS DE ELECTRO-ÓSMOSIS.....	31
CONCLUSIONES	36
RECOMENDACIONES	37
REFERENCIAS BIBLIÓGRAFICAS.....	38
ANEXOS.....	42

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. IMÁGENES DE <i>BIT BALLING</i> EN BROCAS POLICRISTALINAS DE DIAMANTES COMPACTOS.....	15
FIGURA 2. DIAGRAMA DE BLOQUES	17
FIGURA 3. MONTAJE PARA PRUEBAS DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA.....	20
FIGURA 4. COMPOSICIÓN ROCA TOTAL MUESTRA C ₂ Y COMPOSICIÓN FRACCIÓN MENOR A 2 μ MUESTRA C ₂	25
FIGURA 5. REOGRAMA DE ESFUERZOS PARA LAS FORMULACIONES DE LODO.	26
FIGURA 6. GELES VS TIEMPO PARA LAS DIFERENTES FORMULACIONES DE LODO.	26
FIGURA 7. MODELO PARA <i>BIT BALLING</i>	27
FIGURA 8. REGISTRÓ FOTOGRÁFICO PRUEBA DE ACRECIÓN UTILIZANDO EL LODO 2.....	28
FIGURA 9. MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE PROPUESTO.....	30
FIGURA 10. PORCENTAJE DE LIMPIEZA DEL ELECTRODO AL APLICAR DIFERENTES INTENSIDADES ELÉCTRICAS.	32
FIGURA 11. CURVA GALVANOSTÁTICA CORRIENTE FINAL -50 MA/CM ²	32
FIGURA 12. REGISTRO FOTOGRÁFICO ANTES Y DESPUÉS DE UTILIZAR LA TÉCNICA GALVANOSTÁTICA.	33
FIGURA 13. REOGRAMA DE ESFUERZOS PARA LODO 1 DESPUÉS DE APLICAR LA TÉCNICA GALVANOSTÁTICA	34

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE ARCILLAS EN RELACIÓN CON FLUIDOS DE PERFORACIÓN.	13
TABLA 2. PARÁMETROS ELECTROQUÍMICOS PARA DEMOSTRAR EL FENÓMENO DE ELECTRO-ÓSMOSIS.	21
TABLA 3. EVALUACIÓN DE TIEMPOS NO PRODUCTIVOS POR <i>BIT BALLING</i> . CASO ESTUDIO.	23
TABLA 4. COORDENADAS DEL AFLORAMIENTO AL CUAL SE REALIZÓ EL MUESTREO.	24
TABLA 5. RESULTADOS IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA.	30

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. TIPOS DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN.	42
ANEXO B. FENÓMENO DE ELECTRO-ÓSMOSIS EN UN PORO.	43
ANEXO C. REOLOGÍA. DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD PLÁSTICA, PUNTO DE CEDENCIA Y FUERZA GEL PARA FLUIDOS DE PERFORACIÓN.	44
ANEXO D. FORMULACIÓN DE FLUIDOS BENTONÍTICOS.	45
ANEXO E. PROCEDIMIENTO PRUEBA DE ACRECIÓN.	46
ANEXO F. POZOS ECOPEPETROL Y FORMACIONES COLOMBIANAS QUE PRESENTARON MAS PROBLEMAS ASOCIADOS AL BIT BALLING.	48
ANEXO G. MUESTREO DE LA FORMACIÓN Y DIFRACTOGRAMA.	50
ANEXO H. CÁLCULOS PARA PRUEBA AZUL DE METILENO.	52
ANEXO I. VISCOSIDAD PLÁSTICA, PUNTO DE CEDENCIA, VISCOSIDAD APARENTE, DENSIDAD Y PH PARA LODOS BENTONÍTICOS.	53
ANEXO J. REGISTRO FOTOGRÁFICO ANTES Y DESPUÉS DE REALIZAR LA PRUEBA DE ACRECIÓN UTILIZANDO COMO FLUIDOS AGUA Y LODO BENTONÍTICO.	54
ANEXO K. ESPECTROS DE IMPEDANCIAS UTILIZANDO AGUA COMO FLUIDO Y MUESTRA C ₂	57
ANEXO L. ESPECTROS DE IMPEDANCIAS UTILIZANDO LODO 1 Y MUESTRA C ₂	58
ANEXO M. CURVAS GALVANOSTÁTICAS UTILIZANDO LODO 1 Y MUESTRA C ₂	63
ANEXO N. REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LOS LODOS UNA VEZ APLICADA LA TÉCNICA GALVANOSTÁTICA.	65
ANEXO O. VISCOSIDAD PLÁSTICA, PUNTO DE CEDENCIA Y VISCOSIDAD APARENTE PARA LODO 1 ANTES Y DESPUÉS DE APLICAR CORRIENTE.	66
ANEXO P. INFORMACIÓN LODO POLIMÉRICO.	67

RESUMEN

Título: ESTUDIO DEL FENÓMENO DE ELECTRO-ÓSMOSIS COMO SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE BIT BALLING EN FORMACIÓN ARCILLOSA*.

Autor: JENNIFFER SOLANGE AYALA RIVERA**

Palabras claves: Bit balling, embotamiento de la broca, hinchamiento, arcilla, electro-ósmosis.

En la actualidad la industria del petróleo enfrenta grandes desafíos técnicos y medioambientales asociados a la perforación de pozos. Las restricciones medioambientales hacen referencia de manera específica a los lodos como un contaminante potencial del subsuelo, por esto y sumado a las razones económicas y de logística, resulta necesario perforar con lodos base agua. Sin embargo, estos lodos presentan un pobre desempeño en lutitas, causando hinchamiento o desintegración de la misma.

El bit balling es uno de los principales problemas presentes en la interacción fluido de perforación-formación arcillosa, debido a que al absorber agua del lodo, los cortes de shales se hinchan, adhiriéndose a la broca, dando lugar a inestabilidad de pozo, además de efectos indeseables como reducción en la tasa de penetración, bloqueo parcial de los inyectores y desgaste de los dientes de la broca, llevando a tiempos no productivos y elevando los costos de perforación.

Esta investigación propone un nuevo enfoque para la reducción de bit balling sin sustancias químicas tóxicas, cambios en el lodo o cambios en el diseño de la broca; basado en el concepto de electro-ósmosis, proceso por el cual el agua que absorbe la arcilla es forzada a fluir cuando se aplica un campo eléctrico y se libera en forma de película delgada en la interfase metal-arcilla evitando la adherencia.

Para la evaluación de la técnica electro-osmótica se realizaron estudios experimentales de los fenómenos físico-químicos interfaciales que ocurren entre el metal y la arcilla hinchada antes y después de la aplicación del tratamiento; el cual se llevó a cabo a través de un montaje experimental simulando la adherencia de muestra proveniente de la formación Honda rica en minerales arcillosos de tipo esmectita en un electrodo de acero, demostrando que la adherencia disminuye cuando el electrodo actúa como cátodo en el montaje.

*Trabajo de Grado.

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Química.

Director: Ing. Jaime Alberto Loza Castillo. Co-directores: Dr. Dionisio Antonio Laverde Cataño, Ing. Diego Fernando Suarez Arias

ABSTRACT

Title: STUDY OF PHENOMENON OF ELECTRO-OSMOSIS AS SOLUTION TO THE PROBLEM OF BIT BALLING IN CLAY FORMATION*.

Author: JENNIFFER SOLANGE AYALA RIVERA **

Keywords: Bit balling, swelling, clay, electro-osmosis.

Currently the oil industry faces major technical and environmental challenges associated with well drilling. Environmental restrictions refer specifically to muds as a potential contaminant of subsoil, taking this into account and adding the economic and logistical reasons, it is necessary to drill with water-based muds. However, these muds have a poor performance in shales, causing swelling or disintegration of it.

Bit balling is one of the main problems found in the drilling fluid-clay formation interaction, because when they absorb water from the mud, shales swell, adhering to the bit, leading to well instability as well as undesirable effects like reduction of the penetration rate, partial blockage of the nozzles and weathering of the bit's teeth, leading to non-productive times and raising drilling costs.

This research proposes a new approach for bit balling reduction without toxic chemical substances, changes in the mud or in the bit's design, based on electro-osmosis concept, the process by which the water that absorbed by the clay is forced to flow when an electric field is applied and released as a thin film on the metal-clay interface preventing adhesion.

For the evaluation of electro-osmotic technique, experimental studies of the physico-chemical phenomena that occurs between the metal and swelled clay before and after treatment application were made. They were conducted through an experimental assembly simulating the adhesion of the sample from the Honda formation rich in smectite clay minerals in a steel electrode, demonstrating that adherence decreases when the electrode acts as a cathode in the assembly.

* Degree Work.

**School of Physical and Chemical Engineering, School of Chemical Engineering.

Director: Mr. Jaime Alberto Loza Castillo, P. Eng. Co-directors: Ph. D. Dionisio Antonio Laverde Cataño, Mr. Diego Fernando Suarez Arias, P. Eng.

INTRODUCCIÓN

La evaluación de registros de pozos a nivel mundial indica que cerca del 60% de las formaciones perforadas son lutitas, rocas sedimentarias de baja permeabilidad ricas en minerales arcillosos, que al interactuar con fluidos base agua sufren un proceso de expansión de su estructura cristalina denominado hinchamiento, el cual es causante de eventos de inestabilidad como: pega de tubería, pérdidas de circulación, hueco apretado, inestabilidad térmica y *bit balling*, problema en el que se centra esta investigación [1, 2, 3].

El *bit balling* o embotamiento se debe a la tendencia de los cortes hinchados a adherirse a la broca y otros miembros del BHA (*Bottom Hole Assembly*). El principal efecto que ocasiona, es un descenso progresivo en la tasa de penetración (ROP), llevando a tiempos no productivos que se traducen en un aumento en los costos del taladro [4, 5]. A pesar de la importancia que tiene el *bit balling* debido a su relación directa con la ROP, es un evento poco tratado por la literatura. Por eso surge la necesidad de generar conocimiento básico que permita entender el problema y plantear alternativas que contribuyan a su solución.

El objetivo del presente trabajo, es estudiar el fenómeno de electro-ósmosis como solución al problema de adherencia, aplicando la técnica Galvanostática. Así mismo, para dar soporte a la investigación, se realizan estudios que definen las formaciones colombianas más susceptibles a presentar eventos asociados al embotamiento de brocas, se selecciona la muestra más favorable para llevar a cabo las pruebas y evalúa la adherencia a través de pruebas de acreción y análisis de la técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica.

1. MARCO REFERENCIAL

En el presente capítulo, conceptos básicos, complementarios y específicos son definidos con la idea de orientar al lector en el tema central de esta investigación.

1.1 ESTABILIDAD DE POZO

Dentro de los inconvenientes encontrados durante la perforación de pozos petroleros, el 42% corresponden a problemas de estabilidad de pozo según *GeoMechanics International* (2008). El mantenimiento de un pozo estable es una de las principales tareas de perforación en la industria petrolera y gasífera, ya que problemas de inestabilidad resultarán en altos costos de perforación y tendrán un impacto severo en el cronograma del mismo, además de poner en peligro al personal asociado a esta tarea.

Antes de la perforación los esfuerzos mecánicos en la formación son menores que la resistencia de la roca y la acción química esta balanceada, permitiendo que las rocas estén estables bajo estas condiciones *in-situ*. Luego de la perforación, la roca circundante en el pozo sufre cambios en tensión, compresión y cargas de cizalla. Al igual, la interacción química y térmica entre el fluido de perforación y las formaciones genera redistribución de esfuerzos alrededor de la cara del pozo durante la perforación, que puede causar el colapso del hueco o fractura [2, 6].

Los problemas se agravan si se perfora una formación arcillosa debido a las propiedades únicas de los *shales* como baja permeabilidad, hinchamiento y reactividad química de los minerales presentes en ellos. Sanjit Roy, et al (1993) estableció que cerca del 60% de las formaciones perforadas en el mundo son clasificadas como *shales* y cerca del 75% de los problemas operacionales durante la perforación ocurrían en este tipo de formaciones. A nivel mundial se estima que el problema de inestabilidad en lutitas le cuesta a la industria del petróleo entre 400 y 600 millones de dólares anuales, Van Oort et al (1996).

1.2 LAS ARCILLAS

Desde el punto de vista mineralógico, son silicatos de aluminio hidratado de dos, tres y cuatro capas, que desarrollan plasticidad cuando se mojan y tienen un máximo tamaño de partícula de 2 μm . Los minerales de arcilla son de naturaleza cristalina, y la estructura atómica de sus cristales es el factor primordial que determina sus propiedades. La identificación de las arcillas se lleva a cabo por análisis de Difracción de Rayos-X o Espectro de Absorción [3, 7, 8].

En la naturaleza existe un gran número de minerales arcillosos, pero los que nos interesan en relación con los fluidos de perforación pueden ser clasificados en tres tipos, los cuales se muestran en la Tabla 1. Los minerales arcillosos que se encuentran en las lutitas se establecen en el orden siguiente y en cantidades decrecientes: 1. Illita, 2. Clorita, 3. Montmorillonita, 4. Caolinita.

Tabla 1. Clasificación de arcillas en relación con fluidos de perforación.

CLASIFICACIÓN	MINERAL
1. Arcillas en formas de aguja no hinchables	Atapulguita o Sepiolita
2. Arcillas laminares no hinchables (o ligeramente hinchables)	Illita, Clorita o Caolinita,
3. Arcillas laminares muy hinchables	Motmorillonitas
Fuente: L, Restan, et al. 2005.	

Características de las Formaciones Arcillosas

Capacidad de Intercambio Catiónico: La teoría de disociación catiónica, sostiene que los cationes adsorbidos tienden a disociarse desde la superficie arcillosa cuando el mineral está en contacto con el agua, dejando algunas de las unidades estructurales negativamente cargadas; las fuerzas repulsivas hacen que las láminas se alejen permitiendo la entrada de agua entre ellas iniciando el proceso de hinchamiento. La capacidad de intercambio catiónico puede ser medida mediante la Prueba de Azul de Metileno (MBT) [3, 6, 7, 9].

Hidratación de arcillas: La hidratación es la inclusión de moléculas de agua en la estructura laminar. El hinchamiento se da, porque la absorción de agua en el espacio inter-laminar, separa cada vez más las láminas dependiendo así del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. La capacidad de hinchamiento es mucho mayor, cuando el catión inter-laminar es el sodio (esmeclita) teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales [6, 7].

Plasticidad: Refleja la capacidad de las arcillas de ser modeladas; se debe a que el agua forma una envoltura sobre las partículas laminares, produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras, cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas [6].

Tixotropía: Fenómeno que consiste en la pérdida de resistencia de un coloide al amasarlo y su posterior recuperación con el tiempo [6].

1.3 FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Un fluido de perforación es una mezcla de un solvente (base) con aditivos o productos, que cumplen funciones fisicoquímicas específicas de acuerdo a las necesidades operativas de la formación a perforar. La clasificación de los fluidos de perforación se muestran en el ANEXO A.

Fluidos Base Aceite Vs Fluidos Base Agua

Los Fluidos Base Aceite u OBMs (*Oil Based Muds*), son a menudo escogidos para perforar formaciones de *shale* problemáticas ya que normalmente minimizan la interacción desfavorable entre el fluido de perforación y la formación de *shale* con contenido de arcilla reactiva. Lomba, et al (2000) expone que este tipo de fluido previene que el agua entre en contacto directo con la roca, debido a que se encuentra emulsificada en la fase continua de aceite, el cual actúa como una barrera para el movimiento de los iones. Sin embargo, los Fluidos Base Agua o WBMs (*Water Based Muds*) están siendo usados ampliamente para perforar a

través de *shales* por su gran aceptabilidad ambiental y una mejor relación efectividad-costo. A pesar de estos incentivos, la incorrecta aplicación de WBMs mientras se perforan formaciones de *shales* sensitivas puede conducir a problemas costosos de inestabilidad. Para la correcta aplicación de los fluidos de perforación base agua es importante un entendimiento de la interacción fisicoquímica arcilla-lodo [2, 11].

1.4 BIT BALLING

El *bit balling* o embotamiento, es un problema que se encuentra frecuentemente al perforar a través de una formación arcillosa y se debe a la tendencia de los cortes de arcilla hidratada a pegarse o adherirse a la broca y el BHA (*Bottom Hole Assembly*) reduciendo la tasa de penetración [1, 12, 13] .

Figura 1. Imágenes de *bit balling* en brocas policristalinas de diamantes compactos.



Fuente: L, Restan, et al. 2005.

