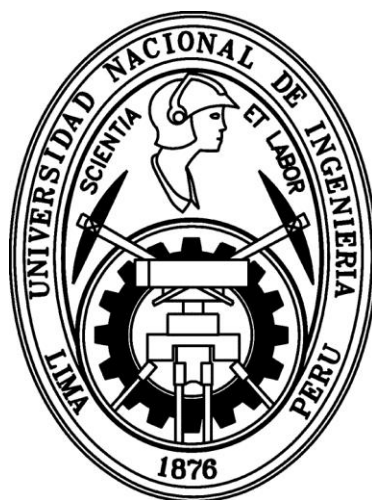


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL PROCEDENTE DEL LODO DE
PERFORACION DEL POZO PETROLERO "BRETAÑA NORTE 95-2-1XD"
MEDIANTE EL PROCESO ELECTROQUIMICO DE
ELECTROCOAGULACION USANDO ELETRODOS DE ALUMINIO

Tesis para optar el título profesional de
INGENIERO QUIMICO

PRESENTADO POR:

KARIN FLORENCIO PÉREZ
HENRY CIENFUEGOS PÁUCAR

LIMA – PERU

2013

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los Ingenieros Ali Ávila y Cesar Hidalgo por la confianza depositada en nosotros y el apoyo en las gestiones de recolección y traslado del efluente de estudio desde la locación de origen hasta llegar a Lima para el desarrollo de esta investigación de gran relevancia para el sector hidrocarburos.

Agradecemos a la Facultad de Ingeniería Química y Textil de la Universidad Nacional de Ingeniería y al Ing. Cesar Osorio, jefe del Laboratorio N° 11 de Físicoquímica por las facilidades brindadas para realizar las pruebas experimentales y en especial al Ing. Warren Reátegui por la asesoría brindada en el transcurso del desarrollo de la tesis y de sus acertados consejos, con el fin de lograr en nosotros el mejor desempeño.

A todas las personas que de una manera u otra apoyaron y facilitaron la realización de la presente tesis.

A Dios por ser mi guía y fortaleza en mi vida.

A mi madre, por ser el motivo por el cual me enfrento a los obstáculos de la vida, con el mismo ímpetu y fuerza que solo ella posee.

A mi padre, por ser el ejemplo de disciplina y constancia.

Karin Florencio Pérez

A mis queridos padres, Mercedes y Alejandro, por la vida;

A mi hermano, William, por su grandeza y fortaleza;

A mi Tío Isidoro, por su apoyo y ejemplo de vida;

A mis amigos, los de siempre y los únicos.

En una palabra, a mi Familia.

Henry Cienfuegos Páucar

INDICE

RESUMEN

CAPITULO I.....	8
I. GENERALIDADES	8
1.1. Introducción	8
1.2. Antecedentes.....	9
1.3. Marco Legal.....	10
1.3.1.De la obligatoriedad de tratar las aguas residuales	11
1.3.2.Del nivel mínimo de tratamiento.....	12
1.3.3.De los Límites Máximos Permisibles (LMP) y Estándares de Calidad del Agua(ECA)	12
1.4. Planteamiento del problema	18
1.5. Justificación del problema	20
1.6. Objetivos	22
1.6.1.Objetivo general.....	22
1.6.2.Objetivos específicos	22
CAPITULO II.....	23
II. MARCO TEORICO	23
2.1. Coloides	23
2.2. Tipos de coloides de acuerdo con su comportamiento en el agua ...	24
2.3. Características de las partículas coloidales.....	24
2.3.1.Características de las arcillas.....	25
2.4. Propiedades de los coloides	26
2.4.1.Propiedades cinéticas	26
2.4.2.Propiedad óptica.....	27
2.4.3.Propiedad de superficie	28
2.4.4.Propiedad electrocinética.....	29
2.5. Estabilidad e inestabilidad de los coloides	29
2.6. Carga eléctrica de los coloides. Fuerza de estabilización.....	29

2.7.	Doble capa eléctrica de los coloides	30
2.8.	Energía potencial de interacción de las partículas coloidales	32
2.9.	Efecto del aumento de la concentración iónica	33
2.10.	Mecanismo de electrocoagulación	34
	2.10.1.Compresión de la doble capa.....	34
	2.10.2.Adsorción y neutralización de la carga.....	35
2.11.	Cinética o etapas de la coagulación.....	37
2.12.	Química del Aluminio en disolución acuosa	38
2.13.	Principio de electrocoagulación	40
	2.13.1.Las reacciones en los electrodos y la asignación de los electrodos	42
	2.13.2.Pasivación y Activación del electrodo	44
	2.13.3.Comparación entre la electrocoagulación y coagulación química.....	45
2.14.	Diseños típicos de los reactores de EC	47
	2.14.1.Asignación del flujo	48
2.15.	Factores que afectan la Electrocoagulación.....	49
	2.15.1.Efecto de la densidad de corriente	49
	2.15.2.Efecto del pH	52
	2.15.3.Efecto de la Conductividad.....	54
	2.15.4.Efecto de la Temperatura	55
2.16.	Metales pesados: Aluminio y Bario	55
	2.16.1.Aluminio.....	55
	2.16.2.Bario	56
CAPITULO III.....		58
III.	CONCEPTOS GENERALES DE PERFORACION Y EFLUENTE DE ESTUDIO	58
3.1.	Descripción general del Proceso de Perforación en Pozos Petroleros.	58
	3.1.1.Fluidos de Perforación	60

3.1.2.	Deshidratación del Lodo de Perforación (Dewatering)	62
3.1.3.	Disposición de Sólidos y Líquidos durante el proceso de perforación.....	66
3.2.	Procedencia de agua industrial residual en pozos de perforación	68
3.3.	Pozo Bretaña Norte 95-2-1XD – Loreto – Perú.....	70
3.3.1.	Ubicación del Pozo Bretaña Norte 95-2-1XD	70
3.3.2.	Memoria descriptiva del proceso de tratamiento de agua residual en el Pozo Bretaña Norte 95-2-1XD.	71
3.4.	Efluente de estudio	73
3.4.1.	Fluido de perforación utilizado en la sección 8 ½ durante la perforación.....	74
3.4.2.	Características del Efluente.....	79
CAPITULO IV		82
IV.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	82
4.1.	Metodología.....	82
4.1.1.	Influencia de la densidad de corriente	82
4.1.2.	Influencia del Caudal.....	83
4.2.	Cálculos	85
4.3.	Diagrama de flujo del sistema por lotes	86
4.4.	Diagrama de flujo del sistema continuo	87
4.5.	Materiales experimentales	88
4.6.	Procedimiento experimental.....	92
4.6.1.	Sistema por lotes.....	92
4.6.2.	Sistema por flujo continuo	99
4.7.	Observaciones del desarrollo experimental.....	107
4.8.	Resultados de los procesos experimentales del tratamiento de electrocoagulación	113

CAPITULO V.....	123
V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	123
Sistema por lotes	123
5.1. Comportamiento general del proceso de electrocoagulación	123
5.2. Estudio del efecto de la Densidad de Corriente Aplicada – DCA	124
5.2.1.Efecto de la DCA sobre el pH.....	124
5.2.2.Efecto de la DCA sobre el Aluminio.....	125
5.2.3.Efecto de la DCA sobre la Turbidez.....	128
5.2.4.Efecto de la DCA sobre los Sólidos suspendidos totales	131
5.2.5.Efecto de la DCA sobre la Conductividad específica	133
5.2.6.Efecto de la DCA sobre el Bario	137
5.2.7.Efecto de la DCA sobre el Voltaje.....	139
Sistema Continuo.....	140
5.3. Comportamiento general del proceso continuo de electrocoagulación.....	140
5.4. Estudio del efecto de la Densidad de Corriente Aplicada – DCA	145
5.4.1.Efecto de la DCA sobre el pH.....	145
5.4.2.Efecto de la DCA sobre el Aluminio.....	147
5.4.3.Efecto de la DCA sobre la Turbidez.....	150
5.4.4.Efecto de la DCA sobre los Sólidos suspendidos Totales.....	154
5.4.5.Efecto de la DCA sobre la Conductividad específica	156
5.4.6.Efecto de la DCA sobre el Bario	162
5.5. Estudio del Caudal aplicado en el proceso continuo	165
5.6. Sistema por lotes vs Sistema Continuo	171
CAPITULO VI	174
VI. COSTOS DE IMPLEMENTACION A ESCALA INDUSTRIAL	174
6.1. Dimensionamiento del reactor electroquímico industrial	174
6.1.1.Caudal de pozo real	175
6.1.2.Volumen del reactor industrial.....	175
6.2. Número de electrodos	176

6.3.	Intensidad de corriente	177
6.4.	Energía consumida por volumen de efluente tratado	177
6.5.	Consumo de Aluminio.....	178
6.6.	Presupuesto del costo para el sistema de tratamiento de electrocoagulación de flujo continuo	178
CAPITULO VII		180
VII.	CONCLUSIONES	180
CAPITULO VIII		183
VIII.	RECOMENDACIONES	183
8.1.	Recomendaciones para el proceso experimental del tratamiento de electrocoagulación	183
8.2.	Manejo y disposición de flóculos luego del EC	184
ANEXO Nro.1 Legislación medio ambiental para la calidad del agua y efluentes líquidos del sector hidrocarburos.		186
ANEXO Nro.2 Agencia de sustancias tóxicas y el registro de enfermedades (ATSDR) – Aluminio y Bario.....		201
ANEXO Nro.3 Hoja de datos de seguridad de los componentes presentes en el efluente.		206
ANEXO Nro.4 Diagrama del reactor del sistema continuo de electrocoagulación.....		250
ANEXO Nro.5 Resultados de los procesos experimentales del tratamiento de electrocoagulación.		252
ANEXO Nro.6 Cotizaciones de las planchas de Aluminio, hierro y PVC.		254
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS		257
FUENTES DE INFORMACION.....		261

RESUMEN

Los fluidos de perforación están considerados como uno de los principales problemas ambientales de mayor impacto, generando una gran variedad de efluentes y residuos sólidos para ser tratados. Esta investigación, que parte de la importancia de mejorar el tratamiento de efluentes, se realiza para poder atender los requerimientos medioambientales y cumplir la legislación vigente del decreto supremo N° 037-2008-PCM. La aplicación del tratamiento a través de la Electrocoagulación es de suma importancia para la industria de perforación, que tiene por prioridad el cuidado del medio ambiente. El efluente que se ha utilizado para las pruebas de tratamiento electroquímico de electrocoagulación proviene del proceso de deshidratación o separación sólido – líquido (Dewatering) del lodo de perforación correspondiente a la sección 8 ½ del pozo Bretaña Norte 95-2-1XD, ubicado en el distrito de Puinahua, provincia de Requena, departamento de Loreto. En un sentido general la electrocoagulación es una tecnología basada en los conceptos de celdas electroquímicas. Las aplicaciones pueden ser hechas en procesos por lotes y continuo. El aluminio es disuelto del ánodo generando iones que inmediatamente se hidrolizan a hidróxidos poliméricos de hidróxido de aluminio, estos hidróxidos poliméricos son excelentes agentes coagulantes. Los iones Al^{3+} se combinan con los iones OH^- para formar especies monoméricas y poliméricas que por procesos de precipitación forman el $Al(OH)_{3(s)}$. El hidróxido de aluminio es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que expone una gran área superficial con propiedades adsorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes. El pH de la solución tiene un rol importante en el proceso electroquímico y químico de coagulación. El ánodo (Al) metálico consumible es usado para producir continuamente hidróxidos poliméricos en la vecindad del ánodo. La coagulación ocurre cuando estos complejos metálicos se combinan con las partículas negativas llevadas hacia el ánodo por movimiento electroforético. La presente Tesis que tiene por título “Tratamiento de agua residual procedente del Lodo de Perforación del pozo petrolero Bretaña Norte 95-2-1XD mediante el proceso electroquímico de electrocoagulación usando electrodos de aluminio” se centra en la posibilidad

de reducir la concentración del aluminio, bario, turbidez, SST y conductividad del efluente mediante el proceso de electrocoagulación. El objetivo fundamental es estudiar, de forma detallada los parámetros que influyen en el proceso de remoción de los contaminantes antes mencionados mediante la técnica de electrocoagulación (EC) con ánodos de aluminio. En concreto se estudió el efecto de la densidad de corriente y caudal aplicado. El estudio de viabilidad se realizó a escala laboratorio, desarrollándose en sistema por lotes y flujo continuo, con el fin de saber si la tecnología de electrocoagulación es válida para el agua residual estudiada, determinando las condiciones óptimas de operación para obtener una primera aproximación y determinar los parámetros de eficacia. En este estudio se obtuvieron las condiciones de operación como densidad de corriente, tiempo de operación y caudal para la electrocoagulación, considerando para ello los mejores porcentajes de remoción logrados al variar la intensidad de corriente y el tiempo de operación para el sistema por lotes y adicionalmente el caudal para el caso del sistema continuo, manteniendo constante el volumen y la distancia entre electrodos. Además se compararon las remociones logradas entre la electrocoagulación en sistema por lotes y en flujo continuo para las mejores condiciones de operación, para densidades de corriente de 1.11, 2.22, 3.33 A/dm². El proceso por lotes y flujo continuo se realizó en reactores de plexiglás de 2L y 4L de capacidad respectivamente. Los electrodos de aluminio fueron ubicados en posición vertical con una separación de 3cm. La remoción de los contaminantes aumentó a medida que se incrementó la densidad de corriente, debido a la mayor dosificación del aluminio y a que el efluente se encontró mayor tiempo sometido al proceso de electrocoagulación. El Aluminio, procedente de los electrodos, fue un excelente agente coagulante para las necesidades de remoción del efluente proveniente del fluido de perforación. Por último se evaluaron los costos del tratamiento electrolítico teniendo en cuenta la corriente y caudal utilizando los valores correspondientes al mejor porcentaje de remoción obtenida.

CAPITULO I

I. GENERALIDADES

1.1. Introducción

Desde mucho tiempo atrás los ríos, lagos y mares recogen los residuos producidos por la actividad humana. El ciclo natural del agua tiene una gran capacidad de purificación, sin embargo esta misma facilidad de regeneración del agua, y su aparente abundancia, hace que sea el vertedero habitual de desechos químicos, desechos orgánicos, metales pesados, residuos radiactivos e hidrocarburos, los cuales se encuentran en cantidades mayores o menores al analizar las aguas. Es el agua, el principal producto residual de la industria del petróleo y gas durante la vida de casi todos los pozos individuales, campos de petróleo y gas en la etapa de perforación. La exploración del Lote 95, que comprende la perforación del pozo vertical denominado Bretaña Norte 95-2-1XD; ubicado en el distrito de Puinahua, provincia de Requena, departamento de Loreto, cuyo objetivo principal es confirmar o ajustar las reservas estimadas de hidrocarburos. Durante su proceso de perforación el lodo desplazado o desechado desde el sistema activo se somete a un proceso de deshidratación conocido como deshidratación (Dewatering), donde se separa dos fases: una sólida y una líquida. Esta fase líquida o agua residual como subproducto, es cada día manipulado en cientos de barriles de agua conteniendo grandes cantidades de sales disueltas, sólidos en suspensión, metales pesados dispersos y disueltos. Existe una variedad de métodos para el procesamiento y eliminación de agua residual de este tipo, la mayoría de los cuales han sido aplicados en un momento u otro, encontrándose aún en uso en varios lugares del país. Teniendo en cuenta que el agua residual es una mezcla de sólidos inorgánicos, que pueden estar disueltos o en suspensión coloidal y constituido por iones solubles; que la

caracteriza con alto valor de turbidez, conductividad y sólidos suspendidos totales, es claro pues que el tratamiento por electrocoagulación es apropiado por estar ampliamente relacionado con la composición química y eléctrica. La electrocoagulación no es más que la coagulación química combinada con principios eléctricos, como es la producción de iones metálicos de alta valencia, como coagulante en celdas electrolíticas. Este mecanismo se basa en la adición de iones metálicos por medio de una celda electrolítica donde ocurre la remoción de partículas finamente dispersas (metales pesados, sólidos suspendidos, entre otros.) en el residuo líquido. Posteriormente se lleva la electroprecipitación, formándose los flocs con las partículas ya desestabilizadas que finalmente sedimentan. En este trabajo se muestra el desarrollo experimental, los resultados y análisis alcanzados de niveles de remoción de turbidez, sólidos suspendidos totales, conductividad, metales pesados como Al y Ba, para un efluente proveniente de un lodo de perforación base agua, obtenidos al variar la corriente, el tiempo de operación y el caudal. Para luego establecer las óptimas condiciones de operación considerando los mejores porcentajes de remoción de los contaminantes anteriormente mencionados.

1.2. Antecedentes

En la búsqueda de nuevos tratamientos para minimizar la contaminación ambiental, ha llevado a los científicos a considerar la utilización de nuevos métodos para transformar y remover los contaminantes de efluentes. Entre los nuevos tratamientos se encuentran los métodos electroquímicos, como la electroflotación, electrodecantación y la electrocoagulación. De todas las técnicas electroquímicas conocidas se tiene mayor interés en emplear la electrocoagulación como método de tratamiento de aguas residuales que contengan metales pesados, altos valores de turbidez y conductividad, residuos de grasa, tintes textiles, partículas suspendidas, suspensiones acuosas de partículas ultrafinas, nitratos,

fenoles, arsénico y contaminantes orgánicos. En los últimos años, y debido a la imperante necesidad de investigar, adaptar e implementar tecnologías eficientes en la remoción de contaminantes de diversos efluentes, se ha vuelto a considerar la electrocoagulación como alternativa viable en el tratamiento de los efluentes líquidos, cobrando un importante interés científico e industrial, lo cual permitirá avanzar sobre los obstáculos que han dejado a esta tecnología rezagada durante varias décadas. Es así como se enfrenta al reto de investigar los parámetros que controlan el proceso de electrocoagulación de manera organizada y sistemática. Estos métodos electroquímicos emplean electrones para realizar el tratamiento mientras que otros métodos usan reactivos químicos y microorganismos, lo que los hace más costosos y en ocasiones toman más tiempo. Entre las ventajas de los métodos electroquímicos se encuentran los beneficios ambientales, de compatibilidad, versatilidad, eficiencia de energía, seguridad, selectividad, facilidad de automatización del proceso y bajos costos.

1.3. Marco Legal

La Gestión de los Recursos Hídricos, la protección de la salud, la tecnología y la productividad son aspectos que el Perú viene desarrollando progresivamente a fin de dar un enfoque sistémico al tratamiento y adecuación de factores ambientales como son el uso eficiente del agua y la generación de aguas residuales generadas por las actividades poblacionales y productivas. Por razones de salud pública y por consideraciones ambientales, económicas y sociales, las aguas residuales provenientes de los usos poblacionales o procesos industriales, no pueden ser eliminadas evacuándolas directamente a las fuentes naturales; toda vez que constituye en una obligación de quien lo produce y asume los costos que representa su tratamiento previo. De acuerdo a la normatividad peruana, el proyecto de perforación de pozos petroleros está sujeto a los límites establecidos por la autoridad sectorial para las descargas y el

cumplimiento de los niveles o estándares de calidad ambiental. Con la promulgación de la Ley 29338 se derogó La Ley General de Aguas [1], esta nueva norma en su artículo 2º, establece que “El Agua constituye el patrimonio de la Nación. El dominio sobre ella es inalienable e imprescriptible. Es un bien de uso público y su administración solo puede ser otorgada y ejercida en armonía con el bien común, la protección ambiental y el interés de la Nación. No hay propiedad privada sobre el agua”. Se creó asimismo, el Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos con el objetivo de articular la acción del Estado para conducir los procesos y conservar los recursos hídricos en cuencas y ecosistemas entre otros. En este caso la Autoridad Nacional del Agua – ANA – es el ente rector y la máxima autoridad técnica normativa del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos. En este caso, la autoridad sanitaria es la Dirección General de Salud Ambiental [2], la cual tendrá como funciones, entre otras, vigilar el estricto cumplimiento de disposiciones generales referidas a cualquier vertimiento, llevar un registro oficial de los vertimientos de residuos a las aguas marítimas o terrestres del país, estudiar solicitudes y expedientes relacionados con el vertimiento de residuos, practicar visitas de inspección ocular, aprobar los proyectos de plantas de tratamiento de aguas servidas, etc.

1.3.1. De la obligatoriedad de tratar las aguas residuales

La Ley General de Aguas [1], en su artículo 22º, establece la prohibición de verter cualquier residuo sólido, líquido o gaseoso que pueda contaminar las aguas y causar daños o poner en peligro la salud humana o el normal desarrollo de la flora y fauna, o comprometer su empleo para otros usos. Y señala que dichas descargas deberán ser sometidas al tratamiento previo que sea necesario. El Reglamento de la Ley General de Aguas [3], en su artículo 61º del título II, señala que todo vertimiento de residuos a las aguas

marítimas o terrestres del país deberá efectuarse previo tratamiento, lanzamiento submarino o alejamiento adecuado, de acuerdo con lo dispuesto por la Autoridad Sanitaria [2] y deberá contar previamente con la licencia respectiva.

1.3.2. Del nivel mínimo de tratamiento

Como complemento, la Norma Técnica OS.090 del Reglamento Nacional de Edificaciones, que norma el desarrollo de proyectos de tratamiento de aguas residuales, en su numeral 4.3.11, establece que en ningún caso se permitirá la descarga de aguas residuales sin tratamiento a un cuerpo receptor, aun cuando los estudios del cuerpo receptor indiquen que no es necesario el tratamiento. Señala que el tratamiento mínimo que deberán recibir las aguas residuales antes de su descarga deberá ser el tratamiento primario. Es decir, un nivel de tratamiento capaz de remover la materia orgánica sedimentable, entre los que se encuentra el tanque Imhoff, el tanque séptico, el tanque o laguna de sedimentación y las lagunas en general, aunque estas últimas se encuentren dentro de los procesos de tratamiento secundario, que es un objetivo adicional al alcanzado mediante el tratamiento primario.

1.3.3. De los Límites Máximos Permisibles (LMP) y Estándares de Calidad del Agua (ECA)

Con la finalidad de controlar excesos en los niveles de concentración de sustancias físicas, químicas y biológicas presentes en efluentes o emisiones, para evitar daños a la salud y al ambiente, así deberá tenerse en cuenta lo indicado en el Decreto Supremo N° 037-2008-PCM, del 12 de mayo de 2008, en el cual se Establecen Límites Máximos Permisibles de Efluentes Líquidos para el Subsector Hidrocarburos. Los

Límites Máximos Permisibles (LMP) se definen como la concentración de los parámetros físicos, químicos y biológicos que caracterizan un efluente, que al ser excedido causa o puede causar daños para la salud, bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por la respectiva autoridad competente. Los parámetros regulados y Límites Máximo Permisibles se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Límites máximos permisibles de efluentes líquidos para el Subsector hidrocarburos (Decreto Supremo N° 037-2008-PCM).

Parámetro Regulado	Límites Máximos Permisibles (mg/l) (Concentraciones en cualquier momento)
Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)	20
Cloruro	500 (a ríos ,lagos y embalses) 2,000 (estuarios)
Cromo Hexavalente	0,1
Cromo Total	0,5
Mercurio	0,02
Cadmio	0,1
Arsénico	0,2
Demanda Bioquímica de Oxígeno	50
Demanda Química de Oxígeno	250
Cloro Residual	0,2
Nitrógeno Amoniacal	40
Coliformes Totales(NMP/100ml)	Menor que 1,000
Coliformes Fecales(NMP/100ml)	Menor que 400
Fósforo	2,0
Bario	5,0
pH	6,0 – 9,0
Aceites y Grasas	20
Plomo	0,1
Incremento de Temperatura*	Menor que 3°C

*Es el incremento respecto a la temperatura ambiental del cuerpo receptor medida a 100 m de diámetro del punto de vertido

Las aguas del ámbito Pozo Bretaña Norte 95-2-1XD, corresponden a la Clase VI (aguas de zonas de preservación de fauna acuática, pesca recreativa y comercial), según la clasificación aprobada por la DIGESA mediante Resolución Directoral N° 1152-2005/DIGESA/SA del 03 de agosto de 2005 para la clasificación de los principales cuerpos de agua del Perú.

Tabla 1.2. Límites Aplicables a la Clase VI.

Parámetro	Unidad	Uso
		Clase VI
Límites Bacteriológicos (*)		
Coliformes Totales	NMP/100 mL	20,000
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	4,000
Límite de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) 5días,20°C y de Oxígeno Disuelto (O.D)		
DBO	mg/L	10
O.D	mg/L	4
Límite de Sustancias Potencialmente Peligrosas		
Selenio	mg/m ³	10
Mercurio	mg/m ³	0,2
P.C.B.	mg/m ³	2
Esteres Estalatos	mg/m ³	0,3
Cadmio	mg/m ³	4
Cromo	mg/m ³	50
Níquel	mg/m ³	**
Cobre	mg/m ³	*
Plomo	mg/m ³	30
Zinc	mg/m ³	-
Cianuros (CN)	mg/m ³	5
Fenoles	mg/m ³	100
Sulfuros	mg/m ³	
Arsénico	mg/m ³	50
Nitratos (N)	mg/m ³	N.A
Pesticidas		(**)

(*) Entendidos como valor máximo en 80% de 5 o más muestras mensuales

*: Pruebas de 96 horas multiplicadas por 0,02

** : Pruebas de 96 horas LC50 multiplicadas por 0,1.

N.A. Valor no aplicable.

(**): Para cada uso se aplicará como límite los criterios de calidad de aguas establecidos por el Environmental Protection Agency de los Estados Unidos de Norteamérica.

El Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, publicado el 31 de julio de 2008, aprueba los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, con el objetivo de establecer el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos. Los mismos son obligatorios en el diseño de las normas legales, siendo un referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental. La Tabla 1.3. muestra los ECA Ambiental para Agua, aplicables al proyecto Pozo Breña Norte 95-2-1XD, Ríos – Selva.

Tabla 1.3. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (Decreto Supremo N°002-2008-MINAM).

Categoría 4 : Conservación del Ambiente Acuático						
Parámetro	Unidades	Lagunas y Lagos	Ríos		Ecosistema Marino Costero	
			Costa y Sierra	Selva	Estuarios	Marinos
Físicos y Químicos						
Aceites y Grasas	mg/L	Ausencia de película visible	Ausencia de película visible	Ausencia de película visible	1	1
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	<5	<10	<10	15	10
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	<0,02	0,02	0,05	0,05	0,08
Temperatura	°C					delta 3°C
Oxígeno Disuelto	mg/L	≥5	≥5	≥5	≥4	≥4
pH	-	6,5-8,5	6,5-8,5		6,5-8,5	6,5-8,5
Sólidos Disuelto Totales	mg/L	500	500	500	500	
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	≤ 25	≤ 25 - 100	≤ 25 - 400	≤ 25 - 100	30,00
Inorgánicos						
Arsénico	mg/L	0,01	0,05	0,05	0,05	0,05
Bario	mg/L	0,7	0,7	1	1	-
Cadmio	mg/L	0,004	0,004	0,004	0,005	0,005
Cianuro Libre	mg/L	0,022	0,022	0,022	0,022	-
Clorofila A	mg/L	10	-	-	-	-
Cobre	mg/L	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05
Cromo VI	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Fenoles	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	
Fosfatos Total	mg/L	0,4	0,5	0,5	0,5	0,031-0,093
Hidrocarburo de Petróleo	Ausente				Ausente	Ausente

Categoría 4 : Conservación del Ambiente Acuático						
Parámetro	Unidades	Lagunas y Lagos	Ríos		Ecosistema Marino Costero	
			Costa y Sierra	Selva	Estuarios	Marinos
Mercurio	mg/L	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Nitratos (Ni-NO ₃)	mg/L	5	10	10	10	0,07-0,28
Inorgánicos						
Nitrógeno Total	mg/L	1,6	1,6		-	-
Níquel	mg/L	0,025	0,025	0,025	0,002	0,052
Plomo	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,0061	0,0061
Silicatos	mg/L	-	-	-	-	0,14-0,7
Sulfuro de Hidrogeno (H ₂ S indispensable)	mg/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,081
Zinc	mg/L	0,03	0,03	0,3	0,03	0,081
Microbiológicos						
Coliformes Termotolerantes	(NMP/100mL)	1,000	2,000		1,000	≤30
Coliformes Totales	(NMP/100mL)	2,000	3,000		2,000	

Nota: Aquellos parámetros que no tienen valor se debe reportar cuando se dispone de análisis.

Dureza: Medir "dureza" del agua muestreada para contribuir en la interpretación de los datos (método-técnica recomendada: APHA-AWWA-WPCF 2340C).

Nitrógeno Total: Equivalente a la suma de nitrógeno Kjeldahl Total (Nitrógeno Orgánico y amoniacal), nitrógeno en forma de nitrato y nitrógeno en forma de nitrito (NO_x). Amoniacal: Como NH₃ no ionizado.

NMP/100mL: Número más probables de 100 mL.

Ausente: No deben de estar presentes a concentraciones que sean detectables por olor, que afecten a los organismos comestibles, que puedan formar depósitos de sedimentos en las orillas o en el fondo, que puedan ser detectadas como películas visibles en la superficie o que sean nocivos a los organismos acuáticos presentes.

1.4. Planteamiento del problema

Los asuntos ambientales están recibiendo una creciente atención en nuestro país, como resultado de la gran conciencia del público, la preocupación y la presión de los gobiernos. Asimismo, se está concentrando mayor atención sobre las actividades individuales dentro de las compañías exploradoras, productoras y comercializadoras de petróleo tanto privadas como públicas. Se está solicitando a éstas compañías que demuestren su compromiso con la protección del ambiente por medio de la adopción de políticas corporativas ambientales y a través de su actual desempeño en el campo. La actividad de la perforación petrolera provoca contaminación terrestre y acuífera. Dicha actividad produce pérdida de la diversidad biológica, pérdida de ecosistemas que sirven de sostén al equilibrio ecológico, alterando el estado físico y químico de los suelos, aire y degradando la calidad del agua.



Figura 1.1 Línea de Descarga del efluente tratado hacia el cuerpo receptor.

El Proceso de Perforación generalmente crea y procesa grandes volúmenes de líquidos de desecho que contienen una variedad de contaminantes de aguas residuales como es el caso metales pesados, alto contenidos de sólidos, sales disueltas proveniente de los lodos de perforación, algunos de los cuales son difíciles y costosos de tratar o eliminar afectando la calidad de agua. Además, pueden producirse grandes fluctuaciones en el flujo de aguas residuales por cada hora, cambios de temperatura, y composición. En algunos casos, varios flujos de residuos de diferentes áreas del proceso de perforación pueden integrarse al mismo tiempo. El agua residual en el lugar de perforación puede incluir no sólo el agua barro y reciclado, sino también el agua de lavado del piso de perforación y las cubiertas y escorrentía de las tormentas. Los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales utilizados en la actualidad como son los químicos y físicos o una combinación de ellos, están limitados por bajos rangos de concentración y en algunos casos pueden tener altos costos. En ocasiones, algunos de los parámetros presentan incumplimientos al no encontrarse debajo de los límites máximos permisibles establecidos por el Ministerio de Medio Ambiente.

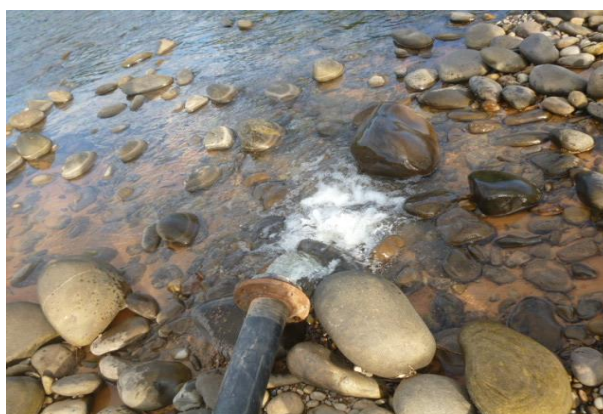


Figura 1.2. Contaminación del Cuerpo Receptor. Presencia de flóculos en la descarga del efluente tratado debido a un proceso de tratamiento fisicoquímico ineficiente, faltando a los cumplimientos medioambientales.

El impacto ambiental de efluentes que contienen metales pesados es cada vez mayor. Los metales pesados más importantes encontrados a menudo en efluentes y suelos contaminados provenientes de la perforación incluyen al Aluminio, Bario, sales disueltas como el sodio, calcio, potasio, magnesio, resulta básicamente del lodo utilizado para la sección perforada. Estos agentes contaminantes que se descargan en la naturaleza no son biodegradables, siendo algunos de ellos altamente tóxicos incluso en concentraciones bajas.

1.5. Justificación del problema

En muchas ocasiones durante las etapas de perforación, dependiendo la composición del fluido de perforación y la sección a perforar, generan una gran variedad de residuos que se descargan en forma de lodo líquido o sólido para ser tratados.



Figura 1.3. Almacenamiento del efluente en Tanques Australianos, durante la actividad de Perforación.

Generalmente las empresas han implementado sistemas de tratamiento de aguas residuales que son combinaciones de procesos físico-químicos, tratamientos de agua que requieren de múltiples etapas para eliminar los contaminantes de las aguas residuales antes de su descarga al medio ambiente o un cuerpo de agua y que aun así no logran tener buenos resultados de eliminación de estos

contaminantes. Al utilizar sólo tratamientos fisicoquímicos tradicionales no permiten una buena remoción de estos, lo que conlleva a que las descargas de los efluentes produzcan la contaminación de acuíferos de aguas de ríos y suelos.



Figura 1.4. Flóculos formados luego del tratamiento fisicoquímico en Tanques Australianos

En los últimos años no se ha presentado nuevas alternativas de tratamiento para exigencia y cumplimiento de las normas ambientales. Esta necesidad de investigar, mejorar el tratamiento de agua y de buscar una nueva alternativa para efluentes, se realiza para poder atender las necesidades de cumplimiento de las normas ambientales. El presente proyecto de tesis es de suma importancia para la Industria de perforación, que tiene por prioridad el respeto de su compromiso de cuidado del ambiente, salud de ciudadanos y cumplimiento de las leyes ambientales vigentes en nuestro país. Con este estudio se pretende enfocar una nueva alternativa de cómo tratar los efluentes provenientes del lodo de perforación, sugiere el medio para la eliminación de contaminantes que ha sido probado, recomienda las condiciones de operación a usar para lograr la protección ambiental, al mismo tiempo de continuar un desarrollo sostenido hacia las necesidades de la industria y demás empresas.

1.6. Objetivos

Con miras a ampliar el conocimiento acerca de la electrocoagulación, método que ofrece al sector hidrocarburos una oportunidad económica y eficiente de tratamiento de aguas residuales en comparación con los métodos convencionales, se planteó esta investigación que tiene los siguientes objetivos:

1.6.1. Objetivo general

Mejorar la calidad del efluente procedente del lodo de perforación del pozo petrolero Bretaña Norte 95-2-1XD, de acuerdo a la norma ambiental vigente, estableciendo los parámetros electroquímicos de operación y el procedimiento para el tratamiento de electrocoagulación.

1.6.2. Objetivos específicos

- Cuantificar el porcentaje remoción del Bario y Aluminio del efluente final.
- Cuantificar el porcentaje de remoción de la Turbidez del efluente final.
- Cuantificar el porcentaje remoción de Solidos Suspendidos Totales del efluente final.
- Cuantificar el porcentaje de remoción de la Conductividad del efluente final.
- Definir los parámetros de operación: Densidad de corriente, Tiempo de proceso, Flujo de ingreso y salida.

Los niveles de remoción de las especies químicas y las propiedades que se mencionan, como características del efluente final, serán de acuerdo a los niveles que establece la norma vigente D.S N°037-2008-PCM.

CAPITULO II

II. MARCO TEORICO

2.1. Coloides

Las partículas coloidales en el agua por lo general presentan un diámetro entre 1 y 100 nm y su comportamiento depende de su naturaleza y origen. Por debajo de esos límites están las disoluciones verdaderas, y por encima, las suspensiones ordinarias. La importancia del tamaño de partícula, se debe a que de este, depende la magnitud de superficies de la sustancia dispersa. Si la cantidad de superficie es muy grande se manifiestan, y son predominantes, propiedades que están vinculadas a la superficie de las partículas, propiedades superficiales. Las dimensiones coloidales se pueden alcanzar, bien por agrupación de moléculas o subdivisión de partículas superiores al límite del tamaño indicado.

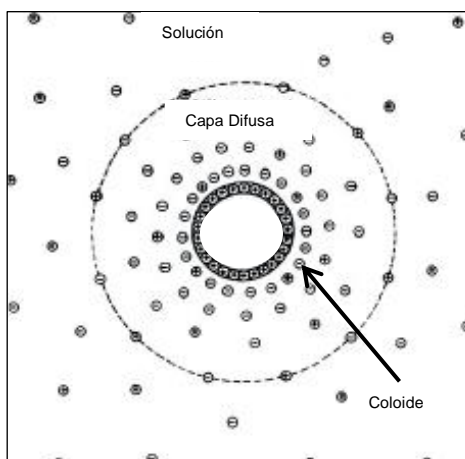


Figura 2.1. Esquema de un colóide con carga positiva [4]

Se trata por tanto de un estado de las sustancias, llamado estado coloidal en el que tienen manifestación muy destacada las propiedades de superficie. Adicionalmente, estas partículas

presentes en el agua son las principales responsables de la turbiedad [4].

2.2. Tipos de coloides de acuerdo con su comportamiento en el agua

En el tratamiento del agua, es común referirse a los sistemas coloidales como hidrófobos cuando repelen el agua, e hidrófilos cuando presentan afinidad con ella. En los sistemas coloidales hidrófobos, las propiedades de la superficie de las partículas son muy importantes, principalmente en las aguas naturales, que pueden contener varios tipos de arcillas. Las arcillas y algunos óxidos metálicos son coloides hidrófobos muy importantes en el tratamiento del agua. Se caracterizan por ser termodinámicamente inestables con respecto a la formación de grandes cristales no coloidales. Los coloides hidrofílicos comprenden soluciones verdaderas, ya sea de moléculas grandes o de agregados de moléculas pequeñas, cuyas dimensiones están dentro de los límites coloidales. Abarcan varios polímeros tanto sintéticos como naturales y numerosas sustancias de significación biológica como proteínas, ácidos nucleicos, almidones y otras macromoléculas [4].

2.3. Características de las partículas coloidales

Desde el punto de vista energético, algunas partículas coloidales son termodinámicamente estables y se denominan coloides reversibles, incluidas las moléculas de detergente o jabón, proteínas, aminas y algunos polímeros de cadena larga. Otros coloides termodinámicamente inestables se denominan irreversibles, como las arcillas, los óxidos metálicos, los microorganismos, etcétera, que están sujetos a coagulación. Algunos coloides coagulan rápidamente, mientras que otros lo hacen lentamente. Los términos termostable e inestables muchas veces se aplican a los coloides irreversibles. Con ello se hace referencia, por ende, a cinética de coagulación y no a las características termodinámicas y energéticas.

Un sistema coloidal cinéticamente inestable es un sistema coloidal irreversible, en el cual la coagulación es significativa [4].

2.3.1. Características de las arcillas

Las arcillas están principalmente constituidas por partículas minerales: cuarzo, mica, pirita, calcita, etcétera. Los constituyentes más importantes de las arcillas son los silicatos hidratados de aluminio y hierro, también algunos elementos alcalinos y alcalino-térreos. Morfológicamente, las partículas de arcillas se representan en forma de plaquetas compuestas de láminas muy finas, como muestra la figura 2.2 [5].

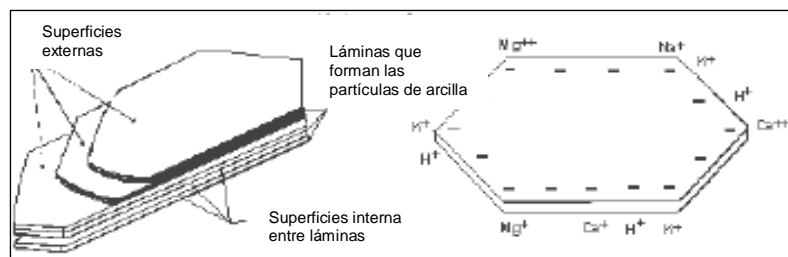


Figura 2.2. Representación esquemática de una partícula de arcilla [5]

Tabla 2.1. Arcillas más comunes [5]

Montmorillonita (bentonita)	$Al (Mg) (Si_8O_{20}) (OH)_4 \cdot XH_2O^*$
Ilita	$K_yAl_4 (Fe_4 Mg_4 Mg_{16}) (Si_8 - Y Al_y) O_{20}^*$
Muscovita	$K_yAl_4 (Al_2 Si_6 O_{20}) (OH)_4$

*Los elementos entre paréntesis pueden ser sustituidos por el material que se encuentra a la izquierda del paréntesis.