La literatura ofrece algunas maneras para reducir este problema y son:

- Optimización del sistema hidráulico [14, 15].
- Agregar aditivos al fluido base agua [16].
- Rediseño de brocas [17].
- Electro-ósmosis [4, 5].

Las únicas técnicas implementadas en campo como solución a este problema son la optimización del sistema hidráulico y el uso de inhibidores. Sin embargo, la hidráulica se ve visiblemente afectada cuando las boquillas resultan taponadas, ya que una vez se produce el bloqueo la velocidad del fluido se reduce alrededor de la broca, y la adición de inhibidores a pesar de ser la técnica más comúnmente utilizada, poco a poco se ve restringida por las normas medioambientales que rigen cada uno de los países del mundo.

1.5 ELECTRO-ÓSMOSIS.

Electro-ósmosis se define como la circulación forzada de agua a través de un material poroso, debido a un campo eléctrico externo. La electro-ósmosis no es un fenómeno descubierto recientemente. F. Reuss (1809) describió originalmente este fenómeno en un experimento que mostró que el agua podría ser forzada a fluir a través de un sistema arcilla-agua cuando se aplica un campo eléctrico. Desde entonces investigaciones demuestran que el flujo se inicia con el movimiento de los cationes presentes en el poro de la arcilla o medios porosos similares, y el agua que rodea los cationes se mueve con ellos [4, 5, 18, 19]. (Ver ANEXO B).

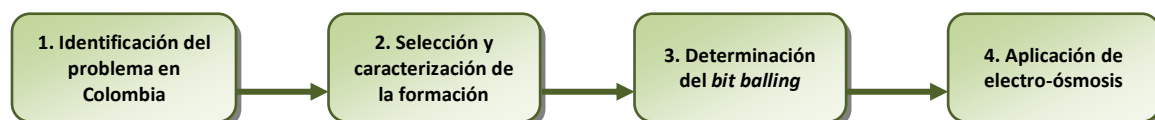
1.6 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS).

Esta técnica electroquímica de corriente alterna, consiste en la aplicación de un voltaje sinusoidal, con una alta frecuencia inicial buscando el comportamiento capacitivo del sistema hasta una baja frecuencia final, registrando el comportamiento resistivo. Resultado de este ensayo, se determina un espectro de impedancia real Vs impedancia imaginaria, magnitud de la impedancia Vs frecuencia ó ángulo de desviación Vs frecuencia, las cuales se conocen como espectro de Nyquist y Diagrama de Bode, respectivamente [20, 21].

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

Este trabajo de grado presenta componentes investigativos, teóricos y experimentales. Su desarrollo tiene como objetivos generar conocimiento básico que permita entender el problema de *bit balling* y demostrar que el fenómeno de electro-ósmosis funciona como solución al mismo. La metodología para su realización fue desarrollada en 4 etapas principales, presentadas en el siguiente diagrama de bloques.

Figura 2. Diagrama de bloques



Fuente: El autor

2.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA EN COLOMBIA

Con el fin de identificar la existencia del problema de *bit balling* en Colombia, se realizó una recopilación de reportes de 500 pozos Ecopetrol perforados en los últimos 15 años y se procedió a establecer las formaciones en las cuales el embotamiento ocasionó más problemas. Asimismo, se realizó una evaluación de tiempos no productivos para hallar el costo que generó el *bit balling*, tomando como caso estudio un pozo Ecopetrol perforado en el período de Enero a Marzo del 2011 en la cuenca de los Llanos, en el departamento del Meta.

2.2 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA FORMACIÓN

Después de encontrar las formaciones más susceptibles a sufrir *bit balling*, se determinó el lugar (coordenadas) donde se encuentra la mejor opción de muestra, para la realización del proyecto y así proceder a su recolección y posterior caracterización.

La recolección de muestras se realizó directamente de la formación objetivo.

La caracterización de la muestra fue realizada determinando el contenido mineralógico y midiendo la capacidad de intercambio catiónico, mediante las siguientes pruebas:

Difracción de Rayos X ⁽¹⁾: La caracterización mineralógica de la muestra se realizó bajo dos modalidades de análisis: Roca Total o Bulk y Fracción arcilla (fracción de la muestra con partículas de diámetro efectivo menor a 2 μm), de acuerdo con el UST-53-P-010 del “Manual de Procedimientos Técnicos del Laboratorio de DRX” y la Norma ASTM C775-79 [22]. Para el análisis mineralógico, los difractogramas fueron obtenidos en un Difractómetro de Rayos-X marca Siemens modelo D500, equipado con lámpara de Cu y monocromador de grafito, operado a 30 mA y 40kV.

Azul de Metileno ⁽²⁾: La determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico o “reactividad” de la muestra, se realizó siguiendo el “Instructivo Técnico de Ensayo para la Prueba de Azul de Metileno para Sólidos Perforados” API RP 13I [23].

2.3 DETERMINACIÓN DEL BIT BALLING

El estudio y determinación del *bit balling* se realizó con el fin de identificar las propiedades físicas y químicas de las películas formadas cuando se presenta adherencia utilizando la técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS). Para llevar a cabo este ensayo se efectuó en primer lugar:

Selección del Fluido: Se seleccionaron como fluidos de prueba agua y lodos base agua con diferentes formulaciones de bentonita. Propiedades reológicas, densidad y pH fueron medidas para cada uno de los fluidos. La viscosidad plástica, punto de

⁽¹⁾ La determinación de minerales y/o compuestos cristalinos de la muestra, se realizó en el *Laboratorio de Difracción de Rayos X, del Instituto Colombiano del Petróleo, ECOPETROL (Piedecuesta)*, con el fin de garantizar el cumplimiento de la norma citada

⁽²⁾ La determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico, fue realizada en el *Laboratorio de Daños a la Formación, del Instituto Colombiano del Petróleo, ECOPETROL (Piedecuesta)*. con el fin de garantizar el cumplimiento de la norma citada

cedencia y fuerza gel para los lodos (Ver ANEXO C), fueron determinados a 120°F (49°C) en un viscosímetro FANN 35 A, basadas en la práctica recomendada API RP 13B-1 [24] ⁽³⁾. Para cada una de las pruebas realizadas durante el proyecto, los lodos fueron preparados 16 horas antes de cada ensayo, con el fin de obtener una adecuada hidratación de bentonita. Las formulaciones de los lodos utilizados en la investigación se presentan en el ANEXO D.

La elección de diferentes formulaciones de lodo bentonítico se debe a que es el lodo más comúnmente utilizado en la perforación de la primera fase del pozo, es económico y no contamina el medioambiente. Así mismo, la bentonita se emplea como componente básico en la mayoría de los fluidos de perforación base acuosa, donde actúa fundamentalmente como viscosificante y controlador de filtrado.

Prueba de Acreción ⁽⁴⁾: Se realizaron pruebas de acreción para evaluar los fluidos de prueba y cuantificar la adherencia de la muestra a un tubo elaborado en acero inoxidable tipo 316. El procedimiento utilizado para llevar a cabo este ensayo puede observarse en el ANEXO E.

Una vez realizadas las anteriores pruebas, se procedió a establecer el montaje para la aplicación de la técnica de EIS.

Espectroscopía de Impedancia Electroquímica ⁽⁵⁾: Esta prueba se realizó teniendo en cuenta el procedimiento técnico PTE-123019 “Procedimiento de Ensayo Evaluación Impedancia Electroquímica” y la Norma ASTM G106-89 [25].

⁽³⁾ Las mediciones de densidad, pH y reología de los fluidos, se realizaron en el *Laboratorio de Daños a la Formación, del Instituto Colombiano del Petróleo, ECOPETROL (Piedecuesta)*, con el fin de garantizar el cumplimiento de la práctica citada.

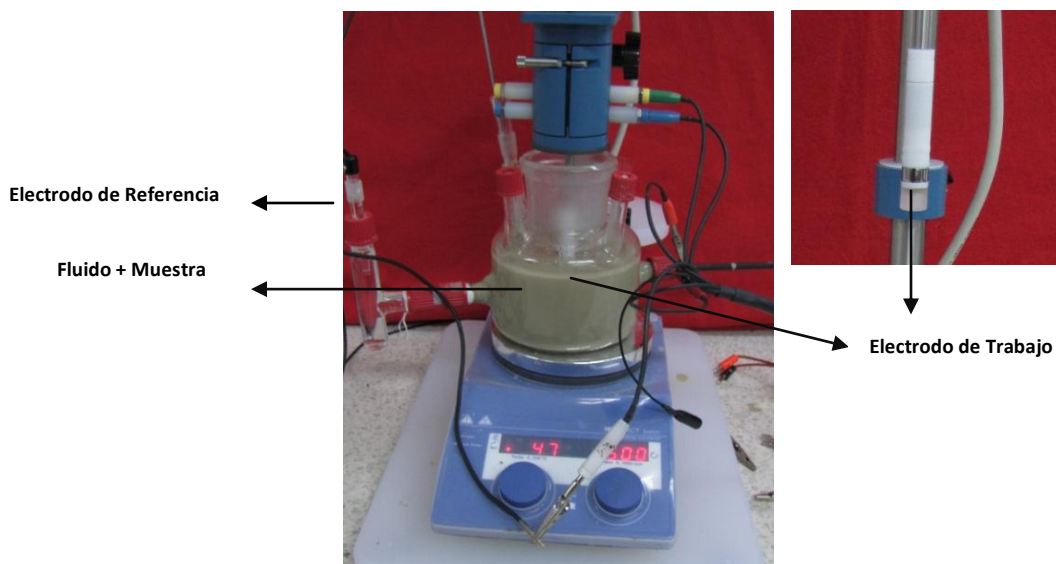
⁽⁴⁾ El Test de acreción desarrollado por Shell BTC, es utilizado para evaluar la tendencia de adhesión de los cortes de perforación (*Shale*) sobre las partes metálicas. Su ejecución se realizó en el *Laboratorio de Daños a la Formación, del Instituto Colombiano del Petróleo, ECOPETROL (Piedecuesta)*.

⁽⁵⁾ Las pruebas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica fueron desarrolladas en el *Laboratorio de Tecnología de Materiales, del Instituto Colombiano del Petróleo, ECOPETROL (Piedecuesta)*, con el fin de garantizar el cumplimiento de la práctica citada.

Las mediciones de Impedancia fueron realizadas por un potencióstato/galvanostato GAMRY referencia 600. La celda utilizada para la realización de los ensayos fue la correspondiente al electrodo de cilindro rotatorio. En esta se fijó una velocidad de rotación del electrodo de trabajo de 200 revoluciones por minuto. Para lograr una temperatura de 120°F (49°C) en las muestras de análisis, se empleó una plancha de calentamiento IKA Instruments. En el interior de la celda se dispuso un magneto para homogeneizar los lodos de ensayo con la muestra. En la plancha de calentamiento la velocidad de rotación se fijó en 400 revoluciones por minuto.

El electrolito utilizado para las mediciones consistió en los 4 fluidos evaluados en la prueba de acreción, a los cuales fueron agregados 40 g de muestra respectivamente. Se utilizó un electrodo de trabajo elaborado en acero (AISI SAE 1020) y pulido a grano #600 con lija de SiC; como contraelectrodo se usó grafito de alta pureza y un electrodo de referencia de calomel saturado. La técnica se aplicó con corridas en períodos de 0 horas, 1 hora, 2 horas, 4 y 24 horas. La Figura 3 muestra el montaje utilizado para los ensayos de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.

Figura 3. Montaje para pruebas de Impedancia Electroquímica.



2.4 APLICACIÓN DE ELECTRO-ÓSMOSIS

Para demostrar el fenómeno de electro-ósmosis se usó la técnica Galvanostática. Esta técnica electroquímica de corriente directa consistió en la aplicación de una intensidad de corriente de signo negativo al electrodo de trabajo, con el fin de lograr una polarización catódica y de esta forma promover una atracción de especies ó iones de carga positiva.

El ensayo fue realizado con el lodo que mostró mejor comportamiento reológico y se adaptó de mejor forma en las pruebas de EIS. La aplicación del voltaje se mantuvo inicialmente por un período de 4 horas y posteriormente fue incrementado en busca de obtener un mejor resultado. El montaje para los ensayos fue similar al descrito en las pruebas de Espectroscopia de Impedancia Figura 3.

Los parámetros electroquímicos y parámetros de ensayo se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2. Parámetros electroquímicos para demostrar el fenómeno de Electro-ósmosis.

PARÁMETROS ELECTRO-ÓSMOSIS	
Corriente Inicial	-3 mA/ cm ²
Tiempo Inicial	30 s
Corriente Final	5, -10, -40, -50, -100, - 200 mA/cm ²
Tiempo Final	14400 s
Área del Electrodo	3 cm ²
Densidad del Electrodo	7.87 g/cm ²
Temperatura del Sistema	50 °C
RPM Electrodo de Trabajo	200
RPM Magneto	400
Fuente: El autor	

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la metodología planteada y su respectivo análisis.

3.1 BIT BALLING EN COLOMBIA

La revisión efectuada a los 500 pozos colombianos mostró que se presentaron 1250 eventos de *bit balling* a lo largo de las diferentes perforaciones. Cabe resaltar que un descenso en la velocidad de penetración es motivo para retirar el sistema de perforación del pozo, la calificación de broca embotada se da en la evaluación del sistema en superficie. Si la broca es calificada como 100% embotada se atribuye la reducción de ROP a este problema.

Por otra parte, la evaluación realizada a los pozos indica que en varios de ellos se encontraron más de 10 evaluaciones hechas en superficie donde la broca salió 100% embotada. Este resultado se considera importante ya que en muchos casos los reportes de pozos se acomodan al beneficio de quien lo está desarrollando y el *bit balling* en ocasiones es un problema secundario frente a otros presentes durante las operaciones de perforación.

Así mismo, la evaluación individual realizada a cada pozo para identificar las formaciones más susceptibles a presentar problemas de *bit balling*, dio como resultado que formaciones como Guayabo, Carbonera Unidad C2 y T2, Lutita E y E3, y Honda registraron varios eventos de embotamiento en diferentes campos colombianos.

En el ANEXO F se muestran los pozos colombianos que presentaron con más frecuencia problemas de *bit balling* en los últimos 4 años y las formaciones más susceptibles a sufrir embotamiento en cada campo perforado.

Para cuantificar el problema de *bit balling* fue necesario hacer un análisis de tiempos no productivos asociados a la tasa de penetración, profundidad,

evaluación y limpieza del BHA durante la perforación del caso estudio. Cabe resaltar que el incremento en los costos por *bit balling* está directamente relacionado con la profundidad del pozo. Si el pozo presenta problemas de embotamiento a mayor profundidad; aumenta el tiempo no productivo debido a que es necesario llevar a cabo viajes de tubería no programados más largos.

La evaluación de tiempos no productivos para el caso estudio se desarrolló de la siguiente forma:

Problema: El pozo *Gavan A* presentó un descenso en la tasa de penetración la cual fue del orden de 20 ft/h (6.1 m/h), cuando el desempeño objetivo era de 60 ft/h (18.3 m/h) en la formación Lutita E3 a 9500 ft (2896 m) de profundidad. La evaluación en superficie indicó que la broca salió con la estructura de corte en buen estado pero 100% embotada junto con los estabilizadores. Durante la perforación de la formación problema se realizó limpieza del BHA, la cual tomó un tiempo de 5 horas. El sistema de perforación fue sacado, habiendo perforado cerca de 300 ft (91 m) de la formación lutítica.

Tabla 3. Evaluación de tiempos no productivos por *bit balling*. Caso estudio.

OPERACIÓN	NPT (Horas)	VALOR (USD)
Sacando Tubería	9 horas	
Evaluación de la Broca Cambio de BHA Broca	1 hora	
Bajando Tubería	5 horas	
	15 horas	\$34000
Limpieza (subiendo una parada, circulando)	5 horas	\$15000
Reducción en la tasa de penetración ROP (300 ft)	10 horas	\$30000
Total	32 horas	\$79000

Evaluación de Tiempos No Productivos: Considerando que un valor promediado del costo del taladro (equipo de perforación y compañías en general) es de

aproximadamente USD 70000/día, la Tabla 3 muestra los costos asociados a tiempos no productivos por el problema de *bit balling* en el pozo ⁽⁶⁾.

Es así como al pozo *Gavan A* el haber presentado el problema de *bit balling* le costó cerca de USD 80000, el equivalente a más de un día de trabajo en pozo, demostrando que si se presenta este problema, se genera un impacto significativo sobre los costos del taladro y más aún si se reproduce a los largo de ellos.

3.2 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA FORMACIÓN

Selección de la Muestra: Como se indicó anteriormente, Guayabo, Carbonera, Lutita y Honda son las formaciones más susceptibles a sufrir problemas de *bit balling*. Sin embargo, debido a la facilidad de muestreo ya que es un afloramiento, y a un estudio realizado por H, Laguna et al (2008), donde se indica que la naturaleza mineralógica de la formación Honda contiene diferentes proporciones de fase esmectítica dioctaédrica (entre 24 y 64%), con comportamiento similar al de la montmorillonita [26]; esta formación resultó como opción más favorable en la elección para recolección de muestra y posterior análisis (Ver ANEXO G).

Las coordenadas del lugar de recolección fueron las siguientes:

Tabla 4. Coordenadas del afloramiento al cual se realizó el muestreo.

FORMACIÓN	LONGITUD	LATITUD	COORDENADAS ORIGEN BOGOTÁ	
			X	Y
C ₂	-74°56'18.93"	+4°37'44.47"	904826	1003372

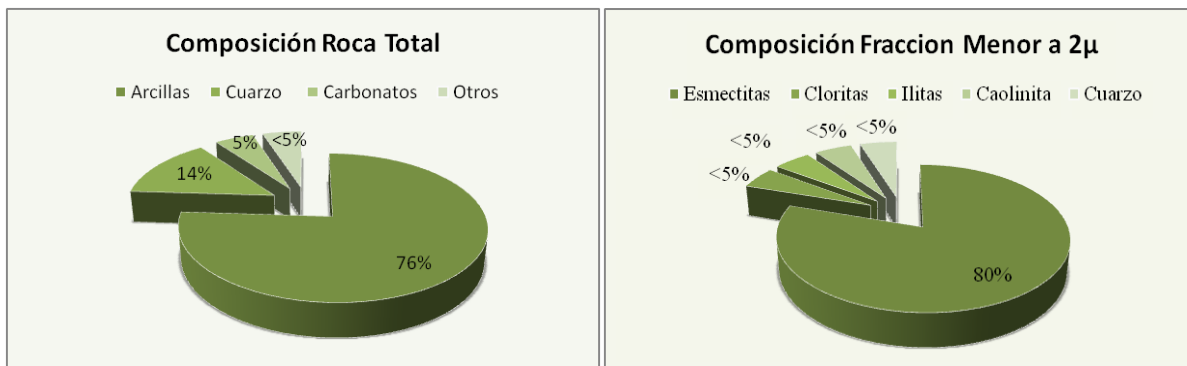
Caracterización de la Muestra: El análisis de Difracción de Rayos-X realizado a la muestra catalogada como C₂ (Sample ID 20061139), indica que está constituida principalmente por minerales arcillosos que corresponden al 76% en peso aproximadamente. El cuarzo, (SiO₂) constituye el mineral secundario y representa

⁶ Los datos utilizados para la realización del análisis de Tiempos No Productivos fueron suministrados por el Ingeniero Mario Roa. *Superintendencia de Perforación GTD-E&P, ECOPETROL S.A Bogotá, Colombia.*

contenidos alrededor del 14% en peso. Adicionalmente se encontraron minerales accesorios en contenidos inferiores al 5% en peso, entre ellos carbonatos tipo calcita (CaCO_3).

El Difractograma que se obtuvo para el análisis de los minerales arcillosos caracterizados a fracción menor a $2\ \mu\text{m}$ puede observarse en el ANEXO G (Figura G2). Su estudio indica que esta fracción representa el 95% en peso aproximadamente. Los minerales arcillosos son arcillas hinchables tipo esmectitas que representan contenidos alrededor del 80% en peso; mientras el 20% restante corresponde a minerales arcillosos tipo illita, clorita y caolinita; estos minerales se encontraron en proporciones similares, alrededor del 5% en peso.

Figura 4. Composición roca total muestra C₂ y Composición fracción menor a $2\ \mu\text{m}$ muestra C₂



Por otra parte, el resultado de la prueba de MBT corroboró la composición reactiva de la muestra, cuyo resultado fue de 81.22 lb bentonita equivalente /100 libras de *shale* (Ver ANEXO H). J. Lummus (2008), establece que los sólidos perforados son catalogados dentro de una zona de alto contenido de arcilla reactiva cuando supera el punto crítico de 15 lb bentonita equivalente /100 libras [27].

3.3 RESULTADOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL BIT BALLING

Evaluación de Lodos: El estudio reológico realizado a los 3 lodos determinó un comportamiento pseudoplástico característico de un típico fluido de perforación. En forma general los Lodos 2 y 3 presentaron un aumento en el esfuerzo al aumentar las revoluciones del rotor debido al aumento de bentonita en la formulación, la cual

produce un incremento en la viscosidad de la suspensión (Figura 5). Así mismo, el análisis tixotrópico indica un aumento en la fuerza para mover el lodo al aumentar el tiempo de reposo en los tres fluidos. Sin embargo, los Lodos 2 y 3 presentan una formación de geles progresivos (Figura 6), donde existe una variación amplia entre la indicación inicial del gel y las indicaciones de gel a 10 y 30 min, propiciado una acumulación de sólidos en los lodos. *M-I SWACO* en su manual [28], establece que la formación de geles progresivos puede indicar problemas en el sistema de fluido; por tal motivo y sumado a las altas viscosidades presentes en los Lodos 2 y 3, el fluido que presenta mejor comportamiento reológico es Lodo 1.

Figura 5. Reograma de esfuerzos para las formulaciones de lodo.

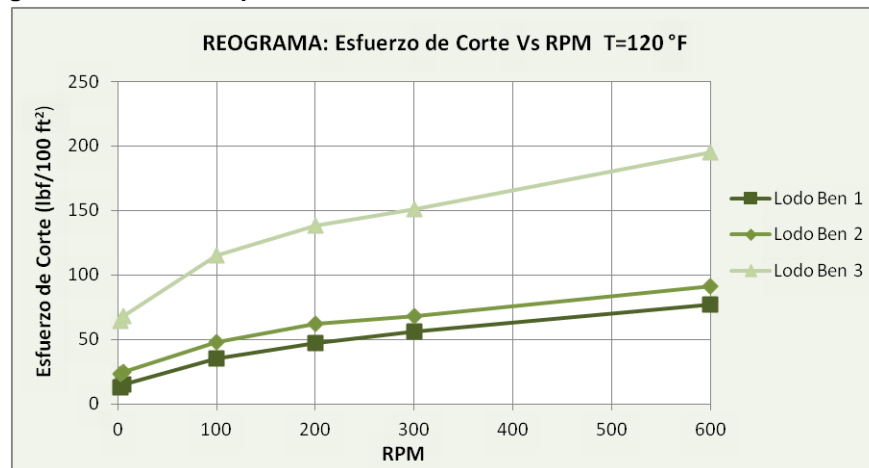
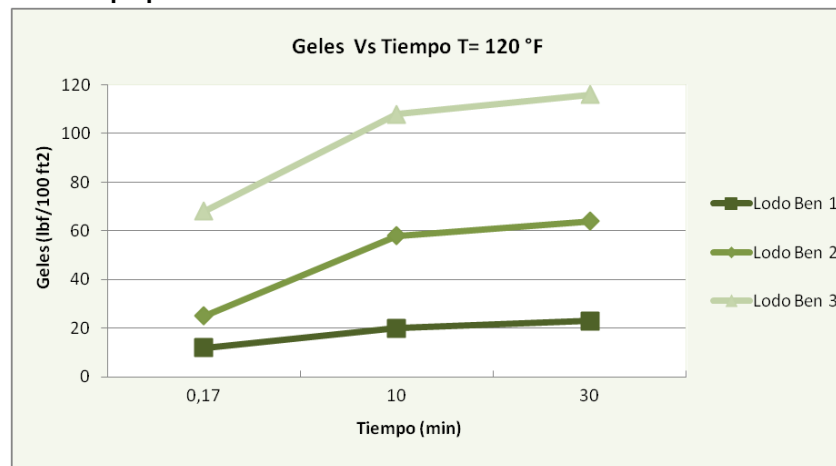


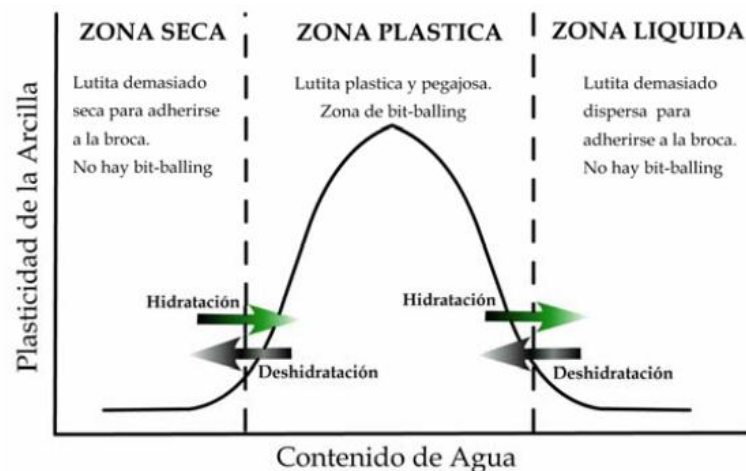
Figura 6. Geles Vs Tiempo para las diferentes formulaciones de lodo.



La viscosidad plástica, fuerza gel y viscosidad aparente para cada lodo evaluado se registran en el ANEXO I.

Resultados de Pruebas de Acreción: Para el estudio de los resultados de las pruebas de Acreción, se tomó como referencia el modelo para embotamiento de la broca propuesto por Van Oort (2003). En él se establece que incrementando el contenido de agua de una arcilla, conllevará primero a una zona seca por debajo del límite plástico (Ver Figura 7); en esta zona el material es demasiado seco como para tener una tendencia significativa a adherirse. Por encima del límite plástico, a contenidos de agua más altos la tendencia a adherirse incrementa rápidamente. Si el contenido de agua es incrementado aun mas, el límite líquido es alcanzado tal que el material tiene una resistencia inherente muy limitada y se dispersará [16]. En el gráfico se observa que hay una clara zona de peligro para embotamiento de la broca: La zona plástica a contenidos de agua intermedios.

Figura 7. Modelo para *bit balling*.



Fuente: Van Oort. 2003.

Los análisis de estas pruebas indican que al utilizar agua como fluido, se alcanza el límite líquido y no se presenta ningún tipo de adherencia al tubo de acero. Por otro lado, al utilizar el fluido con un contenido de bentonita de 15 lb/barril (43 kg/m^3) se empieza a observar adherencia de muestra al tubo de acero, y al ser

incrementado el contenido de bentonita, como en el Lodo 2 y Lodo 3 con contenidos de 20 lb/barril (57 kg/m^3) y 25 lb/barril (71 kg/m^3) de bentonita respectivamente; se presenta mayor adherencia de muestra al tubo. En la Figura 8 se observa el resultado de adherencia para el Lodo 2. El registro fotográfico realizado en cada prueba se registra con detalle en el ANEXO J.

Figura 8. Registró fotográfico prueba de Acreción utilizando el Lodo 2.



De lo anterior se concluye que todos los casos en los que se usó lodo bentonítico se encuentran en la zona plástica o zona de *bit balling*; resaltando que la naturaleza mineralógica de la bentonita se suma a la naturaleza reactiva de la muestra promoviendo la adherencia en cada prueba realizada. Los resultados de la diferencia de pesos para los tubos de acero se registran en el ANEXO J (Tabla J1).

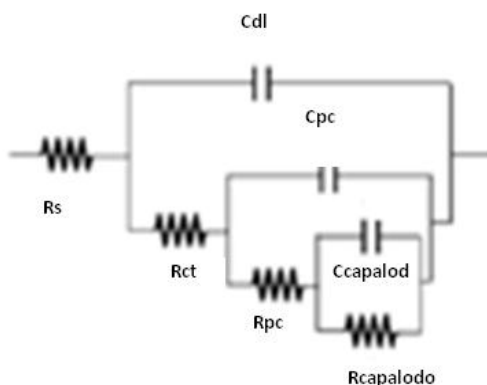
Técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica: La técnica EIS fue utilizada con el fin de estudiar el comportamiento interfacial que ocurre entre el metal y la arcilla hinchada, y así generar conocimiento básico que permita entender el problema de *bit balling*. Para el análisis de resultados de estos ensayos, se obtuvieron los correspondientes espectros de Bode y de Nyquist en los sistemas Agua+Muestra C_2 , Lodo 1+Muestra C_2 , Lodo 2+Muestra C_2 , Lodo 3+Muestra C_2 .

En el ANEXO K se observan los espectros de Nyquist utilizando como electrolito agua y muestra C₂, al finalizar este ensayo no se observó adherencia de muestra al electrodo. Sin embargo, la inspección visual realizada, indicó productos de corrosión en alta proporción, como consecuencia del ataque electroquímico del agua y una nula adherencia de la muestra de análisis a la superficie del electrodo.

Para el análisis de los datos de impedancia electroquímica se emplearon dos tipos de circuitos equivalentes. El primero de ellos, es el circuito de Randles, en el cual se supone la generación experimental de un domo en el espectro de Nyquist y presenta tres elementos, R_s – resistencia de la solución en serie, con un circuito en paralelo entre el valor de la resistencia a la transferencia de carga y la capacitancia de la doble capa eléctrica. Sin embargo, para el análisis de los datos obtenidos a partir de los ensayos con los lodos, la resistencia a la transferencia de carga se reemplaza por la resistencia del lodo en la interfaz electrolito metal y la capacitancia formada por el lodo adherido a la superficie del electrodo de trabajo.

La propuesta de circuito de análisis empleado en la simulación de los espectros obtenidos utilizando los sistemas de Lodos+Muestra C₂, se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** En esta figura, R_s - representa la resistencia de la solución, R_{ct} - resistencia a la transferencia de carga, C_{dl} - capacitancia de la doble capa, R_{pc} - resistencia de los productos de corrosión, R_{capalodo} - resistencia de la capa de lodo y muestra depositada en el electrodo de trabajo y C_{capalodo} – capacitancia del lodo. El modelo se caracteriza por la presencia de tres escenarios electroquímicos, relacionadas por una capacitancia y una resistencia en paralelo respectivamente. La primera interfaz hace referencia a la doble capa desarrollada por la absorción de iones presentes en los lodos. La segunda interfaz se relaciona a la reacción electroquímica dada por el material y el medio acuoso, y la última interfaz corresponde a la interacción electroquímica entre los minerales arcillosos en la suspensión cuyo efecto se manifiesta en la adsorción y posterior adhesión del lodo sobre el material.

Figura 9. Modelo de circuito equivalente propuesto.



En el ANEXO L se presentan los espectros de Nyquist y Bode obtenidos como resultado del experimento realizado al Lodo 1+Muestra C₂. En ellos se presenta un aumento en las capacitancias (Z_i), dado por el incremento en la adherencia de material en el electrodo a medida que aumenta el tiempo de análisis. La Tabla 5 registra los valores de resistencia y las observaciones realizadas después de cumplir cada ensayo.

Tabla 5. Resultados Impedancia Electroquímica.

MUESTRA EVALUACIÓN	CIRCUITO ANÁLISIS	TIEMPO (HR)	RESISTENCIA SOLUCIÓN (OHMIOS)	RESISTENCIA LODOS (OHMIOS)	OBSERVACIONES
Agua+40 g muestra C₂	Randles	0	--	--	Productos de Corrosión en Alta Proporción Después del ensayo
		1	92.38	67.23	
		2	91	63.43	
		4	89.18	65.23	
		24	88.63	77.38	
Lodos 1 +40 g muestra C₂	Lodos	0	18.74	120.6	Productos de Corrosión + Capa de Lodo y Muestra Después del ensayo
		1	18.72	127.7	
		2	17.85	146.9	
		4	17.5	210	
		24	17.79	500	
Lodos 2 +40 g muestra C₂	Lodos	0	17.96	90	Productos de Corrosión + Capa de Lodo y Muestra Después del ensayo
		1	15.84	130	
		2	14.7	130.5	
		4	14.49	130.5	
		24	13.9	210	

Tabla 5. Continuación Resultados Impedancia Electroquímica.