Las observaciones microscópicas y el análisis de las arcillas mediante los rayos X posibilitan clasificarlas de acuerdo con

su estructura cristalina. Los principales elementos constituyentes de las arcillas son el aluminio, silicio, magnesio, potasio, oxígeno e hidrógeno. La distribución de estos elementos en la red cristalina define a los tipos de arcilla. En la tabla 2.1 se presentan los tipos de arcillas más comunes en el agua y su respectiva estructura química [5].

2.4. Propiedades de los coloides

Desde el punto de vista físico, las arcillas son cristales con una estructura atómica reticular. Véase la figura 2.3.

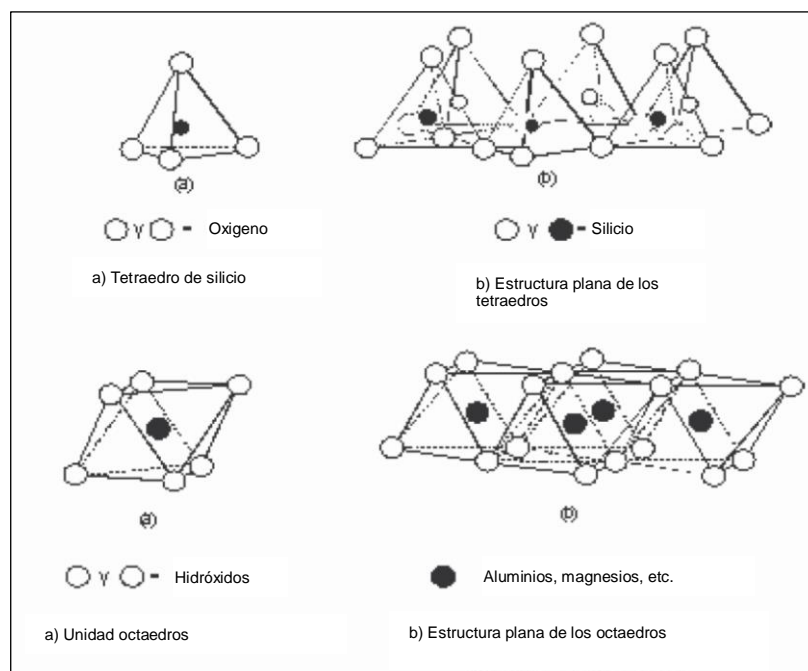


Figura 2.3. Estructura atómica reticular de la arcilla [4]

2.4.1. Propiedades cinéticas

Las propiedades cinéticas son las que definen el comportamiento de las partículas coloidales referidas a su movimiento en el agua [4].

a. Movimiento browniano

Las partículas coloidales, dentro de la fase líquida, presentan un movimiento constante e irregular, que se ha denominado movimiento browniano. La teoría cinética explica este fenómeno como resultado del bombardeo desigual y casual de las partículas en suspensión por las moléculas del líquido. Al elevarse la temperatura del líquido, las moléculas adquieren mayor energía cinética y aumenta el movimiento Browniano.

b. Difusión

Debido al movimiento browniano, las partículas coloidales tienden a dispersarse por todas partes en el sistema hídrico. A este fenómeno se le llama difusión.

c. Ósmosis

La ósmosis es el flujo espontáneo que se produce cuando un disolvente atraviesa una membrana que la separa de un sistema coloidal (agua + coloides). Esta membrana es permeable al solvente pero no a los coloides; por tanto, la dilución puede ocurrir únicamente con el movimiento del solvente hacia el sistema coloidal a través de la membrana. A la presión hidrostática necesaria para detener el flujo osmótico, que alcanza así un estado de equilibrio, se le denomina presión osmótica.

2.4.2. Propiedad óptica**• Efecto Tyndall-Faraday**

El efecto Tyndall-Faraday es un fenómeno por el cual las partículas coloidales provocan la dispersión de la luz cuando esta pasa a través de una suspensión coloidal. Esta dispersión es directamente proporcional al tamaño de las partículas [4].

2.4.3. Propiedad de superficie

- **Adsorción**

Como se puede comprobar en el tabla 2.2, las partículas coloidales se caracterizan por tener una gran superficie específica, definida como la relación entre el área superficial y la masa. Nótese el efecto de la disminución del tamaño de las esferas sobre el área total superficial y el tiempo de sedimentación requerido. La gran superficie específica da a los coloides una gran capacidad de adsorción y, por tanto, no resulta práctico sedimentar las partículas coloidales sin tratamiento previo [6].

Tabla 2.2. Efecto al disminuir el tamaño de las esferas [6]

Diámetro de la partícula (mm)	Escala de tamaños	Área superficial total^a	Tiempo requerido para sedimentar^b
10	Grava	3.15 cm ²	0.3 s
1	Arena gruesa	31.50 cm ²	3.0 s
0.1	Arena fina	315.00 cm ²	38.0 s
0.01	Sedimento	3 150.00 cm ²	33.0 min
0.001	Bacteria	3.15 m ²	55.0 horas
0.0001	Partícula coloidal	31.50 m ²	230.0 días
0.00001	Partícula coloidal	0.283 ha	6.3 años
0.000001	Partícula coloidal	2.83 ha	63.0 años

^a Área de partículas del tamaño indicado, producida a partir de una partícula de 100 mm de diámetro y gravedad específica 2.65.

^b Cálculos basados en esferas con gravedad específica de 2.65 que sedimenta 30 cm.

2.4.4. Propiedad electrocinética

- **Electroforesis**

La electroforesis es un fenómeno que consiste en el movimiento de partículas coloidales cargadas bajo la acción de un campo eléctrico aplicado. La magnitud de interés es la movilidad electroforética, u_e , relación entre la velocidad alcanzada por las partículas y el campo aplicado. La movilidad u_e está relacionada con las propiedades de la suspensión, entre ellas el potencial zeta y la conductividad superficial de la doble capa. Su valor es el resultado del balance de fuerzas que actúan sobre la partícula y su doble capa [4].

2.5. Estabilidad e inestabilidad de los coloides

Las suspensiones coloidales están sujetas a ser estabilizadas y desestabilizadas [7]. Entre las fuerzas de estabilización o repulsión podemos mencionar las siguientes:

- La carga de las partículas.
- La hidratación, que es importante para los coloides hidrofílicos.

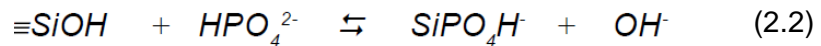
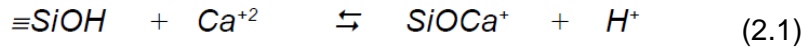
Los factores de atracción o desestabilización son los siguientes:

- La gravedad.
- El movimiento browniano. Permite que las partículas entren en contacto.
- La fuerza de Van der Waals. Es un factor muy importante, pues constituye la principal fuerza atractiva entre las partículas coloidales.

2.6. Carga eléctrica de los coloides. Fuerza de estabilización

En el agua, la mayor parte de las partículas y moléculas poseen superficie cargada eléctricamente, usualmente negativa y dependiente de tres procesos [7]:

- a) Grupos presentes en la superficie sólida pueden recibir o donar protones al reaccionar con el agua.
- b) Grupos superficiales pueden reaccionar en el agua con otros solutos además de protones. Así, considerando la sílice como un óxido representativo, se tiene:



- c) Por otro lado, las cargas pueden ser el resultado de imperfecciones de la estructura molecular, como en el caso de las arcillas que se encuentran en suspensión en aguas turbias. Como ejemplo de este tipo de imperfecciones se puede mencionar la estructura reticular en tetraedro del SiO₄. El átomo de Si (+4) puede ser reemplazado por uno de Al (+3) y la estructura reticular resultará con carga negativa.

2.7. Doble capa eléctrica de los coloides

El sistema coloidal no presenta carga eléctrica “líquida” debido a que la carga de superficie negativa es balanceada con los iones de carga contraria presentes en el agua. La figura 2.4 muestra una representación esquemática de una partícula coloidal negativa con una nube de iones alrededor de la misma. Como la superficie de la partícula es negativa, hay un cúmulo de iones positivos en la región de interfaz (sólido-líquido) que forman, junto con la carga negativa de la partícula, la doble capa eléctrica, también denominada capa compacta. Los iones negativos se aproximan a la capa compacta y atraen iones positivos; así se forma la capa difusa, que engloba a la primera. En realidad, la capa difusa resulta de la atracción de iones positivos, de la repulsión electrostática de iones negativos y la difusión térmica. Se tiene, por tanto, una concentración elevada de iones positivos próximos a la superficie del coloide, también denominada capa de Stern, a partir de la cual se forma la capa difusa, en la cual la concentración de iones es menor. Se han

propuesto varios modelos para explicar la doble capa eléctrica. Quizás el modelo que explica mejor este fenómeno es el de doble capa difusa de Stern-Gouy (figura 2.5) [8].

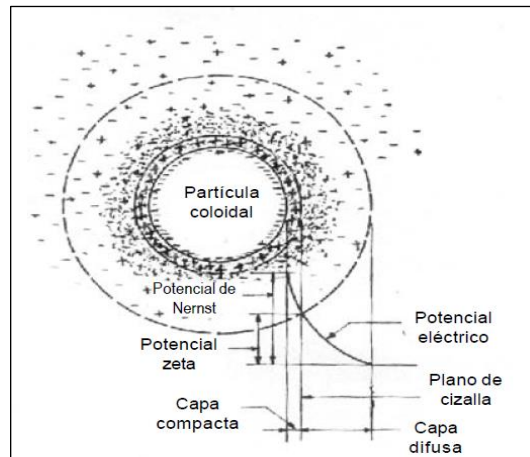


Figura 2.4. Configuración esquemática de la doble capa eléctrica [8]

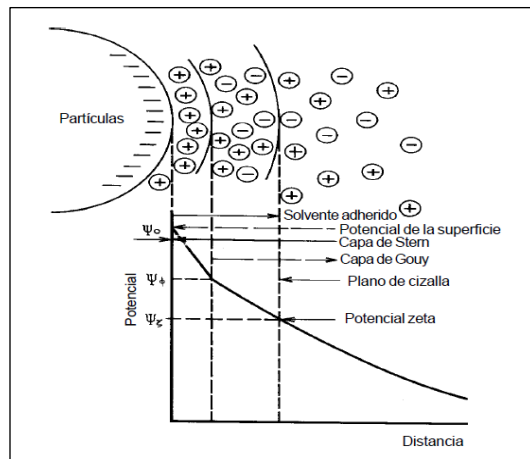


Figura 2.5. Modelo de la doble capa difusa de Stern-Gouy [8]

En este modelo hay tres potenciales de interés:

- i. El potencial ψ_0 en la superficie coloidal. Es un potencial eléctrico creado por la presencia del coloide en el agua, que disminuye con la distancia, a partir de la superficie del mismo, donde es máximo.

- ii. El potencial $\psi\phi$ (Phi), en el interior de la superficie de la doble capa, donde comienza la capa difusa.
- iii. El potencial $\psi\zeta$ (Zeta) en el plano de cizalla.

2.8. Energía potencial de interacción de las partículas coloidales

Cuando dos coloides semejantes se aproximan uno a otro, ocurre interacción entre las capas difusas, lo que hace que haya repulsión debido a la fuerza electrostática entre ellos. La energía potencial de repulsión, que disminuye con la distancia a partir de la superficie del coloide, está demostrada en la figura 2.6. Existen fuerzas atractivas entre las partículas denominadas fuerzas de Van der Waals. Tales fuerzas son atribuidas a las fluctuaciones de carga en los átomos y resultan de interacciones entre dipolos permanentes o inducidos en los átomos interactuantes de los coloides del agua. Para dos átomos, la fuerza atractiva de Van der Waals es inversamente proporcional a la séptima potencia de la distancia entre ellos. Por ende, para dos partículas constituidas por gran número de átomos, las fuerzas actuantes sobre cada par de átomos son aditivas, lo que resulta en una energía de atracción inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre las superficies de ellas. La interacción entre las fuerzas de repulsión de origen eléctrico y de atracción de Van der Waals, y entre partículas coloidales que se mueven continuamente, debido al movimiento browniano, contribuye a la estabilidad del sistema [8]. Cuando la fuerza iónica es pequeña, la energía resultante es de repulsión, y adquiere un valor máximo conocido como barrera de energía, a una distancia, a partir de la superficie de la partícula coloidal, próxima a aquella en que se tiene el plano de cizallamiento. Por eso, el potencial zeta puede presentar indicaciones de gran estabilidad en un sistema coloidal. Con el aumento de la fuerza iónica, la energía resultante puede ser reducida al punto de eliminar la barrera de energía, de modo que las partículas pueden ser aproximadas sin que exista repulsión entre ellas.

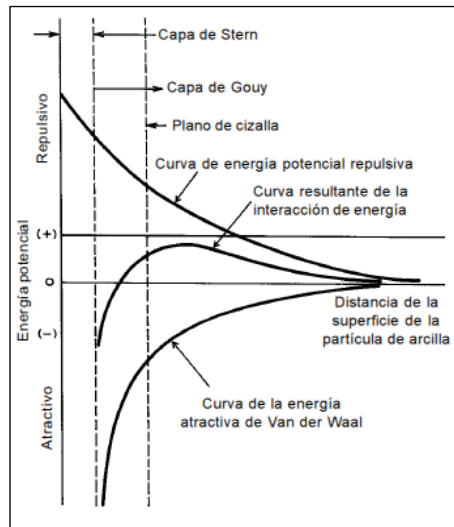


Figura 2.6. Energía potencial de interacción entre dos coloides [8]

2.9. Efecto del aumento de la concentración iónica

Las figuras 2.7- a, b muestran el efecto que produce el aumento de concentración iónica en la distribución de la carga. Como se puede observar comparando las figuras 2.7, un aumento en la concentración total de electrolitos reduce la distancia efectiva a través de la cual se manifiesta la carga. El efecto es aún más pronunciado cuando se utilizan cationes polivalentes [9].

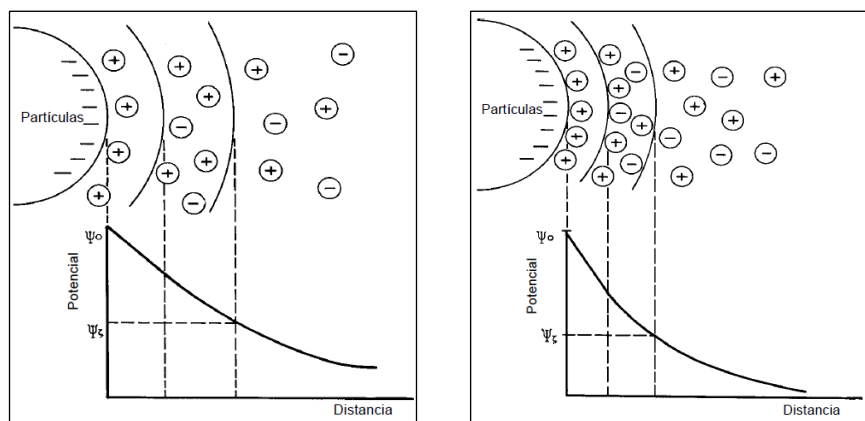


Figura 2.7. Efecto del aumento de concentración iónica. (a) Baja concentración de iones monovalentes. (b) Alta concentración de iones monovalentes. [9]

2.10. Mecanismo de electrocoagulación

Como se ha visto anteriormente, las partículas coloidales y algunos microorganismos presentan una carga negativa en el agua, lo cual impide la aproximación de las mismas. En el tratamiento del agua será necesario alterar esta fuerza iónica mediante la adición de aluminio o de hierro que provoquen el fenómeno de la coagulación. Actualmente se considera la coagulación como el resultado de la acción de cuatro mecanismos [10]:

- a. Compresión de capa difusa.
- b. Adsorción y Neutralización.

2.10.1. Compresión de la doble capa

Este modelo físico de doble capa puede explicar el fenómeno de la desestabilización de un coloide por un coagulante y la figura 2.6 ayuda a explicar el fenómeno de desestabilización: la curva de atracción de Van der Waals es fija mientras que la de repulsión eléctrica disminuye si se incrementan en la solución los iones de carga opuesta. En consecuencia, si se reduce el potencial repulsivo, decrece también la curva resultante de interacción. Por lo tanto, las partículas pueden acercarse suficientemente para ser desestabilizadas por la energía atractiva de Van der Waals. La introducción de un electrolito indiferente en un sistema coloidal causa un incremento de la densidad de cargas en la capa difusa y disminución de la "esfera" de influencia de las partículas, y ocurre la coagulación por compresión de la capa difusa. De modo tal que las fuerzas de Van der Waals sean dominantes, y se elimine la estabilización electrostática. Cabe destacar dos aspectos interesantes sobre ese mecanismo de coagulación [10]:

- a. La concentración del electrolito que causa la coagulación es prácticamente independiente de la concentración de coloides en el agua.

- b. Es imposible causar la reestabilización de las partículas coloidales con la adición de mayores cantidades de electrolitos debido a que ha ocurrido una reversión de la carga de las mismas, que pasa a ser positiva.

Cabe destacar que si bien este mecanismo puede explicar la acción de iones de sodio y calcio, que son iones indiferentes, no es válido para la acción del aluminio, porque este último no es un electrolito indiferente, sino que reacciona tanto con el agua como con la alcalinidad. Por tanto, el modelo físico de doble capa presenta limitaciones para explicar el fenómeno de coagulación.

2.10.2. Adsorción y neutralización de la carga

La desestabilización de una dispersión coloidal consiste en las interacciones entre coagulante-coloide, coagulante-solvente y coloide-solvente. El efecto de adsorción y neutralización de la carga se encuentra estrechamente ligado al de compresión de la doble capa. Cuando se agrega aluminio o fierro al agua en condiciones especiales de dosis de coagulante y pH, se forma una serie de especies solubles hidrolizadas. En el caso del aluminio, las especies hidrolizadas que se forman son Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$ y $\text{Al}(\text{OH})_4^+$, las cuales son tomadas a menudo para representar todo el sistema. Estas especies hidrolizadas se adhieren o forman complejos superficiales con los grupos Silanol (SiOH) y el coloide, y lo desestabilizan, lo que permite la formación de flóculos (figura 2.8). Este mecanismo es denominado neutralización de carga (también se lo llama de desestabilización-adsorción). Cuando la cantidad de coloides presente en el agua es grande, la distancia entre ellos es pequeña. Por lo tanto, es mayor la fuerza de atracción y la

2.11. Cinética o etapas de la coagulación

Considerando la discusión teórica que antecede, se identificaron varias etapas en el proceso de coagulación [11].

- i. Hidrólisis de los iones metálicos multivalentes y su consecuente polimerización hasta llegar a especies hidrolíticas multinucleadas.
- ii. Adsorción de las especies hidrolíticas en la interfaz de la solución sólida para lograr la desestabilización del coloide.
- iii. Aglomeración de las partículas desestabilizadas mediante un puente entre las partículas que involucra el transporte de estas y las interacciones químicas.
- iv. Aglomeración de las partículas desestabilizadas mediante el transporte de las mismas y las fuerzas de Van der Waals.
- v. Formación de los flóculos.
- vi. Precipitación del hidróxido metálico.

Algunas de estas etapas ocurren secuencialmente. Otras coinciden parcialmente y otras incluso pueden ocurrir simultáneamente. Se puede suponer que las diferentes etapas de la reacción pueden resultar controlables en un cierto porcentaje, bajo diversas condiciones químicas (figura 2.10) [11].

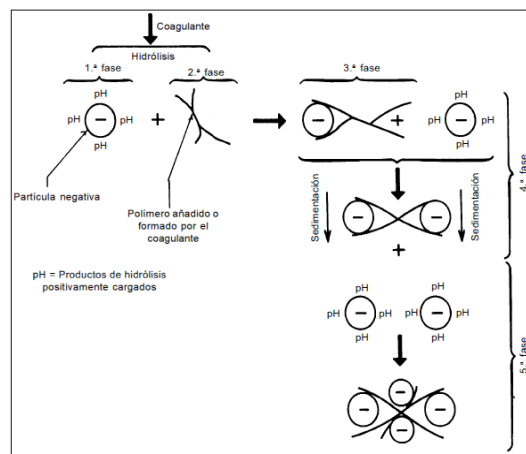
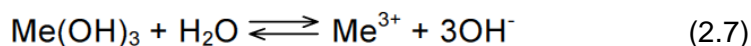
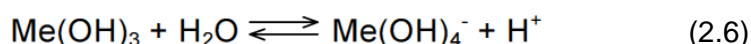
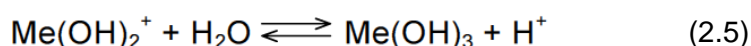
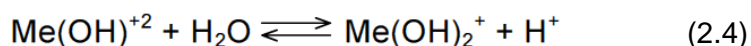
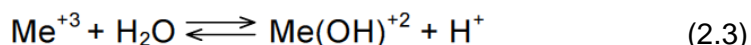


Figura 2.10. Modelo esquemático del proceso de coagulación [11]

2.12. Química del Aluminio en disolución acuosa

En disolución acuosa todos los metales se encuentran hidratados hasta cierto punto y, por tanto, es razonable pensar en la existencia de una capa de hidratación primaria alrededor del ión metálico, donde las moléculas de agua están en contacto con el ión metálico central, y una segunda capa de hidratación alrededor de la primera. Debido a la carga del ión metálico, las moléculas de agua de la primera capa de hidratación pueden estar polarizadas, y esto puede originar la pérdida de uno o más protones de algunas de las moléculas de agua presentes en la capa de hidratación primaria (en función del pH de la disolución), lo que se traduce en que las moléculas de agua en la capa de hidratación son progresivamente reemplazadas por iones hidroxilo, dando lugar a una carga positiva más baja de la especie hidratada. De forma genérica, esto se observa en la secuencia de reacciones de un ión metálico trivalente que se muestra a continuación (ecuaciones 2.3 a 2.7), en las que se han omitido, intencionadamente, las moléculas de hidratación [12]:



En el caso del ión aluminio, es conocido que la capa de hidratación primaria consiste en seis moléculas de agua en coordinación octaédrica, y que la química acuosa del ión aluminio es muy compleja, y sobrepasa con creces el nivel de complejidad de las especies monoméricas, ya que éstas se pueden combinar para dar especies de mayor peso molecular. Así, es conocido que, como productos de la hidrólisis del Al^{3+} , pueden formarse especies de peso molecular intermedio (oligómeros), tales como los dímeros y

trímeros, y también especies de elevado peso molecular (polímeros) entre las que la más conocida es el tridecámero. Sin embargo, para bajas concentraciones de metal puede ignorarse la formación de estas especies, y considerar solamente la formación de especies monoméricas. En el esquema de reacciones mostrado (ecuaciones 2.3 a 2.7) se enumeran consecutivamente las especies que se forman con el aumento del pH. En el caso del aluminio, el hidróxido que se forma tiene una solubilidad muy baja (ecuación 2.7) y, por tanto, se forma un precipitado amorfo para pH cercano a la neutralidad, siendo de una gran importancia en la utilización de este metal en los procesos de coagulación [13].

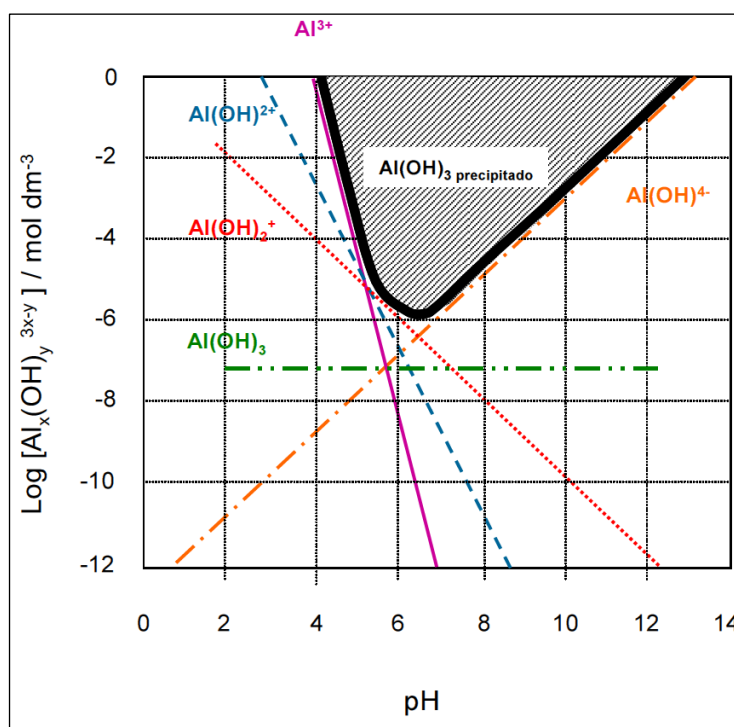


Figura 2.11. Diagrama de concentración de especies monoméricas de aluminio en equilibrio con el hidróxido amorfo, en condiciones de fuerza iónica cero y 25 °C [10]

Como se ha comentado anteriormente, la figura 2.11 es un diagrama aproximado que considera únicamente especies monoméricas, y que puede asumirse acertado cuando se trata de sistemas diluidos, sin

embargo para concentraciones de aluminio elevadas es necesario tener en cuenta la formación de diferentes especies poliméricas de aluminio. Los productos poliméricos de hidrólisis de aluminio se forman en concentraciones significativas bajo determinadas condiciones. Numerosas técnicas han sido empleadas para demostrar la existencia de estas especies poliméricas y el compuesto más referenciado es el tridecámero $[Al_{13}O_4(OH)_{24}]^{7+}$, que puede ser generado fácilmente mediante neutralización controlada de disoluciones de sales de aluminio, y que ha sido caracterizado mediante métodos de rayos X [14].

2.13. Principio de electrocoagulación

La electrocoagulación (EC) es un proceso complejo que involucra muchos fenómenos químicos y físicos que utiliza electrodos consumibles (Fe/Al) para suministrar iones a la corriente de agua. Fe/Al se disuelve a partir de los ánodos generadores de los iones metálicos correspondientes, el cual inmediatamente se hidroliza en hierro polimérico o hidróxido de aluminio. Estos hidróxidos poliméricos son excelentes agentes coagulantes. Los ánodos metálicos consumibles (electrodos de sacrificio) se utilizan para producir continuamente hidróxidos poliméricos en las proximidades del ánodo. La coagulación se produce cuando estos cationes metálicos se combinan con las partículas negativas llevadas hacia el ánodo por el movimiento electroforético. Los contaminantes presentes en el flujo de las aguas residuales son tratados ya sea por reacciones químicas y la precipitación o mediante la unión física y química a los materiales coloidales que se generan por la erosión del electrodo. Estos se retiran a continuación por electroflotación, sedimentación, y filtración. En el proceso de coagulación convencional, se agregan químicos coagulantes. En contraste, estos agentes coagulantes se generan in situ en el proceso de EC. [15]. El proceso básico se puede resumir en la figura 2.12. En el proceso de EC, el mecanismo de desestabilización de los contaminantes,

partículas en suspensión, y la ruptura de las emulsiones se pueden resumir de la siguiente manera:

- i. Compresión de la doble capa difusa alrededor de las especies cargadas por las interacciones de los iones generados por la oxidación del ánodo de sacrificio.
- ii. Neutralización de la carga de las especies iónicas presentes en el agua residual por los iones conjugados producidos por la disolución electroquímica del ánodo de sacrificio. Estos iones conjugados reducen la repulsión electrostática entre las partículas en la medida en que la atracción Van der Waals predomina, causando así la coagulación. Una carga neta cero se traduce en el proceso.

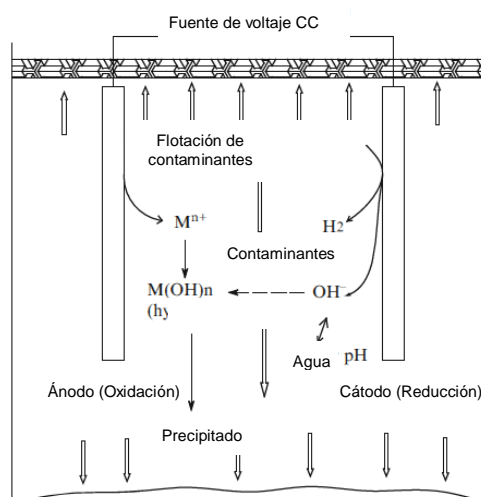


Figura 2.12. Diagrama esquemático de una celda de electrocoagulación con dos electrodos [15]

- iii. Formación de Floc: el flóculo formado como resultado de la coagulación crea un manto de lodo que atrapa y puentes de partículas coloidales que aún permanecen en el medio acuoso.

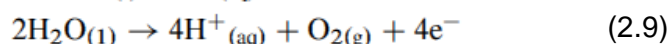
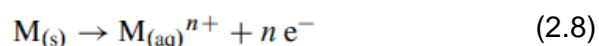
El agua también es electrolizada en una reacción paralela, la producción de pequeñas burbujas de oxígeno en el ánodo e hidrógeno en el cátodo. Estas burbujas atraen a las partículas

floculadas y flotan espontáneamente a la superficie con los contaminantes floculados. Además, las siguientes reacciones físico-químicas también pueden tener lugar en la celda de EC: (i) reducción catódica de las impurezas presentes en el agua residual; (ii) descarga y coagulación de las partículas coloidales; (iii) migración electroforética de los iones en solución; (iv) electroflotación de las partículas coaguladas por burbujeo de O_2 e H_2 producido en los electrodos; (v) reducción iones metálicos en el cátodo, y (vi) otros procesos electroquímicos y químicos [16].

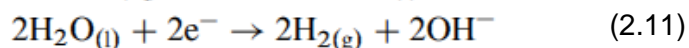
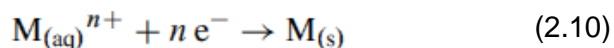
2.13.1. Las reacciones en los electrodos y la asignación de los electrodos

Un reactor de electrocoagulación sencillo se compone de un ánodo y un cátodo. Cuando se aplica un potencial de una fuente de poder externa, el material del ánodo sufre la oxidación, mientras que el cátodo es sometido a la reducción o deposición reductora de metales elementales. Las reacciones electroquímicas con el metal M como ánodo pueden estar resumidas de la siguiente manera [17]:

En el ánodo:



En el cátodo:



Si se utilizan electrodos de hierro o de aluminio, los iones $Fe_{(ac)}^{3+}$ o $Al_{(ac)}^{3+}$ generados sufrirán inmediatamente después reacciones espontáneas para producir hidróxidos y/o poli-hidróxidos correspondientes. Estos compuestos tienen una fuerte afinidad por las partículas dispersas, así como por los iones conjugados para provocar la coagulación. Los gases que

se desprenden en los electrodos pueden incidir y causar la flotación de los materiales coagulados [18]. Para mejorar el rendimiento de la EC, se puede intercambiar la polaridad de los electrodos de forma intermitente. El uso de electrodos de gran superficie es necesario y la mejora del rendimiento se ha logrado mediante el uso de celdas de EC ya sea con electrodos monopolares o electrodos bipolares. El diagrama esquemático de electrodos monopolares y bipolares con conexiones en serie se muestra en la figura 2.13 [19].

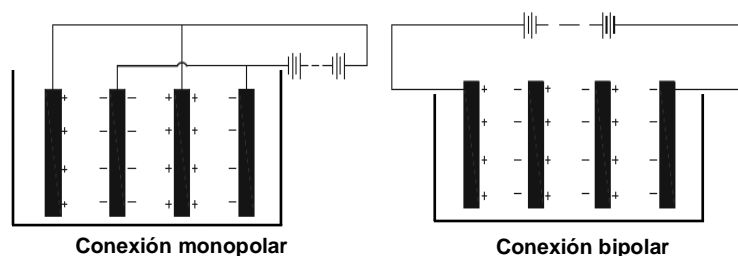


Figura 2.13. Diagrama esquemático de electrodos monopolar y bipolar en conexión en serie [19]

En una disposición monopolar, cada par de electrodos de sacrificio está conectado internamente uno con el otro, y no tiene ninguna interconexión con los electrodos exteriores. Esta disposición de electrodos monopolares con celdas en serie es eléctricamente similar a una única celda con muchos electrodos e interconexiones. La configuración experimental también requiere una caja de resistencia para regular el flujo de corriente eléctrica y un multímetro para leer los valores de la corriente eléctrica. El electrodo de sacrificio y el cátodo pueden estar hechos del mismo o de diferentes materiales. En una disposición bipolar, los electrodos de sacrificio se colocan entre los dos electrodos paralelos sin ninguna conexión eléctrica. Los dos electrodos monopolares están conectados a la fuente de energía eléctrica sin conexiones

entre los electrodos de sacrificio. Esta disposición de celdas proporciona una configuración sencilla, lo que facilita el mantenimiento. Cuando una corriente eléctrica pasa a través de los dos electrodos, los lados neutrales de la placa conductora se transformarán a los lados cargados, que tienen carga opuesta en comparación con el lado paralelo al lado de él. Los electrodos de sacrificio son conocidos como electrodos bipolares. Se ha reportado que la celda de EC con electrodos monopolares con conexión en serie fue más efectiva donde electrodos de aluminio fueron utilizados como electrodos de sacrificio y el hierro se usó como ánodo y el cátodo. Y, la electrocoagulación con Fe/Al (ánodo/cátodo) fue más eficaz para el proceso de tratamiento que el par de electrodos Fe/Fe [19].

2.13.2. Pasivación y Activación del electrodo

La pasivación del electrodo, específicamente electrodos de aluminio, ha sido ampliamente observado y reconocido como perjudicial para el rendimiento del reactor. Esta formación de una capa de inhibición, por lo general un óxido sobre la superficie del electrodo, evitará la disolución del metal y la transferencia de electrones, limitando de este modo la adición de coagulante hacia la solución. Con el tiempo, el espesor de esta capa aumenta, reduciendo la eficacia del proceso de electrocoagulación. La adición de aniones disminuye la pasivación del electrodo. El efecto positivo es el siguiente: $\text{Cl}^- > \text{Br}^- > \text{I}^- > \text{F}^- > \text{ClO}_4^- > \text{OH}^-$ y SO_4^{2-} . Especialmente, la adición de una cierta cantidad de Cl^- en la solución acuosa inhibirá el proceso de pasivación del electrodo en gran medida. También es necesario enjuagar regularmente la superficie de los electrodos. Las placas de aluminio también están encontrando aplicación en el tratamiento de aguas residuales ya sea solo o en combinación con placas de hierro, debido a

la alta eficiencia de la coagulación de Al^{3+} . Cuando hay una cantidad significativa de iones Ca^{2+} o Mg^{2+} en el agua, se recomienda que el cátodo sea acero inoxidable [17].

2.13.3. Comparación entre la electrocoagulación y coagulación química

La coagulación química y la electrocoagulación tienen el mismo fenómeno en el cual las partículas cargadas en suspensión coloidal se neutralizan por la colisión mutua con iones de hidróxidos metálicos y son aglomerados, seguidos por sedimentación o flotación. La diferencia entre la electrocoagulación y la coagulación química es principalmente la forma en la que los iones de aluminio o de hierro son entregados [20]. La electrocoagulación es un proceso que consiste en la creación de flocs de hidróxido metálico en el agua por electrodisolución de los ánodos solubles, por lo general de hierro o aluminio. En la coagulación química, la hidrólisis de sales metálicas, a base de aluminio o de hierro, por ejemplo, sulfatos de aluminio y férrico y cloruros, son ampliamente utilizados como coagulantes en el tratamiento del agua. Hay algunas ventajas para EC en comparación con la coagulación química, que son las siguientes [21]:

- i. En el proceso de coagulación química, la hidrólisis de las sales metálicas dará lugar a una disminución del pH y siempre será necesario modular el pH del efluente. La coagulación química es muy sensible al cambio de pH y la coagulación eficaz se consigue al pH entre 6-7. Mientras que en la electrocoagulación, el efecto de la neutralización del pH hizo efectiva en un amplio intervalo de pH entre 4-9.
- ii. Los flóculos formados por la EC son similares a los flóculos químicos. Pero, el flóculo EC tiende a ser mucho

más grande, contiene menos agua ligada, es resistente a los ácidos, y es más estable. En el proceso de coagulación química, siempre es seguido por sedimentación y filtración. Mientras que en el proceso de electrocoagulación, este puede ser seguido por sedimentación o flotación. Las burbujas de gas, que se producen durante la electrólisis, pueden transportar al contaminante a la parte superior de la solución en donde se concentra, recoge y elimina.

- iii. El lodo formado por EC tiende a ser estabilizado fácilmente, porque se compone de óxidos/hidróxidos metálicos principalmente. Sobre todo, se trata de una técnica de reducción de lodos.
- iv. En el proceso de EC se evita el uso de productos químicos. En consecuencia, no es necesario neutralizar el exceso de productos químicos, y la contaminación secundaria causada por las sustancias químicas agregadas se puede evitar.
- v. El proceso de EC tiene la ventaja de tratar el agua con baja temperatura y baja turbidez. En este caso, la coagulación química tiene dificultad en alcanzar un resultado satisfactorio.
- vi. El proceso de EC requiere un equipo sencillo y es fácil de operar.

Las desventajas de la EC son las siguientes:

- i. Los electrodos de sacrificio se disuelven en las aguas residuales como resultado de la oxidación, y necesitan ser sustituidos periódicamente.
- ii. La pasivación de los electrodos a través del tiempo ha limitado su aplicación.
- iii. El uso de la electricidad puede ser costoso en diferentes lugares.

- iv. Se necesita de alta conductividad para la suspensión de las aguas residuales.

2.13.4. Diseños típicos de los reactores de EC

Los reactores de electrocoagulación han sido construidos en diversas configuraciones. Cada sistema tiene su propio conjunto de ventajas y desventajas. Es importante diseñar la celda de EC para poder alcanzar la eficiencia máxima. Entre los reactores de electrocoagulación, la primera distinción importante es si un reactor se configuró como un proceso por lotes o un sistema continuo. Es claro que la mayoría de las aplicaciones caen en esta última categoría, que tiene una alimentación continua de aguas residuales y operando bajo (pseudo) condiciones de estado estacionario. Una ventaja clave para tal sistema de reactores es que el consumo de coagulantes son esencialmente fijas, una de las principales ventajas en términos de diseño y operación. Las aplicaciones en reactores por lotes típicamente operan con un volumen fijo de aguas residuales por ciclo de tratamiento, estos sufren la desventaja que esas condiciones dentro del reactor cambian con el tiempo. La segunda distinción importante entre las alternativas de los diseños de reactores es el papel de la flotación. Los reactores que no aprovechen la separación de contaminantes a través del burbujeo, burbujas generadas electroquímicamente, se consideran procesos de "coagulación puro", mientras que los reactores que integran la flotación en su diseño y operación se clasifican como procesos de "coagulación y flotación" [22]. La diferencia entre la remoción de contaminantes por decantación o flotación parece ser la densidad de corriente. Una corriente baja produce una baja densidad de burbujas, lo que lleva a una condición de bajo impulso del flujo hacia arriba lo que favorece la sedimentación más que la flotación. Cuando se

aumenta la corriente, la densidad de burbujas aumenta, lo que resulta en un mayor impulso del flujo hacia arriba. Por lo tanto, los contaminantes pueden ser quitados por flotación [15].

2.13.5. Asignación del flujo

En general, el flujo de líquido está conectado en paralelo (figura 2.14), el cual es fácil de fabricar. Sin embargo, el flujo de líquido es bajo para la conexión en paralelo y no es beneficiosa para la difusión de iones de Al y la formación del Al coagulante, así como la adsorción [23]. Además, si los iones de Al no se pueden transferir, el electrodo será pasivado. Por lo tanto, la sobretensión se incrementará y la energía eléctrica será consumida. Por el contrario, el ratio del flujo de líquido en la conexión en serie se puede incrementar (figura 2.14). Ciertamente, la velocidad de flujo no se puede incrementar demasiado con el fin de no destruir el coagulante [24].