MUESTRA EVALUACIÓN	CIRCUITO ANÁLISIS	TIEMPO (HR)	RESISTENCIA SOLUCIÓN (OHMIOS)	RESISTENCIA LODOS (OHMIOS)	OBSERVACIONES
Lodos 3+40 g muestra C₂	Lodos	0	21.14	100	Productos de Corrosión + Capa de Lodo. y Muestra Después del ensayo
		1	14.37	110	
		2	14.67	120.5	
		4	14.69	120.5	
		24	15.05	200	

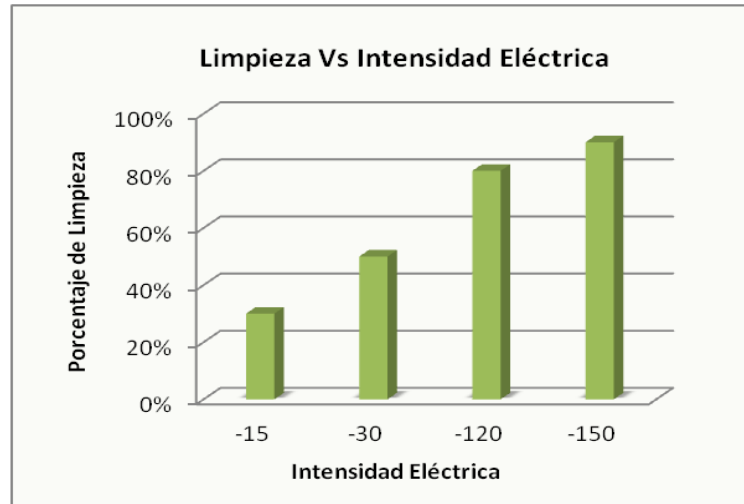
Para todos los sistemas Lodo+ Muestra analizados, se observó un incremento en la resistencia de lodos producida por el aumento en capacitancia de la doble capa; esto se debe a la expansión de la estructura cristalina de los minerales en el sistema, causando un aumento en volumen y plasticidad, los cuales se ven reflejados en la adherencia al electrodo.

3.4 RESULTADOS DE ELECTRO-ÓSMOSIS

Para la aplicación de la técnica Galvanostática se utilizó el Lodo 1 por presentar el mejor comportamiento reológico, dado que su baja viscosidad facilitó el movimiento del electrodo en el montaje y en él se observó mejor suspensión de la muestra. En los ensayos, la celda funcionó de la siguiente manera: El electrodo de trabajo fue polarizado como cátodo al aplicarle corriente negativa y la obtención de las curvas Galvanostáticas determinaron los valores de Voltaje Vs tiempo durante la aplicación de la corriente.

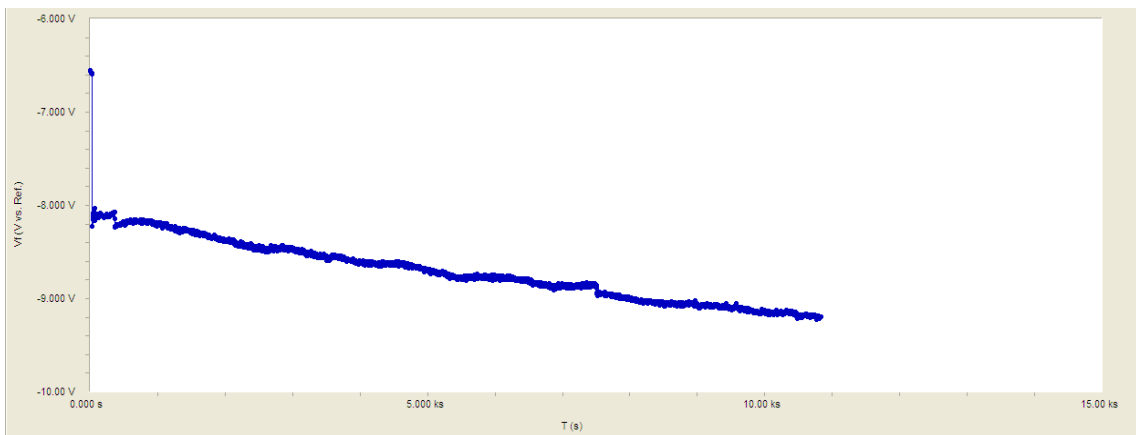
Los resultados obtenidos al aplicar intensidades eléctricas de -15 mA, -30 mA, -120 mA y -150 mA por un periodo de 4 horas, mostraron una variación caótica en los voltajes registrados por el equipo (Ver ANEXO M). Sin embargo, los resultados en porcentaje de limpieza descritos por la inspección visual hecha a los electrodos después de finalizar cada ensayo, muestran claramente una tendencia de reducción en la adherencia al aumentar la corriente aplicada, representados en la Figura 10. Por otra parte, para intensidades de -300 mA y -600 mA no pudo aplicarse la técnica por sobrecarga, debida a la alta resistencia de la suspensión.

Figura 10. Porcentaje de limpieza del electrodo al aplicar diferentes intensidades eléctricas.



Para obtener una máxima limpieza en el electrodo, fue necesario aplicar una intensidad de corriente de -150 mA por un periodo de 6 horas. La curva Galvanostática indica una tendencia lineal como respuesta del sistema, al ser aplicada la técnica, cuyo voltaje varía en el rango de 8 a 9 Voltios (Figura 11).

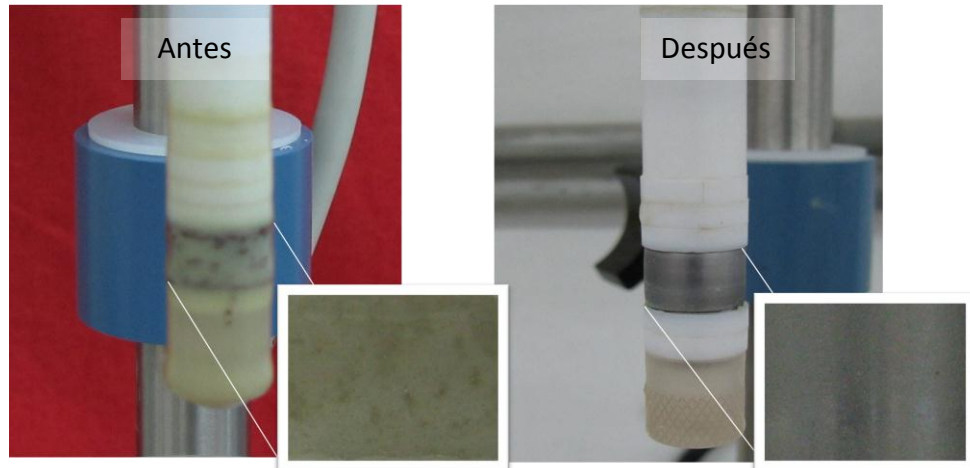
Figura 11. Curva Galvanostática corriente final -50 mA/cm².



Fuente: Reporte de resultados GAMRY.

El resultado de la inspección visual realizada antes y después de aplicar la técnica Galvanostática con mejor resultado se observa en la siguiente figura.

Figura 12. Registro fotográfico antes y después de utilizar la técnica Galvanostática.



Resultados Paralelos

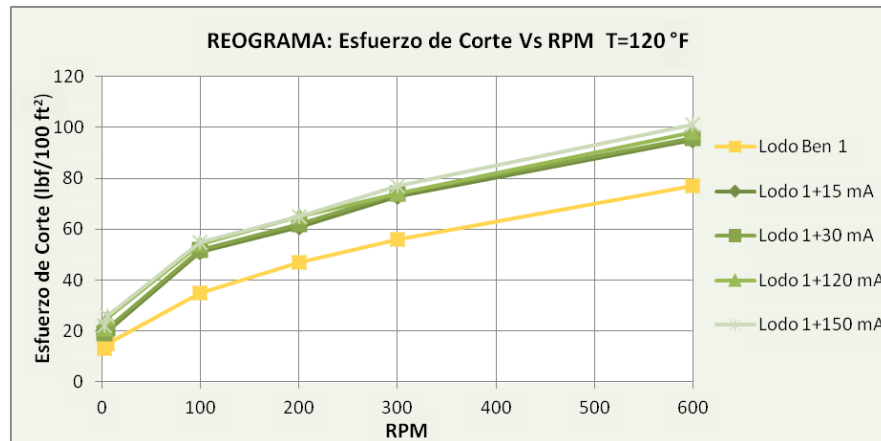
A pesar del éxito que obtuvo la técnica Galvanostática para demostrar el fenómeno de electro-ósmosis, al finalizar los ensayos se presentó una aglomeración de los sólidos en suspensión (Ver ANEXO N), lo cual puede convertirse en un problema grave al momento de aplicar la técnica en procesos reales de perforación. Por tal motivo, fue necesario realizar pruebas reológicas para identificar el cambio en viscosidades que presentó cada lodo al ser aplicadas las diferentes intensidades de corriente.

La Figura 13 registra un aumento en el esfuerzo de corte al aumentar las revoluciones del equipo después de aplicar cada técnica. Aunque al parecer la intensidad de corriente no parece ampliar en forma progresiva este problema, *M-I SWACO* [28] establece en su manual que un aumento en la viscosidad del lodo no planeado durante operaciones en tiempo real, puede generar un aumento en las presiones en fondo, favorecer la pega de tubería o incrementar el arrastre de sólidos provocando mayores cavings, dando inicio a un derrumbe de pozo. Por lo contrario, un aspecto que puede favorecer la aglomeración de partículas solidas es la limpieza del fluido de perforación en superficie. Sin embargo, cabe resaltar que en operaciones de perforación el fluido está en constante circulación; esta

condición dinámica puede hacer posible que el fluido no se vea afectado por la aplicación de corriente

Los resultados de viscosidades y punto de cedencia se registran en el ANEXO O.

Figura 13. Reograma de Esfuerzos para Lodo 1 después de aplicar la técnica Galvanostática



Resultados Posteriores

Una vez demostrado que la electro-ósmosis funcionó como alternativa de solución al problema de adherencia utilizando el Lodo 1 y muestra C₂; se decidió aplicar la técnica Galvanostática en un lodo polimérico, empleando una intensidad eléctrica de -150 mA, y de esta forma verificar la veracidad de la técnica utilizando una formulación de lodo base agua diferente. En el ANEXO P se registra toda la información correspondiente a las pruebas realizadas para este lodo.

A pesar de observarse adherencia al tubo de acero en la prueba de Acreción; al aplicar la técnica Galvanostática no fue posible encontrar una condición electroquímica suficiente para obtener la capa de agua en la superficie del electrodo de trabajo; esto se debió a que no se lograron las condiciones de suspensión de la muestra, en donde a pesar del movimiento del magneto y el electrodo, se iba al fondo del cilindro.

Los resultados obtenidos después de aplicar la intensidad eléctrica, mostraron que el lodo cambió de apariencia convirtiéndose en un líquido espumoso. El análisis de

las pruebas reológicas indican un descenso en la viscosidad plástica, punto de cedencia y viscosidad aparente medidas para el lodo. Al igual que en el caso anterior, este efecto puede causar cambios en el sistema de fluido, en operaciones de perforación. Sin embargo, la anterior afirmación está sujeta a la implementación de la técnica de electro-ósmosis en campo

CONCLUSIONES

La evaluación de la incidencia, frecuencia e impacto económico asociados a problemas de *bit balling* durante la perforación de pozos en Colombia, permite reconocer la necesidad de mayor inversión en estudios que promuevan su solución, ya que este evento se presenta a través de varias formaciones del piedemonte y puede ser repetitivo a lo largo de la perforación. La aplicación de los resultados investigativos se verá reflejada en la reducción de tiempos no productivos asociados al aumento en la tasa de penetración cuando se perfora una formación reactiva.

La reactividad de los minerales arcillosos y su interacción con los diferentes componentes presentes en los fluidos, puede contribuir a un aumento del problema de embotamiento. El análisis realizado al estudio de adherencia demuestra que se da en forma progresiva y se debe a la expansión de la estructura mineralógica de la arcilla cuando entra en contacto con el agua del fluido de perforación.

La demostración del fenómeno de electro-ósmosis a partir de la técnica Galvanostática, se presenta como solución potencial al problema de *bit balling*. Sin embargo, los efectos secundarios asociados a cambios en las propiedades del fluido que inciden en forma directa sobre los parámetros de perforación, podrían limitar la aplicación de esta técnica durante la perforación de pozos en tiempo real.

RECOMENDACIONES

Se recomienda validar el fenómeno de electro-ósmosis en un simulador de perforación; de esta forma se podrá verificar su funcionalidad como solución al problema de *bit balling* utilizando diferentes formulaciones de lodo base agua y rocas con variaciones en su composición mineralógica. Así mismo, se recomienda modificar parámetros como WOB, RPM y torque para observar si realizando modificaciones a estas variables se mejora, no tiene incidencia o empeora el *bit balling* con la aplicación de la técnica electro-osmótica.

Debido a las grandes profundidades a las cuales se lleva a cabo la perforación de pozos, no es posible utilizar una fuente de poder externa que genere el flujo de corriente necesario para dar paso a este fenómeno. Por tal motivo, se recomienda la construcción de un alternador que convierta la energía producida por el movimiento del fluido y/o el sistema de perforación en energía eléctrica o comprobar si una pila integrada al BHA puede funcionar como fuente de poder para aplicar la técnica.

Por las grandes profundidades perforadas también es necesaria la construcción de un sistema autónomo de carga entre la broca y el resto del BHA. Esto requiere que tanto el cátodo como el ánodo se encuentren en la columna de perforación e implica que la broca y posiblemente el ánodo estén aislados del resto del *drill string*. Por tal motivo, se recomienda estudiar diferentes materiales aislantes que resistan las condiciones de altas temperaturas, altas presiones, torque y vibraciones presentes en operaciones reales de perforación.

REFERENCIAS BIBLIÓGRAFICAS

- [1] ROY, S y COOPER, G. Prevention of bit balling in shales. Preliminary Results. En: SPE Drilling & Completion (1993). p. 195-200.
- [2] FERNÁNDEZ V, William. Determinación de la eficiencia de membrana en rocas arcillosas a partir de la selectividad iónica para la obtención del gradiente de presión osmótico efectivo. Bucaramanga. Trabajo de grado (Ingeniero de Petroleos). Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petroleos. Universidad Industrial de Santander, 2008.
- [3] RESTAN C, Luis y OSPINA H, Gustavo. Mucilago de fique como producto estabilizador de arcillas. Bucaramanga. Trabajo de grado (Ingeniero de Petroleos). Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petroleos. Universidad Industrial de Santander, 2005.
- [4] ROY, S y COOPER, G. Prevention of bit balling by electro-osmosis. En: SPE Western Regional Meeting (1994). p. 335-349.
- [5] HARIHARAN, P y COOPER, G. Bit balling reduction by electro-osmosis while drilling shale using a model BHA (Bottom Hole Assembly). En: IADC/SPE Drilling Conference (1998). p. 913- 924.
- [6] DIAZ R, John y RUEDA A, Marcela. Diseño de la ventana operacional de lodo mediante un modelo químico termo elástico. Bucaramanga. Trabajo de grado (Ingeniero de Petroleos). Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petroleos. Universidad Industrial de Santander, 2011.
- [7] AMOROCHO, Ricardo. Análisis de la interacción química entre los fluidos de formación, fluidos de perforación y composición mineral de rocas arcillosas en la estabilidad del pozo. Bucaramanga. Trabajo de grado

(Geologo). Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Universidad Industrial de Santander, 2004.

- [8] QUIJADA, Kalam y PÉREZ, Ramón. Evaluación de campo de inhibidores alternativos en el distrito Anaco. PDVSA. Seflucempo. Isla Margarita, 2004.
- [9] SANCHEZ, Erna; GRATEROL, Leonardo y SUAREZ, Jaime. Metodología de selección de parámetros óptimos de perforación de formaciones lutíticas para estabilidad del pozo. Parte I. PDVSA. Seflucempo. Isla Margarita 2004.
- [10] LOMBA, R; CHENEVERT, M y SHARMA M. The Ion-Selective membrane behavior of native shales. En: Journal of Petroleum Science and Engineering. Elsevier. 2000.
- [11] REYES, R Y VARGAS, J. Análisis del fenómeno de ósmosis entre fluidos de perforación y formaciones Arcillosas. Trabajo de grado (Ingeniero de Petroleos). Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petroleos. Universidad Industrial de Santander, 2005.
- [12] CHEATHAM, C; SUN, S y NAHM, J. Bit balling in water-reactive shale during Full-Scale drilling rate tests. En: IADC/SPE Drilling Conference (1990). p. 169-178.
- [13] LEDGERWOOD III, L. Bit balling and wellbore instability of downhole shales. En: SPE Annual Technical Conference and Exhibition (1991). p. 393-404.
- [14] SPEER, John. A Method for determining optimum drilling techniques. En: API (1958). p. 130-147.
- [15] KENDAL, H y GOINS, W. Design and operation of jet bit programs for maximum hydraulic horsepower, impact force or jet velocity. En: SPE (1960). p. 238-247.

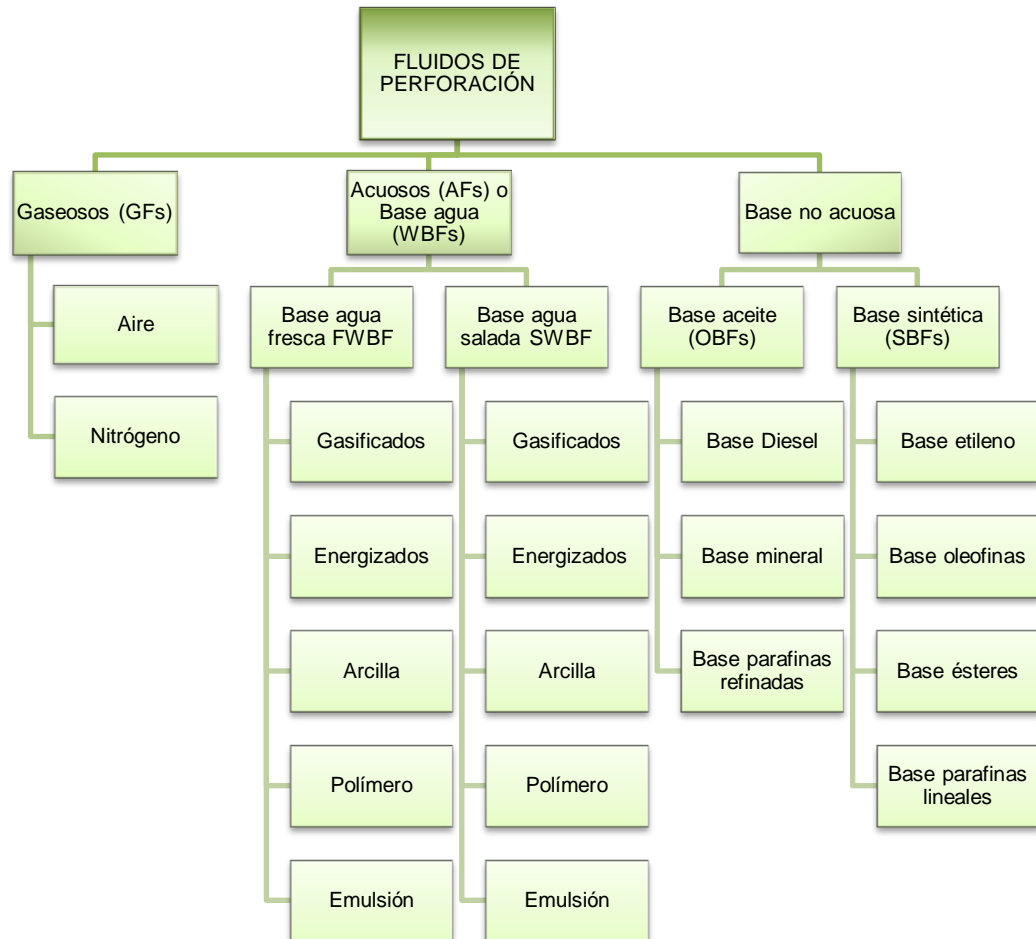
- [16] VAN OORT, E. A novel technique for the investigation of drilling fluid induced borehole instability in shales. En SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering Conference. 1994.
- [17] WELLS, Michael; MARVEL, Tim; BEUERSHAUNSEN, Chad. Bit Balling Mitigation in PDC Bit Desing. En: IADC/SPE. 2008.
- [18] ORANGE, M; MOREFIELD, S y HOCK, V. Electro-Osmotic Pulse Technology for Corrosion Prevention and Control of Water Intrusion in Below Grade Concrete Structures. En: RI-Services/Corrosion conference (2007). p. 60-68.
- [19] HOCK, V y KIRSTEIN, E. Demonstration of electro-osmotic pulse technology for groundwater intrusion control in concrete structures. En: Army Science and Technology, 1998.
- [20] CABRERA, R; MARIN, J; GONZALEZ, I. La utilización de la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) para identificar diferentes estados superficiales en el proceso de corrosión del acero al carbono en medios amargos. En: Sociedad Química de México (2007). p. 32-41.
- [21] ESCOBEDO, E y ZAMORA, L. Modelado dinámico de celdas de combustible. Cuernavaca. Trabajo de grado. Magister en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. 2006.
- [22] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS C775-79 (1997). Standard Method for Particle-Size Analysis of Whiteware Clays. 2002. ASTM Standards, West Conshohocken, Pennsylvania, United States.

- [23] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE RP 13I (2009). Recommended Practice for Laboratory Testing of Drilling Fluids. API Standards, Washington, DC, United States.
- [24] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE RP 13B-1 (2009). Recommended Practice for Laboratory Testing of Drilling Fluids. API Standards, Washington, DC, United States.
- [25] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS G106-89 (2010). Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements. 2002: ASTM Standards, West Conshohocken, Pennsylvania, United States.
- [26] LAGUNA, H; MOLINA, C; MORENO, S; et al. Naturaleza mineralógica de esmectitas provenientes de la formación honda (Noreste del Tolima Colombia). En: Boletín Ciencias de la Tierra, 2008.
- [27] LUMMUS, J y AZAR, J. Drilling Fluids Optimization a Practical Field Approach. PennWell Books. Tulsa, Oklahoma. 1986. 263 p.
- [28] M-I SWACO A SCHLUMBERGER COMPANY. Drilling Fluids Engineering Manual. Version v2s. 2006.
- [29] RAMIREZ, Nubia. Guía de manejo integral de residuos de perforación de pozos de petróleo y gas. Piedecuesta. Instituto Colombiano del Petróleo - Unidad de Disciplinas Especializadas (ICP-UDE).Ecopetrol, 2011

ANEXOS

ANEXO A. TIPOS DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN.

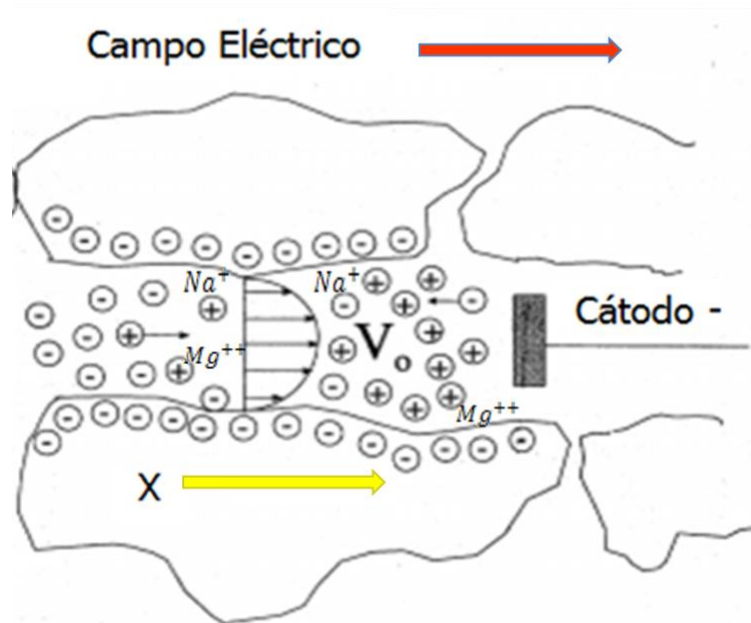
Figura A1. Mapa conceptual de los diferentes tipos de fluidos de perforación utilizados en la industria del petróleo.



Fuente: N, Ramírez. 2011.

ANEXO B. FENÓMENO DE ELECTRO-ÓSMOSIS EN UN PORO.

Figura B1. Movimiento de los cationes en un poro por electro-ósmosis.



Fuente: O, Marshall, et al. 2007.

ANEXO C. REOLOGÍA. DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD PLÁSTICA, PUNTO DE CEDENCIA Y FUERZA GEL PARA FLUIDOS DE PERFORACIÓN.

- Viscosidad Plástica: Es aquella parte de la resistencia a fluir causada por fricción mecánica entre los sólidos contenidos en el lodo y entre los sólidos y el líquido que les rodea. La viscosidad plástica η_p del lodo se determina como la diferencia entre las lecturas a 600 y 300 RPM.

$$\eta_p = R_{600} - R_{300}$$

Dónde:

η_p : Viscosidad plástica (cP)

R_{600} : Lectura a 600 RPM

R_{300} : Lectura a 300 RPM

- Punto de Cedencia: Se define como la resistencia a fluir causada por las fuerzas de atracción electroquímica entre las partículas solidas y se determina como:

$$Y_p = R_{300} - \eta_p$$

Dónde:

Y_p : Punto de cedencia (lb/100 ft²)

R_{300} : Lectura a 300 RPM

η_p : Viscosidad plástica (cP)

- Viscosidad aparente: Se determina como

$$\eta_a = \frac{R_{600}}{2}$$

Dónde:

η_a : Viscosidad Aparente (cP)

ANEXO D. FORMULACIÓN DE FLUIDOS BENTONÍTICOS ⁽⁷⁾.

Tabla D1. Formulación lodo 1 bentonítico por cada barril Equivalente (350 cm³) preparado.

COMPONENTE	PESO	FAMILIA QUIMICA	APLICACIÓN
BENTONITA	15 g	Mineral	Viscosificador
PAC R	1 g	Polímero	Reductor de filtrado
PAC L	1 g	Carbohidrato	Reductor de filtrado
BACTERICIDA	0.5 g	Aldehído	Bactericida
Fuente: El autor			

Tabla D2. Formulación lodo 2 bentonítico por cada barril Equivalente (350 cm³) preparado.

COMPONENTE	PESO	FAMILIA QUIMICA	APLICACIÓN
BENTONITA	20 g	Mineral	Viscosificador
PAC R	1 g	Polímero	Reductor de filtrado
PAC L	1 g	Carbohidrato	Reductor de filtrado
BACTERICIDA	0.5 g	Aldehído	Bactericida
Fuente: El autor			

Tabla D3. Formulación lodo 3 bentonítico por cada barril Equivalente (350 cm³) preparado.

COMPONENTE	PESO	FAMILIA QUIMICA	APLICACIÓN
BENTONITA	25 g	Mineral	Viscosificador
PAC R	1 g	Polímero	Reductor de filtrado
PAC L	1 g	Carbohidrato	Reductor de filtrado
BACTERICIDA	0.5 g	Aldehído	Bactericida
Fuente: El autor			

⁽⁷⁾ Los productos utilizados para elaborar los lodos fueron fabricados por “Fluidos para Perforación Baroid”. Los aditivos BENTONITA, PAC R Y PAC L, NO poseen ninguna clase de riesgo (EPA SARA 311, 312), NO contienen productos químicos tóxicos (EPA SARA 313) y NO se consideran como residuos peligrosos (Clasificación de residuos peligrosos de la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA) de la EPA). Se recomienda estudiar la ficha de seguridad del BACTERICIDA antes de su uso.

ANEXO E. PROCEDIMIENTO PRUEBA DE ACRECIÓN.

Los sólidos utilizados en la prueba de acreción son tamizados a través de una malla # 5 y son retenidos en una malla # 10.

PROCEDIMIENTO

1. Limpiar y secar los tubos de metal del Kit de acreción con detergente y agua tibia.
2. Registrar el peso inicial del tubo de metal limpio y seco en la balanza analítica.
3. Colocar cada tubo de metal en una celda del horno de rolado, sumergido dentro de 350 cm³ (1 barril equivalente) de fluido a evaluar.
4. Adicionar 20 gramos de cortes de perforación (*Shale*) de la formación que se está evaluando por la parte externa del tubo sobre la superficie del fluido. (Distribuirlo de manera uniforme alrededor de la superficie externa del tubo).
5. Colocar en el horno de rolado por 45 minutos a una temperatura de 66 °C (150 °F).
6. Después de 45 minutos de rolado, remover el tubo del fluido.
7. Rodar el tubo sobre una toalla de papel limpia para retirar el exceso de fluido.
8. Registrar la acreción de los cortes sobre el tubo con una fotografía tomada con una cámara digital si es posible.
9. Colocar el tubo a secar estáticamente por 20 minutos aproximadamente a 85 °C (185 °F).
10. Retirar del horno, dejar enfriar por 15 minutos, medir y registrar el peso final del tubo con la muestra adherida.
11. Reportar la cantidad de cortes adheridos al metal como la diferencia en peso, en porcentaje comparado con el peso inicial de cortes (20 gramos).

Figura F1. Diagrama del procedimiento para pruebas de acreción.



Fuente: El autor

ANEXO F. POZOS ECOPETROL Y FORMACIONES COLOMBIANAS QUE PRESENTARON MAS PROBLEMAS ASOCIADOS AL BIT BALLING.

Tabla F1. Top 10 de los pozos ECOPETROL que presentaron problemas de *bit balling* en los últimos 4 años.

	POZO	AÑO	NÚMERO DE OPERACIONES
1	TENAY 12	2008	19
2	CARIBE 7	2010	18
3	ZULIA PROFUNDO 1	2007	16
4	TENAY 9	2008	15
5	TENAY 7	2007	15
6	GALAN 130	2008	12
7	TEMPRANILLO 2	2008	12
8	GALAN 133	2008	10
9	CASABE 122	2008	10
10	CASTILLA 42	2007	10

Fuente: El autor

Tabla F2. Formaciones asociadas a campos ECOPETROL en las cuales se presentaron más problemas de *bit balling*.

CAMPO	FORMACIÓN
APIAY	Carbonera Unidad C2
	Guayabo
AZUCENA	Honda
BONANZA	Esmeralda
CARIBE	Orito Belén
	Rumiyaco
	Villeta
CASABE	Carbonera Unidad C1
	Mugrosa
	Real
	Colorado A1

Fuente: El autor

Tabla F3. Continuación formaciones asociadas a campos ECOPETROL en las cuales se presentaron más problemas de *bit balling*.

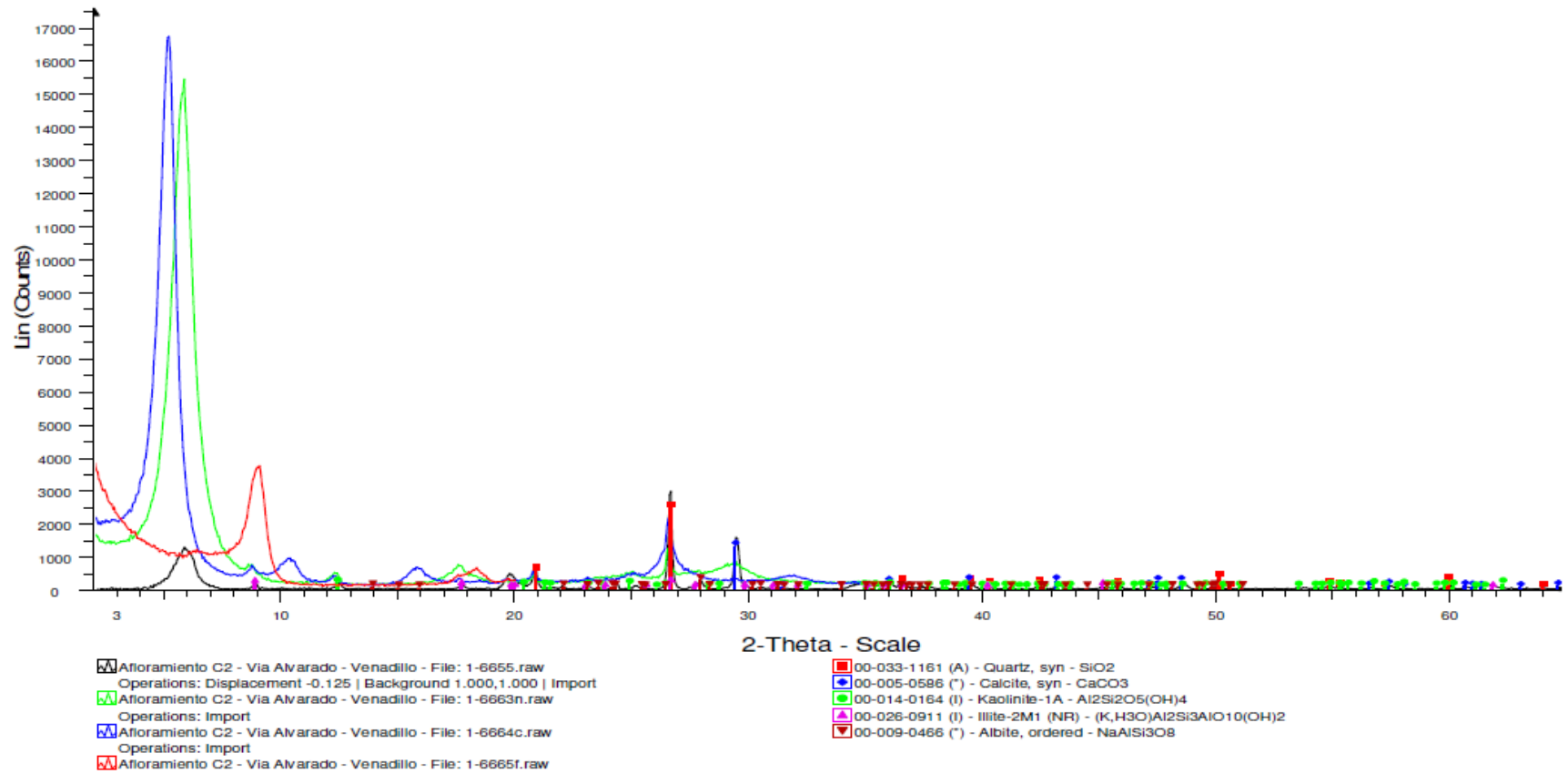
CAMPO	FORMACIÓN
CASTILLA	Carbonera Unidad C2
	Carbonera Unidad T1
	Carbonera Unidad T2
	Carbonera Unidad E4
	Guayabo
	Lutita E
	Lutita E4
	San Fernando
CHICHIMENE	Carbonera Unidad C1
	Carbonera Unidad C2
	Lutita E
	San Fernando
CHURUYACO	Rumiyaco
COPORO	Carbonera Unidad C5
	Carbonera undad C6
	Carbonera Unidad C7
GALAN	Mugrosa
GUATIQUEIA	Carbonera Unidad C2
ORITO	Carbonera Unidad C2
	Guayabo
RUMBERO	Grupo Real
TENAY	Honda
SURIA SUR	Carbonera Unidad C1
ZULIA PROFUNDO	Carbonera Unidad C2
	Guayabo
Fuente: El autor	

ANEXO G. MUESTREO DE LA FORMACIÓN Y DIFRACTOGRAMA.