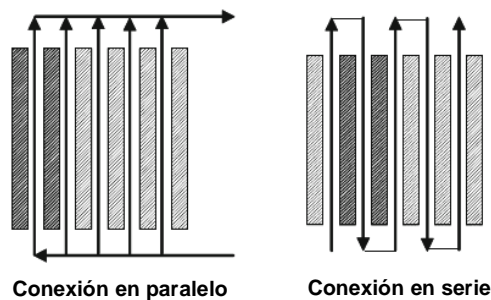


Figura 2.14. Diagrama esquemático del flujo líquido en conexión en serie y paralelo [24]

Se reportó los resultados del tratamiento de las aguas residuales textiles por un proceso de EC utilizando diversos valores de flujo. Dos materiales de electrodos, aluminio y hierro, se conectaron en tres modos: monopolar-paralelo (MP-P), monopolar-serie (MP-S), y bipolar-serie (BP-S). Para

MP-P, los ánodos y cátodos están en conexión en paralelo, la corriente se divide entre todos los electrodos en relación a la resistencia de las celdas individuales. En consecuencia, una menor diferencia de potencial se requiere para la conexión en paralelo, cuando se compara con las conexiones en serie. Para MP-S, cada par de electrodos de sacrificio está conectado internamente entre sí, porque las tensiones de las celdas suman una mayor diferencia de potencial requerida para una corriente dada. Para BP-S, no hay conexión eléctrica entre los electrodos interiores, sólo los electrodos exteriores están conectados a la fuente de poder. Los electrodos externos son monopares y los internos son bipares. Este modo de conexión tiene una configuración sencilla y tiene menos costes de mantenimiento durante el funcionamiento. Los resultados muestran que el modo monopolar-paralelo es el más rentable, para los tipos de electrodo [24].

2.14. Factores que afectan la Electrocoagulación

2.14.1. Efecto de la densidad de corriente

La densidad de corriente aplicada es muy importante en la electrocoagulación, ya que es el único parámetro operacional que puede ser controlado directamente. En este sistema, el espaciamiento de los electrodos es fijo y la corriente es un suministro continuo. La densidad de corriente determina directamente la dosis de coagulante y las tasas de generación de burbujas e influye fuertemente tanto en la mezcla de la solución y la transferencia de masa en los electrodos. En un experimento de EC, el electrodo o conjunto de electrodos se conecta normalmente a una fuente de CC externa. La cantidad de metal disuelto o depositado depende

en la cantidad de electricidad que pasa a través de la solución electrolítica. Una simple relación entre la densidad de corriente ($A\text{ cm}^{-2}$) y la cantidad de sustancias (M) disueltas (g de $M\text{ cm}^{-2}$) puede derivarse de la ley de Faraday [25]:

$$w = \frac{itM}{Nf} \quad (2.12)$$

Donde w es la cantidad de material de electrodo disuelto (g de $M\text{ cm}^{-2}$), i la densidad de corriente ($A\text{ cm}^{-2}$), t el tiempo en s; M la masa molar relativa del electrodo, N es el número de electrones en la reacción de oxidación/reducción, y f es la Constante de Faraday, $96\,500\text{ C mol}^{-1}$. Se espera que haya una relación entre la cantidad calculada de sustancias disueltas como resultado del paso de una cantidad determinada de energía eléctrica y una cantidad determinada experimentalmente. Por lo general, se obtiene un buen resultado [26]. Uno es la incertidumbre en la medición del potencial de la celda EC.

El potencial medido es la suma de tres componentes:

$$\eta_{AP} = \eta_k + \eta_{Mt} + \eta_{IR} \quad (2.13)$$

Donde η_{AP} es la sobretensión aplicada (V), η_k es la sobretensión cinética (V), η_{Mt} es la sobretensión de concentración (V), y el η_{IR} es la sobretensión causada por la resistencia de la solución o la caída IR (V). La caída IR está relacionada con la distancia (d en cm) entre los electrodos, el área (A en m^2) del cátodo, conductividad específica de la solución (κ en mS m^{-1}), y la corriente (I en A). La caída de IR puede ser fácilmente minimizada por la disminución de la distancia entre los electrodos y el aumento del área de la sección transversal de los electrodos y la conductividad específica de la solución. La sobretensión de concentración (η_{Mt} , V), también conocida como la transferencia de masa o sobretensión de difusión, es causada por el cambio en la

concentración analítica que ocurre en la proximidad de la superficie del electrodo debido a la reacción del electrodo. Esta sobretensión es causada por las diferencias en la concentración de las especies electroactivas entre el seno de la solución y la superficie del electrodo. Esta condición se produce cuando la reacción electroquímica es lo suficientemente rápida para disminuir la concentración de las especies electroactivas en la superficie de los electrodos por debajo de la concentración del seno de la solución. El sobrepotencial es pequeño cuando la constante de la velocidad de reacción es mucho menor que el coeficiente de transferencia de masa. El sobrepotencial del transporte de masa (η_k , V) se puede reducir mediante el aumento de la masa de los iones metálicos transportados desde la superficie del ánodo hacia el seno de la solución y se puede lograr mediante la mejora de la turbulencia de la solución. También se puede superar mediante el paso de la solución de electrolito del ánodo al cátodo a una velocidad más alta mediante el uso de algunos medios mecánicos. Con el aumento en la corriente, la sobretensión cinética y sobretensión de concentración aumentan. La densidad de corriente es el parámetro operacional clave, afectando no sólo el tiempo de respuesta del sistema, sino también influye fuertemente en el modo de la separación de los contaminantes. La más alta densidad de corriente admisible puede no ser el modo más eficiente de funcionamiento del reactor. Es bien sabido que la densidad de corriente óptima, invariablemente implicará un equilibrio entre los costos operativos y el uso eficiente del coagulante introducido. Mientras tanto, la densidad de corriente depende del pH de la solución, temperatura, velocidad de flujo, etc. Como resumen [27], el suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de Al^{3+} o

Fe^{2+} liberados de su respectivo electrodo. La selección de la densidad de corriente se debe hacer con otros parámetros de funcionamiento tales como el pH, la temperatura, así como la tasa de flujo para asegurar un alto rendimiento de la corriente. Existe una densidad de corriente crítica requerida. Una vez que se alcanza el valor crítico de la densidad de corriente, la calidad del efluente no muestra una mejora significativa para más incrementos de corriente. El rendimiento de la corriente para el electrodo de aluminio puede ser 120-140% mientras que el hierro es de alrededor de 100%. El rendimiento superior al 100% de eficiencia de la corriente global para el aluminio se atribuye al efecto de la corrosión por picaduras, especialmente cuando hay presencia de iones de cloro. El rendimiento de la corriente depende de la densidad de corriente, así como los tipos de aniones. La calidad del agua tratada depende de la cantidad de iones producidos (mg), el producto de la corriente y el tiempo (Ah). Tabla 2.3 da los valores del ion Al^{3+} requerido para el tratamiento de algunos contaminantes típicos en el tratamiento del agua [28].

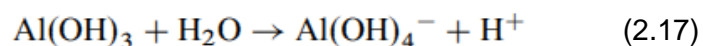
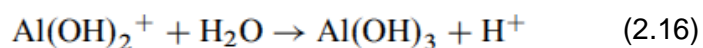
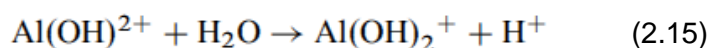
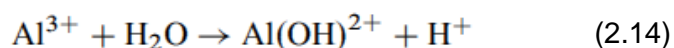
Tabla 2.3. Demanda de Al y consumo de potencia para remover los contaminantes del agua [28].

Contaminante	Unidad	Purificación preliminar		Purificación	
		Al^{3+} (mg)	E (Whm^{-3})	Al^{3+} (mg)	E (Whm^{-3})
Turbiedad	mg	0.04-0.06	5-10	0.15-0.2	20-40
Color	Unidad	0.04-0.1	10-40	0.1-0.2	40-80
Silicatos	mg/ SiO_2	0.2-0.3	20-60	1-2	100-200
Hierro	mg Fe	0.3-0.4	30-80	1-1.5	100-200
Oxígeno	mg O_2	0.5-1.0	40-200	2-5	80-800
Algas	1 000	0.006-0.025	5-10	0.02-0.03	10-20
Bacterias	1 000	0.01-0.04	5-20	0.15-0.2	40-80

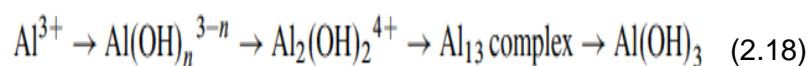
2.14.2. Efecto del pH

El pH de la solución juega un papel importante en los procesos de coagulación química y electroquímica. Bajo

ciertas condiciones, varios compuestos complejos y poliméricos se pueden formar a través de la hidrólisis y reacción de polimerización del Al^{3+} disuelto electroquímicamente. La formación de compuestos de coordinación de un solo núcleo de Al^{3+} se puede describir de la siguiente manera [29]:

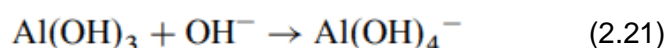
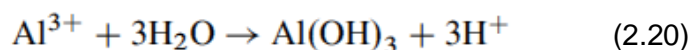


Con la extensión de la hidrólisis de Al^{3+} , compuestos de coordinación multinúcleo y precipitados de Al(OH)_3 pueden ser formados.



En el intervalo de pH de 4-9, Al(OH)^{2+} , Al(OH)_2^+ , $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, Al(OH)_3 , y $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{32}^{7+}$ se forman. La superficie de estos compuestos tiene grandes cantidades de carga positiva, que puede conducir a la adsorción de neutralización electroquímica y reacción de captura neta. A $\text{pH} > 10$, Al(OH)_4^- es dominante, y el efecto de coagulación disminuye rápidamente. A pH bajo, Al^{3+} es dominante, el cual no tiene el efecto de coagulación. En el proceso de coagulación química, el pH es ajustado debido a que el pH de la solución disminuirá con la adición de coagulantes. En la coagulación electroquímica, la evolución de H_2 en el cátodo incrementará la concentración del OH^- . Por lo tanto, el pH en la solución acuosa se incrementará cuando el pH del agua original está en el rango de 4-9. Sin embargo, cuando el pH del agua

original es mayor que 9, el pH del agua tratada disminuirá. En comparación con la coagulación química, la electrocoagulación puede neutralizar el pH del agua tratada en cierta medida a través de las siguientes reacciones [29].



Bajo condiciones ácidas, el CO_2 puede ser purgado con la evolución de H_2 y O_2 . Particularmente, la disolución del Al se produce por (2.11) - (2.21). Y, el $\text{Al}(\text{OH})_3$ formado también se disuelve, la reacción (2.19) se produce hacia la izquierda fácilmente. Estas reacciones son responsables para el aumento del pH de la solución. A pH alto, la reacción (2.20) ocurre hacia la derecha fácilmente, el Ca^{2+} y Mg^{2+} pueden precipitar con $\text{Al}(\text{OH})_3$. A pH más alto, la reacción (2.21) procede. Estos procesos son responsables de la disminución del pH acuoso [19].

2.14.3. Efecto de la Conductividad

Cuando la conductividad electrolítica es baja, la eficacia de la corriente disminuye. Entonces, se necesita un alto potencial aplicado el cual dará lugar a la pasivación del electrodo y aumentará los costos del tratamiento. Generalmente, se añade NaCl a fin de aumentar la conductividad electrolítica. El cloruro activo producirá también la electrólisis del Cl^- , lo que contribuirá a la desinfección del agua [30]. Y, la adición del Cl^- también disminuirá el efecto negativo de CO_3^{2-} y SO_4^{2-} . La presencia de CO_3^{2-} y SO_4^{2-} dará lugar a la deposición de Ca^{2+} y Mg^{2+} y la formación de una capa de óxido, lo que disminuirá la eficiencia de la corriente rápidamente. Es, por lo tanto, recomendable que entre los aniones presentes, debe haber

20% Cl^- para garantizar un funcionamiento normal de electrocoagulación en el tratamiento del agua [15].

2.14.4. Efecto de la Temperatura

La temperatura del agua también influye en el proceso de electrocoagulación. La eficiencia de la corriente en el Al aumenta rápidamente cuando la temperatura del agua aumenta de 2 a 30°C. El aumento de la temperatura acelerará la reacción destructiva de la membrana de óxido y aumentará la eficacia de la corriente. Sin embargo, cuando la temperatura esta sobre 60°C, la eficacia de la corriente comienza a disminuir. En este caso, el volumen del coloide $\text{Al}(\text{OH})_3$ disminuirá y los poros producidos en el ánodo de Al se cerrará [24].

2.15. Metales pesados: Aluminio y Bario

2.15.1. Aluminio

a. En el ambiente

Es un componente natural del agua, debido principalmente a que forma parte de la estructura de las arcillas. Puede estar presente en sus formas solubles o en sistemas coloidales, responsables de la turbiedad del agua. Las concentraciones más frecuentes en las aguas superficiales oscilan entre 0,1 y 10 ppm. El problema mayor lo constituyen las aguas que presentan concentraciones altas de aluminio, las cuales confieren al agua un pH bajo, debido a sus propiedades anfóteras, que hacen que sus sales se hidrolicen formando ácidos débiles [31].

b. Efectos sobre la salud

Los trabajadores que inhalan cantidades altas de aluminio en polvo pueden desarrollar problemas respiratorios tales como tos o alteraciones que se visualizan en radiografías del tórax. Las personas que respiran polvo o vapor de aluminio no se desempeñan bien en algunas pruebas que miden funciones del sistema nervioso. Gente con enfermedades del riñón almacenan una gran cantidad de aluminio en sus cuerpos y en ocasiones desarrollan enfermedades de los huesos o del cerebro que pueden deberse al exceso de aluminio. Los estudios en animales han demostrado que el sistema nervioso presenta la mayor susceptibilidad al aluminio. Aunque la administración de dosis altas de aluminio a animales no produjo señales obvias de toxicidad, afectó la capacidad para ejercer fuerza de las extremidades y la movilidad [32].

2.15.2. Bario**a. En el ambiente**

La contaminación del agua por bario puede provenir principalmente de los residuos de perforaciones, de efluentes de refinerías metálicas o de la erosión de depósitos naturales. Las concentraciones halladas en el agua son por lo general muy bajas; alrededor de 0,05 mg/L. Estudios realizados en las aguas de consumo muestran evidencias de que el bario puede ser absorbido por óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso [28].

b. Efectos sobre la salud

Elemento altamente tóxico para el hombre; causa trastornos cardíacos, vasculares y nerviosos. Se considera fatal una dosis de 550 a 600 miligramos de bario. La

exposición durante períodos relativamente breves a niveles de bario más altos que las normas establecidas por la EPA (2 mg/l en las fuentes de aguas de consumo humano) puede causar perturbaciones gastrointestinales y debilidad muscular. La ingestión durante un período breve de cantidades de bario más altas que las que ocurren normalmente en los alimentos y el agua puede producir vómitos, calambres estomacales, diarrea, dificultad para respirar, aumento o disminución de la presión sanguínea, adormecimiento de la cara y debilidad muscular. La ingestión de cantidades muy altas de compuestos de bario que se disuelven fácilmente puede alterar el ritmo del corazón y producir parálisis y posiblemente la muerte. Algunos animales que ingirieron bario durante mucho tiempo sufrieron daño del riñón, pérdida de peso y algunos fallecieron [33].

CAPITULO III

III. CONCEPTOS GENERALES DE PERFORACION Y EFLUENTE DE ESTUDIO

3.1. Descripción general del Proceso de Perforación en Pozos Petroleros

La perforación es un proceso que consiste en realizar en el subsuelo un hueco vertical, inclinado u horizontal, para alcanzar profundidades que van en promedio de 3 a 6 kilómetros de extensión con el objetivo de llegar a sitios conocidos como formaciones posiblemente productoras que puede tener hidrocarburos (crudo, gas, condensados o una mezcla de estos). Lo que se pretende con la perforación de los pozos exploratorios es confirmar la existencia en la zona de estructuras que sirvan como yacimientos, en esta actividad se puede establecer si la reserva es comercialmente explotable ya que esto es el centro o motivo de todas las actividades realizadas. Si el pozo realizado no contiene ningún hidrocarburo es considerado seco, pero si lo tiene se llama productor [34].



Figura 3.1. Pozo Exploratorio en la Selva Peruana

Los especialistas comienzan por construir unos altísimos taladros de perforación que miden aproximadamente de 30 a 40 metros y van reforzadas transversalmente. Estas torres facilitan el manejo de los pesados equipos de perforación. Éste método consiste en una serie de tubos acoplados unos a continuación de otros que son accionados por un motor. Los tubos comienzan a girar y en el extremo inferior una mecha o broca rompe y separa la roca.

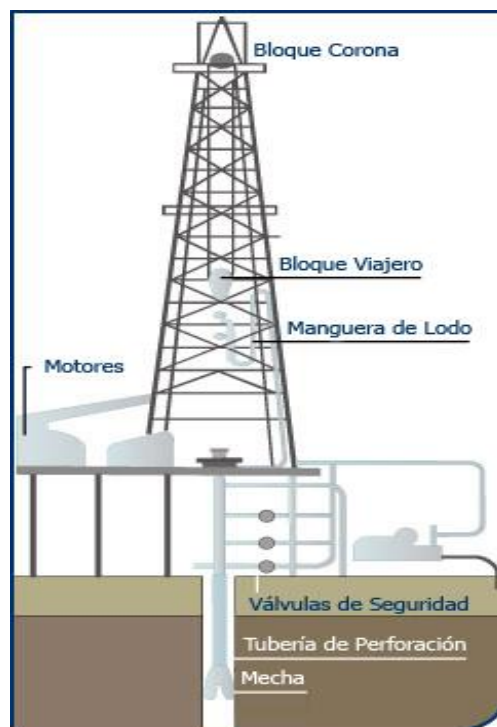


Figura 3.2 Equipo Rotatorio de Perforación

En la parte superior del mástil o torre se encuentra un sistema de poleas que se soportan parcialmente el peso de la sarta de perforación, de manera que no todo el peso de la misma recae sobre la mecha o broca. A medida que se avanza en la perforación del hoyo se hace necesario revestir las paredes del mismo. De manera que se usan tubos especiales de mayor longitud y espesor a los usados en el proceso de perforación, de manera de evitar el derrumbe o colapso del mismo. Las paredes del pozo se revisten con

láminas de acero de entre 6 y 12 milímetros de espesor y luego, por dentro del revestidor se prosigue la perforación con una mecha o broca de menor diámetro. Los rípios o recortes son arrastrados a la superficie mediante la inyección de fluidos de perforación, que además de lubricar los elementos cortantes de la mecha, cumplen la función de refrescar la misma, la cual se calienta por la fricción en el desgaste de la roca. Este bombeado de fluido, a la presión y volumen adecuados, garantiza que el fondo del pozo se mantenga limpio y la mecha avance [35].

3.1.1. Fluidos de Perforación

Para el proceso de perforación es indispensable la utilización de lodos o fluidos de perforación en cuyo caso son mezclas preparadas con gran cantidad de aditivos químicos. Los Lodos o Fluidos de Perforación pueden ser de dos tipos: Lodos Base Agua o Lodos Base Aceite. La composición química precisa de los lodos varía de pozo a pozo, o aún dentro de un mismo pozo, pero los componentes utilizados incluyen: arcillas, baritina y aditivos químicos. Muchos de los aditivos son altamente tóxicos y pueden incluir biocidas, bactericidas, anticorrosivos, espesante y sustancias químicas para controlar el pH. Las funciones del fluido de perforación describen las tareas que el fluido de perforación es capaz de desempeñar, aunque algunas de éstas no sean esenciales en cada pozo [36].

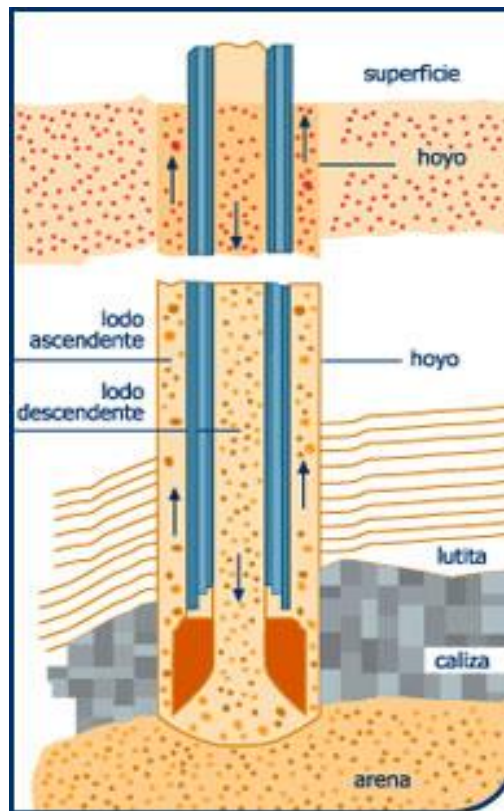


Figura 3.3. Corte Transversal de un hoyo para mostrar el ascenso y descenso de un fluido de perforación.

La remoción de los recortes del pozo y el control las presiones de la formación son funciones sumamente importantes. Las funciones más comunes del fluido perforación son las siguientes:

- Retirar los recortes del pozo.
- Controlar las presiones de la formación.
- Suspender y descargar los recortes.
- Obturar las formaciones permeables.
- Mantener la estabilidad del agujero.
- Minimizar los daños al yacimiento.
- Enfriar, lubricar y apoyar la broca o mecha.

Los desechos producidos por los lodos de perforación pueden hallarse mezclados con petróleo y sales provenientes del pozo y pueden ser sumamente alcalinos [35]. Estudios realizados establecen que la composición química de los desechos de perforación normalmente contiene cantidades considerables de una variada gama de contaminantes tóxicos, como aluminio, antimonio, arsénico, bario, cadmio, cromo, plomo, magnesio, mercurio, níquel, zinc así como niveles tóxicos de sodio y cloruros [37].

3.1.2. Deshidratación del Lodo de Perforación (Dewatering)

Es la separación físico/química de las fases sólida y líquida de un fluido de desecho. Su principal aplicación está en el tratamiento de volúmenes de lodo en exceso. Remueve la mayoría de los sólidos coloidales de los fluidos de perforación. La Deshidratación de lodo es el proceso de remoción de la mayoría de los sólidos coloidales en exceso presentes en los lodos de perforación base agua mediante la adición de productos químicos para coagular y flocular los sólidos presentes [34]. Sin la aplicación de un proceso químico o Deshidratación de Lodo, la separación mecánica de líquidos y sólidos mediante la utilización de una centrifuga está limitada a 2 o 3 micrones. Por esto que la Deshidratación de Lodo vence esta limitación mediante la "Floculación" del lodo por el pre-tratamiento químico para incrementar "el tamaño de Partícula Efectivo" de los sólidos suspendidos. La Coagulación es la adición de productos químicos al agua, los cuales causan que las partículas coloidales se agrupen en otras más grandes cuando entren en contacto[38].

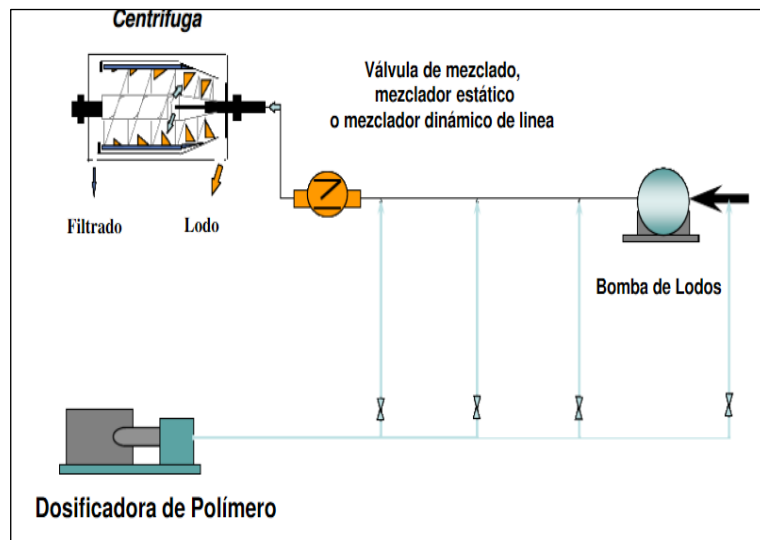


Figura 3.4. Proceso de Dewatering de un Lodo de Perforación [38].

Esta mezcla es utilizada durante la coagulación para proveer una rápida e uniforme dispersión de los químicos y también incrementar el acople entre partícula y partícula. Normalmente, el proceso completo ocurre en menos de un Segundo. La Floculación generalmente es seguida por la coagulación y puede describirse como un puente físico-químico o aglomeración de las partículas coaguladas [39]. El proceso de floculación involucra una mezcla de partículas, hasta que los flóculos son formados. La Separación de los líquidos y sólidos del sistema de lodo ocurre fácilmente mediante la eliminación de grandes sólidos floculados en forma de lodo húmedo. Los sólidos provenientes de la Deshidratación de Lodo es descargado dentro de los contenedores y el Agua Recuperada es retornada para almacenar o en forma directa para el sistema activo de lodo. El agua obtenida de esta deshidratación puede ser reciclada en forma de dilución en el proceso o retornada al sistema activo de lodo o transferida a los tanques de agua de perforación para su uso como dilución o tratamiento final. El objetivo primordial del Sistema

de Deshidratación de Lodo, es procesar los recortes o ripios y lodos de perforación para:

- Reducir el volumen de los desechos líquidos generados.
- Re-utilización del lodo.
- Disposición de los recortes o ripios y lodos.
- Descarga en la fosa de lodos de manera ambientalmente segura y costo efectivo.

El Sistema de Deshidratación es utilizado para procesar los recortes y lodos del Sistema de Lodo y del Sistema de Almacenamiento, debido lo anterior el efluente o fase líquida puede ser:

- Retornado al Sistema Activo de Lodo.
- Retornado a los tanques de agua de perforación para ser usado como dilución.
- Enviado a tratamiento de aguas para ajustar todos los parámetros y poder ser vertidos en forma segura.

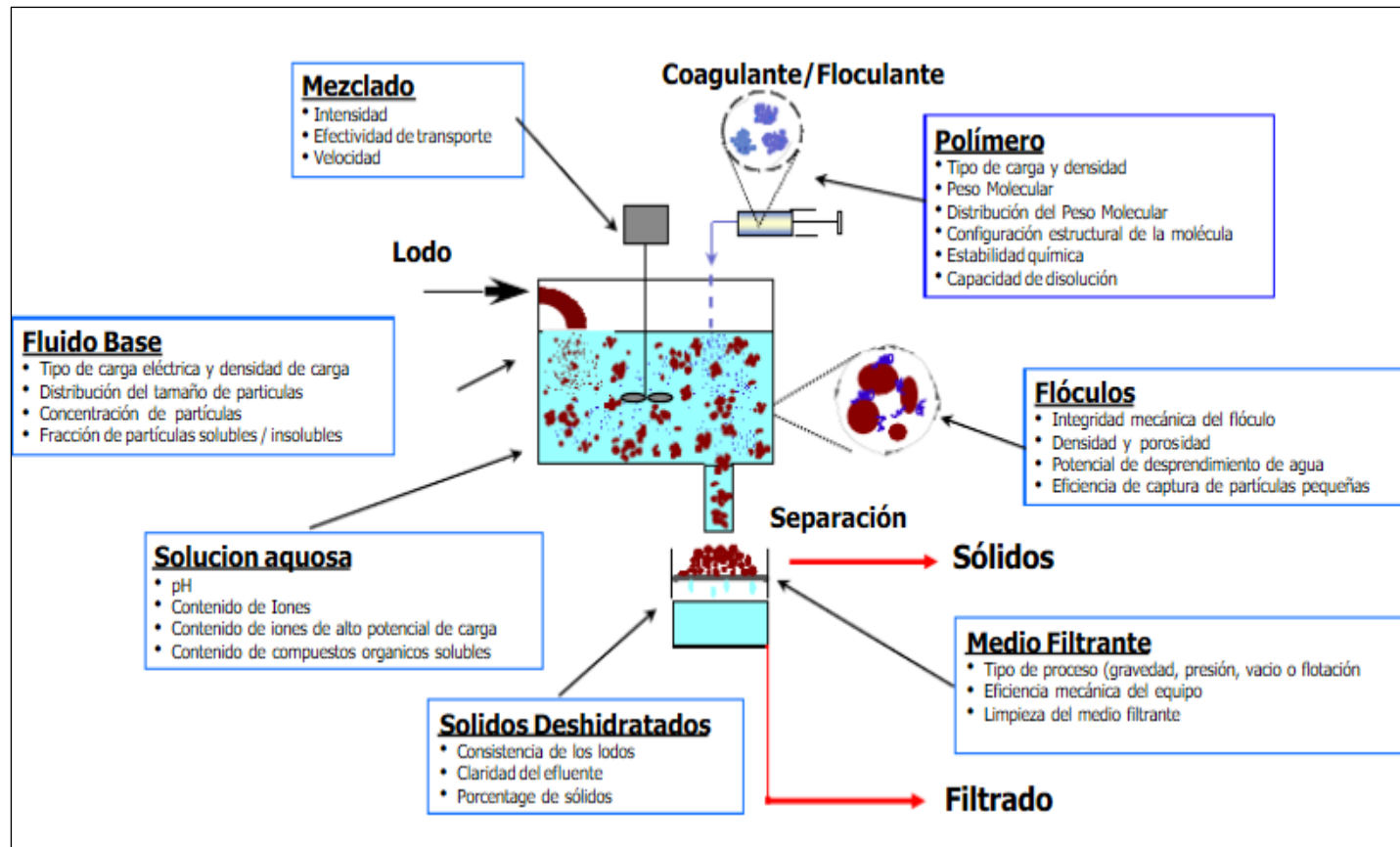


Figura 3.5. Dewatering – Variables del proceso para un Lodo de Perforación [39].

3.1.3. Disposición de Sólidos y Líquidos durante el proceso de perforación

- **Sólidos**

Los recortes de perforación después de ser procesados por los diferentes equipos de control de sólidos, zarandas primarias e hidrociclones: desarenadores, desarcilladores y centrifugas los cuales permitirán eliminar el exceso de líquido que pueda estar asociado al ripio (sólidos). Una vez que los sólidos hayan sido tratados se depositarán en la sección de residuos sólidos de la pileta de residuos (Fosa de lodo) [40].

- **Líquidos**

Lodos Base Agua: Es todo Fluido de perforación (Lodo de perforación) descartado por efectos de dilución, pérdida de vida útil o derrames. Estos desechos serán contenidos en el compartimiento de la pileta para tratamiento de lodos donde se le realiza un tratamiento de ajuste de pH, soda para control de alcalinidad y clarificación con coagulantes-floculantes [40].

3.2. Procedencia de agua industrial residual en pozos de perforación

El agua residual industrial presenta diferentes procedencias en el proceso de perforación de pozos de petróleo o gas los cuales son los siguientes:

a. Agua del lavado de equipo: Posee una carga contaminante alta, debido a:

- Aceites y grasas
- Sólidos en suspensión
- Desechos orgánicos

El Agua del lavado de equipo y la proveniente de los canales perimetrales, no se utiliza en nada relacionado al lodo de perforación o tratamiento.

b. Agua de canales Perimetrales internos: Tienen escasa carga contaminante, pero todavía poseen algo de lubricante de motores y maquinas que transitan en la locación, y además sólidos en suspensión.

c. Agua del proceso de Deshidratación (Dewatering) del fluido de perforación: Estas aguas mantienen una alta carga contaminante debido a:

- Sólidos en Suspensión
- Sales Disueltas
- Productos químicos orgánicos (polímeros) e inorgánicos solubles en agua.
- Metales pesados.



Figura 3.8. Sistema de Tratamiento de agua con tanques australianos típicos en un pozo petrolero.

3.3. Pozo Bretaña Norte 95-2-1XD – Loreto – Perú

3.3.1. Ubicación del Pozo Bretaña Norte 95-2-1XD

La petrolera canadiense Gran Tierra Energy terminó las pruebas iniciales en su pozo exploratorio Bretaña Norte 95-2-1XD en el bloque peruano 95, la exploración del Lote 95, que comprende la perforación del pozo vertical denominado Bretaña Norte 95-2-1XD; ubicado en el distrito de Puinahua, provincia de Requena, departamento de Loreto, cuyo objetivo principal es confirmar o ajustar las reservas estimadas de hidrocarburos. GRAN TIERRA ENERGY PERÚ S. R.L. Logro la autorización de vertimiento de aguas residuales industriales tratadas para su pozo exploratorio de la Locación 2 del Lote 95. Por un volumen anual de 5 702,40 m³ equivalente a un caudal de 1,10 l/s. de régimen continuo. Durante un periodo de dos (02) meses. a través de una tubería de 200 m de longitud al río "Canal del Puinahua". Clasificado transitoriamente con la Categoría 4: Conservación del Ambiente Acuático - Ríos de la Selva. Según la R.J. N° 202-2010-ANA. Y el numeral 3.3 del D.S. N° 023-2009-MINAM [41].



Figura 3.9. Locación del Pozo Breña Norte 95-2-1XD – Lote 95 [41].

3.3.2. Memoria descriptiva del proceso de tratamiento de agua residual en el Pozo Breña Norte 95-2-1XD.

El tratamiento actual de agua que se realiza consiste en la adecuación de los parámetros del agua proveniente del Dewatering, de las trampas y canales de la localización .El

procedimiento contempla el tratamiento químico por medio de floculantes y coagulantes a las agua de desechos y circulación del fluido dentro del tanque o fosa. El fluido es circulado usando bombas centrífugas. El tratamiento químico es aplicado a la fosa directamente o inyectado en la bomba. Una vez que el fluido es floculado apropiadamente la circulación es parada para permitir a los sólidos su asentamiento y el completo ajuste de parámetros fisicoquímicos para la descarga de un cuerpo receptor.

Químicos utilizados en el Tratamiento de Aguas:

- Sulfato de Aluminio (coagulante)
- Polímeros (floculantes neutros, de baja o alta carga).
- Controlador de pH.
- Cloro

De cada tratamiento realizado se obtiene precipitación de flóculos, este residuo sólido proveniente del proceso mismo de tratamiento es enviado y procesado por la unidad de deshidratación (Dewatering) nuevamente.

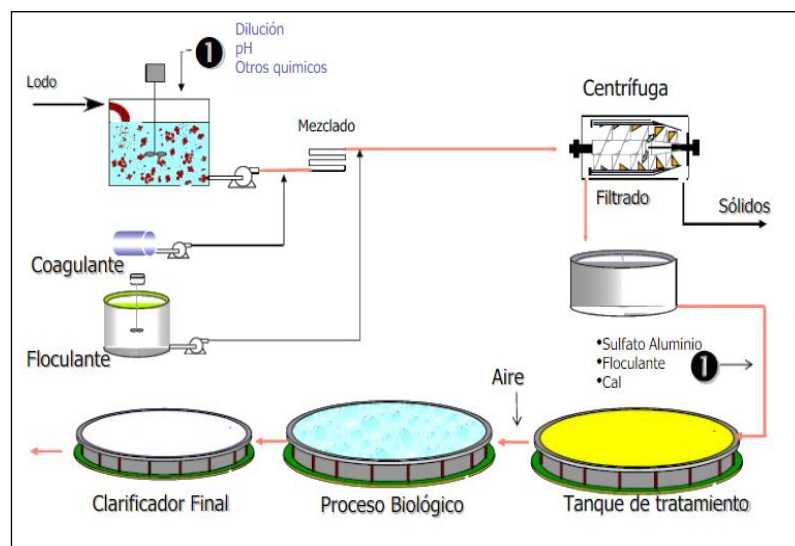


Figura 3.10. Tratamiento Físicoquímico del Efluente Industrial.

3.4. Efluente de estudio

El efluente que se ha utilizado para realizar las pruebas de tratamiento electroquímico de electrocoagulación proviene del proceso Dewatering del lodo de perforación correspondiente a la sección 8 ½ del pozo Bretaña Norte 95-2-1XD. La sección que se perforo tiene las siguientes características [42]:

Tabla 3.1. Características de la Sección de Perforación - Sección Producción.

Profundidad Inicial, Metros	Profundidad Final, Metros	Tamaño del Hoyo, Pulgadas	Diámetro del Revestidor, Pulgadas
2874	3304	8 ½"	7"

Características litológicas de la sección perforada:

- a. **Vivian:** La formación está compuesta por gruesos cuerpos de areniscas finas bien ordenados con contenido de cuarzo, son moderadamente friable, en la parte superior de color gris verdoso y moderada claystones limosa marrón ligeramente calcárea, en la zona media capas de color azul arcilloso, moderadamente firme, de color gris claro y gris y arcilloso, limoso.
- b. **Chonta:** se encuentra dividida en tres zonas, upper, lower y basal.
 - i. **Upper:** Esta unidad está compuesta principalmente por lutitas (shales) grises, son frágil mostrando una textura suave, fisionable, con astillas y la fractura laminar.
 - ii. **Lower:** Un cuerpo de piedra caliza indica la parte superior Chonta miembro inferior. Por debajo de esta marca regional de la unidad consiste predominantemente de areniscas intercaladas con lutitas, claystones limosa y finas capas de piedra caliza. Areniscas de color blanquecino, gris claro y fino, bien ordenados, subangulares a redondeados, con

granos de cuarzo hialino y transparente y líticos de vez en cuando gris oscuro.

- iii. **Basal:** Esta unidad consta de intercalaciones de areniscas, limolitas y claystones. Las areniscas son moderados de color rosa anaranjado, muy bien gris amarillento, muy fino y de menor importancia de grano, de cuarcita, en parte con matriz arcillosa abundante y localmente con cemento calcáreo, mientras que el claystones es rojo grisáceo y de menor importancia gris verdoso y suave a moderadamente firme.

c. **Aguas calientes:** La formación está compuesta por areniscas finas.

3.4.1. **Fluido de perforación utilizado en la sección 8 ½ durante la perforación.**

Para perforar las formaciones mencionadas con una litología de intercalaciones de areniscas y lutitas se utilizó el sistema de lodo denominado Clear Drill que en su composición mayoritaria lleva Formiato de Sodio y Complejos de Aluminio, el cual tiene propiedades inhibitorias de lutitas y es bajo en sólidos aportando así un buen filtrado estático y dinámico. Es imprescindible adquirir un conocimiento profundo de los usos y límites de cada producto usado como aditivo. Entre sus principales componentes químicos se tiene [42]:

- **Agentes Densificantes**

El mármol molido es un carbonato de calcio de alta pureza soluble en ácido que se usa como agente puenteante y densificante en los fluidos de perforación, de yacimiento y rehabilitación/ completación. Se prefiere a la caliza porque es generalmente más puro y tiene una dureza más alta. La alta pureza proporciona una mejor solubilidad en ácido y la alta dureza proporciona una mayor resistencia a la

degradación del tamaño de las partículas. Está disponible en tres tamaños estándar de molienda: Fina (F), Mediana (M) y Gruesa (C).

- **Modificadores de pH**

La soda cáustica es el hidróxido de sodio (NaOH) que se puede usar en salmueras monovalentes como fuente de iones hidroxilo para controlar el pH. Otros nombres comunes para el hidróxido de sodio son cáustica, álcali y lejía. Se trata de una base fuerte que es extremadamente soluble en agua y se disocia formando iones sodio (Na⁺) e hidroxilo (OH⁻) en solución. El óxido de magnesio se usa para aumentar el pH en salmueras divalentes o complejas. Este producto químico moderadamente soluble forma un pH amortiguado de 8,5 a 10,0, según el ambiente iónico.

- **Formiato de Sodio**

Químico comercial que ha logrado ser aceptado como alternativa a las salmueras de cloruro. Puede ser usado en operaciones de rehabilitación y completación que requieren fluidos claros con una densidad de hasta 11,0 lb/gal (1,32 SG) y como líquido de base para los fluidos de perforación. Para muchas aplicaciones, se considera que las salmueras a base de formiato tienen mejores características de HSE (Salud, Seguridad y Medio Ambiente) que las salmueras de cloruro y bromuro. Las salmueras de formiato también proporcionan una excelente estabilización térmica a los polímeros naturales usados como viscosificadores.

- **Inhibidores de Corrosión**

El inhibidor de corrosión es un aditivo de tipo amínico diseñado para proteger todos los materiales tubulares del

campo petrolífero. Ayuda a prevenir el ataque de corrosión general sobre la tubería de revestimiento, la tubería de producción y las herramienta de fondo que hacen contacto con salmueras claras.

Tabla 3.2. Principales químicos del Lodo de perforación del Pozo Bretaña Norte 95-2-1XD.

NOMBRE	FUNCION
Formiato de Sodio	Densificante
Sulfato de Bario	Densificante
Goma xantica	Viscosificante
Celulosa Polianiónicas	Control de Filtrado
Amina	Inhibidor de Arcillar
Carbonato de calcio	Material puenteante y Densificante
Soda Cáustica	Control de pH
Tanino	Dispersante
Complejo de Aluminio	Estabilizador de lutitas

El agua del proceso de Dewatering, debido a la alta carga de químicos, que en su mayoría son constituyente del lodo en uso, se puede reutilizar para diluir el sistema, en el caso que se requiera bajar el peso del lodo, o bien para preparar nuevo lodo. Este el llamado Sistema Cerrado. Cuando esta agua recuperada, no se requiere para el sistema de fluidos, se debe recibir en cisternas o tanques. Es en este punto donde comienza el proceso de Tratamiento del agua residual, para luego poder disponer de ellas ya sea vertiéndolas al medio ambiente o para locaciones remotas. Separación de Sólidos del lodo de perforación durante el proceso de Dewatering. El tratamiento de la fase líquida consiste básicamente en el control de solidos presentes en las mismas y adecuación de los parámetros finales.