Figura G1. Imágenes del lugar del muestreo realizado por el Ingeniero Juan Espinosa. Formación Honda (Noreste del Tolima - Colombia).



FIGURA G2. Difractograma Formación C₂ (SAMPLE ID: 200611739).



Fuente: Reporte de resultados Laboratorio de Difracción de Rayos-X.

ANEXO H. CÁLCULOS PARA PRUEBA AZUL DE METILENO.

La capacidad de azul de Metileno de los sólidos (MBT_{DS}) está dada por la siguiente ecuación:

$$MBT_{DS} = \frac{V}{m_{DS}}$$

Dónde:

MBT_{DS} : Es la capacidad de azul de Metileno de los sólidos perforados, en miliequivalentes por cien gramos (meq/100g).

V: Volumen de la solución de azul de metileno usado en la titulación.

m_{DS} : Masa de la muestra de sólidos.

Tabla I1. Resultados de capacidad de intercambio catiónico para muestra C₂.

RESULTADOS PARA LA MUESTRA C ₂		
Análisis MBT	Centímetros cúbicos de Azul de Metileno usado	57 cm ³
	Gramos de muestra usada	1 g
	MBT (meq/100g)	57
	MBT (lb bentonita equivalente/100 lb shale) ⁽⁸⁾	81.23
Repetibilidad Análisis MBT	Centímetros cúbicos de Azul de Metileno usado	57.5 cm ³
	Gramos de muestra usada	1 g
	MBT (meq/100g)	57.5
	MBT (lb bentonita equivalente/100 lb shale)	82
Fuente: El autor		

⁽⁸⁾ La Capacidad de Azul de Metileno en las unidades de libras de bentonita equivalente/ libras de *Shale* se da mediante MBC (libras de bentonita equivalente / 100 libras de *shale*) = (cm³ azul de metileno utilizado para titular 0.57 gramos de arcilla)*2.5 (23).

ANEXO I. VISCOSIDAD PLÁSTICA, PUNTO DE CEDENCIA, VISCOSIDAD APARENTE, DENSIDAD Y pH PARA LODOS BENTONÍTCOS.

Tabla I1. Resultados de Viscosidad Plástica, Punto de Cedencia y Viscosidad Aparente.

FLUIDO	VISCOSIDAD PLÁSTICA (cP)	PUNTO DE CEDENCIA (lb/100 ft ²)	VISCOSIDAD APARENTE (cP)
Lodo Bentonítico 1	21	35	38,5
Lodo Bentonítico 2	23	45	45,5
Lodo Bentonítico 3	44	107	97,5
Fuente: El autor			

Tabla I2. Densidad y pH para los lodos evaluados.

FLUIDO 27 °C (81 °F)	DENSIDAD (kg/m ³)	DENSIDAD (lb/gal)	pH
Agua	997	8.3	7
Lodo Bentonítico 1	1020	8.5	9.26
Lodo Bentonítico 2	1020	8.5	9.33
Lodo Bentonítico 3	1032	8.6	9.38
Fuente: El autor			

ANEXO J. REGISTRO FOTOGRÁFICO ANTES Y DESPUÉS DE REALIZAR LA PRUEBA DE ACRECIÓN UTILIZANDO COMO FLUIDOS AGUA Y LODO BENTONÍTICO.

Figura J1. Registro fotográfico antes y después de realizar la prueba de Acreción utilizando como fluido Agua.



Fuente: El autor

Figura J2. Registro fotográfico antes y después de realizar la prueba de Acreción utilizando como fluido el Lodo 1.



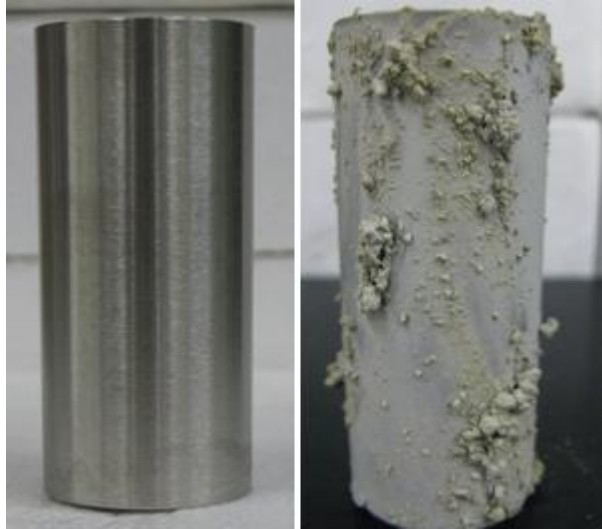
Fuente: El autor

Figura J3. Registro fotográfico antes y después de realizar la prueba de Acreción utilizando como fluido el Lodo 2.



Fuente: El autor

Figura J4. Registro fotográfico antes y después de realizar la prueba de Acreción utilizando como fluido el Lodo 3.



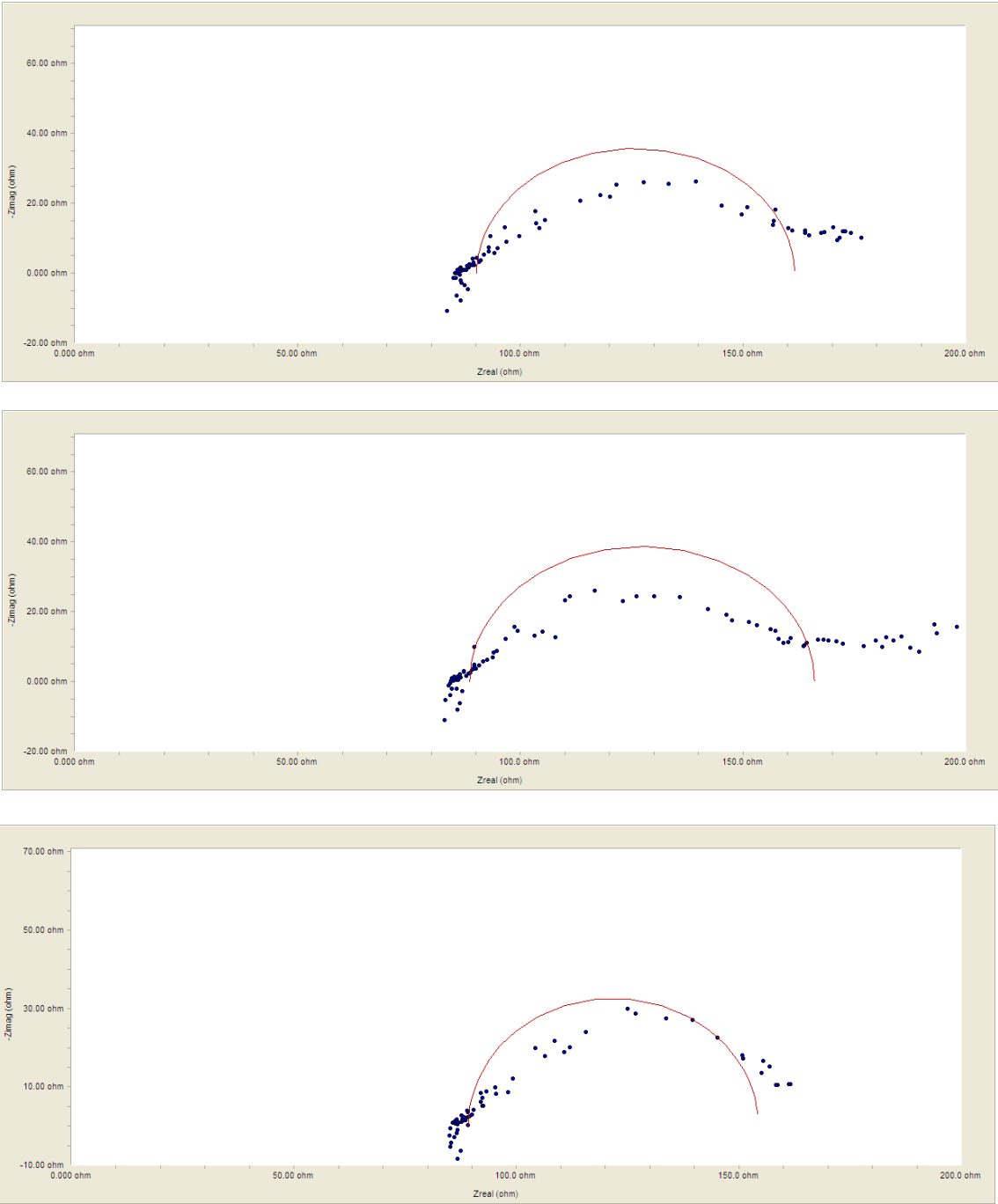
Fuente: El autor

Tabla J1. Resultados de las pruebas de Acreción.

PRUEBA DE ACRECIÓN				
Cilindro	Agua	Lodo 1	Lodo 2	Lodo 3
Peso Inicial (g)	76.27	75.92	76.26	75.96
Peso Final (g)	76.28	77.55	78.36	78.15
Adherencia (g)	0.01	1.63	2.1	2.19

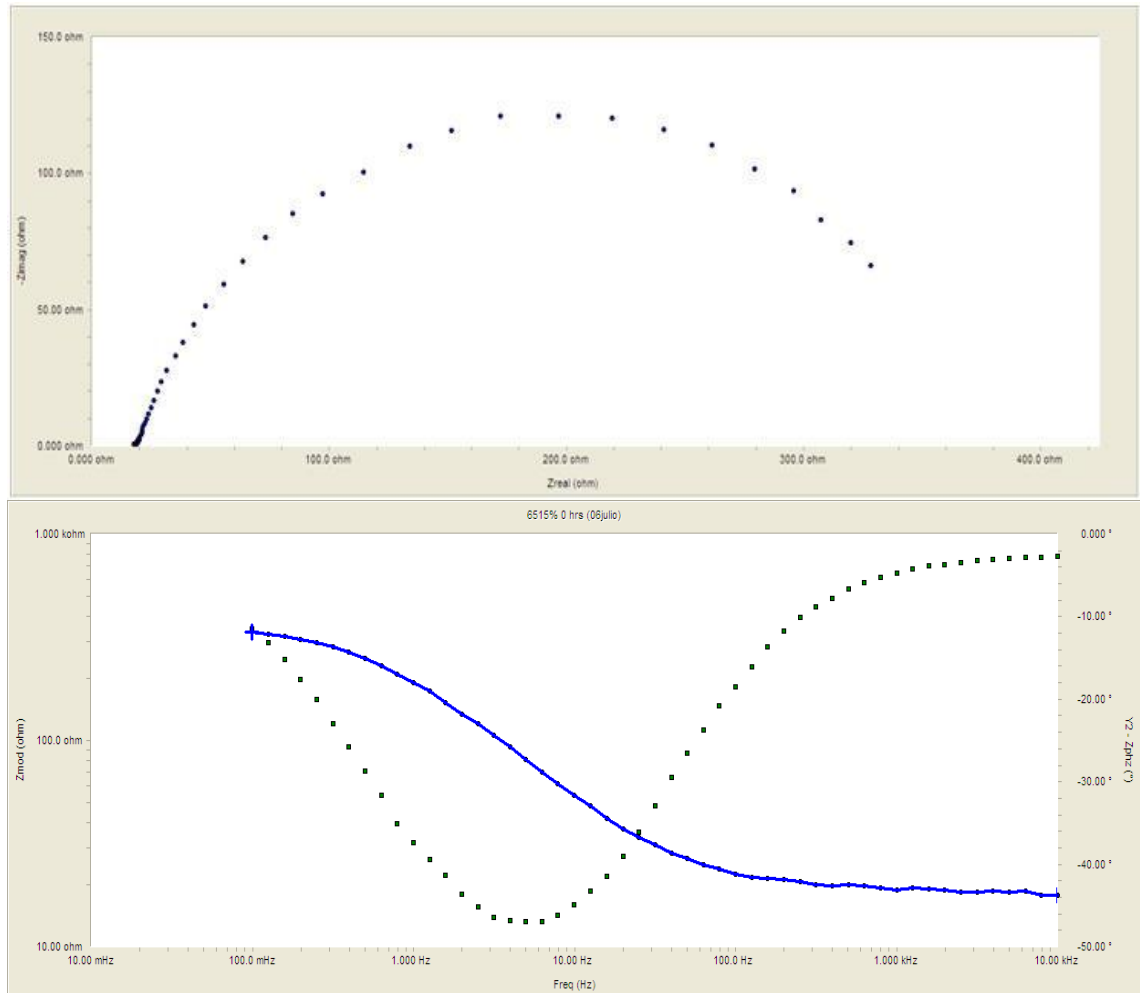
ANEXO K. ESPECTROS DE IMPEDANCIAS UTILIZANDO AGUA COMO FLUIDO Y MUESTRA C₂.

Figura K1. Espectros de Nyquist utilizando como electrolito Agua y Muestra C₂ 1-2-4 horas respectivamente.