Figura 3.11. Efluente proveniente del lodo de perforación después del Dewatering.



Figura 3.12. Sólidos, obtenidos luego del Dewatering.

Generalmente, los fluidos de perforación proporcionan el mayor volumen de los residuos, con otros colaboradores importantes son fluidos asociados con cortes perforados, lavado, la lluvia y las aguas residuales el agua de la plataforma y la ubicación circundante.



Figura 3.13. Muestra obtenida de Agua residual Industrial del Lodo de perforación de la sección 8 1/2, después del proceso de Dewatering.

La Preocupación radica sobre la calidad del agua que incluye sólidos y sales disueltas, turbidez alta, nutrientes (incluyendo el nitrógeno y fósforo), de carbono orgánico, bacterias, coliformes, metales, sodio, productos químicos tóxicos y oxígeno disuelto. Por consiguiente, el tratamiento de agua requerido dependerá de los contaminantes en el líquido a ser dado de alta, la ubicación y las regulaciones ambientales locales. Además de la deshidratación ya aplicado al fluido de perforación o Dewatering, los tratamientos de agua pueden incluir los siguientes [39]:

- La eliminación del resto de sólidos finos suspendidos.
- La eliminación de color, metales, metales pesados y materiales orgánicos.
- La eliminación de nutrientes tales como nitratos o fosfatos.
- Los organismos de eliminación, destrucción o inactivación de patógenos (causantes de enfermedades).
- Reducción total de sólidos disueltos (TDS). Esto puede medirse como la conductividad.

- La reducción de la demanda biológica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO).

Tratamiento de agua se puede definir como el pulido final y la prueba de líquido deshidratado, el agua de lluvia y el agua de lavado de equipo de perforación para asegurar que se cumplan las normas para la liberación al medio ambiente [42].

3.4.2. Características del Efluente

Las muestras de efluente fueron tomadas luego de realizar un proceso de Dewatering al lodo de perforación antes descrito correspondiente a la sección 8 ½ .Teniendo en cuenta que el objetivo es establecer el porcentaje de remoción del contenido de metales pesados como el aluminio y bario, sólidos suspendidos totales, turbidez, conductividad obtenida cuando el efluente se somete al proceso de electrocoagulación; las muestras se tomaron de forma puntual. Se propuso tomar un volumen de Efluente de 200 litros para todo el procedimiento experimental, ya que en el ensayo preliminar, se resolvió el volumen de muestra total al valor indicado, siendo esta cantidad suficiente para realizar los análisis propuestos. Las muestras de efluente fueron llevadas al Laboratorio de Físicoquímica - Laboratorio N°11 de Físicoquímica de la Universidad Nacional de Ingeniería; en 6 canecas 10 de galones cada una, las cuales se vaciaron en un tanque con una capacidad de 220 litros en el que se homogenizó el efluente, previo al tratamiento. Luego se procedió a tomar una muestra de 1,5 litros y fue dirigida al Laboratorio acreditado **CERTIMIN S.A** para su respectivo análisis como punto de partida para la caracterización del efluente. Ver tabla 3.3.

Tabla 3.3. Caracterización de Parámetros Fisiquímicos del Efluente inicial.

Parámetro	Unidades	Efluente
Conductividad	uS/cm	157250
pH	-	6,89
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	6984
Turbidez	NTU	394
Aluminio	mg/L	262,03
Boro	mg/L	0,525
Bario	mg/L	7,31
Calcio	mg/L	413,5
Cobre	mg/L	0,079
Hierro	mg/L	8,175
Potasio	mg/L	39,795
Litio	mg/L	0,176
Magnesio	mg/L	10,93
Manganeso	mg/L	0,609
Sodio	mg/L	36813
Níquel	mg/L	0,133
Sílice	mg/L	22,75
Estroncio	mg/L	1,627
Zinc	mg/L	0,9015



Figura 3.14. Efluente proveniente del proceso de deshidratación del lodo de perforación



Figura 3.15. Envases de transporte del efluente de la zona de perforación hacia el laboratorio.



Figura 3.16. Homogenización del Efluente total recolectado.

CAPITULO IV

IV.DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1. Metodología

4.1.1. Influencia de la densidad de corriente

En ambos procesos se analizó el efecto de la densidad de corriente empleando tres valores de corriente de 1,11; 2,22 y 3,33 A/dm². Los valores de intensidad de corriente fueron seleccionadas dentro del rango de capacidad de intensidad de corriente que la fuente de alimentación puede brindar (0 - 20 A) y (0 - 10 V) con esta primera restricción, se empezó a probar con valores pequeños de intensidad gradualmente, que permitiera cambios significativos en la velocidad de la reacción, esto se pudo verificar en la liberación de hidrogeno en el cátodo y la formación de flóculos en el ánodo, teniendo como valor inicial al de 5 A.

- **Sistema por Lotes**

Para analizar el efecto de la densidad de corriente en la remoción de los contaminantes objetivos en el sistema por lotes, se trabajó con tres valores de intensidad de corriente: 5, 10, 15 A para realizar tres pruebas cuyas densidades de corriente corresponde a 1,11; 2,22; 3,33 A/dm² además los intervalos de tiempo se tomaron con rango de 15 min. Los valores de intensidad están dentro del intervalo de la fuente de poder y los voltajes alcanzados se mantienen dentro del rango de trabajo de dicho equipo. Se tendrá 9 muestras finales luego del tratamiento para sistema por lotes que se llevaran al laboratorio Certimin S.A para sus análisis respectivos.

Luego de obtener los resultados de estas 9 muestras se procederá a repetir la que en valor se considere de mayor porcentaje de remoción para los valores de importancia como intensidad de corriente y tiempo, con el fin de corroborar la efectividad de los parámetros de operación.

Tabla 4.1. Valores de intensidad de corriente y tiempo para los experimentos para el sistema por lotes.

Intensidad de corriente (A)	5	10	15
Densidad de corriente (A/dm ²)	1,11	2,22	3,33
Tiempo (min)	15		
	30		
	45		

4.1.2. Influencia del Caudal

Para el sistema continuo inicialmente se utilizó 2 valores de flujo de 0,2 y 0,5 l/min para luego definir un tercer valor de 0,35 l/min posterior al estudio del efecto de la densidad de corriente. Para la elección de los caudales de trabajo en sistema continuo, se tuvo en cuenta mantener el nivel del líquido en reactor justo al nivel que cubriera los electrodos, este caudal máximo que permitía la válvula fue de 3 L/min, con este valor como restricción, se consideró el tiempo teniendo como guía lo propuesto por el sistema por lotes, el tiempo que resulto una mejor remoción fue para 10 min con lo se trató de conseguir dicho valor en sistema continuo con un volumen útil en el reactor de 4L. Para un caudal de 0,5 L/min se tiene el tiempo de residencia de 8 min.

- **Sistema Continuo**

Para el sistema continuo se trabaja con las mismas densidades de corriente consideradas en sistema por lotes con la finalidad de estudiar el efecto de la densidad de corriente, los caudales de elección son de 0,2 L/min y 0,5 L/min cada una se dará en las tres densidades de

corriente las cuales corresponde a la intensidad de corriente señalada en la tabla 4.2. Al terminar el tratamiento electroquímico se tendrá 18 muestra que serán llevadas al laboratorio CERTIMIN S.A. para su análisis.

Tabla 4.2. Valores de intensidad de corriente y tiempo para los experimentos del sistema continuo.

Caudal (L/min)		0,2			0,5		
Intensidad corriente (A)		5,8	11,5	17,3	5,8	11,5	17,3
Densidad corriente (A/dm²)		1,11	2,22	3,33	1,11	2,22	3,33
Tiempo (min)	10						
	20						
	30						

Luego de obtener los análisis se determinará cual es la densidad de corriente que da mejores porcentajes de remoción, a partir de esta selección se procederá a tomar como tercer valor de caudal uno intermedio de los propuesto en la tabla anterior el cual será de 0,35 L/min, con el que se realizara pruebas a la densidad de corriente elegidos.

Tabla 4.3. Valores de trabajo del tercer caudal para sistema continuo.

Caudal (L/min)		0,35		
Densidad de corriente (A/dm²)		Mejor % de remoción		
Tiempo (min)	10			
	20			
	30			

Los valores obtenidos luego de las experiencias con el tercer caudal permitirán conocer la influencia que tiene al variar el caudal.

4.2. Cálculos

- **Porcentaje de Remoción**

Con los resultados de la cuantificación de los parámetros a remover con el tratamiento electroquímico, se calculó el porcentaje de remoción haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$\text{-----} \quad (4.1)$$

- **Eficiencia de Corriente**

Referida a la disolución de los ánodos de aluminio. La eficiencia de corriente es igual al rendimiento eléctrico. La eficiencia de corriente total, correspondiente a la cantidad de aluminio total oxidado, se puede determinar mediante la siguiente expresión:

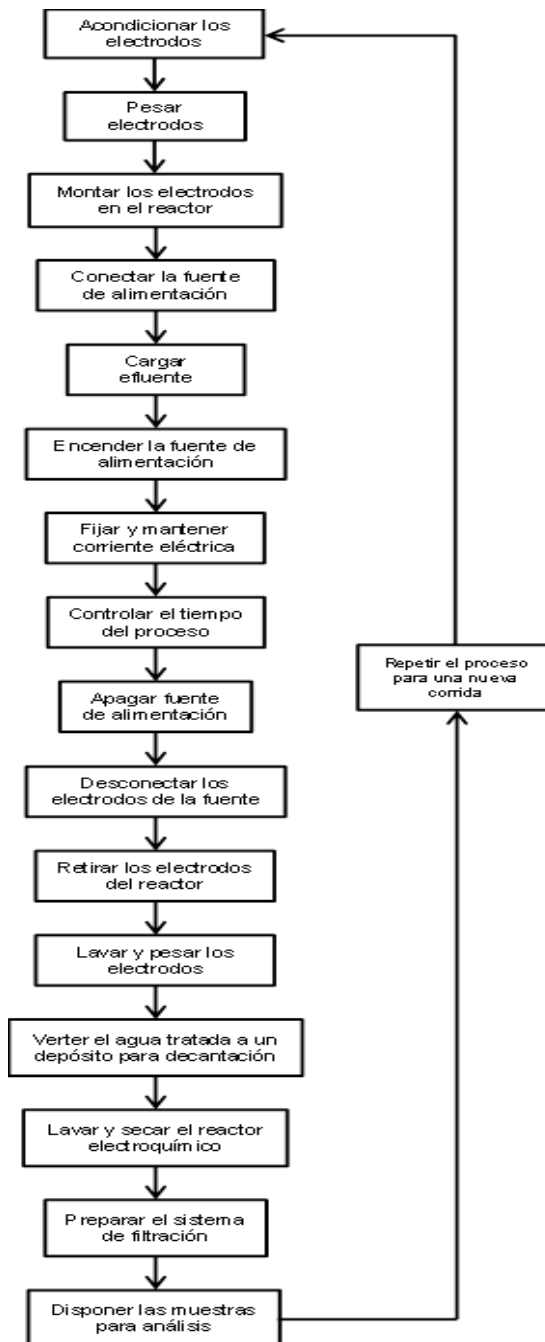
$$\text{-----} \quad (4.2)$$

Dónde:

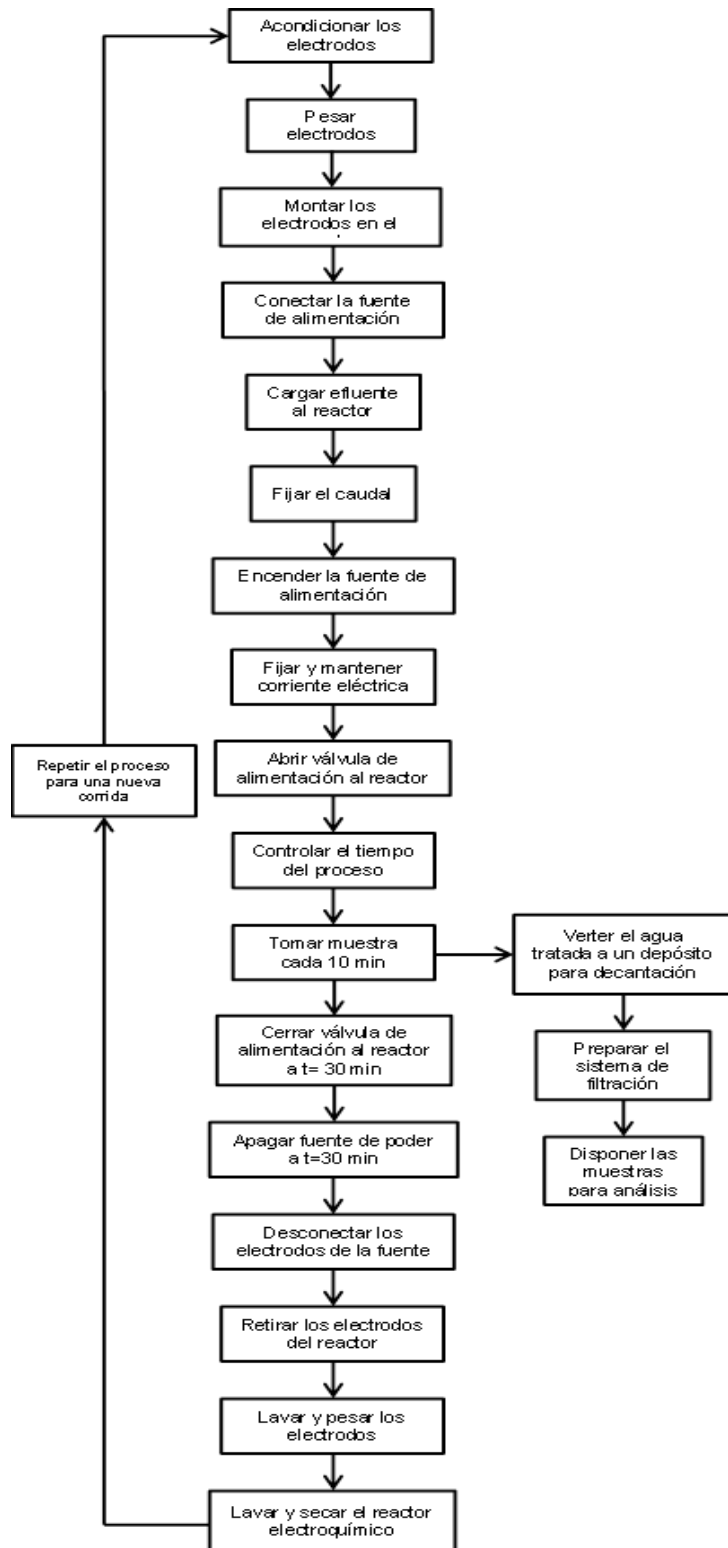
(*)

(*) Capítulo II, Ec. (2.12).

4.3. Diagrama de flujo del sistema por lotes



4.4. Diagrama de flujo del sistema continuo



4.5. Materiales experimentales

El estudio del presente trabajo, para ambos casos (Sistema por Lotes – Sistema Continuo), consta de las siguientes partes:

a. Reactor electroquímico y electrodos

El proceso de electrocoagulación, ya sea un sistema por lotes o un sistema continuo, necesita un reactor donde puedan suceder los diversos fenómenos fisicoquímicos, además se debe disponer de un sistema que permita la disposición de los electrodos. Para cada sistema electroquímico se empleó un reactor de acuerdo a las características experimentales. El material de los reactores fue acrílico transparente de 0,95 cm de espesor. Los electrodos utilizados, en ambos sistemas, son de aluminio industrial. El ánodo se conecta al polo positivo de la fuente de alimentación de corriente continua y el cátodo se conecta al polo negativo de la misma. Para ambas configuraciones, se utiliza una barra de cobre que sirve como contacto para los electrodos y, a la vez, como soporte para asegurar el paso continuo de la corriente, la estabilidad y la seguridad del proceso.

- **Sistema por lotes**

En el proceso por lotes o discontinuo, se utilizó el reactor que se muestra en la figura 4.1. Este reactor tiene 1,5 l de volumen útil, es de forma paralelepípeda, y está dividido en seis semi-celdas con una separación entre ranuras para los electrodos de 3,0 cm. En total se utilizaron 7 electrodos de aluminio: 3 ánodos y 4 cátodos. Las dimensiones de los electrodos son: 10,4 cm de ancho x 7,5 cm de alto x 2,0 mm de espesor. Los ánodos presentan una superficie de contacto global de 450.0 cm².



Figura 4.1. Reactor de electrocoagulación para el sistema por lotes. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

- **Sistema de continuo**

Se utilizó el reactor que se muestra en la figura 4.2. Este reactor tiene una capacidad de 4 L de volumen útil. La base del reactor tiene una inclinación de 10° esta sirve para la acumulación de los sólidos precipitados durante el proceso. Está dividido en 6 semi-celdas con una separación entre ranuras para los electrodos de 3,0 cm. La disposición de los electrodos permite el flujo del efluente de forma serpenteante entre celdas, ya que, entre el electrodo y la pared lateral del reactor existe una separación de 2 cm, véase la figura 4.2. En total se utilizaron 5 electrodos de aluminio: 2 ánodos y 3 cátodos. Los electrodos tienen como dimensiones: 10,2 cm de ancho x 13,0 cm de alto x 3,1 mm de espesor. En este caso, el ánodo presenta una superficie de contacto global de 520,0 cm².

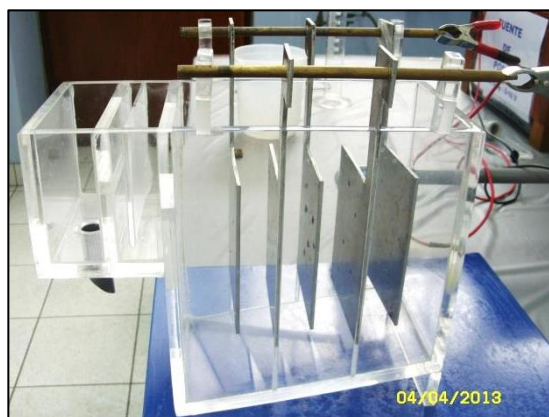


Figura 4.2. Reactor de electrocoagulación para el sistema continuo. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

b. Fuente de poder o alimentación

Fuente de alimentación de corriente continua de la UNI-FIQT, Laboratorio N° 11, cuya potencia es de 250 W, con rango de voltaje de 0-10 v y corriente de 0-20 A.



Figura 4.3. Fuente de poder o alimentación. Propiedad Laboratorio N° 11, UNI-FIQT.

c. Sistema de filtración

- **Bomba de vacío**

Bomba marca GAST, modelo DOA-P504-BN, con rango de voltaje 220-240, amperaje de 1,9-2.2 y 60 Hertz.



Figura 4.4. Bomba de vacío GAST, modelo DOA-P504-BN. Propiedad de Baker Hughes Operaciones Perú. UNI-FIQT. Laboratorio N° 11.

- **Embudo Buchner**

Pieza de cerámica con 12 cm de diámetro. Además para la filtración, se utilizó como medio filtrante papel filtro.



Figura 4.5. Sistema de filtración. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

d. Multímetro

Multímetro de marca Fluke, modelo 87 III True. Soporta un máximo de 5 KHz de ancho de banda (tensión/corriente) y 83 v. Este dispositivo se conecta en serie con la fuente de alimentación con el fin de conseguir una mejor precisión en la medida de la intensidad.

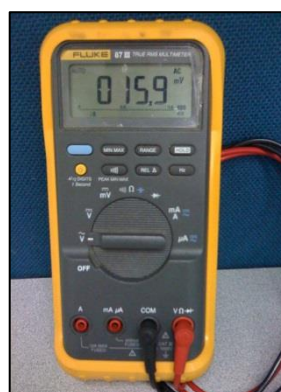


Figura 4.6. Multímetro digital portátil Fluke, modelo 87-III True. Propiedad Laboratorio N° 11, UNI-FIQT.

4.6. Procedimiento experimental

4.6.1. Sistema por lotes

1. Para empezar los procesos experimentales, se inicia con el lijado de las placas de aluminio empleando una de lija para metal. El lijado debe ser por ambas caras y unidireccionalmente. Luego del lijado, se lava los electrodos con agua destilada para retirar los residuos sólidos que permanecen en la superficie de las placas. Finalmente, se pesan los electrodos y se registra como peso inicial.



Figura 4.7. Lijado de electrodos de Aluminio para el proceso experimental por lotes. Laboratorio N° 11. UNI-FIQT

2. Una vez que se tienen los electrodos limpios y secos, se montan los electrodos de acuerdo a la numeración asignada a cada electrodo; esta numeración permite la diferenciación entre ánodos y cátodos. Después, para facilitar el paso de la corriente, se utiliza dos barras de cobre que se conecta a los extremos de los cátodos y ánodos, independientemente.

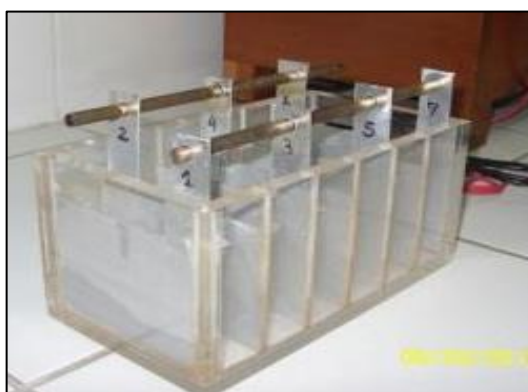


Figura 4.8. Reactor para el proceso de electrocoagulación por lotes con electrodos de Aluminio numerados. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

3. Realizar las conexiones a la fuente de poder, de acuerdo a la siguiente configuración: Polo positivo para la barra que conecta a los ánodos. Polo negativo a la barra que conecta a los cátodos.



Figura 4.9. Reactor para el proceso de electrocoagulación por lotes y conexiones hacia la fuente de poder. UNI-FIQT. Laboratorio N° 11.

4. Posterior al montaje de los electrodos y las conexiones con la fuente de alimentación, se realiza el llenado del reactor (1,5 L) con el efluente a tratar hasta lograr que se cubra toda la superficie de los electrodos.



Figura 4.10. Reactor para el proceso de electrocoagulación por lotes lleno con efluente listo para tratamiento. UNI-FIQT. Laboratorio N° 11.

5. Para el arranque del proceso, se coloca el control de mando en posición 1 (encendido), como se muestra en la figura 4.11.



Figura 4.11. Fuente de poder UNI-FIQT. Laboratorio N° 11. Posición 1 (Encendido).

6. Posteriormente, se fija la intensidad de corriente respectiva con el dial de la fuente. Durante el periodo inicial, aproximadamente, un minuto es necesario controlar el dial para mantener constante el paso de corriente hasta que el sistema se estabilice. Mientras dura la experiencia, observar el proceso electroquímico para intervenir en el caso de retirar el exceso de flóculos que se acumulan en la superficie, adicionalmente anotar las observaciones.

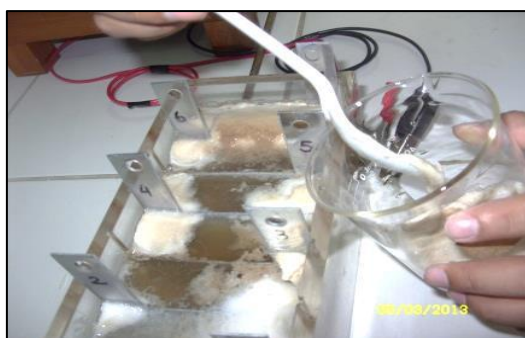
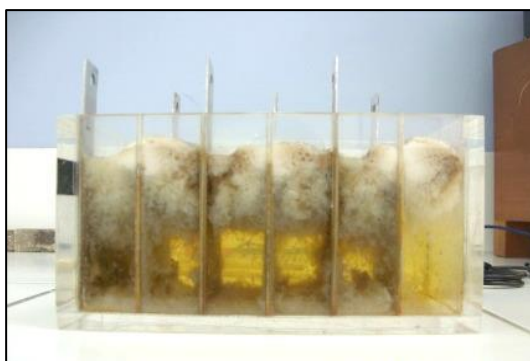


Figura 4.12. Retiro de los flóculos del reactor del proceso de electrocoagulación después del experimento 5 en el sistema por lotes. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

7. Al concluir el tiempo fijado para cada ensayo experimental determinado, disminuir la corriente a cero. Inmediatamente, se apaga la fuente de alimentación y, a continuación, se desconecta las conexiones entre la fuente y los electrodos.



(a)



(b)

Figura 4.13. (a) Conclusión de la prueba experimental 5. Reactor de electrocoagulación sin conexiones a la fuente de poder. (b) Retiro de los electrodos de Aluminio al finalizar el proceso experimental 5. UNI-FIQT. Laboratorio N° 11.

8. Separar la barra de cobre que se conecta con los electrodos para después retirar los electrodos del reactor. Tener cuidado al retirar los electrodos evitando que se dividan los flóculos formados.

9. Lavar, secar y pesar los electrodos para registrar el peso final.

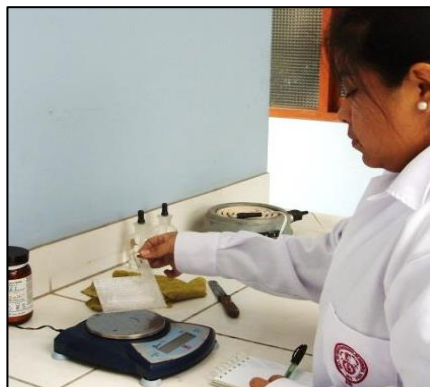


Figura 4.14. Pesado de los electrodos de Aluminio al finalizar el proceso de electrocoagulación por lotes. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

10. El agua procesada se vierte a un depósito para la decantación de los flocúlos formados por la electrocoagulación. Se establece como tiempo de decantación 5 minutos.

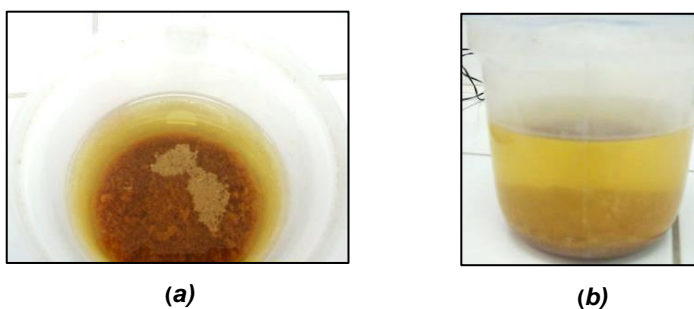


Figura 4.15. Decantación del efluente tratado después del proceso electroquímico experimental 5. (a) Vista superior. (b) Vista lateral. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

11. Lavar y secar del reactor electroquímico para el siguiente proceso experimental.



Figura 4.16. Lavado del reactor de electrocoagulación para procesos por lotes. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

12. Después de la decantación, se prepara el sistema de filtración. Este sistema consiste en: Kitazato, embudo Buchner y bomba de vacío. Se filtra con el objetivo de separar los flóculos que se hayan podido quedar en el agua tratada.



(a)

(b)

Figura 4.17. Filtrado del efluente tratado después del proceso de electrocoagulación. (a) Vista superior: Embudo Buchner. (b) Vista lateral: Embudo y Kitazato. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

13. Finalmente, disponer y acondicionar el agua procesada para el envío de estas al laboratorio.



Figura 4.18. Muestras líquidas del proceso por lotes del experimento 5 rotuladas y envasadas para enviar al laboratorio. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

14. Para un nuevo proceso experimental iniciar el procedimiento indicado.

4.6.2. Sistema por flujo continuo

1. Para empezar el proceso experimental del sistema continuo, se inicia con el lijado de las placas de aluminio empleando una lija para metal. El lijado debe ser por ambas caras y en una sola dirección. Luego del lijado, se lava los electrodos con agua destilada para retirar los residuos sólidos que permanecen en la superficie de las placas. Finalmente, se pesan los electrodos y se registra como peso inicial.

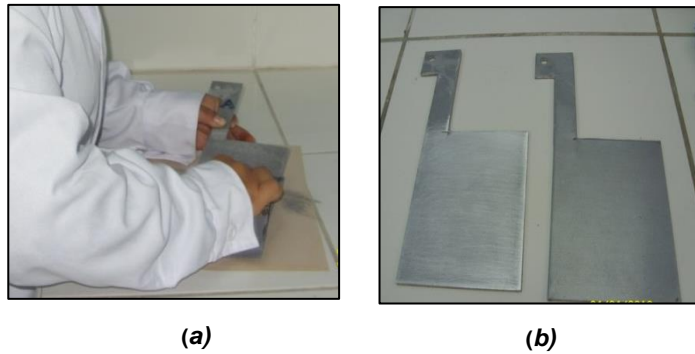


Figura 4.19. (a) Lijado de los electrodos de Aluminio para el proceso continuo experimental. (b) Electrodos de Aluminio para el sistema de flujo continuo. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

2. Una vez que se tienen los electrodos limpios y secos, se montan los electrodos de acuerdo a la numeración asignada a cada electrodo; esta numeración permite la diferenciación entre ánodos y cátodos. Después, para facilitar el paso de la corriente eléctrica, se utiliza dos barras de cobre que se conecta a los extremos de los cátodos y ánodos, independientemente.

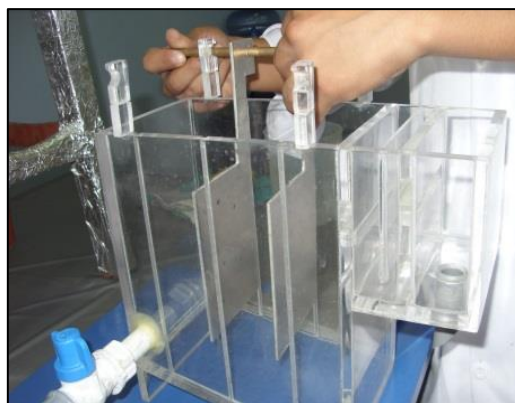


Figura 4.20. Montaje de los ánodos de Aluminio con la varilla de cobre en el reactor de electrocoagulación para el arreglo en flujo continuo. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.



Figura 4.21. Montaje de los cátodos de Aluminio con la varilla de cobre en el reactor de electrocoagulación para el arreglo en flujo continuo. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

3. Realizar las conexiones a la fuente de poder, de acuerdo a la siguiente configuración: Polo positivo para la barra que conecta a los ánodos. Y, el polo negativo a la barra que conecta a los cátodos.

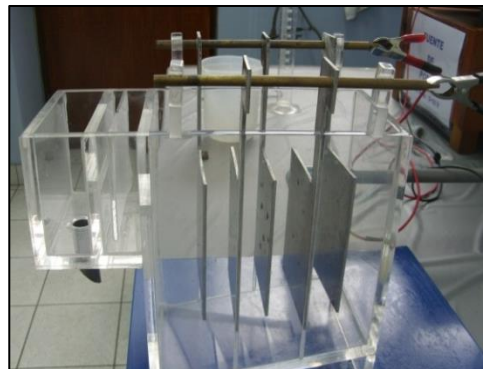


Figura 4.22. Conexión de los electrodos de Aluminio con la fuente de poder. Sistema de electrocoagulación de flujo continuo. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

4. Abrir la válvula de salida del tanque de almacenamiento hasta lograr sumergir la superficie reactiva de los electrodos de Aluminio.



Figura 4.23. Apertura de la válvula de salida del tanque de almacenamiento del efluente. Sistema de electrocoagulación de flujo continuo. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

5. Con la válvula de ingreso al reactor se fija el flujo del efluente procesado para la corrida respectiva. El flujo del efluente procesado se verifica con la ayuda de una probeta graduada y un cronómetro. Luego, cerrar la válvula de salida del tanque de almacenamiento sin mover la válvula de ingreso al reactor.



Figura 4.24. Apertura de la válvula de ingreso al reactor de electroquímico para el llenado del reactor. Sistema de electrocoagulación de flujo continuo. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.



Figura 4.25. Determinación del flujo para el proceso experimental. Sistema de electrocoagulación de flujo continuo. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

6. Para iniciar el proceso de electrocoagulación, se coloca el control de mando de la fuente de alimentación en la posición 1 (encendido).



Figura 4.26. Encendido de la fuente de poder, posición 1. Sistema de electrocoagulación de flujo continuo. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

7. Posteriormente, se fija la intensidad de corriente con el dial de la fuente. Durante el periodo inicial, aproximadamente un minuto, es necesario controlar el dial para mantener constante el paso de corriente hasta que el proceso se estabilice. Inmediatamente, se abre la válvula de salida del tanque de almacenamiento. Observar el proceso electroquímico para intervenir y retirar el exceso de flóculos que se acumulan en la superficie. Anotar las observaciones del proceso.

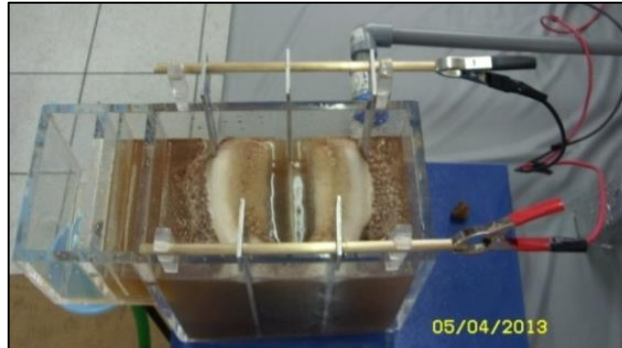


Figura 4.27. Proceso de electrocoagulación de flujo continuo. Ensayo experimental a las condiciones de caudal= 0.2 L/min y densidad de corriente= 2.22 A/dm². UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

8. Para los análisis de laboratorio, tomar muestra de efluente tratado a los 10, 20 y 30 minutos de iniciado el proceso, para cada corrida electroquímica. Al terminar el último muestreo de la corrida, disminuir la corriente a cero, para apagar la fuente de poder. Después, desconectar las conexiones entre la fuente y los electrodos.



Figura 4.28. Toma de muestra (10 min) de efluente tratado. Ensayo experimental a las condiciones de caudal= 0.2 L/min y densidad de corriente= 2.22 A/dm². UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

9. Verter el agua tratada a un depósito para la sedimentación de los sólidos formados por el proceso de electrocoagulación, luego filtrar y disponer para su análisis.
10. Retirar la barra de cobre, después desmontar los electrodos sacándolos del reactor con el cuidado de no romper los coágulos formados durante el tratamiento.

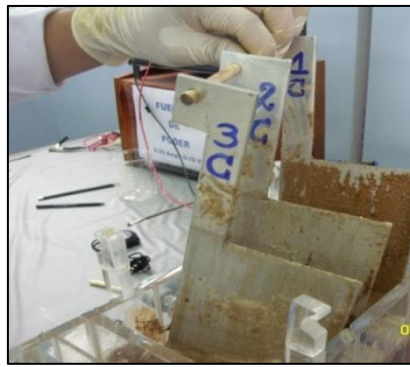


Figura 4.29. Desmontaje de los electrodos de aluminio al finalizar el proceso experimental a las condiciones de caudal= 0.2 L/min y densidad de corriente= 2.22 A/dm². UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

11. Lavar y pesar los electrodos. El peso de los electrodos se registra como peso final.



Figura 4.30. Pesado de los electrodos de Aluminio al finalizar el proceso de electrocoagulación en flujo continuo. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

12. Lavar y secar el reactor del sistema de electrocoagulación para el siguiente ensayo experimental.



Figura 4.31. Lavado del reactor de electrocoagulación para procesos a flujo continuo. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

13. Preparar el sistema de filtración; luego proceder a filtrar el efluente tratado para separar los coágulos formados durante el proceso.



Figura 4.32. Filtrado del efluente tratado después del proceso de electrocoagulación. Sistema de flujo continuo. Vista lateral: Embudo y Kitasato. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

14. Finalmente, disponer y acondicionar las muestras para el envío al laboratorio.



Figura 4.33. Muestras líquidas del proceso continuo experimental envasadas para enviar al laboratorio. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

15. Para un nuevo proceso experimental repetir el procedimiento.

4.7. Observaciones del desarrollo experimental

1. El efluente procedente del fluido de perforación descrito anteriormente, es de color marrón oscuro, se pudo apreciar partículas suspendidas y sedimentos en su composición.



Figura 4.34. Agua residual procedente del lodo de perforación del pozo petrolero Bretaña Norte 95-2-1XD. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

2. El estado final de los electrodos después del proceso depende si es ánodo o cátodo. El ánodo debido a la disolución electroquímica a causa del paso de la corriente disminuye su masa; además se puede observar un desgaste de los ánodos en forma de picadura producto de las condiciones de pH en la cercanía del ánodo. Por el contrario, el cátodo presenta un leve aumento de peso debido a la reducción de los metales en su superficie.

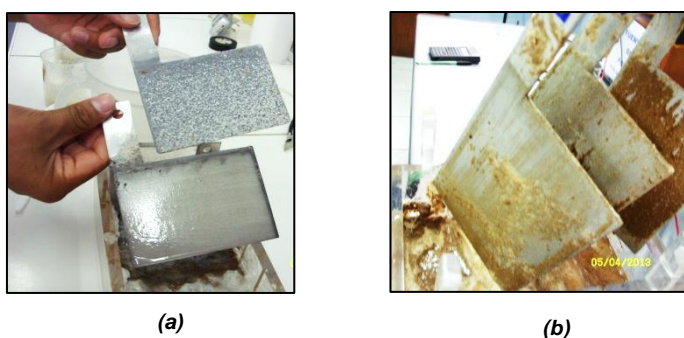


Figura 4.35. (a) Ánodo y cátodo después del proceso de electrocoagulación, sistema por lotes. (b) Ánodo y cátodo después del proceso de electrocoagulación, sistema de flujo continuo. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

3. Después del tratamiento de electrocoagulación, se puede apreciar una mejor calidad visual del efluente. Por ejemplo, una característica destacada que cambia favorablemente es el cambio del color de marrón oscuro a un amarillo claro transparente, sin la presencia de sólidos.



Figura 4.36. Diferenciación de color del efluente y efluente tratado. Derecha: efluente después del proceso electroquímico. Izquierda: Efluente procedente del lodo de perforación sin tratamiento. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

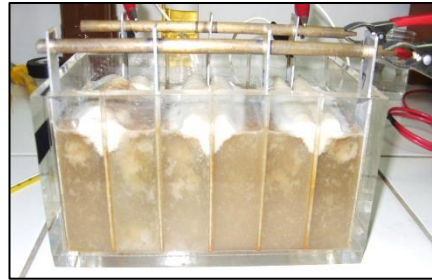
4. Para tiempos de proceso mayores de 30 minutos el efluente tratado tiene aumentos de temperatura. Para el proceso por lotes (eficiente) se registró como temperatura inicial 28 °C y después del tratamiento tuvo un aumento de 9°C.



Figura 4.37. Registro de la temperatura del efluente luego del proceso electroquímico. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

5. Al inicio de las pruebas experimental para cada proceso, presentó dos dificultades bien definidas. La primera, la elevación del voltaje que luego va descendiendo mientras el proceso prosigue. La segunda, en referencia a la anterior, el voltaje inicial impide que no se alcance de forma inmediata el valor de la corriente que corresponde a una determinada experiencia. Finalmente, después de un tiempo menor a 2 minutos el sistema se estabiliza y se puede mantener las condiciones normales del proceso.
6. Durante el proceso de electrocoagulación se observó la formación de coágulos de consistencia suave, estable y ligeramente agregada. Por lo general fue de color marrón claro, pero a la densidad de corriente de 3.33 A/dm² fue de color blanquecino. La cantidad obtenida varia, de acuerdo a la densidad de corriente aplicada y al tiempo del proceso, estos coágulos se evidenció claramente pasado los 12 minutos de iniciado el proceso y prosiguió hasta que finalice. Gracias a la generación de oxígeno en el ánodo y de hidrogeno en el cátodo, estos coágulos pudieron

elevarse a la superficie, siendo de gran ayuda para el proceso debido a que generó un pseudo-flujo en las celdas permitiendo una homogenización del efluente e interacción con los electrodos.



(a)



(b)

Figura 4.38. Formación de coágulos y flóculos durante el proceso experimental. (a) Sistema por lotes; experimento 5. (b) Sistema de flujo continuo; experimento 2. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

7. En el sistema continuo el diseño del reactor y la posición de los electrodos de forma intercalada ayudó a mejorar la distribución del fluido en el reactor para su mejor contacto con los electrodos. El paso del fluido en el reactor se comprobó dejando fluir agua teñida de color azul para observar su recorrido y distribución como muestra la figura 4.39. El recorrido que realiza el agua coloreada es sinuoso hasta llegar al separador de grasas y sólidos además hace un recorrido de abajo hacia arriba. Con lo queda seguro una buen reparto del efluente sobre las áreas anódicas de igual forma su la limpieza, evitando acumulación, con lo cual puede aumentar la resistencia.