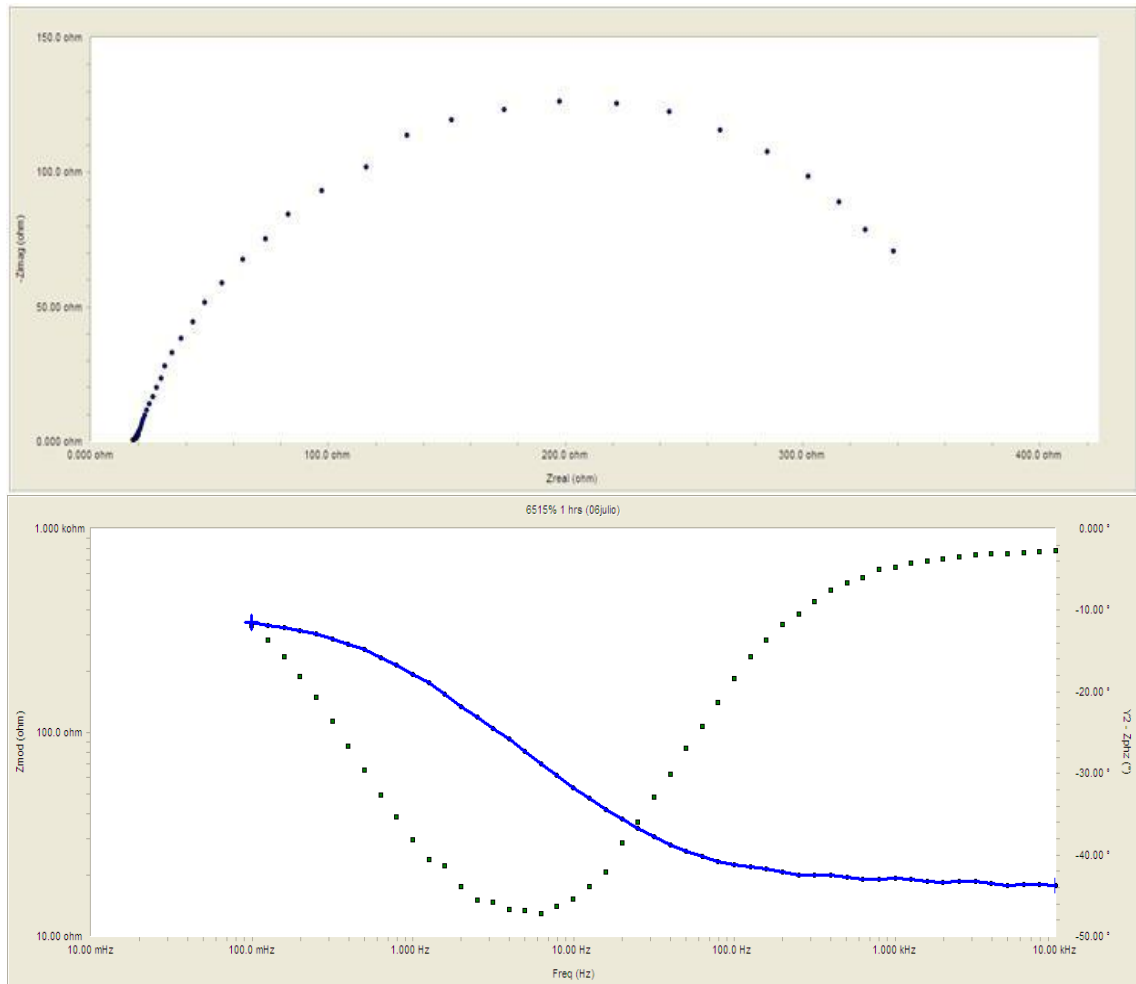
ANEXO L. ESPECTROS DE IMPEDANCIAS UTILIZANDO LODO 1 Y MUESTRA C₂.

Figura L1. Espectro de Nyquist y Bode Lodo 1+ Muestra C₂ – 0 horas.



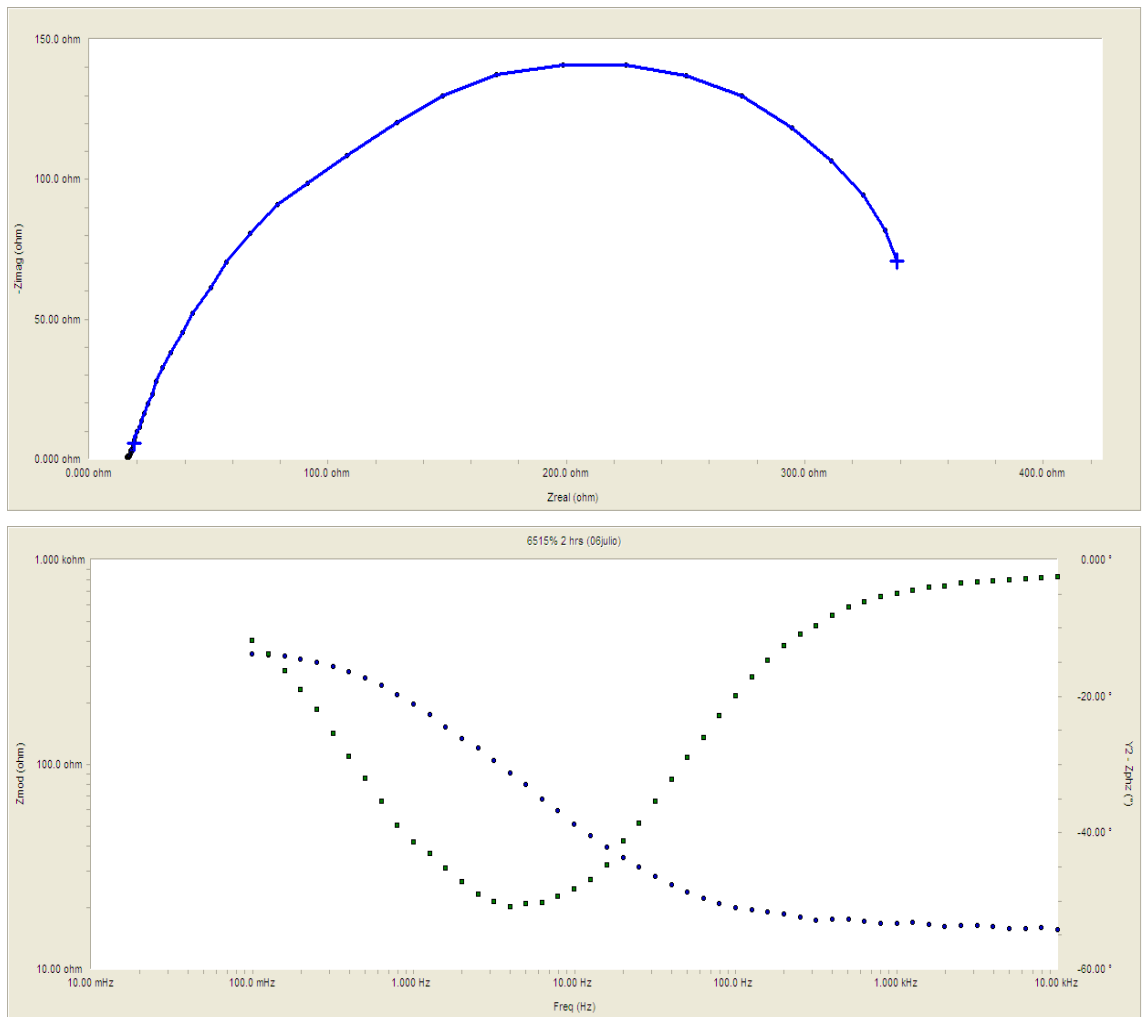
Fuente: Reporte de resultados GAMRY.

Figura L2. Espectro de Nyquist y Bode Lodo 1+ Muestra C₂ – 1 horas.



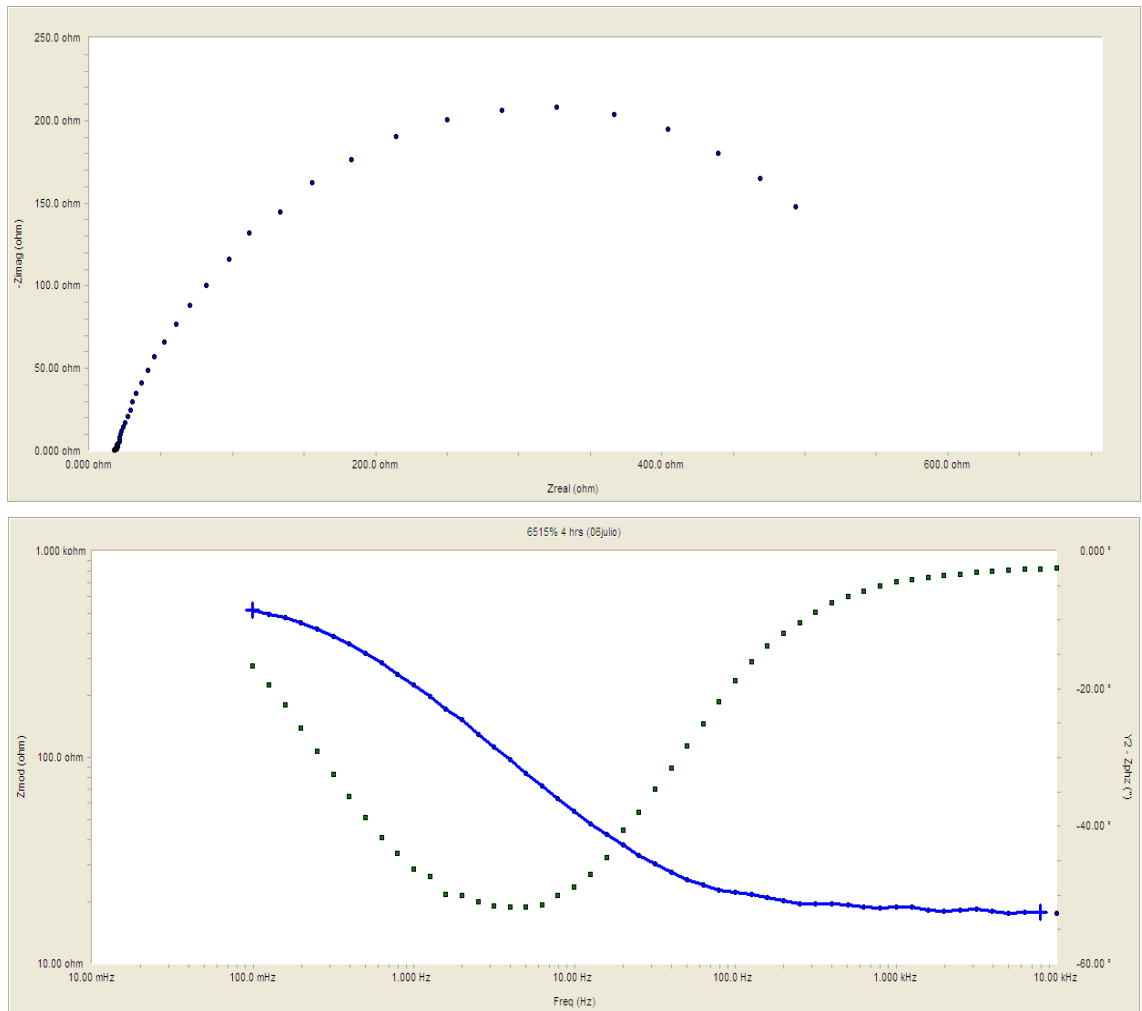
Fuente: Reporte de resultados GAMRY.

Figura L3. Espectro de Nyquist y Bode Lodo 1+ Muestra C₂ – 2 horas.



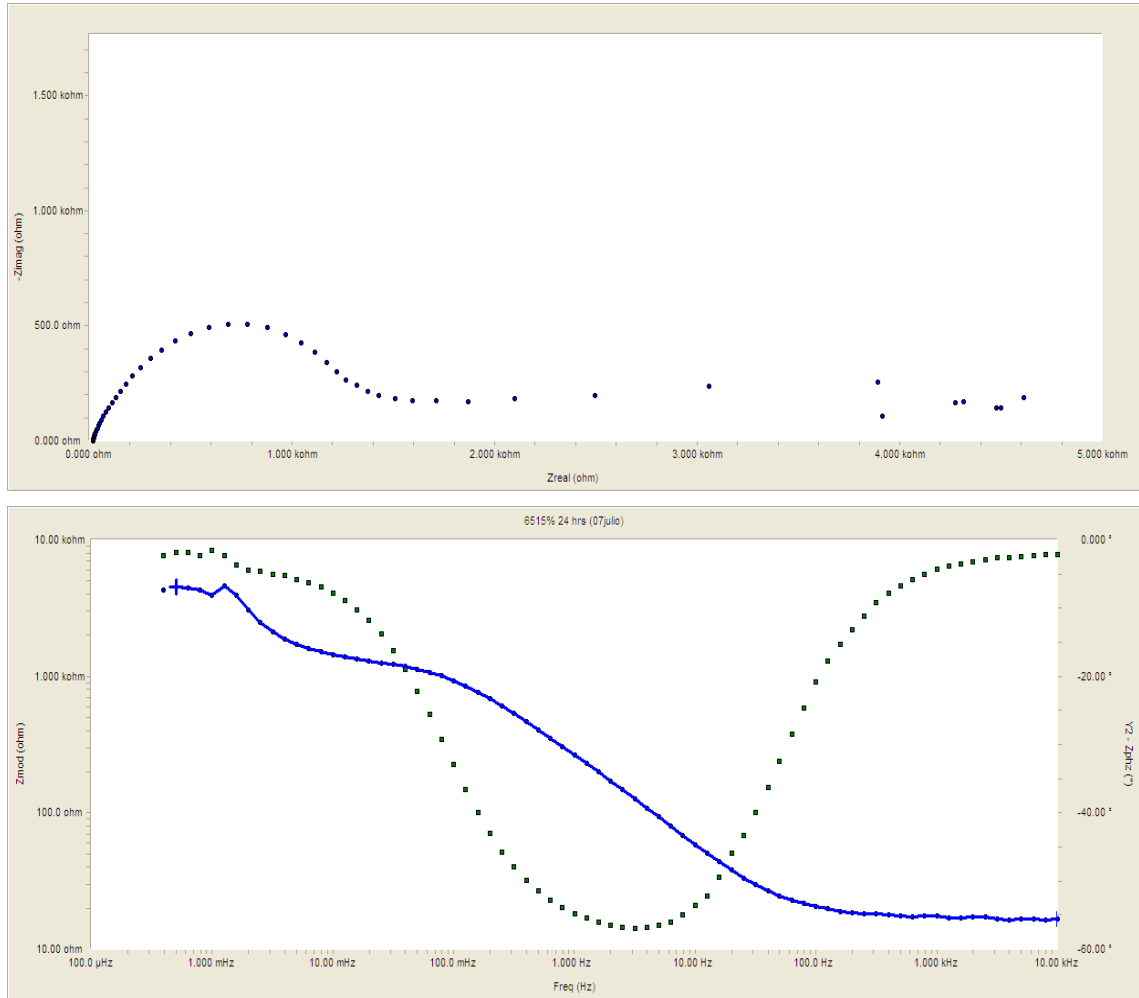
Fuente: Reporte de resultados GAMRY.

Figura L4. Espectro de Nyquist y Bode Lodo 1+ Muestra C₂ – 4 horas.



Fuente: Reporte de resultados GAMRY.

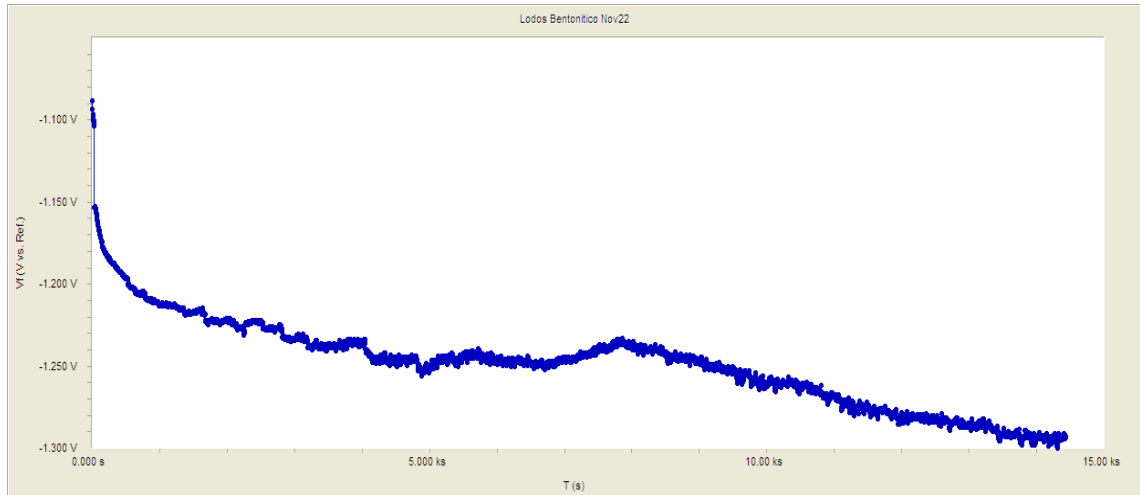
Figura L5. Espectro de Nyquist y Bode Lodo 1+ Muestra C₂ – 24 horas.



Fuente: Reporte de resultados GAMRY.