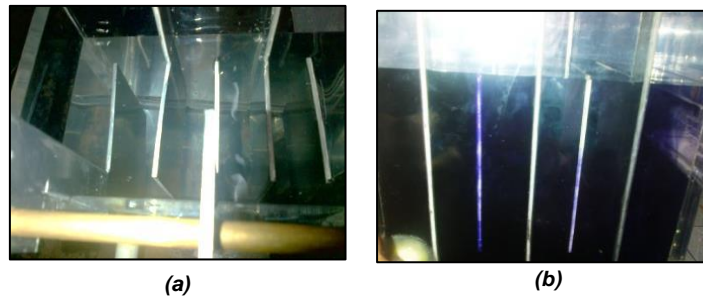


Figura 4.39. Hidrodinámica del fluido en el reactor para el sistema de flujo continuo. (a) Vista superior del reactor con agua limpia. (b) Vista lateral del comportamiento del flujo en el reactor. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

8. Fue necesario fijar los electrodos con cinta aislante para evitar algún movimiento cuando fluyó el efluente como muestra la figura.4.40. A cambios de intensidad de corriente observados en la fuente de poder se procedía a repetir la prueba, de igual manera se corroboró el flujo de trabajo en cada momento, manipulando la válvula con cuidado.

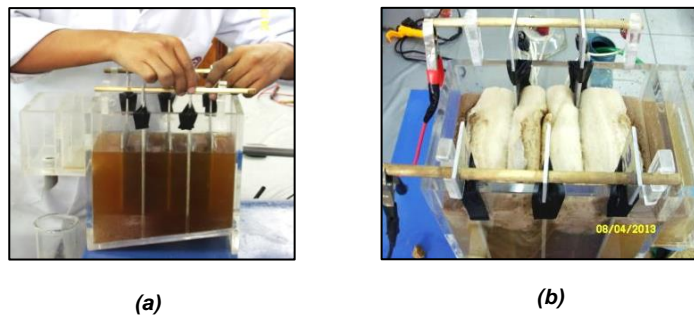


Figura 4.40. (a) Aseguramiento de los electrodos con cinta adhesiva para el sistema de flujo continuo. (b) Proceso de electrocoagulación del sistema de flujo continuo. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

9. El separador de sólidos al final del reactor, como parte del diseño, ayudó a mejorar la separación de flóculos al tomar la muestra como se observa en la figura 4.41. Gracias al separador, la muestra no contenía muchos flóculos; por lo que, se hizo más rápida la filtración. Luego de la filtración, los sólidos obtenidos no fueron abundantes en comparación con los sólidos obtenidos en el sistema por lotes como se muestra en la figura 4.42.



Figura 4.41. Separación de flóculos formados en el separador de sólidos del reactor de electrocoagulación del sistema de flujo continuo durante el tratamiento. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.



(a)



(b)

Figura 4.42. Flóculos obtenidos durante el proceso de electrocoagulación. (a) Sistema por lotes. (b) Sistema de flujo continuo. UNI-FIQT, Laboratorio N° 11.

Tabla 4.3. Resultados de análisis obtenidos después del tratamiento electroquímico para el efluente de estudio Sistema por Lotes. Ver Anexo Nro. 5.

A.	Densidad de corriente	A/dcm ²	1,11			2,22			3,33		
B.	Tiempo	min	15	30	45	15	30	45	15	30	45
N°	Parámetro	Unidades	EXPERIMENTO 1			EXPERIMENTO 2			EXPERIMENTO 3		
1	Conductividad	uS/cm	66600	65800	65200	65200	64300	63200	64200	63200	63200
2	pH	-	7,68	8,3	8,48	7,52	8,86	8,23	7,75	8,86	8,25
3	Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	160	128	95	137	75	86	105	91	111
4	Turbidez	NTU	66	53	45	58	26	32	48	34	39
5	Aluminio	mg/L	46,85	44,32	43,07	38,84	31,8	47,31	79,58	63,35	207
6	Boro	mg/L	0,341	0,306	0,295	0,352	0,323	0,304	0,305	0,293	0,213
7	Bario	mg/L	0,145	0,08	0,066	0,085	0,043	0,03	0,054	0,033	0,024
8	Calcio	mg/L	210	163	144	152	115	69,42	113	43,12	29,34
9	Cobre	mg/L	0,042	0,039	0,027	0,037	0,026	0,017	0,024	0,016	0,015
10	Hierro	mg/L	0,25	0,1	0,09	0,12	0,06	0,05	0,11	0,04	0,03
11	Potasio	mg/L	19,85	19,31	19,05	20,3	20,07	19,55	20,07	18,26	18,17
12	Litio	mg/L	0,104	0,084	0,061	0,052	0,046	0,028	0,035	0,022	0,015
13	Magnesio	mg/L	5,92	2,23	0,91	2,91	1,24	0,75	1,46	0,48	0,32
14	Manganeso	mg/L	0,183	0,066	0,082	0,169	0,06	0,043	0,142	0,055	0,05
15	Sodio	mg/L	17150	16682	16557	16751	16570	16453	16658	16430	16370
16	Níquel	mg/L	0,072	0,039	0,02	0,052	0,022	0,019	0,035	0,019	0,015
17	Sílice	mg/L	2,47	1,07	0,83	1,76	0,59	0,46	1,2	0,85	0,47
18	Estroncio	mg/L	1,0824	0,943	0,9321	1,0025	0,8112	0,4174	0,7682	0,1661	0,1347
19	Zinc	mg/L	0,123	0,089	0,072	0,111	0,065	0,056	0,097	0,058	0,054

Tabla 4.4. Porcentajes de remoción obtenidos luego del tratamiento electroquímico para el efluente de estudio - Sistema por Lotes.

Densidad de corriente	A/dcm ²	1,11			2,22			3,33		
		15	30	45	15	30	45	15	30	45
Tiempo	min	EXPERIMENTO 1			EXPERIMENTO 2			EXPERIMENTO 3		
N°	Parámetro	EXPERIMENTO 1			EXPERIMENTO 2			EXPERIMENTO 3		
1	Conductividad	57,65%	58,16%	58,54%	58,54%	59,11%	59,81%	59,17%	59,81%	59,81%
2	Sólidos Suspendidos Totales	97,71%	98,17%	98,64%	98,04%	98,93%	98,77%	98,50%	98,70%	98,41%
3	Turbidez	83,25%	86,55%	88,58%	85,28%	93,40%	91,88%	87,82%	91,37%	90,10%
4	Aluminio	82,12%	83,09%	83,56%	85,18%	87,86%	81,94%	69,63%	75,82%	21,00%
5	Boro	35,05%	41,71%	43,81%	32,95%	38,48%	42,10%	41,90%	44,19%	59,43%
6	Bario	98,02%	98,91%	99,10%	98,84%	99,41%	99,59%	99,26%	99,55%	99,67%
7	Calcio	49,21%	60,58%	65,18%	63,24%	72,19%	83,21%	72,67%	89,57%	92,90%
8	Cobre	46,84%	50,63%	65,82%	53,16%	67,09%	78,48%	69,62%	79,75%	81,01%
9	Hierro	96,94%	98,78%	98,90%	98,53%	99,27%	99,39%	98,65%	99,51%	99,63%
10	Potasio	50,12%	51,48%	52,13%	48,99%	49,57%	50,87%	49,57%	54,11%	54,34%
11	Litio	40,91%	52,27%	65,34%	70,45%	73,86%	84,09%	80,11%	87,50%	91,48%
12	Magnesio	45,84%	79,60%	91,67%	73,38%	88,66%	93,14%	86,64%	95,61%	97,07%
13	Manganeso	69,95%	89,16%	86,54%	72,25%	90,15%	92,94%	76,68%	90,97%	91,79%
14	Sodio	53,41%	54,68%	55,02%	54,50%	54,99%	55,31%	54,75%	55,37%	55,53%
15	Níquel	45,86%	70,68%	84,96%	60,90%	83,46%	85,71%	73,68%	85,71%	88,72%
16	Sílice	89,14%	95,30%	96,35%	92,26%	97,41%	97,98%	94,73%	96,26%	97,93%
17	Estroncio	33,47%	42,04%	42,71%	38,38%	50,14%	74,35%	52,78%	89,79%	91,72%
18	Zinc	86,36%	90,13%	92,01%	87,69%	92,79%	93,79%	89,24%	93,57%	94,01%

Tabla 4.5. Resultados de análisis obtenidos después del tratamiento electroquímico para el efluente de estudio – Sistema Continuo. Ver Anexo Nro. 5.

A.	Caudal	L/min	0,5								
B.	Densidad de Corriente	A/dcm ²	1,11			2,22			3,33		
C.	Tiempo	min	10	20	30	10	20	30	10	20	30
N°	Parámetro	Unidades	EXPERIMENTO 1								
1	Conductividad	uS/cm	63270	61987	61186	62289	61199	60600	62003	61025	60489
2	pH	-	7,57	8	8,06	7,75	8,13	8,22	8,35	8,23	8,08
3	Solidos Suspendidos Totales	mg/L	1260	930	840	1100	778	702	860	700	640
4	Turbidez	NTU	239	209	199	217	188	185	197	183	180
5	Aluminio	mg/L	144	120	98,38	111	88,99	78,15	101	83,32	77,76
6	Boro	mg/L	0,381	0,354	0,34	0,379	0,35	0,336	0,351	0,335	0,328
7	Bario	mg/L	0,16	0,135	0,119	0,145	0,109	0,095	0,12	0,096	0,093
8	Calcio	mg/L	261	238	232	249	233	227	237	230	224
9	Cobre	mg/L	0,067	0,054	0,051	0,057	0,04	0,035	0,042	0,021	0,019
10	Hierro	mg/L	0,9	0,62	0,53	0,72	0,43	0,41	0,55	0,28	0,28
11	Potasio	mg/L	27,76	26,49	25,77	25,82	21,05	20,52	23,43	20,72	19,11
12	Litio	mg/L	0,149	0,142	0,14	0,146	0,136	0,134	0,139	0,127	0,124
13	Magnesio	mg/L	6,37	6,14	6,03	6,89	5,76	5,74	5,49	5,14	4,97
14	Manganeso	mg/L	0,393	0,345	0,284	0,364	0,292	0,267	0,274	0,24	0,216
15	Sodio	mg/L	14520	14188	14114	13555	13379	13278	13183	12889	12823
16	Níquel	mg/L	0,028	0,025	0,022	0,023	0,021	0,019	0,021	0,018	0,017
17	Sílice	mg/L	15,12	12,98	9,83	14,12	9,18	8,91	9,39	5,34	5,39
18	Estroncio	mg/L	1,2055	1,1914	1,1699	1,1866	1,1346	1,1277	1,1157	1,0586	1,0501
19	Zinc	mg/L	0,223	0,196	0,159	0,202	0,15	0,142	0,15	0,112	0,094

Tabla 4.6. Resultados de análisis obtenidos después del tratamiento electroquímico para el efluente de estudio –Sistema Continuo. Ver Anexo Nro. 5.

A.	Caudal	L/min	0,2								
B.	Densidad de Corriente	A/dcm²	1,11			2,22			3,33		
C.	Tiempo	min	10	20	30	10	20	30	10	20	30
N°	Parámetro	Unidades	EXPERIMENTO 2								
1	Conductividad	uS/cm	61370	60570	60198	61000	60059	59400	60770	60000	59300
2	pH		7,83	8,33	8,49	8,29	8,37	8,44	8,35	8,6	8,28
3	Solidos Suspendidos Totales	mg/L	698	405	350	620	183	43	382	120	19
4	Turbidez	NTU	78	63	57	68	39	32	58	29	25
5	Aluminio	mg/L	58	38	35,57	63	32,21	18,48	27,69	21,06	16,1
6	Boro	mg/L	0,378	0,342	0,34	0,348	0,322	0,318	0,303	0,223	0,204
7	Bario	mg/L	0,152	0,133	0,121	0,107	0,061	0,043	0,083	0,056	0,041
8	Calcio	mg/L	244	235	236	189	155	144	175	125	116
9	Cobre	mg/L	0,033	0,023	0,02	0,023	0,013	0,008	0,016	0,008	0,004
10	Hierro	mg/L	0,99	0,68	0,46	0,39	0,12	0,01	0,05	0,01	0,01
11	Potasio	mg/L	21,54	19,86	19,32	19,23	15,52	13,43	15,15	12,89	11,17
12	Litio	mg/L	0,147	0,131	0,126	0,124	0,114	0,111	0,115	0,092	0,089
13	Magnesio	mg/L	6,94	6,22	6,16	5,79	4,84	4,68	4,57	3,4	2,9
14	Manganeso	mg/L	0,16	0,134	0,133	0,146	0,095	0,091	0,122	0,071	0,067
15	Sodio	mg/L	13299	13149	13130	13175	12997	12935	13046	12933	12904
16	Níquel	mg/L	0,028	0,02	0,018	0,018	0,015	0,0146	0,0147	0,0129	0,0126
17	Sílice	mg/L	9,45	3,76	3,24	7,21	1,56	0,49	6,16	0,66	0,28
18	Estroncio	mg/L	1,195	1,1274	1,0807	1,044	0,9014	0,9001	0,901	0,8368	0,8136
19	Zinc	mg/L	0,21	0,167	0,153	0,099	0,028	0,021	0,036	0,02	0,014

Tabla 4.7. Porcentajes de remoción obtenidos luego del tratamiento electroquímico para el efluente de estudio - Sistema Continuo.

Caudal	L/min	0,5								
Densidad de corriente	A/dcm²	1,11			2,22			3,33		
Tiempo	min	10	20	30	10	20	30	10	20	30
N°	Parámetro	EXPERIMENTO 1			EXPERIMENTO 2			EXPERIMENTO 3		
1	Conductividad	59,76%	60,58%	61,09%	60,39%	61,08%	61,46%	60,57%	61,19%	61,53%
2	Solidos Suspendidos Totales	81,96%	86,68%	87,97%	84,25%	88,86%	89,95%	87,69%	89,98%	90,84%
3	Turbidez	39,34%	46,95%	49,49%	44,92%	52,28%	53,05%	50,00%	53,55%	54,31%
4	Aluminio	45,04%	54,20%	62,45%	57,64%	66,04%	70,18%	61,45%	68,20%	70,32%
5	Boro	27,43%	32,57%	35,24%	27,81%	33,33%	36,00%	33,14%	36,19%	37,52%
6	Bario	97,81%	98,15%	98,37%	98,02%	98,51%	98,70%	98,36%	98,69%	98,73%
7	Calcio	36,88%	42,44%	43,89%	39,78%	43,65%	45,10%	42,68%	44,38%	45,83%
8	Cobre	15,19%	31,65%	35,44%	27,85%	49,37%	55,70%	46,84%	73,42%	75,95%
9	Hierro	88,99%	92,42%	93,52%	91,19%	94,74%	94,98%	93,27%	96,57%	96,57%
10	Potasio	30,24%	33,43%	35,24%	35,12%	47,10%	48,44%	41,12%	47,93%	51,98%
11	Litio	15,34%	19,32%	20,45%	17,05%	22,73%	23,86%	21,02%	27,84%	29,55%
12	Magnesio	41,72%	43,82%	44,83%	36,96%	47,30%	47,48%	49,77%	52,97%	54,53%
13	Manganeso	35,47%	43,35%	53,37%	40,23%	52,05%	56,16%	55,01%	60,59%	64,53%
14	Sodio	60,56%	61,46%	61,66%	63,18%	63,66%	63,93%	64,19%	64,99%	65,17%
15	Níquel	78,95%	81,20%	83,46%	82,71%	84,21%	85,71%	84,21%	86,47%	87,22%
16	Sílice	33,54%	42,95%	56,79%	37,93%	59,65%	60,84%	58,73%	76,53%	76,31%
17	Estroncio	25,91%	26,77%	28,09%	27,07%	30,26%	30,69%	31,43%	34,94%	35,46%
18	Zinc	75,26%	78,26%	82,36%	77,59%	83,36%	84,25%	83,36%	87,58%	89,57%

Tabla 4.8. Porcentaje de remoción obtenidos luego del tratamiento electroquímico para el efluente de estudio - Sistema Continuo.

Caudal	L/min	0,2								
Densidad de corriente	A/dcm²	1,11			2,22			3,33		
Tiempo	min	10	20	30	10	20	30	10	20	30
N°	Parámetro	EXPERIMENTO 4			EXPERIMENTO 5			EXPERIMENTO 6		
1	Conductividad	60,97%	61,48%	61,72%	61,21%	61,81%	62,23%	61,35%	61,84%	62,29%
3	Solidos Suspendidos Totales	90,01%	94,20%	94,99%	91,12%	97,38%	99,38%	94,53%	98,28%	99,73%
4	Turbidez	80,20%	84,01%	85,53%	82,74%	90,10%	91,88%	85,28%	92,64%	93,65%
5	Aluminio	77,87%	85,50%	86,43%	75,96%	87,71%	92,95%	89,43%	91,96%	93,86%
6	Boro	28,00%	34,86%	35,24%	33,71%	38,67%	39,43%	42,29%	57,52%	61,14%
7	Bario	97,92%	98,18%	98,34%	98,54%	99,17%	99,41%	98,86%	99,23%	99,44%
8	Calcio	40,99%	43,17%	42,93%	54,29%	62,52%	65,18%	57,68%	69,77%	71,95%
9	Cobre	58,23%	70,89%	74,68%	70,89%	83,54%	89,87%	79,75%	89,87%	94,94%
10	Hierro	87,89%	91,68%	94,37%	95,23%	98,53%	99,88%	99,39%	99,88%	99,88%
11	Potasio	45,87%	50,09%	51,45%	51,68%	61,00%	66,25%	61,93%	67,61%	71,93%
12	Litio	16,48%	25,57%	28,41%	29,55%	35,23%	36,93%	34,66%	47,73%	49,43%
13	Magnesio	36,51%	43,09%	43,64%	47,03%	55,72%	57,18%	58,19%	68,89%	73,47%
14	Manganeso	73,73%	78,00%	78,16%	76,03%	84,40%	85,06%	79,97%	88,34%	89,00%
15	Sodio	63,87%	64,28%	64,33%	64,21%	64,69%	64,86%	64,56%	64,87%	64,95%
16	Níquel	78,95%	84,96%	86,47%	86,47%	88,72%	89,02%	88,95%	90,30%	90,53%
17	Sílice	58,46%	83,47%	85,76%	68,31%	93,14%	97,85%	72,92%	97,10%	98,77%
18	Estroncio	26,55%	30,71%	33,58%	35,83%	44,60%	44,68%	44,62%	48,57%	49,99%
19	Zinc	76,71%	81,48%	83,03%	89,02%	96,89%	97,67%	96,01%	97,78%	98,45%

Tabla 4.9. Voltajes medidos para el proceso por lotes.

A/dcm²	1,11	2,22	3,33
Tiempo - min	Voltaje	Voltaje	Voltaje
0	3,20	4,13	6,00
2	2,91	3,83	5,49
4	2,68	3,54	4,56
6	2,53	3,33	4,00
8	2,51	3,20	3,79
10	2,49	3,19	3,82
12	2,52	3,21	3,80
14	2,50	3,22	3,81
16	2,48	3,20	3,79
18	2,49	3,21	3,81
20	2,47	3,19	3,78
Promedio	2,62	3,39	4,24

Tabla 4.10. Voltajes medidos para el proceso continuo;

Caudal = 0,35 L/min; $i = 2,22 \text{ A/dm}^2$

Q - L/min	0,35
A/dcm²	2,22
Tiempo - min	Voltaje
0	6,66
2	6,38
4	5,29
6	4,13
8	3,9
10	3,54
15	3,66
20	3,35
22	3,49
24	3,44
26	3,39
28	3,37
30	3,38

Tabla 4.11. Variación de masa de los electrodos después del proceso experimental del sistema por lotes. Condiciones del proceso experimental: $i = 2,22 \text{ A/dm}^2$; $t = 30$ minutos; $v = 3,2$ voltios.

Tipo electrodo	Número electrodo	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Δ Masa (g)
cátodo	1	30,71	30,69	0,02
ánodo	2	34,59	33,84	0,75
cátodo	3	26,49	26,45	0,04
ánodo	4	33,27	32,54	0,73
cátodo	5	30,86	30,83	0,03
ánodo	6	24,91	24,12	0,79
cátodo	7	30,69	30,65	0,04

Tabla 4.12. Aluminio disuelto (experimental y teórico) durante el proceso experimental del sistema por lotes. Condiciones del proceso experimental: $i = 2,22 \text{ A/dm}^2$; $t = 30$ minutos; $v = 3,2$ voltios.

Δ Masa Total Exp. (g) (*)	2,27
Δ Masa Total Teó. (g) (**)	1,96
Eficiencia de Corriente	116,0%

(*) Suma de la variación de las masas de los ánodos.

(**) Se calculó a partir de la Ley de Faraday. Capítulo II, Ec. (2.12).

Tabla 4.13. Variación de masa de los electrodos después del proceso experimental del sistema continuo. Condiciones del proceso experimental: $i = 2,22 \text{ A/dm}^2$; $Q = 0,35 \text{ L/min}$, $t = 30$ min

Tipo electrodo	Número electrodo	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Δ Masa (g)
cátodo	1	65,67	65,64	0,03
ánodo	1	63,95	62,84	1,11
cátodo	2	66,09	66,07	0,02
ánodo	2	63,64	62,55	1,09
cátodo	3	65,91	65,89	0,02

Tabla 4.14. Aluminio disuelto (experimental y teórico) durante el proceso experimental del sistema continuo. Condiciones del proceso experimental: $i= 2,22 \text{ A/dm}^2$; $Q=0,35 \text{ L/min}$.

ΔMasa Total Exp. (g) (*)	2,20
ΔMasa Total Teó. (g) (**)	1,96
Eficiencia de Corriente	112,2%

(*) Suma de la variación de las masas de los ánodos.

(**) Se calculó a partir de la Ley de Faraday. Capítulo II, Ec. (2.12).

Tabla 4.15. Resultados de análisis en sistema por lotes – Corroboración de condiciones eficientes. Ver Anexo Nro. 5.

Densidad de corriente	A/dcm ²	2,22	
Tiempo	min	30	
N°	Parámetro	LOTE	EFICIENCIA
1	Conductividad	63600	59,55%
2	pH	8,83	---
3	Solidos Totales Suspendidos	71	98,98%
4	Turbidez	28	92,89%
5	Aluminio	29,1	88,89%
6	Boro	0,324	38,29%
7	Bario	0,041	99,44%
8	Calcio	113,94	72,44%
9	Cobre	0,013	83,54%
10	Hierro	0,051	99,38%
11	Potasio	21,09	47,00%
12	Litio	0,049	80,71%
13	Magnesio	0,42	96,48%
14	Manganeso	0,062	89,82%
15	Sodio	16600	54,91%
16	Níquel	0,035	73,68%
17	Sílice	0,83	96,35%
18	Estroncio	0,724	55,50%
19	Zinc	0,07	92,24%

Tabla 4.16. Resultados de análisis en sistema continuo – Caudal intermedio a las condiciones óptimas Q= 0,35 L/min; i= 2,22 A/dm². Ver Anexo Nro. 5.

Caudal	L/min	0,35					
Densidad de corriente	A/dcm²	2,22					
Tiempo	min	10	20	30	10	20	30
N°	Parámetro	CONTINUO			EFICIENCIA (*)		
1	Conductividad	61800	60580	60169	60,70%	61,48%	61,74%
2	pH	8,11	8,28	8,37	-	-	-
3	Solidos Totales Suspendidos	890	510	435	87,26%	92,70%	93,77%
4	Turbidez	162	128	121	58,88%	67,51%	69,29%
5	Aluminio	85	67	58,86	67,56%	74,43%	77,54%
6	Boro	0,366	0,335	0,328	30,29%	36,19%	37,52%
7	Bario	0,138	0,093	0,087	98,11%	98,73%	98,81%
8	Calcio	224	192	172	45,83%	53,57%	58,40%
9	Cobre	0,042	0,028	0,025	46,84%	64,56%	68,35%
10	Hierro	0,57	0,33	0,26	93,03%	95,96%	96,82%
11	Potasio	21,99	18,18	18,25	44,74%	54,32%	54,14%
12	Litio	0,137	0,124	0,122	46,06%	51,18%	51,97%
13	Magnesio	6,25	5,41	5,07	47,61%	54,65%	57,50%
14	Manganeso	0,272	0,201	0,15	55,34%	67,00%	75,37%
15	Sodio	13387	13249	13205	63,64%	64,01%	64,13%
16	Níquel	0,0213	0,018	0,0174	83,98%	86,47%	86,92%
17	Sílice	10,11	5,14	4,21	55,56%	77,41%	81,49%
18	Estroncio	1,122	0,9932	0,9896	31,04%	38,96%	39,18%
19	Zinc	0,139	0,089	0,081	84,58%	90,13%	91,01%

(*) Eficiencia calcula a partir de la ecuación (4.1).

CAPITULO V

V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Sistema por lotes

En esta sección se detalla el análisis y discusión de los resultados para el sistema por lotes de electrocoagulación del tratamiento del lodo de perforación descrito en el capítulo 3. Este estudio se divide en dos partes. La primera parte explica el comportamiento general del proceso en modo de operación por lotes. En la segunda parte se discute el efecto de la densidad de corriente aplicada (DCA) sobre la remoción de los contaminantes presentes en el efluente.

5.1. Comportamiento general del proceso de electrocoagulación

El Sistema de EC por lotes, con electrodos de Al, tiene como parámetros operacionales clave a la densidad de corriente; la relevancia se encuentra en que este parámetro controla la dosificación del aluminio a partir de los electrodos. Para el sistema por lotes, el pH se encontró en el rango de 6,8 (valor del efluente sin tratar) hasta 9,0 (durante el proceso). En este rango de pH, generalmente, las especies hidrolizadas del aluminio favorecen la electrocoagulación. Por lo que, las concentraciones de las distintas propiedades de la calidad del efluente se redujeron; es decir, se logró altos niveles de remoción. Sin embargo, existe un límite para la remoción donde prácticamente se mantienen constantes (o son muy cercanas) las propiedades de la calidad del efluente tratado. El límite se alcanzó después de los 20,0 minutos de proceso y para las tres densidades de corriente aplicada en los ensayos experimentales.

5.2. Estudio del efecto de la Densidad de Corriente Aplicada – DCA

5.2.1. Efecto de la DCA sobre el pH

La figura 5.1 indica el comportamiento del pH del efluente a diferentes valores de densidad de corriente para tres tiempos de proceso. El pH inicial del efluente fue 6,89.

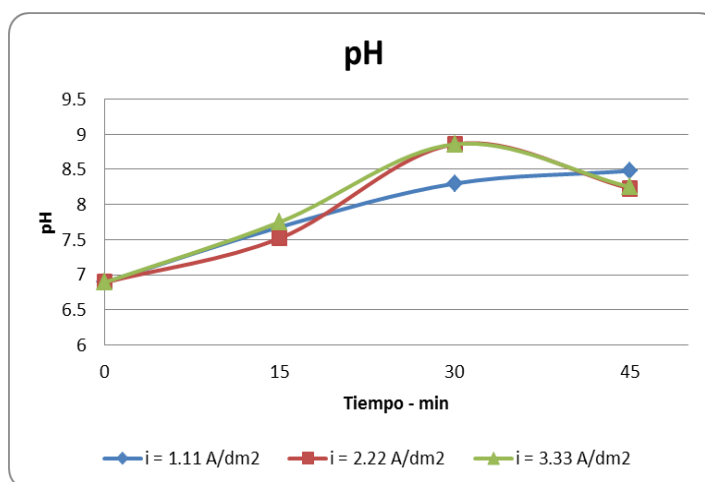


Figura 5.1. Comportamiento de pH vs Tiempo a la $i=1,11$; $2,22$ y $3,33$ A/dm²

- De la comparación de las curvas a diferentes densidades de corriente aplicadas durante el tratamiento del efluente, se observa que cuando se aplicó mayores valores de densidad de corriente, también el pH del efluente se incrementaba. Este tipo de comportamiento es característico para efluentes con pH inicial dentro del intervalo 4-9, debido a que la continua producción de H₂ en el cátodo incrementará la concentración de los iones OH⁻; en consecuencia, elevará el valor del pH del efluente durante el proceso de electrocoagulación [16].
- En el proceso experimental a la densidad de corriente de $1,11$ A/dm², el pH del efluente aumentó mientras se

incrementaba el tiempo del proceso electroquímico, debido al incremento de la concentración de los iones OH^- , como resultado de la electrolisis del agua en el cátodo, y al pH inicial de efluente; en consecuencia, se eleva el pH del efluente durante el proceso de electrocoagulación.

- De forma similar ocurrió para las experiencias a valores de densidad de corriente de 2,22 y 3,33 A/dm^2 , el comportamiento del pH del efluente fue incrementarse rápidamente hasta alcanzar un máximo (8,86) para después disminuir. La explicación para el periodo en que el pH aumentó, es decir, de 15-30 minutos de proceso, fue la producción de H_2 en el cátodo causando el incremento de la concentración del OH^- [16]. Mientras que, para los procesos con duración de 30-45 minutos, se tuvo una caída del pH a causa de la formación de la especie $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ [29], especie dominante a pH cercano a 9, por lo que disminuyó la concentración de los OH^- , como resultado del consumo del OH^- para la formación de la especie mencionada.

5.2.2. Efecto de la DCA sobre el Aluminio

La presencia del Aluminio en el efluente tiene dos razones. La primera, debido a la función y objetivo del efluente para el proceso de perforación del pozo. La segunda, por dosificación mediante electrodisolución del electrodo de Al. En general, para este último, se tuvo que incrementando la densidad de corriente y el tiempo del proceso electroquímico se incrementó la disolución del electrodo de aluminio, aumentando la dosis del ion Al^{3+} .

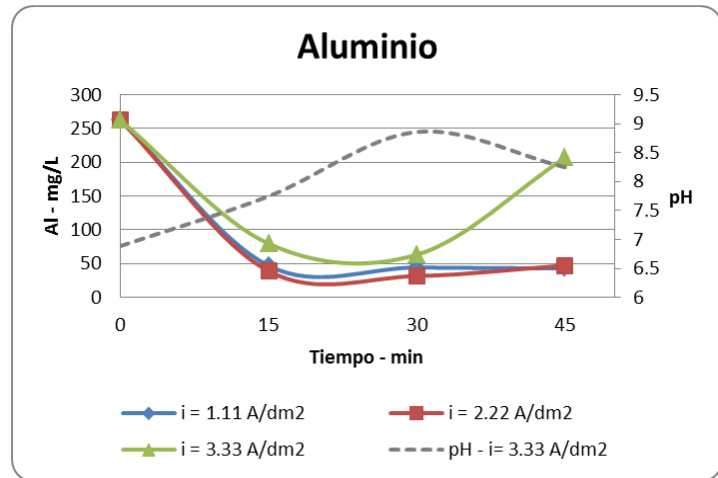


Figura 5.2. Comportamiento del Al vs Tiempo a la $i=1,11; 2,22$ y $3,33 \text{ A/dm}^2$

- Se estudió el comportamiento de la concentración del Al^{3+} en el efluente a tres densidades de corriente en tres tiempos de proceso, adicionalmente se presenta la evolución del pH durante el proceso a la densidad de corriente de $3,33 \text{ A/dm}^2$ para una mejor comprensión de la influencia del pH en la concentración del Aluminio. Figura 5.2.
- Para la densidad de corriente de $1,11 \text{ A/dm}^2$ y pH menor a 8, se observó que si el efluente es sometido a mayor tiempo de proceso la concentración del Al^{3+} disminuía progresivamente. Esto responde como resultado del proceso de coagulación en el cual se consume el ion Al^{3+} dosificado desde los electrodos. A partir del ion Al^{3+} se generan los coagulantes del proceso de electrocoagulación.
- A la densidad de corriente de $2,22 \text{ A/dm}^2$, la concentración de Al^{3+} disminuyó hasta un mínimo para luego aumentar, debido a la dependencia de las especies del Al en solución

con el pH, y al cambio simultáneo del pH del efluente. De acuerdo a la bibliografía, se sabe que en el rango de pH de 4-9, los iones predominantes son Al(OH)_2^+ , Al(OH)^{2+} , $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, Al(OH)_3 , y $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{32}^{7+}$ [25]; son estos compuestos los que provocan la desestabilización y neutralización de los coloides. De acuerdo a lo anterior, el Al^{3+} se consumió durante el proceso de electrocoagulación mientras el pH se encontraba en el rango de 4-9, experimentos con tiempos de proceso de 0-30 minutos.

- De igual forma, se explica la caída de la concentración del Al^{3+} para la densidad de corriente de $3,33 \text{ A/dm}^2$, pH en el rango de 4-9 y tiempos de proceso entre 0-30 minutos.
- Para las curvas de concentración a la densidad de corriente aplicada de $2,22$ y $3,33 \text{ A/dm}^2$, y después de 30 minutos de proceso (pH cercano a 9), la concentración del Al se incrementó. Se sabe, de la literatura, que a pH cercano a 9 ocurre favorablemente la reacción: $\text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Al(OH)}_3 + 3\text{H}^+$ y la posterior precipitación del Al(OH)_3 [29], el equilibrio de la reacción tiene como efecto incrementar la lectura de la concentración del Al en el efluente. Experimentalmente, como los resultados lo demuestran, se comprobó el aumento de la concentración de Al y la precipitación de sólidos.
- La curva de concentración de aluminio en el efluente, a la densidad de corriente de $3,33 \text{ A/dm}^2$, tuvo valores superiores en comparación con los otros valores de densidad de corriente. La explicación se debe a la mayor disolución electroquímica de los electrodos de Al; como producto del mayor paso de corriente a través de ellos.

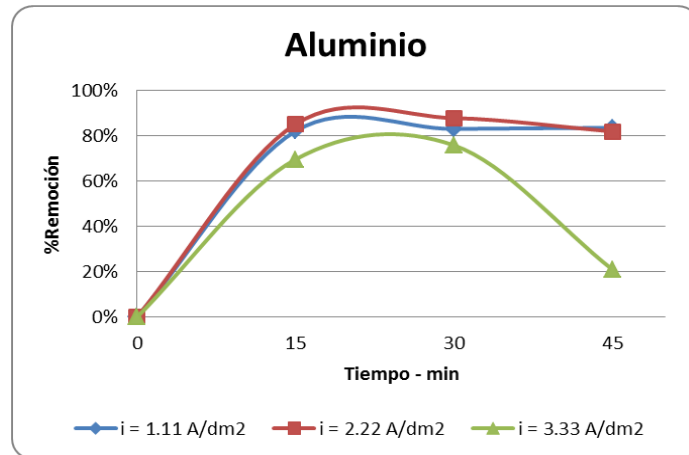


Figura 5.3. Porcentaje de remoción del Al vs Tiempo a la $i=1,11$; $2,22$ y $3,33 \text{ A/dm}^2$.

- En términos de porcentaje de remoción del aluminio, la figura 5.3 muestra la comparación de los procesos a determinadas densidades de corriente aplicada durante los experimentos. Como se observa en la figura, el proceso de electrocoagulación logró alcanzar 88% de remoción del aluminio a las condiciones operativas de $i= 2,22 \text{ A/dm}^2$ y $t= 30 \text{ min}$.

5.2.3. Efecto de la DCA sobre la Turbidez

La turbidez se debe a la presencia de partículas coloidales suspendidas en el efluente, por ejemplo: las arcillas (silicatos hidratados). Estas mismas son también responsables de la turbidez en el efluente del pozo de perforación. Por ello, se analizó el comportamiento de la turbidez versus la densidad de corriente aplicada. La figura 5.4 muestra la evolución de la turbidez.

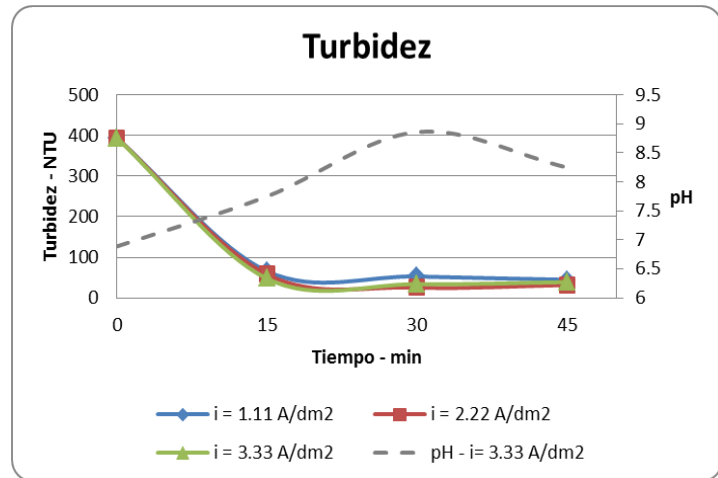


Figura 5.4. Comportamiento de la Turbidez vs Tiempo a la $i=1,11$; $2,22$ y $3,33 \text{ A/dm}^2$

- Se observa que, para la densidad de corriente de $1,11 \text{ A/dm}^2$, la turbidez disminuyó a la vez que aumentó el tiempo del proceso. A medida que aumentaba el tiempo del proceso electroquímico, el efluente estuvo sometido a mayor interacción con los coagulantes generados a partir de la electrodisolución del Al y la condición de pH entre 4-9. Con lo que los coloides del efluente fueron adsorbidos para después formar los flóculos y ser removidos.
- De manera similar sucedió para los valores de densidad de corriente aplicada de $2,22$ y $3,33 \text{ A/dm}^2$, la turbidez disminuyó hasta alcanzar el valor mínimo- $26,0$ y $34,0$ NTU, respectivamente- para aumentar, posteriormente.
- En el tramo antes de alcanzar el valor mínimo de turbidez, el proceso de coagulación es beneficiado por la condición de pH (intervalo 4-9) y, como tal, neutraliza las partículas coloidales y las adsorbe reduciendo así la turbidez del efluente.

- Después del minuto 30 del proceso de electrocoagulación, la condición del pH (cercano a 9) junto con el incremento de la concentración del aluminio en el efluente favorecieron la formación de óxidos de aluminio $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ que precipitaron. Producto de esta precipitación, la turbidez del efluente aumentó.

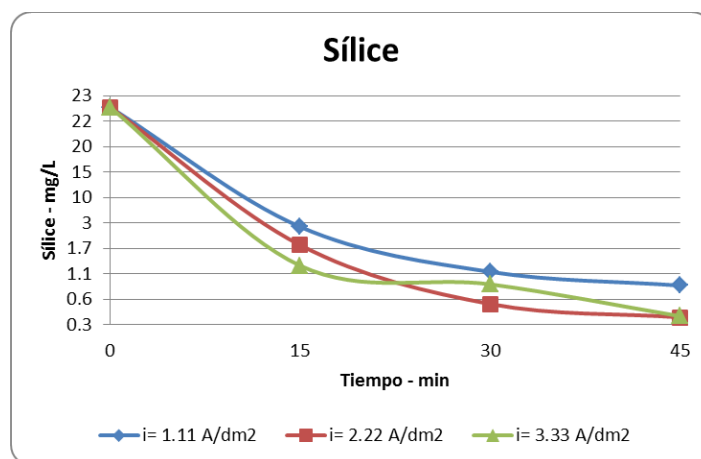


Figura 5.5. Comportamiento del Sílice vs Tiempo a la $i=1,11$; $2,22$ y $3,33 \text{ A/dm}^2$

- En adición al estudio de la disminución de la turbidez, la figura 5.5 representa el desarrollo de la concentración de la Sílice durante el proceso. Como se puede ver, la concentración de la Sílice disminuyó mientras aumentaba la intensidad de corriente. Se alcanzó el 98% de remoción de Sílice. Estos resultados fueron coherentes con el descenso de la turbidez, cuya propiedad, en la mejor de las condiciones, disminuyó hasta en un 93% de remoción. Figura 5.6 representa los resultados del porcentaje de remoción de la turbidez.

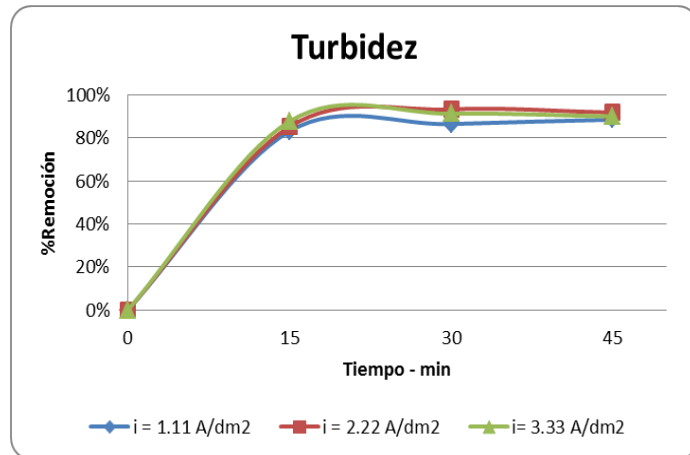


Figura 5.6. Porcentaje de remoción de la Turbidez vs Tiempo a la $i=1,11$; $2,22$ y $3,33$ A/dm²

5.2.4. Efecto de la DCA sobre los Sólidos suspendidos totales

En la figura 5.7 se observa el efecto de la densidad de corriente sobre la concentración de los sólidos suspendidos totales en el efluente. Se trabajó a tres valores de densidad de corriente y a tres tiempos de proceso.

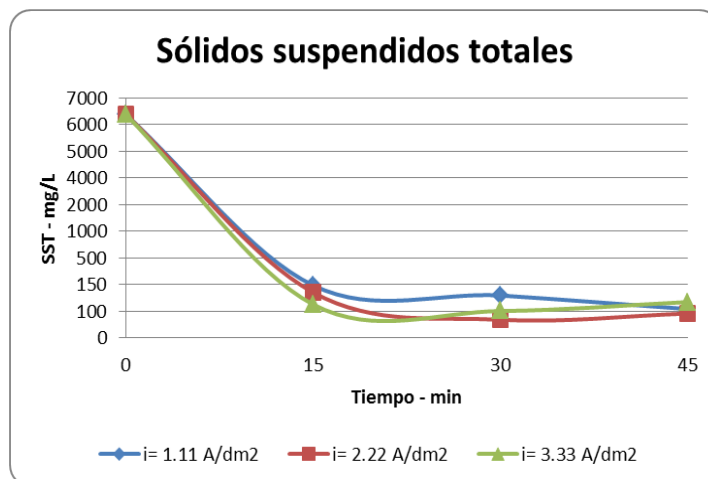


Figura 5.7. Comportamiento del SST vs Tiempo a la $i=1,11$; $2,22$ y $3,33$ A/dm².

- Se observa en la figura 5.7 que la concentración de los sólidos suspendidos totales disminuyó a la vez que se aumentaba la densidad de corriente aplicada. En otras palabras, el efluente estuvo sometido a mayor dosificación de las especies coagulantes del Al a medida que se incrementaba la densidad de corriente. Y, a pH del efluente entre 4-9, el efecto de la coagulación aumentó. Con lo que los sólidos suspendidos- coloides- del efluente fueron neutralizados y adsorbidos para posteriormente dar paso, propiamente, al proceso de coagulación y reducir la concentración de los sólidos suspendidos totales.
- Para el proceso experimental con condiciones de $i = 2,22$ A/dm², $t = 30$ min y pH cercano a 9, se reportó como mínimo (75,0 mg/L) en la curva de la concentración de sólidos suspendidos totales. Luego a mayores tiempos de proceso, la concentración de los sólidos suspendidos totales aumentó ligeramente, debido a que estas condiciones favorecen la formación del $Al(OH)_{3(s)}$ [29] que luego precipitó.

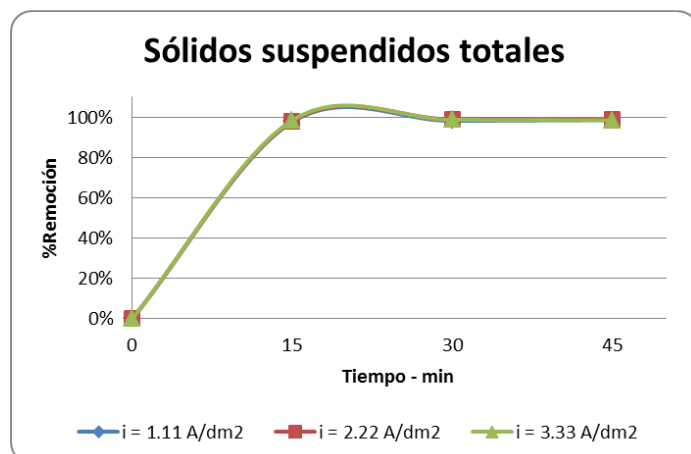


Figura 5.8. Porcentaje de remoción de SST vs Tiempo a la $i = 1,11; 2,22$ y $3,33$ /dm².

- La figura 5.8 representa los porcentajes de remoción de los sólidos suspendidos totales. Los resultados para las condiciones establecidas en los experimentos indicó un porcentaje de remoción no menor al 97%. A las condiciones de $i = 2,22 \text{ A/dm}^2$ y $t = 30 \text{ min}$, se obtuvo el nivel de remoción máximo de los sólidos suspendidos totales alcanzando el valor de 99% de remoción.

5.2.5. Efecto de la DCA sobre la Conductividad específica

La conductividad específica del efluente depende de la concentración de los transportadores de carga y a las interacciones eléctricas entre sí. Por otro lado, el proceso de electrocoagulación permite neutralizar y desestabilizar estas interacciones favoreciendo la coagulación y, posterior, separación del efluente.

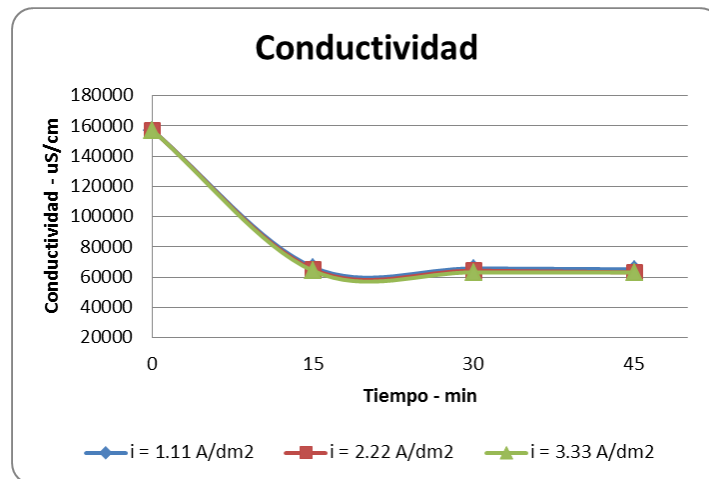


Figura 5.9. Comportamiento de la Conductividad vs Tiempo a la $i = 1,11; 2,22$ y $3,33 \text{ A/dm}^2$.

- La tendencia de la conductividad específica del efluente, figura 5.9, se representa en función del tiempo del proceso de coagulación a diferentes densidades de corriente.

- En principio, se observó que para mayores densidades de corriente aplicada al efluente la conductividad específica disminuyó. La causa de este fenómeno es el incremento en la dosificación de Al desde los electrodos por el mayor paso de corriente eléctrica permitiendo el proceso de electrocoagulación y la remoción de las especies transportadoras de carga.
- En general, la conductividad específica del efluente decreció mientras fue mayor la duración del tiempo del proceso, debido al mayor tiempo de interacción entre las especies transportadoras de carga y los coagulantes del Al^{3+} dosificados a través del proceso de electrocoagulación, consiguiendo así la neutralización, adsorción y, posterior, remoción de las especies cargadas y disminución de la conductividad específica en el efluente.
- De la comparación entre las curvas de conductividad, para los valores de densidad de corriente aplicada 2,22 y 3,33 A/dm^2 , se tuvo que la diferencia entre los resultados no es considerable al no superar el 1% de diferencia.

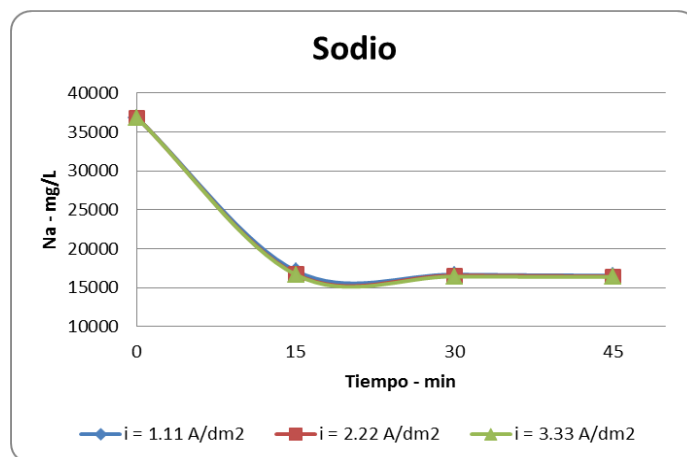


Figura 5.10. Comportamiento de la concentración del Sodio vs Tiempo a la $i=1,11$; $2,22$ y $3,33 \text{ A/dm}^2$

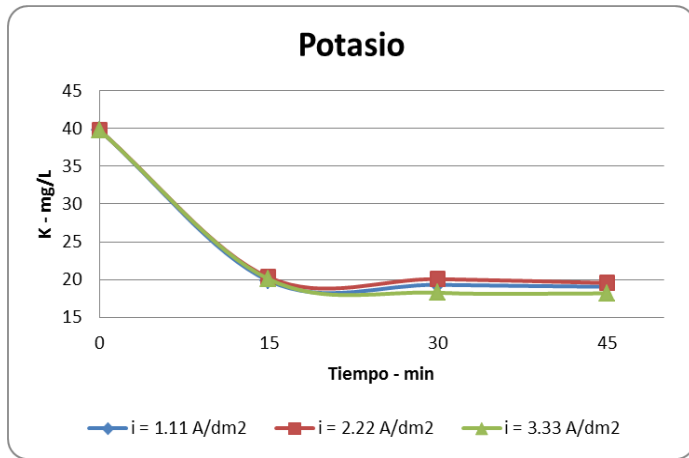


Figura 5.11. Comportamiento de la concentración del Potasio vs Tiempo a la $i=1,11$; $2,22$ y $3,33 \text{ A/dm}^2$.

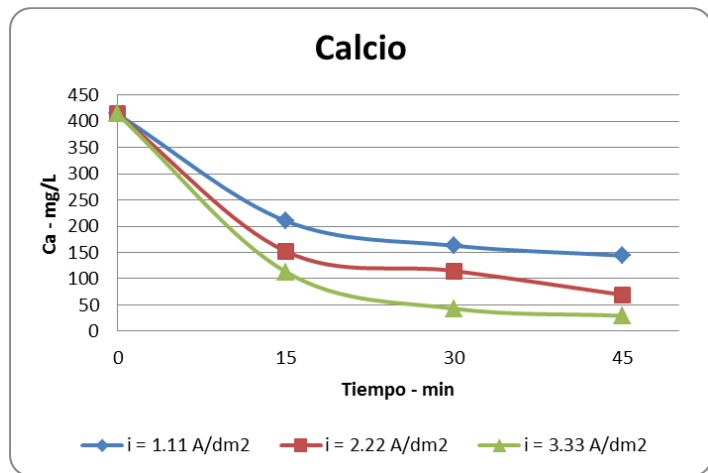


Figura 5.12. Comportamiento de la concentración del Calcio vs Tiempo a la $i=1,11$; $2,22$ y $3,33 \text{ A/dm}^2$.

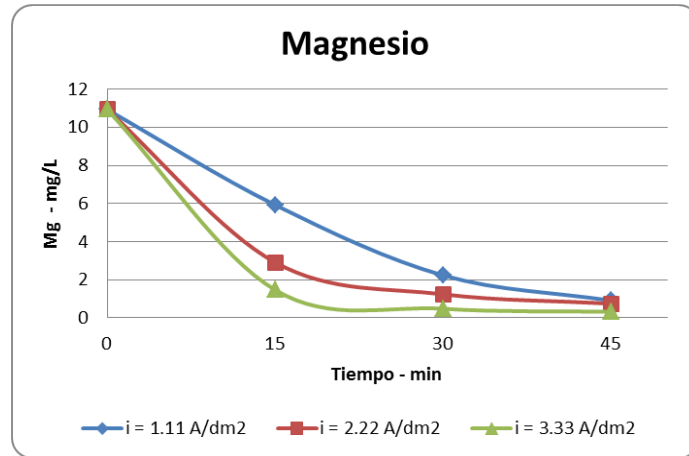


Figura 5.13. Comportamiento de la concentración del Magnesio vs Tiempo a la $i=1,11$; $2,22$ y $3,33$ A/dm².

- Se muestra en las figuras de 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 la evolución de las concentraciones de algunos de los principales transportadores de carga presentes en el efluente; como el Na, Ca, K y Mg. Estas especies son los principales responsables de la conductividad en el efluente.
- Se observa en las figuras que en el proceso de electrocoagulación, sin excepción de elemento, disminuyeron las concentraciones alcanzando niveles de remoción desde 54% (Na y K), debido a que estos compuestos tienen carga positiva y, por tanto, se repelen con las especies coagulantes del aluminio que también tienen carga positiva. Por lo tanto, no se puede continuar con la remoción de estos compuestos.
- Los porcentajes de remoción de la conductividad específica se observan en la figura 5.14. En dicha figura se observa que el grado de remoción no superó el 60%, debido a la repulsión de las cargas. Son tres las condiciones a la cual se alcanzó el máximo porcentaje de

remoción, siendo estas: (2,22 A/dm²; 30 min); (3,33 A/dm²; 30 min) y (3,33 A/dm²; 45 min).

5.2.6. Efecto de la DCA sobre el Bario

Debido a las propiedades nocivas que el Bario tiene para la salud y el medio ambiente [33], la remoción de este metal del efluente se volvió uno de los objetivos principales para el proceso de electrocoagulación. En ese sentido, se estudió la evolución de la concentración del Bario en el efluente a tres valores diferentes de densidad de corriente. Figura 5.15.

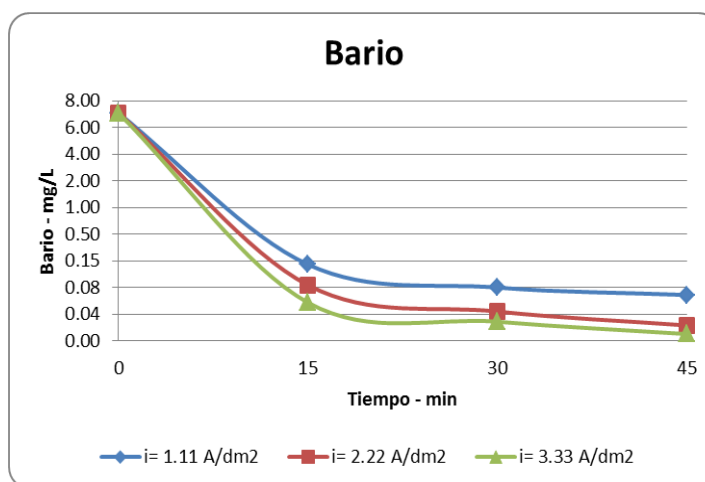


Figura 5.15. Comportamiento del Bario vs Tiempo a la $i = 1,11$; 2,22 y 3,33 A/dm².

- Se observó que si se aumentaba la densidad de corriente la concentración de Ba también disminuía. Figura 5.15. Como se mencionó previamente, la adición electroquímica de Al³⁺ es dependiente de la densidad de corriente; en ese sentido, el efecto del aumento de la densidad de corriente incrementa la electrodisolución del electrodo de aluminio, por lo que se incrementaba la dosificación de los iones de Al³⁺ y, entonces, aumenta las interacciones para el proceso de coagulación electroquímica.

- También, en la figura 5.15, se observa que cuando el efluente fue sometido a tiempos de procesos prolongados, la concentración del Ba cayó de manera gradual, producto de la remoción mediante el mecanismo de desestabilización de la coagulación del Ba a través de las especies hidrolizadas del Al^{3+} .
- Es importante señalar que, después de los 30 minutos de proceso, la pendiente de la curva de concentración del Bario disminuyó, debido a que el proceso de electrocoagulación se ve afectado por las condiciones de pH (cercano a 9), las cuales no favorecen el tratamiento [29].

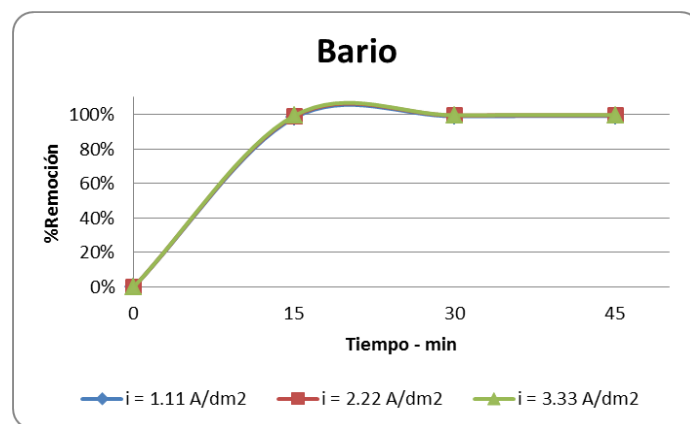


Figura 5.16. Porcentaje de remoción de Bario vs Tiempo a la $i=1,11$; $2,22$ y $3,33 \text{ A/dm}^2$.

- Mediante el proceso de electrocoagulación, la remoción del Bario logró valores elevados entre el 98% hasta 99.7% de remoción del efluente. De acuerdo a los resultados del laboratorio, mostrados en la figura 5.16, se observa que en las diferentes corridas experimentales el porcentaje de remoción fue similar sin diferencias considerables, las diferencias no superaron el 1% al hacer la comparación entre los experimentos.

5.2.7. Efecto de la DCA sobre el Voltaje

Para poder establecer la viabilidad del proceso de EC y poder compararla con respecto a otros métodos, es necesario evaluar el consumo energético y la productividad (rendimiento). Previamente al estudio del consumo energético, se necesita conocer el voltaje alcanzado cuando se trabajó a densidad de corriente constante.

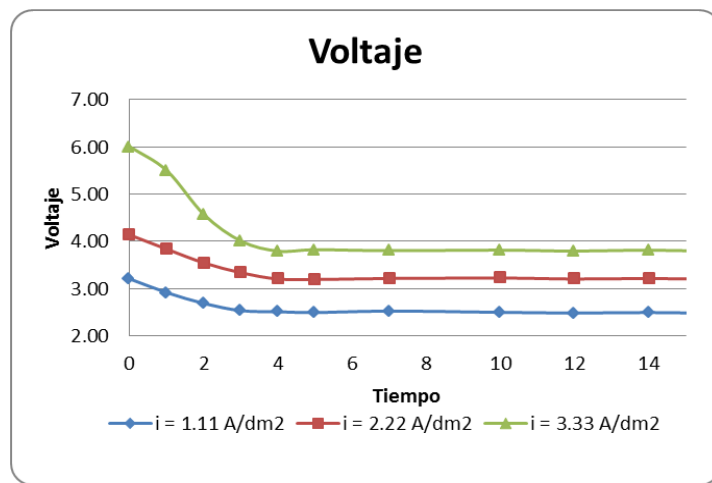


Figura 5.17. Variación del voltaje vs Tiempo a la $i=1,11$; $2,22$ y $3,33 \text{ A/dm}^2$.

- Como puede observarse en la figura 5.17, la evolución del voltaje durante el proceso de electrocoagulación fue, al cabo de 2 minutos, el de estabilizarse y permanecer constante durante el resto del proceso. Gracias a la conductividad específica del efluente ($157,30 \text{ mS/cm}$), este nivel de conductividad permitió el transporte eficaz de la carga, lo que resultó en la disminución gradual del voltaje para el proceso de electrocoagulación. Sin embargo, el arranque demandó un pico en el voltaje para superar los potenciales cinéticos, los de transferencia de masa y la resistencia propia del efluente al inicio del tratamiento.

Sistema Continuo

En esta sección se detallará la discusión de resultados para el proceso continuo de electrocoagulación en el tratamiento de agua proveniente del lodo de perforación descrito anteriormente en el capítulo 3, este estudio ha sido dividido en tres partes. En primer lugar, se ha estudiado el comportamiento general del proceso en modo de operación continuo; seguidamente la influencia de la corriente sobre la remoción de los contaminantes objetivos y por último la influencia del caudal aplicado en la remoción de los contaminantes.

5.3. Comportamiento general del proceso continuo de electrocoagulación.

La mayoría de los estudios de coagulación existentes en bibliografía, se llevan a cabo a escala laboratorio y operan en sistema por lotes. Sin embargo, las plantas a escala real generalmente funcionan en sistema continuo. Por este motivo fue importante llevar a cabo el estudio del proceso electroquímico en continuo, ya que dada la complejidad de los procesos involucrados, el modo de operación puede influir decisivamente en los resultados. En ese contexto, cuando se estudia un proceso en operación continuo es importante caracterizar tanto la respuesta dinámica (cambios de las variables desde el comienzo hasta que se alcanza el estado estacionario) como los valores de estado estacionario de todos los parámetros.

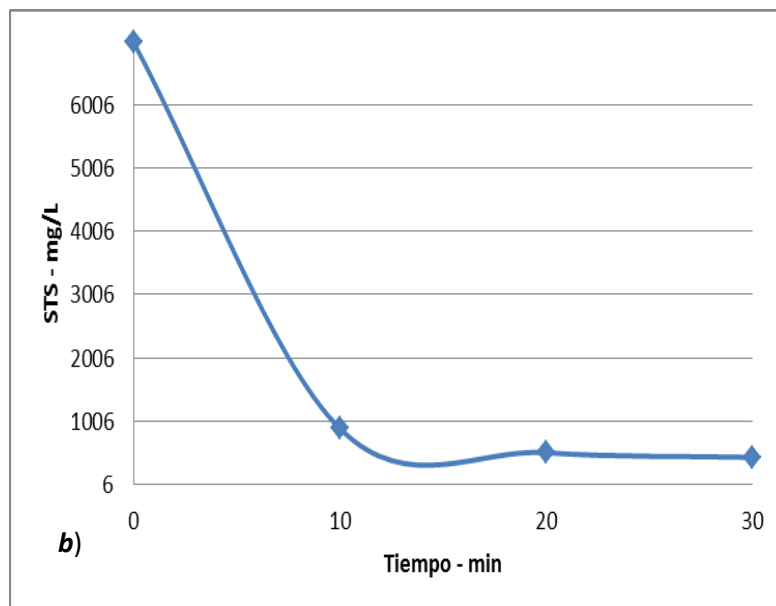
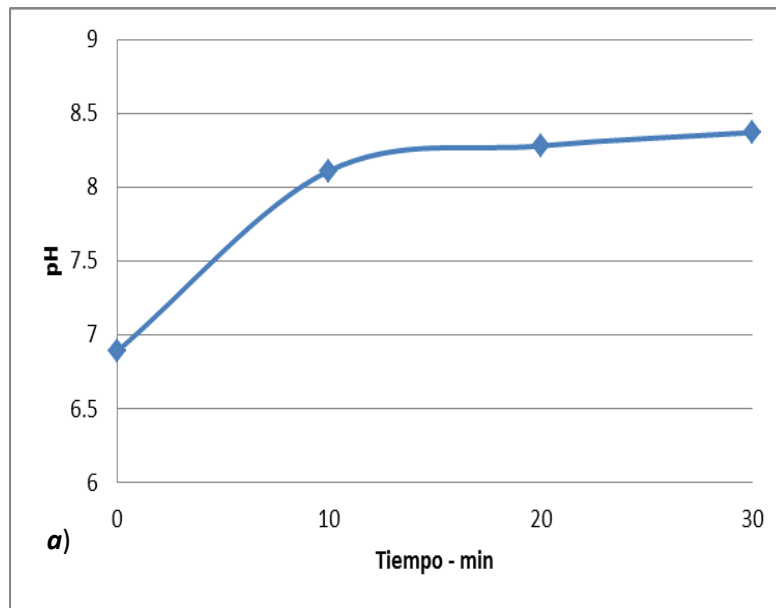


Figura 5.18. Perfiles de (a) pH, (b) SST-solidos suspendidos totales generados en una corrida típica de electrocoagulación en continuo utilizando efluente proveniente de un lodo de perforación. Densidad de corriente= $2,22 \text{ A/dm}^2$, Caudal=0,35 l/min, pH inicial = 6,89.

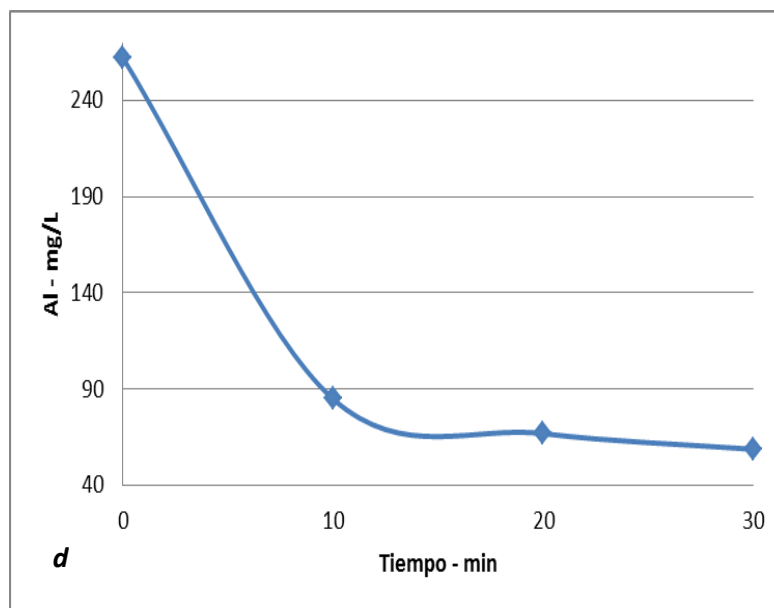
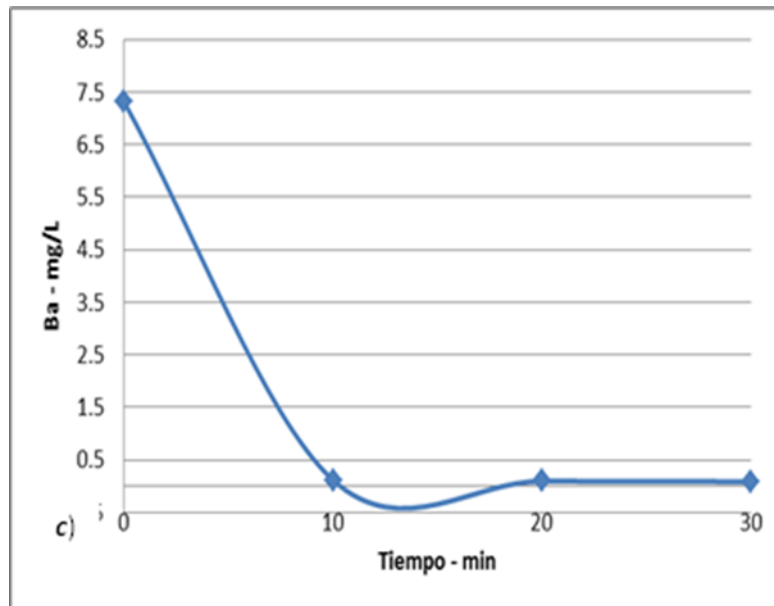


Figura 5.19. Perfiles de (c) Ba, (d) Al generados en una corrida típica de electrocoagulación en continuo utilizando efluente proveniente de un lodo de perforación. Densidad de corriente= $2,22 \text{ A/dm}^2$, Caudal= $0,35 \text{ l/min}$, pH inicial = $6,89$.

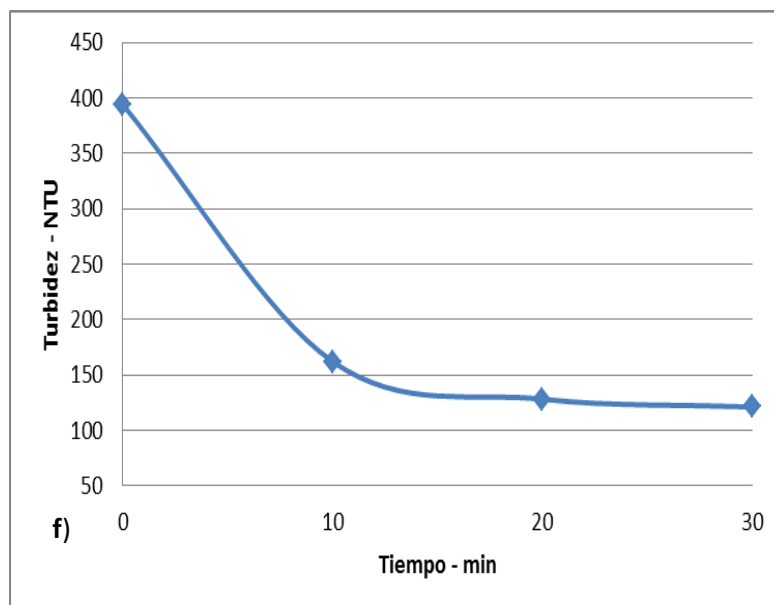
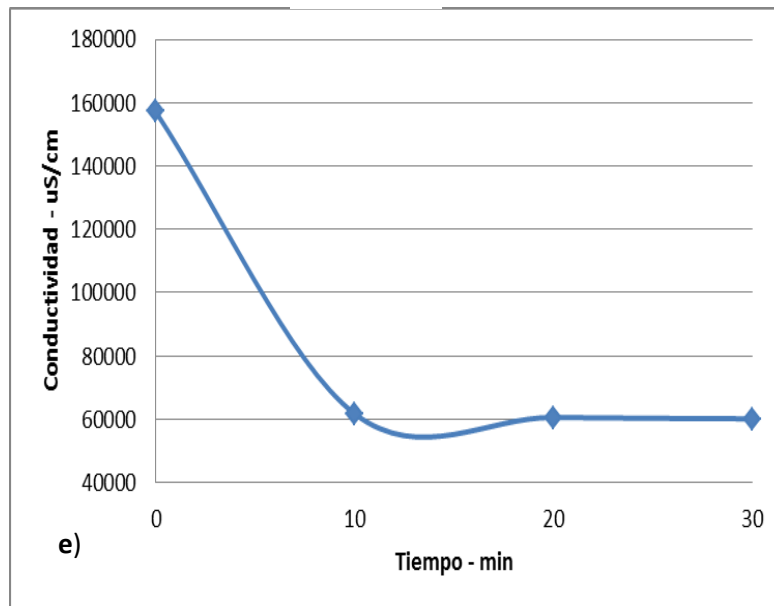


Figura 5.20. Perfiles de (e) Conductividad, (f) Turbidez, generados en una corrida típica de electrocoagulación en continuo utilizando efluente proveniente de un lodo de perforación. Densidad de corriente= 2,22 A/dm², Caudal=0,35 l/min, pH inicial = 6,89.

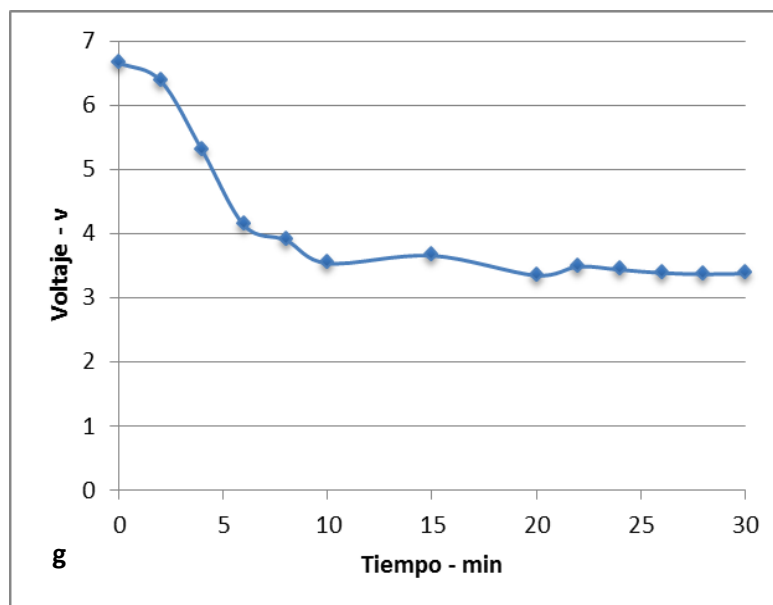


Figura 5.21. Perfiles de (g) voltaje con el tiempo, generados en una corrida típica de electrocoagulación en continuo utilizando efluente proveniente de un lodo de perforación. Densidad de corriente= 2,22 A/dm², Caudal=0,35 l/min, pH inicial = 6,89.

Las figura 5.18 – 5.21. Muestra los resultados obtenidos para un experimento típico de electrocoagulación ($i=2,22 \text{ A/dm}^2$ y $Q=0,35 \text{ L/min}$) en sistema continuo de efluente utilizado para las corridas. Se puede observar que la concentración de los parámetros fisicoquímicos de estudio disminuye hasta llegar a un valor de estado estacionario, siendo alcanzado en su mayoría en el intervalo de 10 a 20 min, además se muestra que disminuye bruscamente alcanzando el valor estacionario en dicho periodo en todos los ensayos experimentales. Este hecho sugiere que el aluminio generado electroquímicamente se utiliza para disminuir no solo un tipo de contaminante de manera selectiva, por el contrario es utilizado para disminuir simultáneamente la concentración de metales pesados, sólidos suspendidos y demás. Asimismo se observa un aumento de pH en el efluente y un descenso en el potencial de la celda (voltaje al inicio), medido en el transcurso de la experimentación. El potencial

de la celda disminuye de forma importante debido a la disminución de las caídas óhmicas, facilidad que proporciona la alta conductividad del efluente. Este comportamiento de cambios observados es representativo en los principales parámetros fisicoquímicos estudiados en las prueba experimentales para las densidades de corriente y flujo propuestas, la única diferencia remarcable es que hay algunos experimentos en los que la turbidez y los sólidos suspendidos presentan valores similares cuando llegan al estado estacionario para las densidades de corriente de 2,22 y 3,33 A/dm². Este caso se discutirá más adelante ya que aporta información muy importante acerca de los mecanismos de coagulación con aluminio. Por último cabe rescatar que en todos los casos el tiempo experimental ha sido suficiente para alcanzar las condiciones de estado estacionario.

5.4. Estudio del efecto de la Densidad de Corriente Aplicada – DCA

5.4.1. Efecto de la DCA sobre el pH

El efluente residual empezó con un valor de pH igual a 6,89, cercano a la neutralidad. Para la aplicación de densidades de corriente (1,11; 2,22; 3,33 A/dm²), el proceso continuo presenta un comportamiento como muestra la figuras 5.22 y 5.23. Este se caracteriza por el incremento de pH para un mismo caudal cuando aumenta la intensidad de corriente. Para las tres densidades de corriente aplicada, la tendencia de pH finales se encuentra ente [8,06 – 8,22] a caudal de 0,5 L/min, de igual forma es 0,2 L/min valores de pH finales se encuentran [8,28 – 8,44].

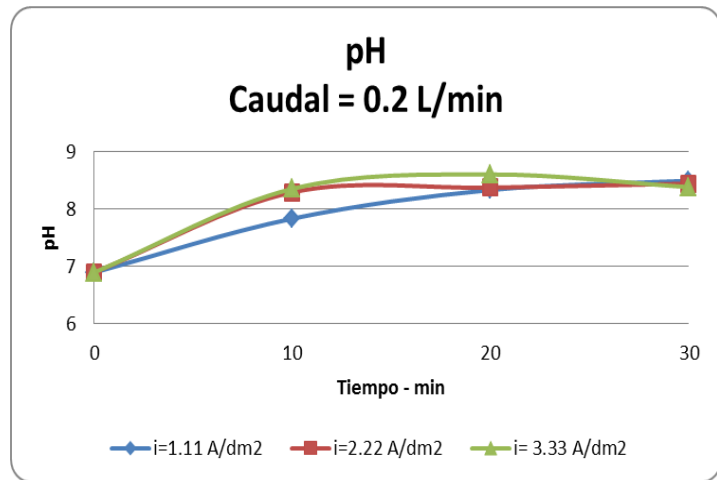


Figura 5.22. Comportamiento del pH vs tiempo – $Q = 0,2 \text{ L/min}$ a $i = 1,11; 2,22; 3,33 \text{ A/dm}^2$.

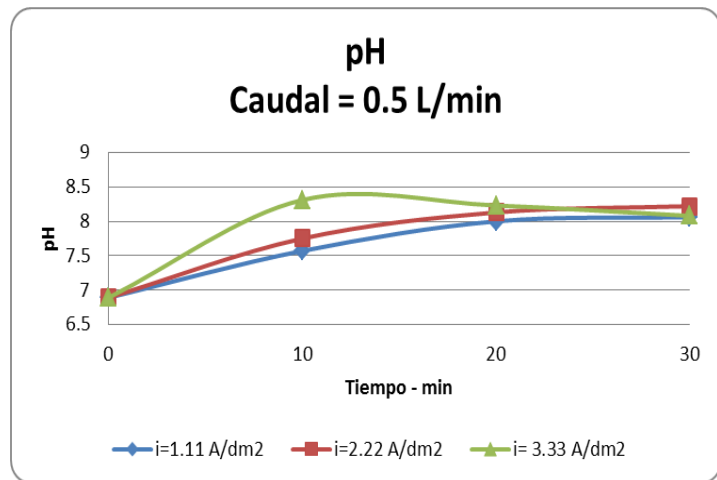


Figura 5.23. Comportamiento del pH vs tiempo – $Q = 0,5 \text{ l/min}$ a $i = 1,11; 2,22; 3,33 \text{ A/dm}^2$.

- El aumento del pH durante los experimentos se puede interpretar en términos de las reacciones químicas y electroquímicas que tienen lugar en el reactor utilizado. La reducción catódica del agua, formación de $(\text{OH})^-$ y la disolución química causan un aumento de pH, mientras que la oxidación de agua, formación de $(\text{H})^+$, en el ánodo conlleva a un descenso en este parámetro [17].

- Dado que esta reacción compite con la liberación de aluminio, el resultado neto es un incremento en la alcalinidad ya que los equilibrios químicos entre las distintas especies de aluminio también influyeron sobre el valor de pH. El pH durante el proceso se incrementó por el efecto atribuido a la generación de $(OH)^{-}$ que se origina en el cátodo, como consecuencia de la reacción de evolución de hidrogeno [16].
- Las reacciones que se dan durante el proceso de electrocoagulación le dan al medio acuoso capacidad buffer, especialmente en aguas residuales donde se aplicó la densidad de corriente de 3.33 A/dm^2 para ambos caudales lo que previene grandes cambios de pH una vez llegados a valores cercanos de 9.

5.4.2. Efecto de la DCA sobre el Aluminio

El efluente inicia con una concentración alta de aluminio (262,03 mg/L) otorgado por la adición de complejos de aluminio durante la preparación del lodo base agua, que no llega a ser eliminado luego de pasar por el proceso de deshidratación (Dewatering). Por los ensayos experimentales realizados, se obtuvo valores de remoción altos en densidades de corriente de 2,22 y $3,33 \text{ A/dm}^2$ para ambos caudales, obteniendo concentraciones finales (estado estacionario) comprendido [98,38–77,76 mg/L] a caudales de 0,5 L/min y de [35,57–16,1 mg/L] para el caudal de 0,2 L/min.

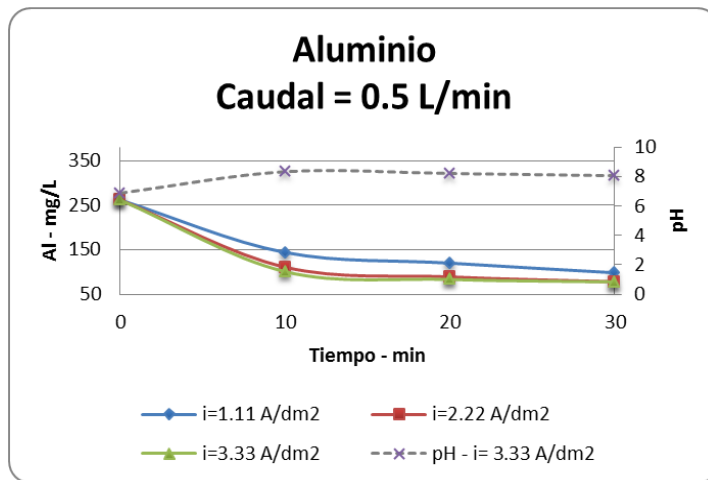


Figura 5.24. Concentración del Al vs tiempo – $Q = 0.5$ l/min a $i = 1.11, 2.22, 3.33$ A/dm². pH vs tiempo – $Q = 0.5$ l/min a $i = 3.33$ A/dm²

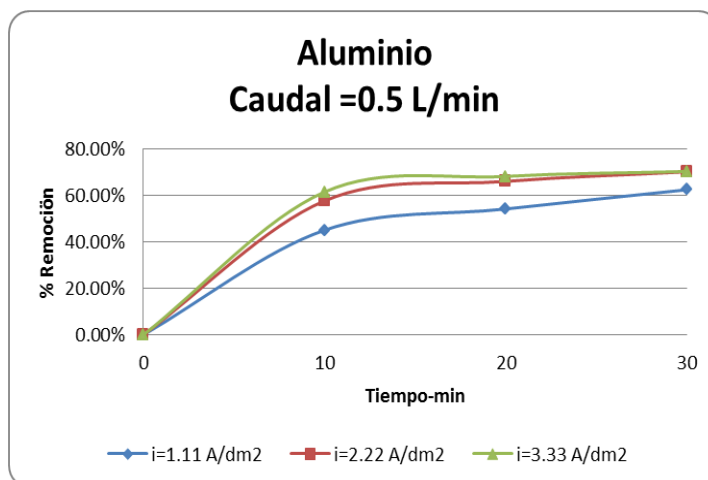


Figura 5.25. Porcentaje de remoción del Al vs tiempo – $Q = 0.5$ l/min a $i = 1,11; 2,22; 3,33$ A/dm².