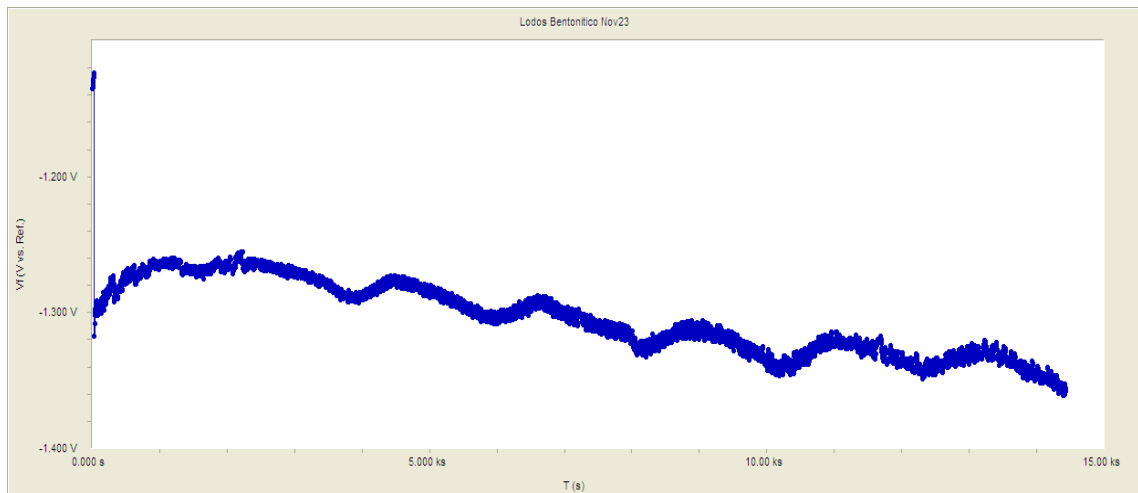
ANEXO M. CURVAS GALVANOSTÁTICAS UTILIZANDO LODO 1 Y MUESTRA C₂.

Figura M1. Curva Galvanostática Lodo 1. Corriente final -5 mA/cm^2 , Voltaje [-1.1 , -1.3] .



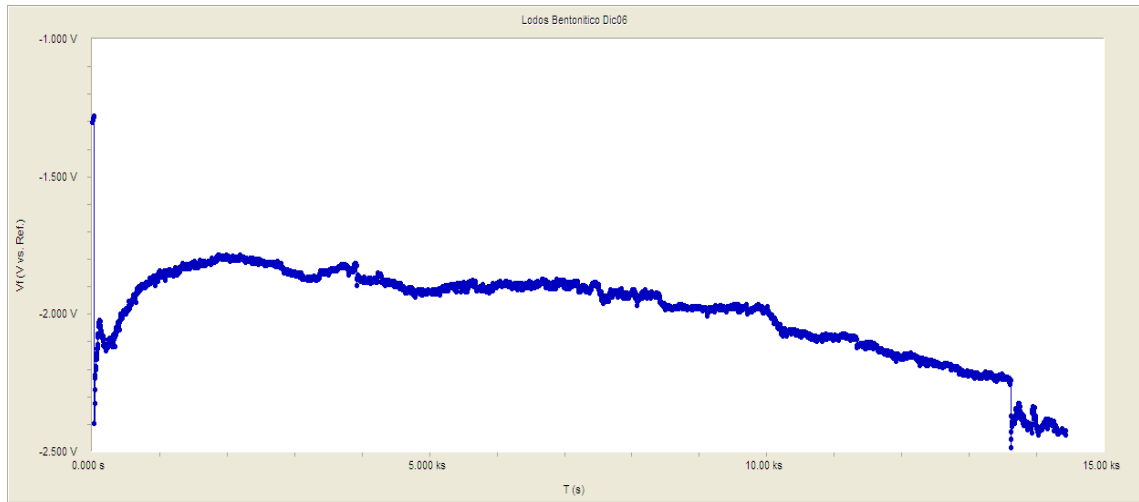
Fuente: Reporte de resultados GAMRY.

Figura M2. Curva Galvanostática Lodo 1. Corriente final -10 mA/cm^2 , Voltaje [-1.26 , -1.38] .



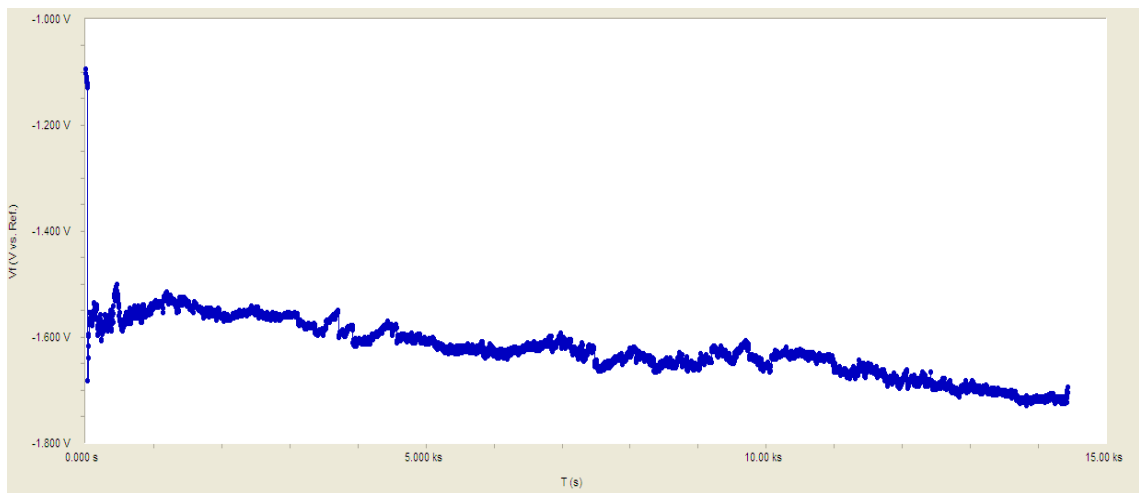
Fuente: Reporte de resultados GAMRY.

Figura M3. Curva Galvanostática Lodo 1. Corriente final -40 mA/cm^2 , Voltaje $[-1.56, -2.5]$.



Fuente: Reporte de resultados GAMRY.

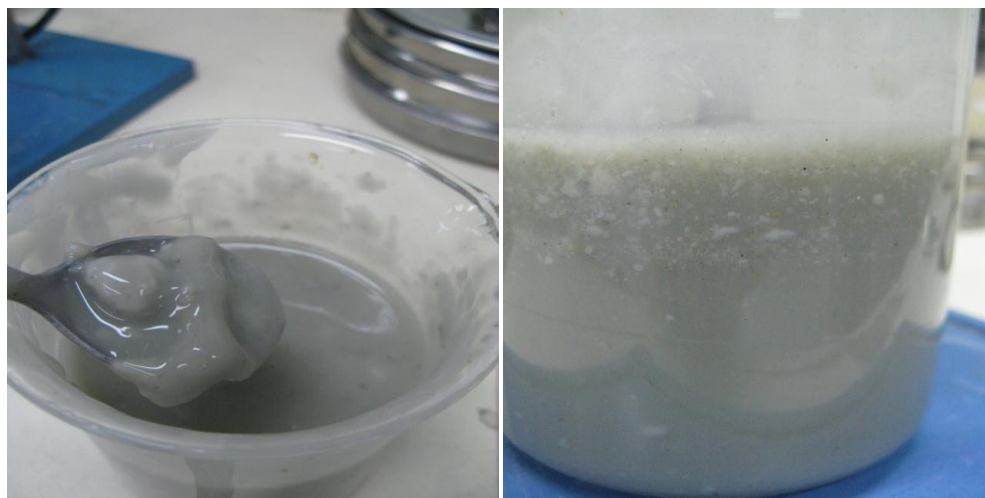
Figura M4. Curva Galvanostática Lodo 1. Corriente final -50 mA/cm^2 , Voltaje $[-1.44, -1.7]$.



Fuente: Reporte de resultados GAMRY.

ANEXO N. REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LOS LODOS UNA VEZ APLICADA LA TÉCNICA GALVANOSTÁTICA.

Figura N1. Aglomeración de partículas suspendidas, al aplicar una intensidad eléctrica de de -150 mA.



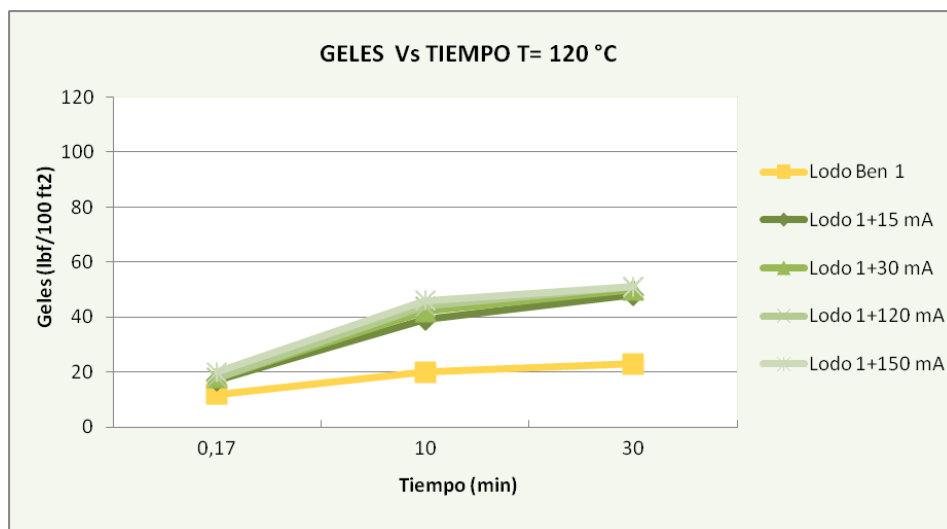
Fuente: El autor

ANEXO O. VISCOSIDAD PLÁSTICA, PUNTO DE CEDENCIA Y VISCOSIDAD APARENTE PARA LODO 1 ANTES Y DESPUÉS DE APLICAR CORRIENTE.

Tabla O1. Viscosidades y punto de cedencia para Lodo 1 antes y después de aplicar corriente.

FLUIDO	VISCOSIDAD PLÁSTICA (cP)	PUNTO DE CEDENCIA (lb/100 ft ²)	VISCOSIDAD APARENTE (cP)
Lodo Bentonítico 1	21	35	38,5
Lodo+15 mA	22	51	47,5
Lodo+30 mA	22	52	48
Lodo+120 mA	24	50	49
Lodo+150 mA	24	53	50,5
Fuente: El autor			

Figura O1. Geles Vs Tiempo para Lodo 1 después de aplicar la técnica Galvanostática.



Fuente: El autor

ANEXO P. INFORMACIÓN LODO POLIMÉRICO ⁽⁹⁾.

Tabla P1. Formulación Lodo Polimérico por cada barril equivalente (350 cm³) preparado.

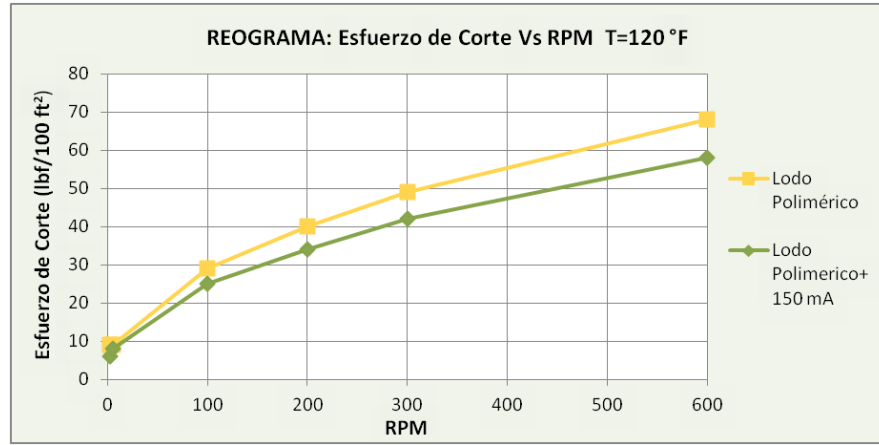
COMPONENTE	PESO	FAMILIA QUIMICA	APLICACIÓN
FILTER CHECK [®]	4 g	Almidón Modificado	Reductor de filtrado
CLAY SEAL [®]	4 g	Poliamina Etoxilada	Estabilizador de arcillas
BARO-LUBE [®] GOLD SEAL	4 g	Lípido	Lubricante
BARAZAN [®] D PLUS	1 g	Polisacárido	Espesante
PAC R	0.5 g	Polímero	Reductor de filtrado
PAC L	0.5 g	Carbohidrato	Reductor de filtrado
BACTERICIDA [®]	0.5 g	Aldehído	Bactericida
Fuente: El autor			

Tabla P2. Densidad y pH de lodo polimérico.

FLUIDO 27 °C (81 °F)	DENSIDAD (kg/m ³)	DENSIDAD (lb/gal)	pH
Lodo Polimérico	1008	8.4	9.0
Fuente: El autor			

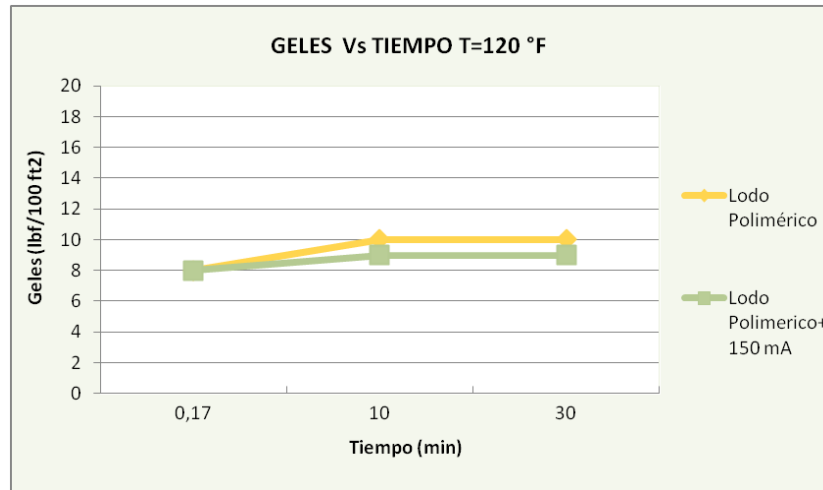
⁽⁹⁾ Los productos utilizados en la elaboración del fluido fueron fabricados por “Fluidos para Perforación Baroid”. Los aditivos FILTER CHECK, PAC R, PAC I, BARAZAN D-PLUS y BARO-LUBE, NO poseen ninguna clase de riesgo (EPA SARA 311, 312), NO contienen productos químicos tóxicos (EPA SARA 313) y NO se consideran como residuos peligrosos (Clasificación de residuos peligrosos de la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA) de la EPA). Se recomienda estudiar la ficha de seguridad del CLAY SEAL Y BACTERICIDA antes de su uso.

Figura P1. Reograma de Esfuerzos para Lodo Polimérico Antes y Después de Aplicar la Técnica Galvanostática.



Fuente: El autor

Figura P2. Geles Vs Tiempo Lodo Polimérico antes y después de aplicar una corriente de -150 mA.

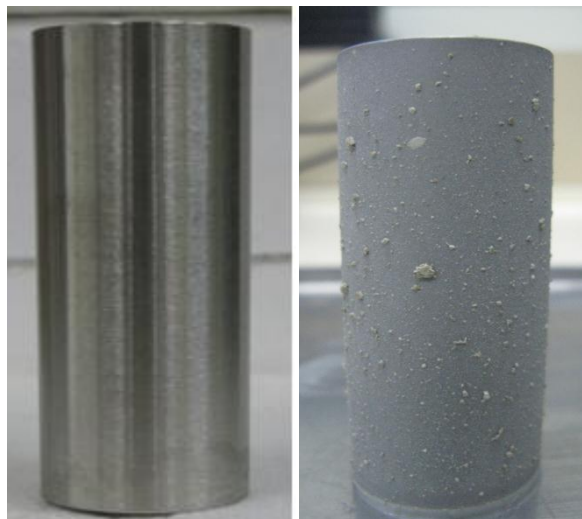


Fuente: El autor

Tabla P3. Viscosidades y punto de cedencia antes y después de aplicar -150 mA de corriente.

	VISCOSIDAD PLÁSTICA	PUNTO DE CEDENCIA	VISCOSIDAD APARENTE
Lodo Polimérico	19	30	34
Lodo Polimérico+ 150 mA	16	26	29
Fuente: El autor			

Figura P3. Registro fotográfico antes y después de realizar la prueba de Acreción utilizando como fluido Lodo Polimérico.



Fuente: El autor

Tabla P4. Resultados Impedancia Electroquímica.

MUESTRA EVALUACIÓN	CIRCUITO ANÁLISIS	TIEMPO (HR)	RESISTENCIA SOLUCIÓN (OHMIOS)	RESISTENCIA LODOS (OHMIOS)	OBSERVACIONES
Lodo Polimérico	Randles	1	4.74	45.89	Productos de Corrosión + Capa de Lodo. Después del ensayo
		2	4.802	51.37	
		4	4.68	64.49	
		8	4.95	96.89	