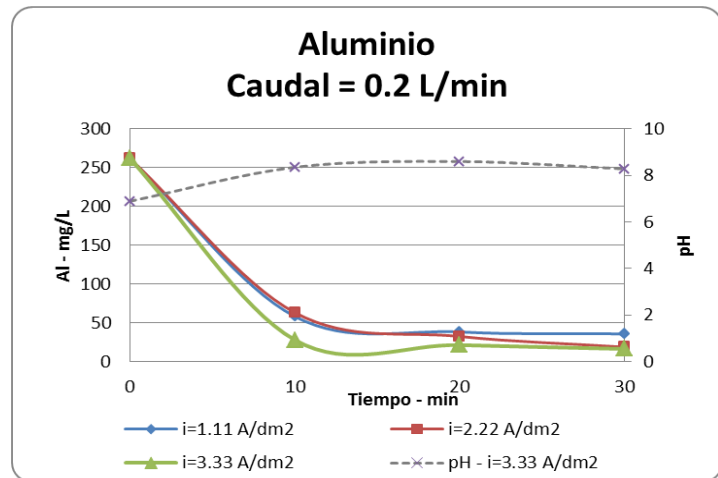


Figura 5.26. Concentración del Al vs tiempo – $Q = 0.2$ l/min a $i = 1,11; 2,22; 3,33$ A/dm². pH vs tiempo – $Q = 0,2$ l/min a $i = 3,33$ A/dm²

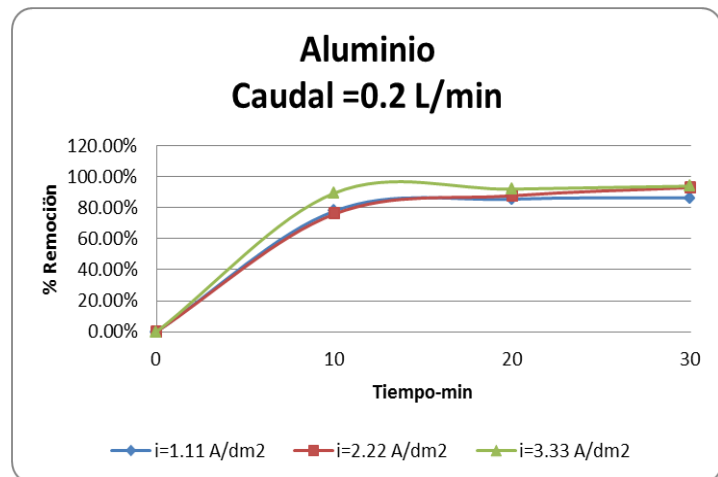


Figura 5.27. Porcentaje de remoción del Al vs tiempo – $Q = 0,5$ l/min a $i = 1,11; 2,22; 3,33$ A/dm².

- Como se aprecia en las figura 5.24 y 5.26 los valores de concentración de aluminio en estado estacionario a $3,33$ A/dm² están próximos con los que se logró a densidad de $2,22$ A/dm², esto es básicamente, para el caso de cargas eléctricas específicamente elevadas (necesarias para

generar concentraciones de aluminio más altas), se pueden justificar en base a los elevados potenciales de celda que se requieren [10].

- En estas circunstancias se generan una gran cantidad de iones hidroxilo, como consecuencia del proceso de reducción del agua que ocurrió en el cátodo. Estas elevadas cantidades de iones hidroxilos y el flujo producido (que puede considerarse tiene lugar en la celda electroquímica) debido al burbujeo de hidrogeno formado, dan lugar a que el pH en las proximidades del cátodo, sea muy alcalino independientemente del pH de la celda. Este hecho, puede explicar que concentraciones altas de complejos de aluminio, formadas químicamente durante el proceso de electrocoagulación, han quedado rezagadas en la solución, no evidenciando su eliminación como flóculos para remoción de contaminantes [15].

5.4.3. Efecto de la DCA sobre la Turbidez

La turbidez inicial fue 394 NTU, luego de culminar el proceso de electrocoagulación en continuo los valores presentados disminuyeron para el flujo de 0.5 L/min a rangos de [199–180 NTU] finales en estado estacionario y para el flujo de 0,2 L/min a rangos de [57–19 NTU].

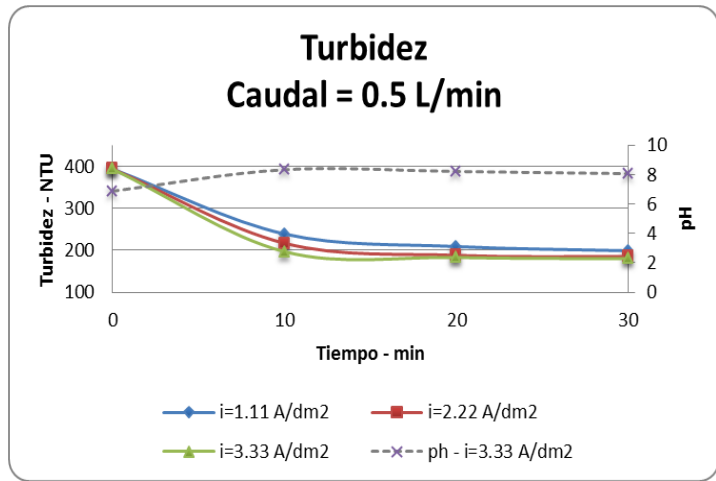


Figura 5.28. Turbidez vs tiempo – $Q = 0,5 \text{ L/min}$ a $i = 1,11; 2,22; 3,33 \text{ A/dm}^2$.

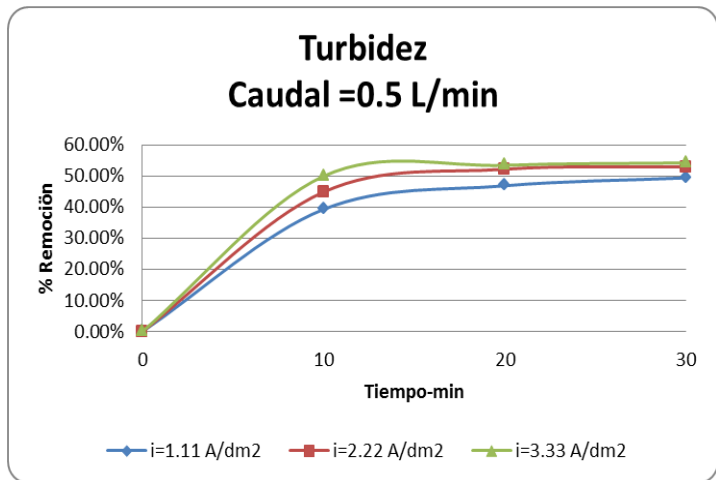


Figura 5.29. Porcentaje de remoción de Turbidez vs tiempo – $Q = 0,5 \text{ L/min}$ a $i = 1,11; 2,22; 3,33 \text{ A/dm}^2$

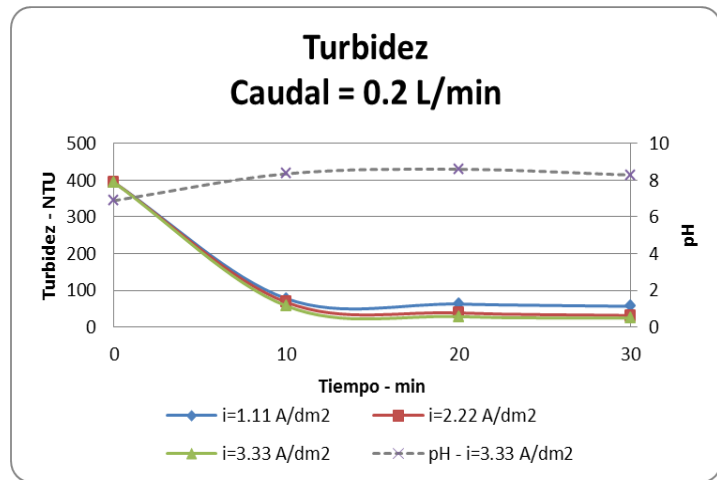


Figura 5.30. Turbidez vs tiempo – $Q = 0,2$ L/min a $i = 1,11; 2,22; 3,33$ A/dm².

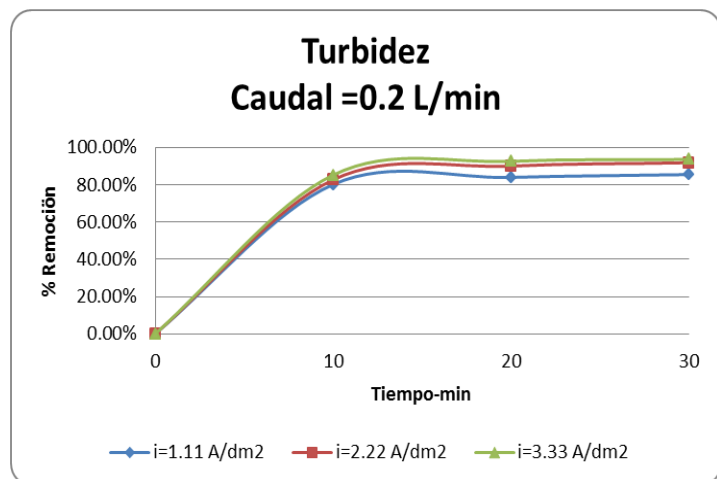


Figura 5.31. Porcentaje de remoción de Turbidez vs tiempo – $Q = 0,2$ L/min a $i = 1,11; 2,22; 3,33$ A/dm².

- Se puede observar en las Figuras 5.28 y 5.30 mostradas anteriormente que a valores de pH alcalinos dio lugar una reducción drástica de la eficiencia del proceso con respecto en la remoción de la turbidez e incremento en la concentración de aluminio electrogenerado Figura 5.24 y 5.26.

- Para una carga eléctrica aplicada la concentración de aluminio en el proceso de electrocoagulación aumenta con el pH, especialmente para pH fuertemente alcalinos (debido a la gran influencia del proceso de disolución química) [26]. No obstante, estas mayores concentración de aluminio no dan lugar a incrementos en la eliminación de turbidez, por el contrario, a menores porcentajes de remoción. Esta característica se presentó claramente en ambos casos de caudal. A densidades de 2,22 y 3,33 A/dm² los valores de turbidez alcanzados son próximos.
- Estas observaciones pueden ser explicadas teniendo en cuenta la naturaleza de las especies de aluminio generadas en cada intervalo de pH. Así, a pH no mayores a 8, las especies de hidrolisis de aluminio predominantes son los cationes monoméricos. Estas especies cargados positivamente pueden ser absorbidas en la superficie de las partículas de arcillas [12].
- Esto explica que la adición de aluminio en este intervalo de pH permitió alcanzar un alto porcentaje de remoción en arcillas y metales pesados, confirmando que la neutralización de la carga superficial es el mecanismo dominante de la coagulación para bajas concentraciones de aluminio electrodisueltas [7]. Esto también explica que para pH alcalinos (superiores a 8) solo se obtuvo bajos porcentaje de remoción de turbidez por lo que no logró superar a los valores obtenidos, debido a que el anión predominante es el Al(OH)_4^- negativamente cargado. Lo que lleva a ser justificada en términos de absorción de protones en la superficie de las partículas de arcillas y contaminantes resultante en la neutralización de la carga superficial [13].

5.4.4. Efecto de la DCA sobre los Sólidos suspendidos Totales

Las figuras 5.32 y 5.34 muestran el comportamiento de sólidos suspendidos totales - SST, el cual tuvo como valor inicial 6984 mg/L, luego del proceso de electrocoagulación, este se redujo de acuerdo a las densidades aplicadas para cada caudal a valores de [840 - 640 mg/L] logrados en estado estacionario a caudal de 0,5 L/min y a 0,2L/min el rango de [350 - 19 mg/L].

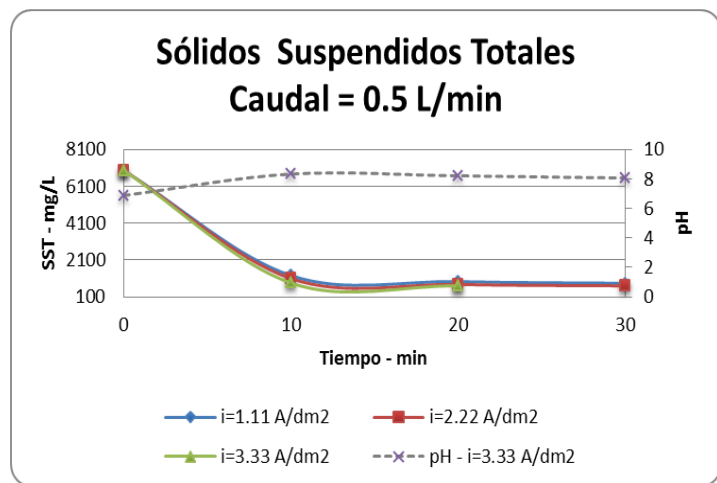


Figura 5.32. SST vs tiempo – $Q = 0,5$ L/min a $i = 1,11$; $2,22$; $3,33$ A/dm².

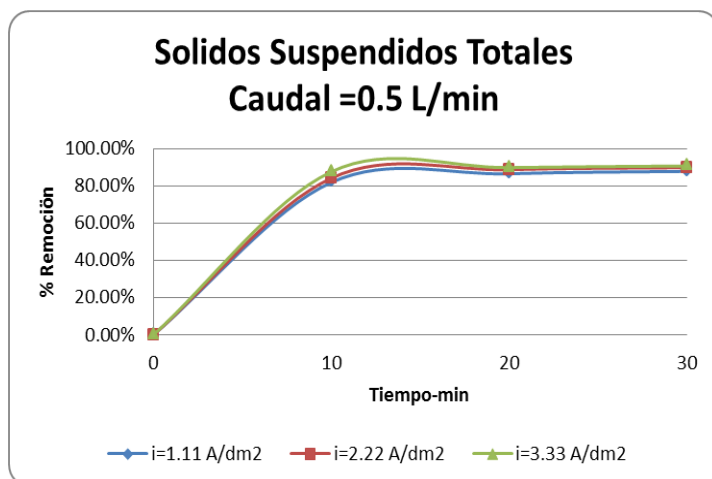


Figura 5.33. Porcentaje de remoción de SST vs tiempo – $Q = 0,5$ L/min a $i = 1,11$; $2,22$; $3,33$ A/dm²

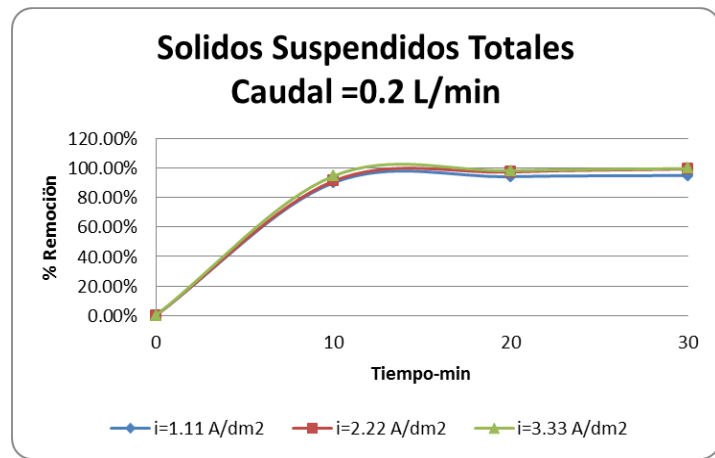


Figura 5.34. SST vs tiempo – $Q = 0,2$ L/min a $i = 1,11$; $2,22$; $3,33$ A/dm².

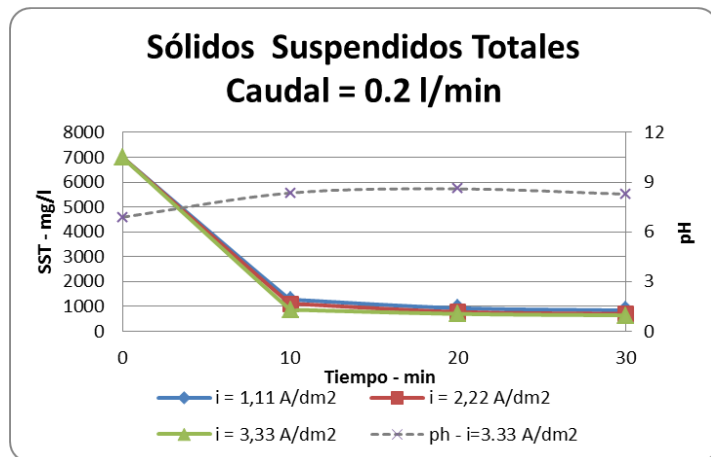


Figura 5.35. Porcentaje de remoción de SST vs tiempo – $Q = 0.2$ L/min a $i = 1.11$, 2.22 , 3.33 A/dm²

- A densidades de corriente de $2,22$ y $3,33$ A/dm² a caudales de $0,5$ L/min y $0,2$ L/min, se obtuvo valores muy cercanos de concentración final, la inmersión de las partículas de sólidos en un floculo podría ser el mecanismo predominante de eliminación de SST, mientras para bajas concentraciones de aluminio, la neutralización de las cargas por precipitación superficial (formación de un precipitado positivamente cargado en la superficie de las

partículas de sólidos) o la neutralización de las cargas mediante la absorción [10].

- Se observa de las gráficas, incluso para valores pequeños de densidad de corriente aplicada, alcanzó altos porcentajes de remoción de turbidez y sólidos suspendidos totales. En este contexto, la primera zona de alta eficiencia (para bajas concentraciones de aluminio electrodisueltas) puede corresponder a este resultado, siendo este un mecanismo de coagulación predominante de neutralización de cargas, bien por adsorción de cationes de aluminio (monoméricos o polimérico) [10].
- El aluminio disuelto se fija en la superficie de las partículas sólidos totales suspendidos, compensando parcialmente la carga negativa de estas [7]. Un exceso de iones de aluminio fijado sobre la superficie pudo cambiar la carga neta superficial de las partículas y por tanto logro disminuir el rendimiento del proceso de coagulación en el ensayo experimental a 3.33 Amp/dm^2 para ambos caudales, ya que estabiliza la suspensión por repulsión electrostática de las partículas. La floculación es la segregación de las partículas previamente coaguladas por coalición de las mismas y este proceso está favorecido por elevadas concentraciones de partículas (debido a las mayores posibilidades de colisión) [10].

5.4.5. Efecto de la DCA sobre la Conductividad específica

La conductividad específica del efluente tuvo como valor inicial $157\ 250 \text{ uS/cm}$, logrando valores finales de $[61\ 186 - 60\ 489 \text{ uS/cm}]$ para caudales de $0,5 \text{ L/min}$ y a $0,2 \text{ L/min}$ de $[60198 - 59300 \text{ uS/cm}]$ a las tres densidades de corriente en estudio. Los resultados que se obtuvieron en su mayoría no

superaron valores mayores a la mitad de remoción. La alta conductividad se debió a que este efluente se obtuvo de un lodo de perforación compuesto básicamente de formiato de sodio, una sal muy soluble.

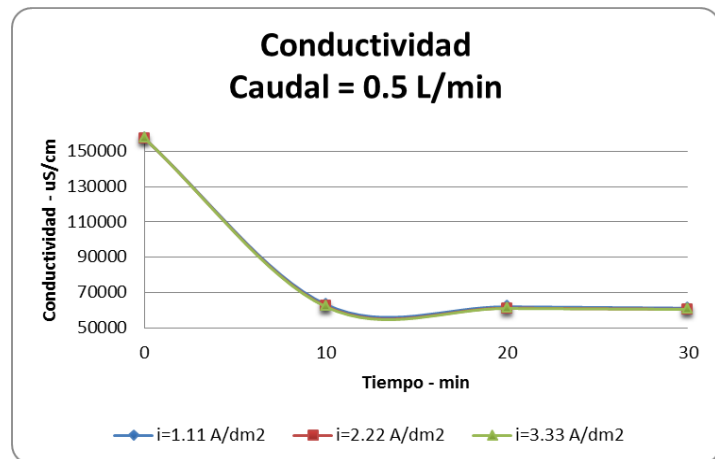


Figura 5.36. Conductividad vs tiempo – Q = 0,5 L/min a i = 1,11; 2,22; 3,33 A/dm².

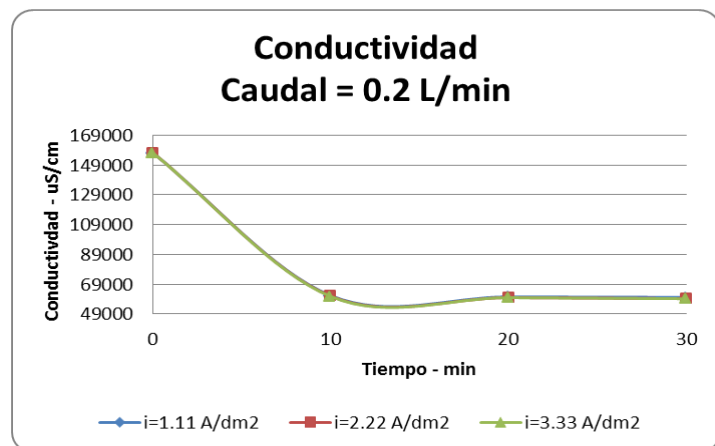


Figura 5.37. Conductividad vs tiempo – Q = 0,2 L/min a i = 1,11; 2,22; 3,33 A/dm².

- La reducción de la conductividad se ve reflejada en la remoción del sodio en el efluente (36813 uS/cm valor inicial), logrando mayor porcentaje de remoción a 3,33 A/dm² en ambos casos de caudal aplicado, aun así se

obtuvo valores de 12823 uS/cm, siendo este alto, esto puede explicarse a la carga positiva que presentan los complejos de aluminio (coagulante) y el sodio dificultando a este ser capturado en los intersticios de los precipitados de formación de hidróxidos. Además no es el único metal que incrementó el valor de la conductividad en el efluente inicial, estando en competencia con otros metales en considerable concentración como se muestra en las gráficas.

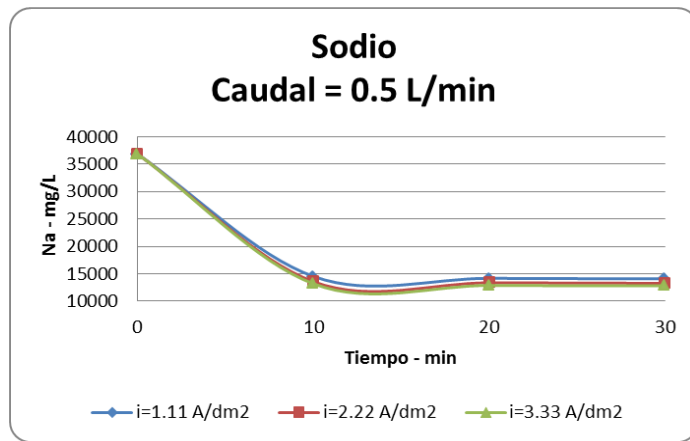


Figura 5.38. Conductividad vs tiempo – $Q = 0,5$ L/min a $i = 1,11; 2,22; 3,33 \text{ A/dm}^2$.

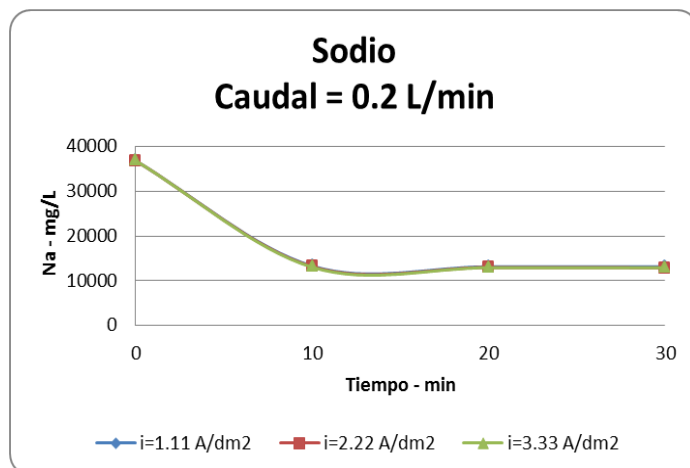


Figura 5.39. Conductividad vs tiempo – $Q = 0,2$ L/min a $i = 1,11; 2,22; 3,33 \text{ A/dm}^2$.

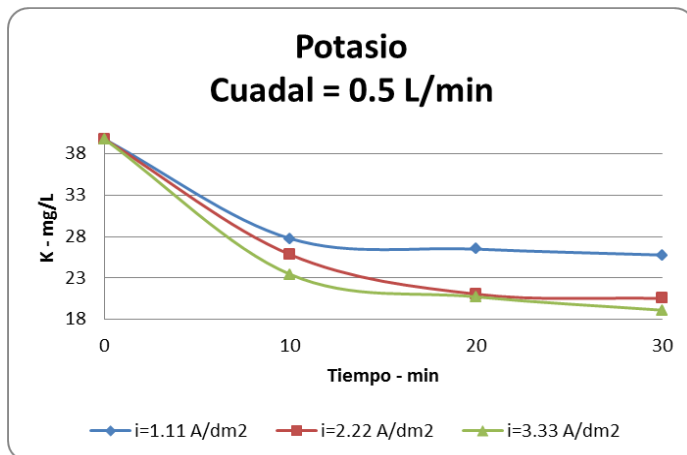


Figura 5.40. Potasio vs tiempo – $Q = 0,5 \text{ L/min}$ a $i = 1,11; 2,22; 3,33 \text{ A/dm}^2$.

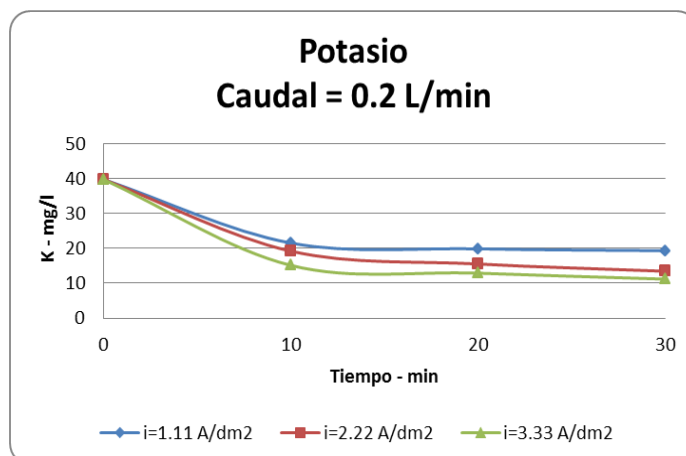


Figura 5.41. Potasio vs tiempo – $Q = 0,2 \text{ L/min}$ a $i = 1,11; 2,22; 3,33 \text{ A/dm}^2$.

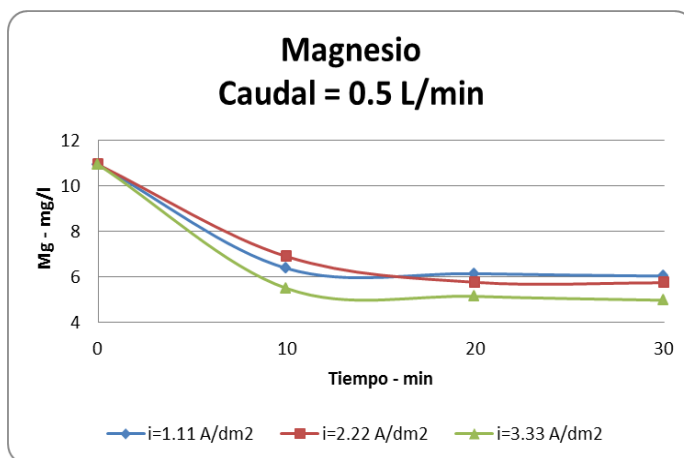


Figura 5.42. Magnesio vs tiempo – Q = 0,5 L/min a i = 1,11; 2,22; 3,33A/dm².

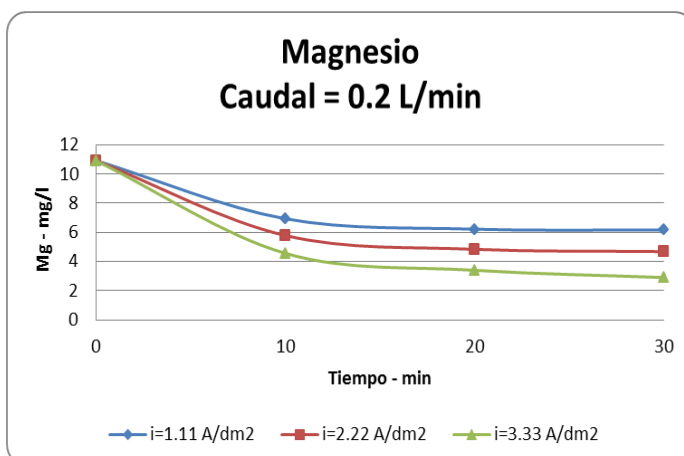


Figura 5.43. Magnesio vs tiempo – Q = 0,2 L/min a i = 1,11; 2,22; 3,33A/dm².

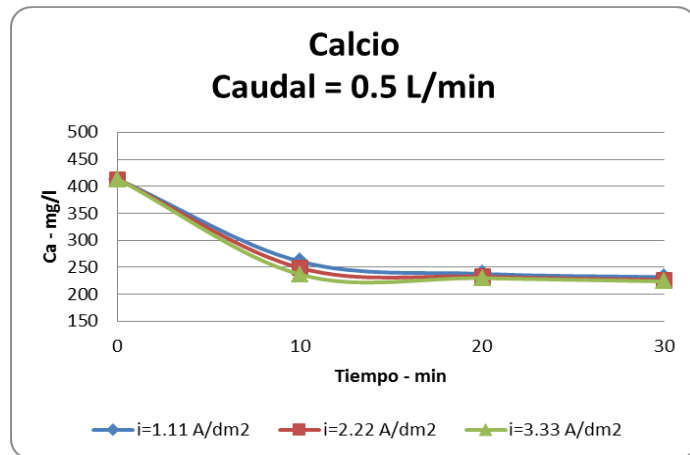


Figura 5.44. Calcio vs tiempo – Q = 0,5 L/min a i = 1,11; 2,22; 3,33A/dm².

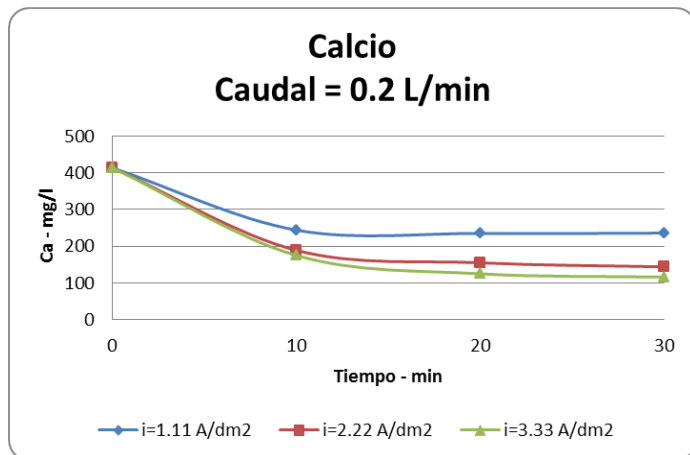


Figura 5.45. Calcio vs tiempo – Q = 0,2 L/min a i = 1,11; 2,22; 3,33A/dm²

- Las concentraciones finales logradas del calcio, magnesio y potasio fueron reducidas a un poco más de la mitad de sus valores iniciales. Por lo que se entiende que la reducción de la conductividad comprendió la eliminación de estas sales disueltas que se encontraron en el efluente en mayor concentración.

- El agua pura se comporta como aislante eléctrico, siendo las sustancias disueltas en ella las que proporcionan al agua la capacidad de conducir la corriente eléctrica [30]. Por tanto es una medida de la capacidad para conducir la corriente eléctrica. Los iones cargados positiva y negativamente son los que conducen la corriente y la cantidad conducida dependerá del número de los iones presentes y de su movilidad iónica en el efluente.
- A mayor sea la cantidad de sales disueltas, mayor será la conductividad, este efecto continúa hasta que la solución esté tan llena de iones que se restringe la libertad de movimiento y la conductividad puede disminuir en lugar de aumentar [30]. En este estudio no ha sido necesario agregar sustancias químicas para incrementar la conductividad, su valor inicial presentado fue de gran ayuda lo que permitió la reducción mayoritaria de los metales evaluados como objetivos, aunque el valor de conductividad como tal no logró una reducción en su totalidad de su valor.

5.4.6. Efecto de la DCA sobre el Bario

La concentración de bario en el efluente fue básicamente por la adición de sulfato de bario (poco soluble), utilizado como densificante para lodos base agua, su concentración inicial fue de 7,31 mg/L. Cabe señalar que la concentración inicial no fue muy elevada, lo que permitió que a 1,11 A/dm² se obtuviera una baja concentración como resultado final en las diferentes condiciones de estudio.

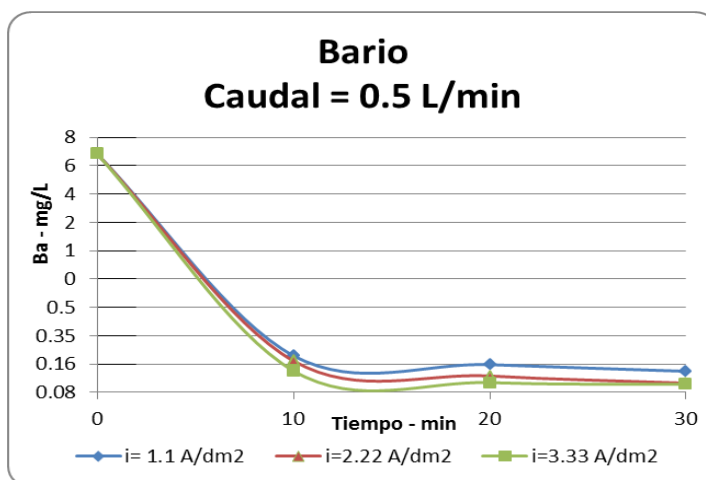


Figura 5.46. Concentración de Ba vs tiempo – $Q = 0,5 \text{ l/min}$ a $i = 1,11; 2,22; 3,33 \text{ A/dm}^2$.

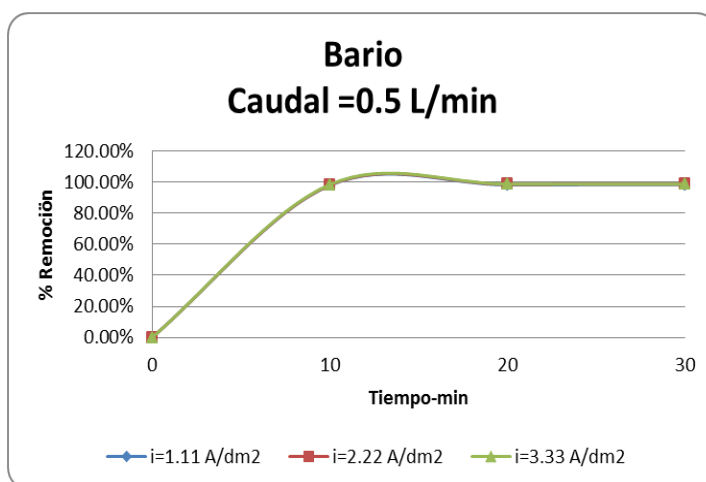


Figura 5.47. Porcentaje de remoción de Ba vs tiempo – $Q = 0,5 \text{ l/min}$ a $i = 1,11; 2,22; 3,33 \text{ A/dm}^2$.

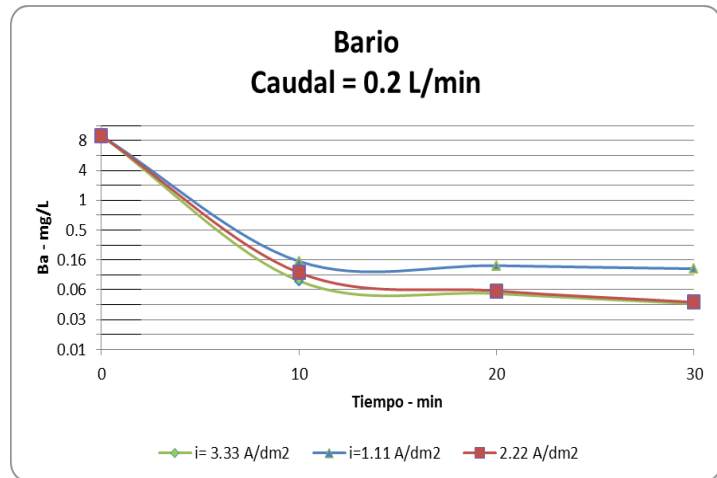


Figura 5.48. Concentración de Ba vs tiempo – $Q = 0,2 \text{ l/min}$ a $i = 1,11; 2,22; 3,33 \text{ A/dm}^2$.

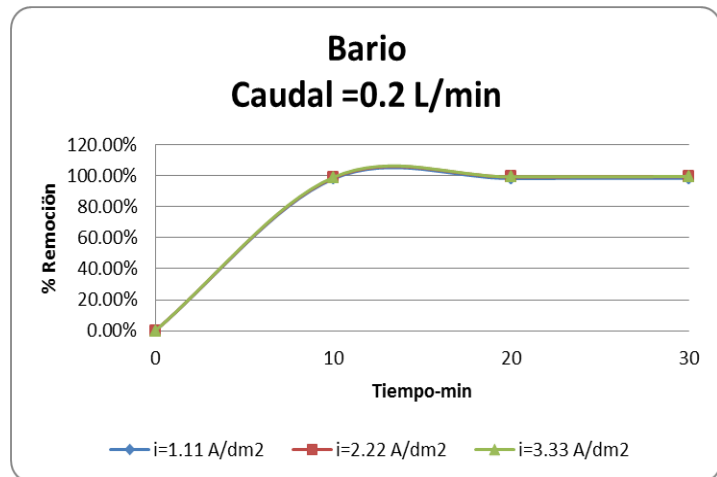


Figura 5.49. Porcentaje de remoción de Ba vs tiempo – $Q = 0,2 \text{ l/min}$ a $i = 1,11; 2,22; 3,33 \text{ A/dm}^2$.

- De acuerdo a la figura 5.46 y 5.48, las concentraciones finales fueron bajas, logrando un porcentaje de remoción alto, si estos valores son comparados con el nivel de remoción del aluminio u otros metales evaluados (ver tablas 4.4, 4.7, 4.8 - Capítulo IV), algunos de ellos se eliminan constantemente en niveles más altos que otros. Al, Ba, Fe, Zn, Cd presentan altos niveles de remoción.

Otros metales muestran una gama más amplia de niveles de eliminación tales como el Si que va desde valores de remoción de 30% hasta alcanzar niveles superiores de 90.0%.

- De acuerdo a las gráficas presentadas se observa que bajo amperaje se logró niveles de remoción altos. logrando su valor más alto de 95% de remoción de bario. Otros metales que muestran una gama de niveles de remoción incluyen Fe (> 93%), y Sr (hasta 49,1%) (ver tablas 4.4, 4.7, 4.8 - Capítulo IV). Algunos metales se eliminaron consistentemente a niveles bajos de densidad de corriente. Estos incluyó al Ba. Cabe resaltar que la alta conductividad del efluente resultó en una menor potencia necesaria para proporcionar un amperaje y lograr niveles de remoción altos en general [27].

5.5. Estudio del Caudal aplicado en el proceso continuo

Para establecer las mejores condiciones de operación (caudal y densidad de corriente) en sistema continuo, se calculó los porcentajes de remoción de la conductividad, aluminio, bario, SST y turbiedad. La evaluación del proceso continuo se realizó al inicio con dos caudales 0,5 L/min y 0,2 L/min y tres densidades de corriente de 1,11, 2,22, 3,33 A/dcm², con el fin de observar el efecto de variación del caudal sobre la remoción de los contaminantes señalados fue necesario comparar con otro valor diferente que permitió inferir cual fue la influencia que tuvo con el porcentaje de remoción de los contaminantes.

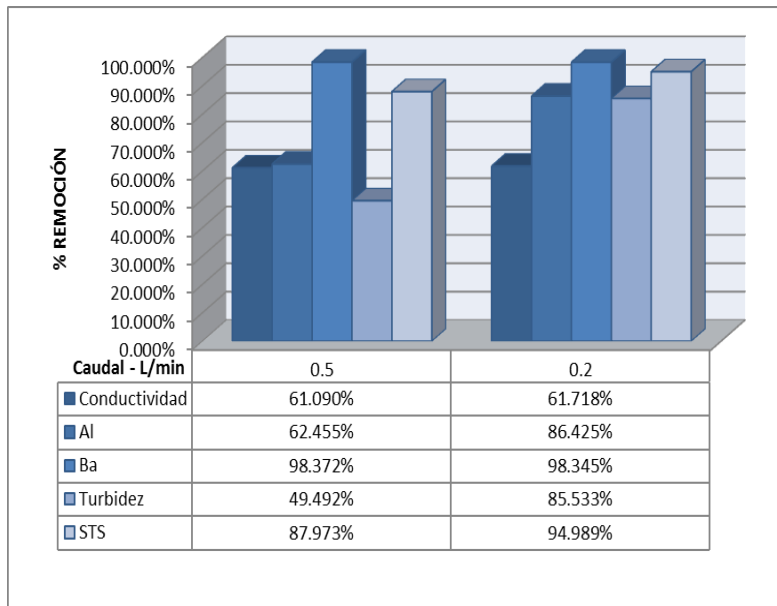


Figura 5.50. Porcentaje de remoción vs Caudales aplicando la densidad de corriente de 1,11 A/dm².

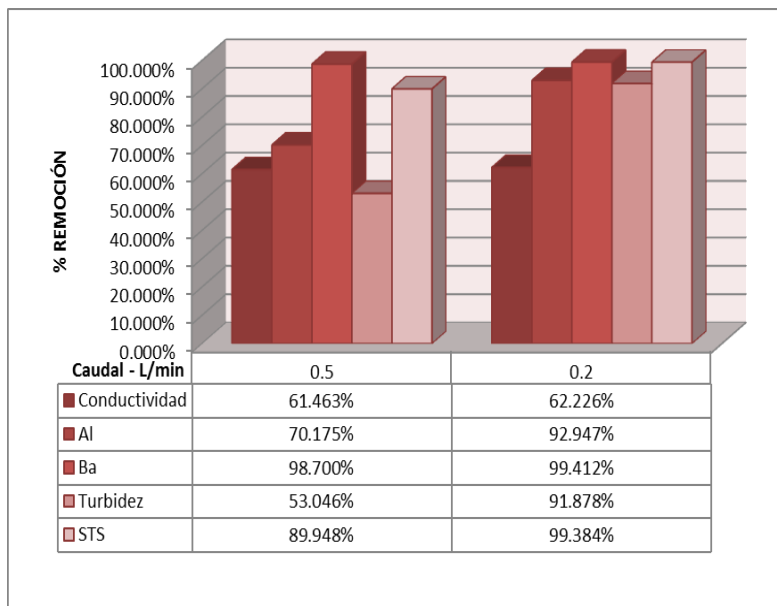


Figura 5.51. Porcentaje de remoción vs Caudales aplicando la densidad de corriente de 2,22 A/dm².

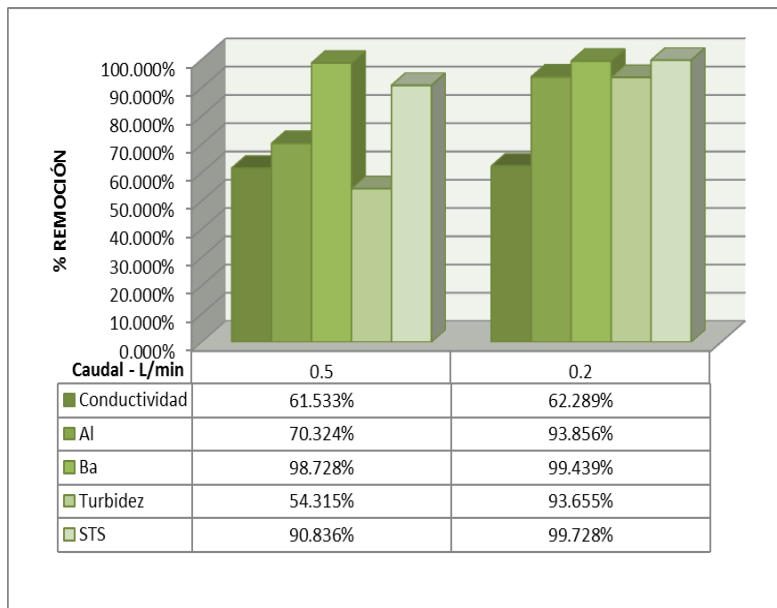


Figura 5.52. Porcentaje de remoción vs Caudales aplicando la densidad de corriente de $3,33 \text{ A/dm}^2$.

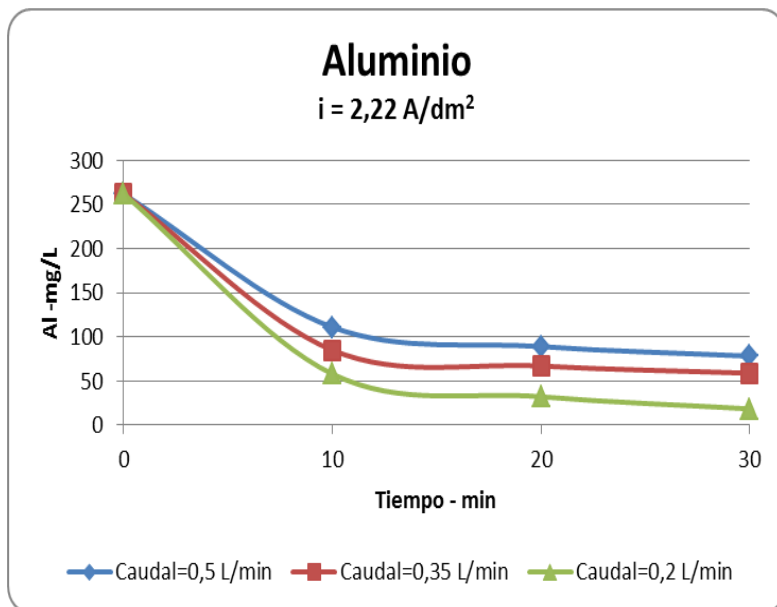


Figura 5.53. Aluminio vs Tiempo – $i = 2,22 \text{ A/dm}^2$ a Caudal = 0,5; 0,35 y 0,2 L/min.

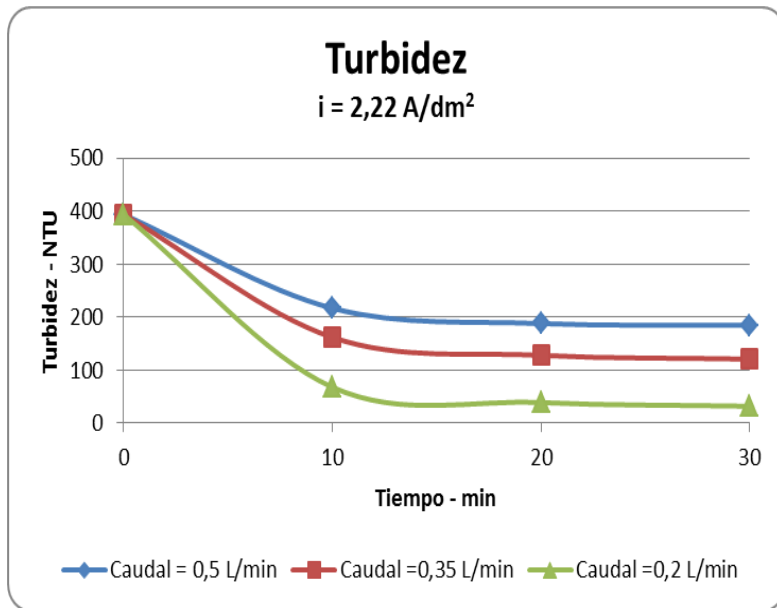


Figura 5.54. Turbidez vs Tiempo – $i = 2,22 \text{ A/dm}^2$ a Caudal = 0,5; 0,35 y 0,2 L/min.

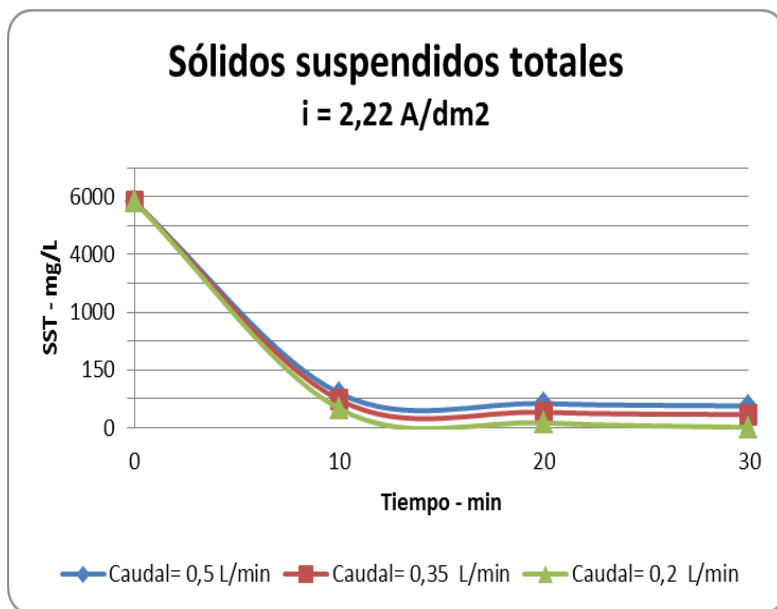


Figura 5.55. Sólidos suspendidos totales vs Tiempo – $i = 3,33 \text{ A/dm}^2$ a $Q = 0,5; 0,35$ y $0,2 \text{ L/min}$.

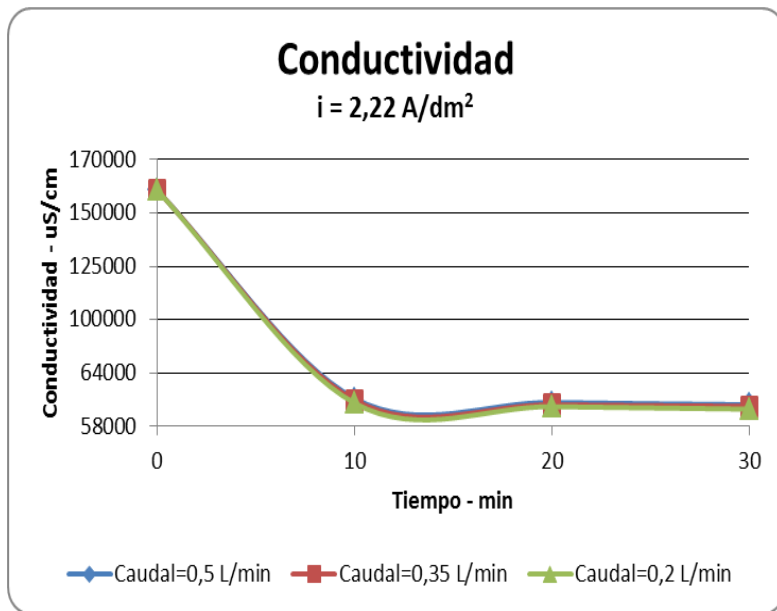


Figura 5.56. Conductividad vs Tiempo – $i = 3,33 \text{ A/dm}^2$ a $Q = 0,5; 0,35$ y $0,2 \text{ L/min}$.

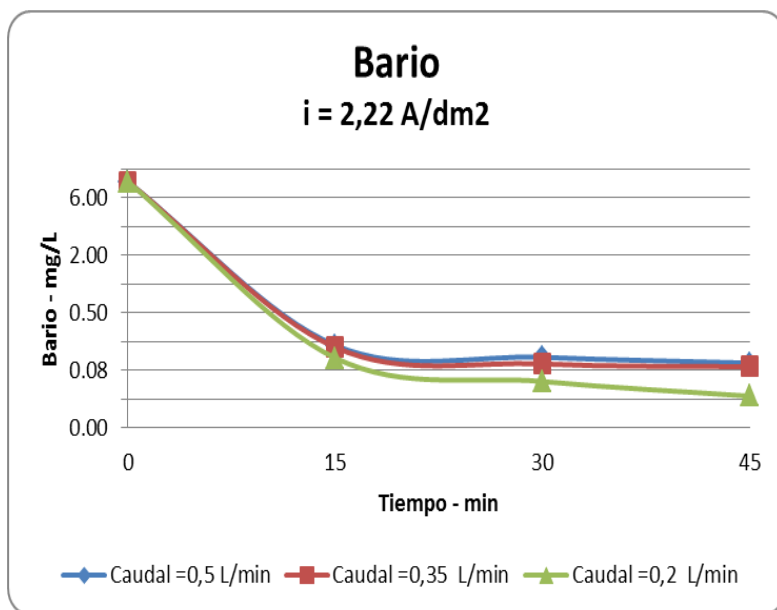


Figura 5.57. Bario vs Tiempo – $i = 3,33 \text{ A/dm}^2$ a $Q = 0,5; 0,35$ y $0,2 \text{ L/min}$.

Como se puede apreciar en las figuras 5.50, 5.51 y 5.52. Al comparar los porcentajes de remoción para las diferentes densidades de corriente se obtuvo altos valores a las densidades de 2,22 y 3,33 A/dm² para ambos caudales (0,5 y 0,2 L/min), sin embargo a valores de 2,22 A/dm² la remoción lograda es cercana a los valores obtenidos en 3,33 A/dm², Es por esta razón que se decidió considerar sola la evaluación de la influencia del caudal a la densidad de 2,22 A/dm² ya que logró un porcentaje de remoción importante de los parámetros a analizar y por su menor consumo de energía eléctrica. El efecto de las condiciones de flujo en la electrocoagulación y la eficiencia que produce en el proceso presenta la influencia de este parámetro para el tratamiento del efluente, se muestra en la figura 5.58.

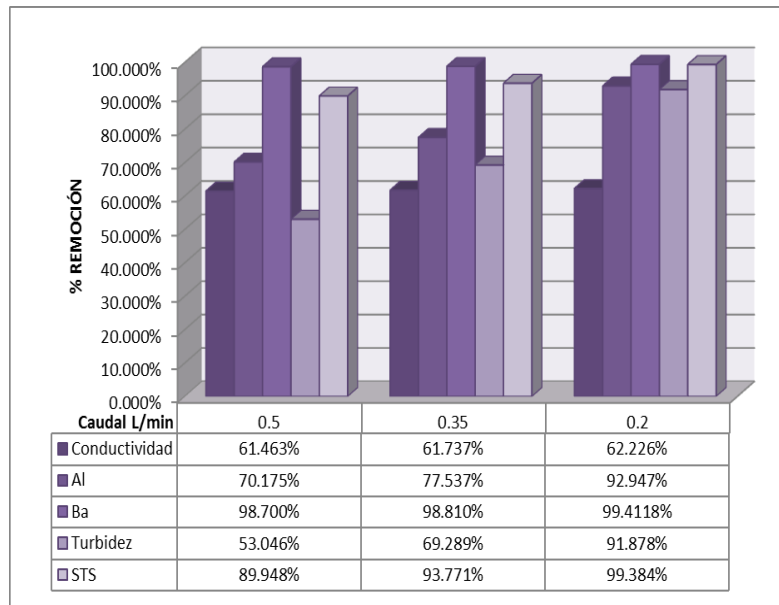


Figura 5.58. Porcentaje de remoción vs Caudales aplicando la densidad de corriente de 2.22 A/dm².

El progreso de electrocoagulación muestra que en la eliminación de Conductividad, turbidez, aluminio, bario, sólidos totales suspendidos es ligeramente mejor en bajas velocidades de flujo. Este resultado podría explicarse por el hecho de que la convección constante permitido por las tasas de flujo más altas mejora la tasa del fenómeno de transporte y traslado de las distintas especies en la celda electroquímica. Además, una menor velocidad de flujo induce a un mayor número de interacciones con las especies coagulantes y las partículas coloidales, mejorando así la coagulación en un periodo mayor de tiempo. Sin embargo, se observó que el efecto de tipo de flujo en la reducción de la conductividad fue menos significativo para el valor de densidad de corriente de 2,22 A/dm². Adema la turbidez muestra una diferencia marcada con el cambio de caudal, esto revela el efecto sinérgico de: (i) la disolución del ánodo, formando Al³⁺ y que permite la coagulación, (ii) los fenómenos de transferencia por convección difusión, y (iii) los fenómenos de Coagulación. Adicional, la influencia de la reducción de la velocidad de flujo en la remoción de SST fue más significativa a 2,22 A/dm².

5.6. Sistema por lotes vs Sistema Continuo

Al comparar los porcentajes de remociones (proceso seleccionado como eficiente) obtenidas en el sistema por lotes (2,22 A/dm² y 15 minutos de operación con electrodos de aluminio) con las del sistema continuo (2,22 A/dm² , caudal de operación de 0,2 L/s, tiempo de residencia de 20 minutos y electrodos de aluminio) se observa el siguiente comportamiento.

Tabla 5.1. Porcentajes de Remoción en Sistema Lotes y Sistema Continuo

A/dm ²	2.22	
SISTEMA	LOTES	CONTINUO
pH	8.86	8.44
Conductividad	61.81%	62.23%
SST	97.38%	99.38%
Turbidez	90.10%	91.88%
Aluminio	87.71%	92.95%
Boro	38.67%	39.43%
Bario	99.17%	99.41%
Calcio	62.52%	65.18%
Cobre	83.54%	89.87%
Hierro	98.53%	99.88%
Potasio	61.00%	66.25%
Litio	35.23%	36.93%
Magnesio	55.72%	57.18%
Manganeso	84.40%	85.06%
Sodio	64.69%	64.86%
Níquel	88.72%	89.02%
Sílice	93.14%	97.85%
Estroncio	44.60%	44.68%
Zinc	96.89%	97.67%

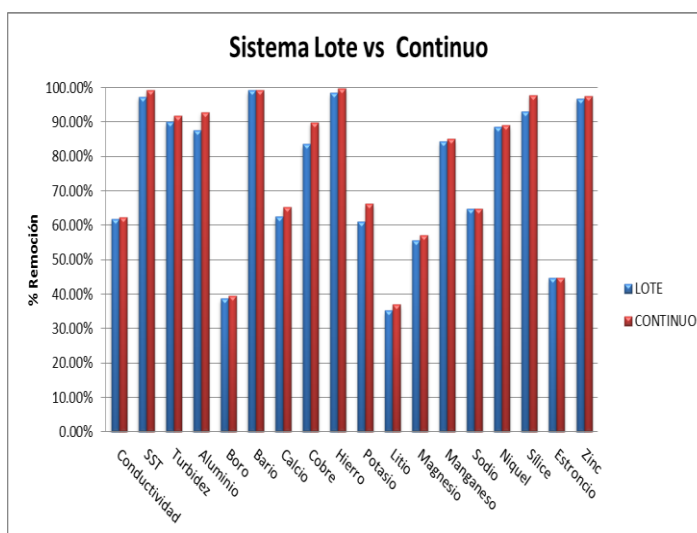


Fig. 5.53. Comportamiento de los parámetros sistema por lotes – sistema continuo

En la comparación del sistema continuo con el batch se observa que las remociones del conjunto de parámetros medidos son muy similares, alcanzando valores de diferenciación mayores para el sistema continuo, sobre todo esto es más notorio en parámetros como SST – 99,38%, turbidez – 91,88% , aluminio – 92,95% y sílice – 97,85%, dentro de los cuales son de interés. No se puede decir que hay una única elección para todos los casos de tratamiento. La elección dependerá de:

1. Caudal y tipo de caudal (continuo o discontinuo)
2. Carga contaminante del agua a tratar
3. Espacio necesario para la planta
4. Rendimiento requerido del tratamiento
5. Costes de mantenimiento
6. Inversión inicial para obra

Y por otro lado, a la hora de elegir la tecnología, también son deseables las características siguientes:

1. Fácil manejo y seguimiento de la instalación
2. Poco espacio necesario para la instalación
3. Muy poco mantenimiento
4. Tratamientos capaces de garantizar rendimientos del 70 al 85%
5. Gasto reducido de energía
6. Inversión inicial razonable

Para el efluente de estudio existe en este caso una gran ventaja de tratamiento por sistema continuo sobre sistema por lotes por las condiciones antes mencionada.

CAPITULO VI

VI.COSTOS DE IMPLEMENTACION A ESCALA INDUSTRIAL

La técnica mediante el proceso de electrocoagulación para el tratamiento del efluente ha demostrado ampliamente buenos resultados, obtenidos a escala de laboratorio bajo condiciones controladas y bien definidas. El siguiente paso para la aplicación de esta tecnología en tratamiento de efluentes, procedentes de lodo de pozos de perforación, es la elaboración del presupuesto para la construcción de una planta de tratamiento de electrocoagulación de acuerdo a los requerimientos de la industria actual. Por lo general, la actividad de perforación se realiza durante 2 meses de operación en los cuales se generan los efluentes de estudio, en ese sentido el enfoque de los costos se plantea para el periodo de duración de las operaciones y las necesidades de consumo en el tratamiento del proceso de electrocoagulación. El presente capítulo detalla el dimensionamiento del reactor a escala industrial con capacidad de 220 barriles por día, producción promedio, conservando constante el tiempo de residencia del reactor piloto a la escala industrial. Se determina el número de electrodos (ánodos y cátodos) manteniendo constante la distancia entre ellos, la distancia a escala industrial es igual a la distancia entre los electrodos a escala piloto, y definir las dimensiones de la superficie activa de los electrodos. También, se evalúa el consumo energético por volumen de efluente tratado para los 2 meses de operaciones, para la evaluación se trabaja con el voltaje y densidad de corriente óptimas del sistema continuo. Se estima el consumo de Aluminio con el fin de conocer el requerimiento de planchas de Aluminio en los 2 meses de actividad. Y, finalmente, se incluye el filtro prensa para el sistema de filtración.

6.1. Dimensionamiento del reactor electroquímico industrial

El dimensionamiento del reactor para el sistema de electrocoagulación en flujo continuo responde a la producción promedio de 220 barriles por día de agua residual que se genera en

la actividad de perforación, durante los 2 meses aproximadamente. Los resultados a escala piloto se utilizan como base para el dimensionamiento del reactor a escala industrial. El tiempo de residencia del efluente en el reactor y el incremento del volumen como consecuencia de la formación de espuma durante el proceso son factores que se consideran para la ponderación del tamaño del reactor industrial.

6.1.1. Caudal de pozo real

Durante las operaciones de perforación, la producción promedio diaria es de 220 barriles de efluente a tratar, lo que lo que equivale a:

—

6.1.2. Volumen del reactor industrial

De los resultados experimentales del sistema continuo, a partir del caudal óptimo y el volumen del reactor piloto se obtiene el tiempo de residencia promedio como la división del caudal entre el volumen del reactor:

Caudal óptimo: —

Volumen de reactor piloto: 4 Litros

Por lo tanto: **Tiempo de residencia: 0,33 h**

El volumen del reactor industrial se calcula del producto del tiempo de residencia por el caudal del efluente a nivel industrial, por lo tanto:

Volumen de reactor: 0,5 m³

De acuerdo a la formación de espuma y flotación de los contaminantes durante el proceso. Además, debido a la comercialización de las planchas de hierro, aluminio y PVC a medidas establecidas por el mercado, se establece un factor de 0,8 como incremento al volumen del reactor.

Por lo tanto, el volumen del reactor industrial será:

Volumen del reactor industrial: $0,9 \text{ m}^3$

Y, las dimensiones del reactor industrial serán:

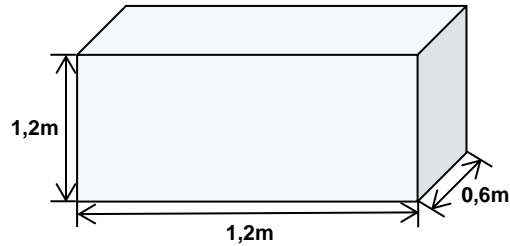


Figura 6.1. Dimensiones del reactor a escala industrial.

Para la construcción del reactor se utilizará planchas de hierro ($2,4\text{m} \times 1,2\text{m} \times 9\text{mm}$) recubiertas en el interior del reactor con planchas de PVC ($2,4\text{m} \times 1,2\text{m} \times 9,5\text{mm}$).

6.2. Número de electrodos

La cantidad de electrodos que pueden caber a una determinada longitud de reactor depende del espesor de la plancha de Aluminio y la distancia de electrodo a electrodo. La expresión matemática de lo antes dicho se representa por:

$$(NE - 1) \quad (6.1)$$

Dónde:

L: Largo del reactor industrial (1,2 m)

ε : Espesor de la plancha de Aluminio (5,0 mm)

δ : Distancia entre electrodos (3,0 cm)

NE: Número de electrodos

Reemplazando los datos en la ecuación anterior y resolviéndola, se obtiene:

$$\mathbf{NE = 33 \text{ electrodos}}$$

El total de los electrodos en el reactor es de 33, cuya distribución es: 17 cátodos y 16 ánodos. Las dimensiones de cada electrodo es 5,0mm x 1,0m x 0,5m. Los electrodos se fabrican a partir de planchas de Aluminio (3mx1mx5mm). El área de cada electrodo es 0,5 m², entonces el área anódica global es 16 m².

6.3. Intensidad de corriente

A partir de los resultados experimentales para el sistema continuo, la densidad de corriente con mejores niveles de remoción fue y, por lo cual, se usará para el dimensionamiento y consumo energético para la implementación industrial:

$$A/dm$$

Por lo tanto, la intensidad de corriente a nivel industrial será el producto de la densidad de corriente por el área global anódica:

Intensidad de corriente: 3 555 A

Potencia: 12.0 kW

6.4. Energía consumida por volumen de efluente tratado

La estimación de la energía consumida por volumen de efluente tratado se calcula mediante la división de la potencia en el reactor industrial entre el caudal del efluente que es tratado. Se mantiene constante el voltaje y es igual al valor del voltaje a escala piloto. Finalmente, la expresión matemática es:

$$\text{—————} \quad (6.2)$$

Dónde:

E: Energía consumida por volumen de efluente tratado (KWh/m³)

I: Intensidad de corriente (3 555 A)

V: Voltaje (3,2 voltios)

Q: Caudal del efluente tratado (1,5 m³/h)

Después de reemplazar los datos, se tiene que la energía es:

—————

de perforación de un pozo petrolero. El presupuesto considera el costo de los equipos y materiales necesarios para la ejecución del proceso de tratamiento de electrocoagulación: Rectificador, material para la construcción del reactor industrial, el filtro prensa para el sistema de filtración y las planchas de Aluminio estimadas para el consumo de los electrodos durante el periodo de operación de perforación. Adicionalmente, se incluye el costo de la energía eléctrica consumida para el total de los efluentes a tratar electroquímicamente, efluentes generados durante los 2 meses de operaciones. Se tomó como precio base (7,15 \$/KWh), costo actualizado por la empresa de distribución Luz del Sur S.A.A. al 04 de julio de 2013 en la región de Lima. En otros términos y como información adicional, el costo del tratamiento por metro cúbico de efluente tratado sería de 56,4 \$/m³.

Tabla 6.1. Presupuesto del costo para el sistema de tratamiento de electrocoagulación de flujo continuo a escala industrial.

Nº	Descripción	Unidad	Cant	Precio unitario (\$) (*)	Precio total parcial (\$)
1	Rectificador (5 000 A – 20 V)	Unid.	1	25 000	25 000
2	Plancha Aluminio 3mx1mx5mm	Unid.	55	360	19 800
3	Plancha Acero 2,4mx1,2mx9mm	Unid.	5	200	1 000
4	Plancha PVC 2,4mx1,2mx9.5m	Unid.	5	468	2 340
5	Filtro prensa	Unid.	1	10 000	10 000
6	Energía eléctrica	KWh		7,1	117 000
COSTO TOTAL					175 140

(*) Precios cotizados a julio de 2013.

CAPITULO VII

VII. CONCLUSIONES

1. Los niveles de remoción de los contaminantes aumentan a medida que se incrementa la densidad de corriente, ya que está relacionada con la velocidad de las reacciones electroquímicas, y por tanto, con la disolución del ánodo. Por lo que a mayor dosificación de Al, se hidroliza para iniciar la desestabilización y neutralización de los coloides, cambiando de forma significativa el valor de pH (aumenta) durante la dosificación electroquímica, dado que este proceso da lugar a la formación de hidróxido de aluminio como producto neto final.
2. El proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio ha sido empleado con éxito. Estos han demostrado excelente performance para el tratamiento del agua residual procedente de un lodo de perforación, gracias a la gran capacidad de hidrólisis del Al y a la facultad de generar polímeros o especies hidrolizadas que se agregan y forman los coágulos.
3. Para el sistema de electrocoagulación por lotes, los parámetros óptimos de operación que se eligieron son: La densidad de corriente de 2,22 A/dm² y el tiempo de proceso óptimo de 30 minutos. Para los objetivos planteados se alcanza niveles de remoción superiores en comparación con la densidad de corriente de 3,33 A/dm²; por otro lado, se tiene en cuenta el ahorro de energía que significa trabajar con menor corriente durante el proceso.
4. De acuerdo a las condiciones óptimas establecidas para el sistema por lotes se obtuvieron %remoción de los metales pesados Al y Ba alcanzado 87,86% y 99,41%, respectivamente. La turbidez del efluente disminuyó hasta los 26,0 NTU (93.40% de remoción), los

sólidos suspendidos totales del agua residual alcanzaron notablemente el nivel del 98,93% de remoción. La conductividad del agua de pozo de perforación luego del tratamiento electroquímico, a las condiciones controladas de 2,22 A/dm² y 30 minutos, disminuye hasta el 59,11% de su valor inicial.

5. Para el sistema de electrocoagulación en continuo, los parámetros óptimos de operación que se eligieron son: La densidad de corriente de 2,22 A/dm² y el caudal de proceso óptimo de 0,2 L/min, alcanzado la estabilidad en periodo de 20 min, considerando que a 3,33 A/dm² la densidad de corriente aplicada disminuye la eficacia de corriente referida a la oxidación del Al y aumenta el consumo específico de energía como consecuencia del mayor peso de las reacciones secundarias.
6. De acuerdo a las condiciones óptimas establecidas para el sistema continuo se obtuvieron en estado estacionario a niveles de %remoción de metales pesados: Al y Ba alcanzado 92,95 % y 99,41 %, respectivamente. La turbidez del efluente disminuyó hasta los 26,0 NTU (91,88% de remoción), los sólidos suspendidos totales del agua residual alcanzaron notablemente el nivel del 99,38 % de remoción. La conductividad del agua de pozo de perforación luego del tratamiento electroquímico, a las condiciones controladas de 2,22 A/dm² y 30 minutos, disminuye hasta el 62,23 % de su valor inicial.
7. Durante el tratamiento, el rango de pH (7-9) que logró el efluente a las condiciones óptimas por lote (2,22 A/dm² - 30 minutos) y continuo (2,22 A/dm² – 0,2 L/min) favorece al proceso de electrocoagulación. Ya que beneficia a las especies con carga negativa hidrolizadas a partir del Al y dan paso al proceso de electrocoagulación.
8. El proceso de electrocoagulación es válida y aplicable para el tratamiento de agua residual estudiada (efluente proveniente de lodos de perforación) por lo cual se obtuvo una primera aproximación

para determinar los parámetros de eficacia. Los resultados obtenidos en el sistema de tratamiento de electrocoagulación por lotes así como continuo, demuestran altos niveles de remoción a condiciones controladas para el efluente.

CAPITULO VIII

VIII. RECOMENDACIONES

8.1. Recomendaciones para el proceso experimental del tratamiento de electrocoagulación

1. Se recomienda soldar y lijar los terminales de conexión eléctrica para evitar falsos contactos durante la experiencia, disminuir la resistencia eléctrica en los electrodos, ya que estos se cubren con óxidos y sólidos flotantes secos, asegurando el paso de la corriente y, por ende, garantizar el funcionamiento adecuado del tratamiento durante todo el proceso.
2. Se propone implementar un sistema que facilite el retiro de los flóculos que logran flotar en la superficie del efluente, como consecuencia del acarreo de los mismos por la generación de gases durante el proceso de electrocoagulación, con el fin de destinarlos directamente al sistema de filtración para finalmente disponerlos.
3. Se sugiere establecer el periodo o tiempo de uso para los electrodos, debido a que durante el proceso el cátodo se pasiva por la reducción de algunos metales en su cercanía sobre su superficie, por otro lado el ánodo se consume gradualmente como consecuencia de la electrodisolución y necesita ser reemplazado para continuar con el tratamiento de electrocoagulación con el fin de conservar las condiciones de trabajo en todas las experiencias realizadas.
4. El proceso de electrocoagulación requiere la homogenización del efluente en el reactor, por lo que se propone la implementación de un sistema de agitación que ayude a la homogenización

durante el proceso, mejorando la performance del tratamiento del efluente con el fin de elevar los niveles de remoción.

5. Se recomienda tener en consideración para el diseño del reactor en ambos sistemas, contar con una salida adicional en el fondo del reactor para retirar los flóculos sedimentados, de esta forma se evita detener el proceso por motivos de limpieza, permitiendo establecer las condiciones de operación en escala piloto.
6. Se propone el cambio de la polarización de los electrodos como alternativa para el uso adecuado de los mismos. Para una futura implementación se sugiere la aplicación de esta técnica para reducir costos operativos ya que minimiza la pasivación de los cátodos y los hace participe en la disolución electroquímica cuando se comportan como ánodos.
7. Con el objetivo de analizar resultados y observar oportunidades de mejora, se sugiere para futuros estudios probar con las configuraciones en serie para un sistema de tratamiento por lotes. Aplicando la distancia entre electrodos se definió bajo la sugiere la recomendación de un trabajo previo como recomendando los experimentos, por lo que sería importante experimentar con diferentes distancias entre electrodos y analizar los resultados, así como las observaciones.

8.2. Manejo y disposición de flóculos luego del EC

Con respecto al manejo y la disposición final de los sólidos que se obtienen como subproducto del tratamiento electroquímico. Este procedimiento permite realizar un manejo adecuado y seguro de los desechos sólidos a lo largo de la operación, optimizando la disposición, y minimizando el impacto ambiental asociado. El manejo y disposición final de los desechos sólidos debe de estar en concordancia con lo establecido en el EIA. Se

recomienda suministrar un sistema de manejo y disposición de sólidos de acuerdo a lo establecido en el PMA (RD 057-2010-MEM-AAE). Todos los cortes o sólidos de perforación provenientes de los equipos de control de sólidos y los generados por el tratamiento de electrocoagulación pueden ser recolectados y transportados a través de un sistema de tornillos y descargados en el equipo de transporte neumático. Los desechos sólidos serán mezclados con tierra del mismo hueco. Una retroexcavadora con orugas abrirá las celdas, mezclará los desechos sólidos y tamará la celda. La mezcla estabilizada en proporción 1:1 con el suelo nativo, permite la inmovilización de los constituyentes de los desechos y el fácil transporte hacia las celdas previamente construidas. Las celdas tendrán un tamaño de 4-5 m x 4-5 m x 4-5 m. La disposición a través de celdas depende del nivel freático y de los niveles de pluviosidad en la zona. Si el nivel freático es profundo y se pueden hacer celdas más profundas el área efectiva se reducirá en algunos casos hasta un 70%. El principal objetivo será mantener las celdas libres de líquidos y los cortes secos. En estas celdas se almacenan y mezclan los cortes con tierra nativa hasta obtener una consistencia adecuada para realizar el taponamiento final de dicha celda. La longitud de la celda dependerá del espacio disponible y las condiciones climáticas.



Fig. 8.1. Construcción de celdas de remediación de suelos

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Ley N° 17752, publicada el 24 de julio de 1969.
- [2] DS N° 261-69-AP, publicado el 12 de diciembre de 1969.
- [3] Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud (DIGESA).
- [4] Olphen, N.; 1977; Introduction to clay colloid chemistry; New York, Interscience.
- [5] Marshall, C.E.; 1949; The colloid chemistry of the silicate minerals; New York, Academic Press.
- [6] Jackson, M.L.; 1965; Chemical composition of soils; In BEAR, F.E. ed. Chemistry of the soil. 2ed; New York, Reinhold.
- [7] Skoog, Douglas; West, Donald; 1992; Química Analítica; México DF; Editorial Mc Graw Hill.
- [8] Kirchmer, C.; Pérez Carrión, J;1981; Coagulación. Programa Regional OPS/HPE/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
- [9] Rivas, G.; 1981; Tratamiento del agua residual. Universidad de Michigan, USA.
- [10] Arboleda Valencia, Jorge; 2000; Teoría y práctica de la purificación del agua; Bogotá; Mc Graw Hill. Tomo I.

- [11] Metcalf & Eddy; 1996; Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización; Tomo I; México; Editorial Mc Graw Hill.
- [12] David, Harvey; 2002; Química Analítica Moderna; México; Ed. Mc. Graw Hill.
- [13] Burriel, L.; Arribas, J.; Hernández, M.; 1989; Química Analítica Cualitativa. Ed. Paraninfo.
- [14] Wesolowski, D.J.; Palmer, D.A.; 1994; Aluminum speciation and equilibria in aqueous solution: V. Gibbsite solubility at 50°C and pH 3.9 in 0.1 molal NaCl solutions (a general model for aluminum speciation; analytical methods). *Geochimica et Cosmochimica Acta*.
- [15] Comninellis, C.; Chen, G.; 2010; *Electrochemistry for the Environment*; London; Springer.
- [16] Chen, G. H.; 2004; *Electrochemical technologies in waste water treatment*. *Sep. Purif. Technol.*
- [17] Chen, X.; Chen, G. H.; Yue, P.L.; 2000; Separation of pollutants from restaurant waste water by electrocoagulation. *Sep. Purif. Technol.*
- [18] Jiang, J. Q.; Graham, N.; Andre, C.; Kelsall, G. H.; Brandon, N.; 2002; Laboratory study of electrocoagulation–flotation for water treatment. *Water Res.*
- [19] Kul'skii, L. A.; Strokach, P. P.; Slipchenko, VA.; Saigak, E.I.; 1978; *Water Purification by Electrocoagulation*, Budivel'nik, Kiev.

- [20] Szpyrkowicz, L.; 2007; Hydrodynamic effects on the performance of electrocoagulation/ electroflotation for the removal of dyes from textile waste water. *Ind. Eng. Chem. Res.*
- [21] Mollah, M.Y.A.; Morkovsky, P.; Gomes, J.A.G.; Kesmez, M.; Parga, J.R.; Cocke, D.L.; 2004; Fundamentals present and future perspectives of electrocoagulation; *Journal of Hazardous Materials.*
- [22] Escobar, C.; Soto Salazar, C.; Toral, M. I.; 2006; Optimization of the electrocoagulation process for the removal of copper, lead and cadmium in natural waters and simulated wastewater, *Journal of Environmental Management.*
- [23] Matteson, M. J.; Dobson, R. L.; Glenn, R. W. J.; Kukunoor, N. S.; Waits, W. H. I.; Clayfield, E. J.; 1995; Electrocoagulation and separation of aqueous suspensions of ultrafine particles.
- [24] Khemis, M.; Leclerc, J.P.; Tanguy, G.; Valentin, G.; Lapique, F.; 2006; Treatment of industrial liquid wastes by electrocoagulation: Experimental investigations and an overall interpretation model, *Chemical Engineering Science.*
- [25] Mollah, M.Y.A.; Schennach, R.; Parga, J.R.; Cocke, D.L.; 2001; Electrocoagulation (EC), science and applications; *Journal of Hazardous Materials.*
- [26] Chen, G.; 2004; Electrochemical technologies in wastewater treatment; *Separation purification technology.*
- [27] Yildiz, Y. S.; Koparal, A. S.; Irdemez, S.; Keskinler, B.; 2007; Electrocoagulation of synthetically prepared waters containing high concentration of NOM using iron cast electrodes.

- [28] Johnson, P. N.; Amirtharajah, A.; 1983; Ferric chloride and alum as single and dual coagulants. Journal of the American Water Works Association, vol. 75.
- [29] Vassos, Basi; Ewing, Galen; 1980; Electroquímica Analítica; México DF; Editorial Limusa.
- [30] Martínez, Sergio A.; 1990; Tratamiento Electrolítico de Efluentes; México; Revista del Instituto Mexicano del Petróleo. Vol. 22 No.2.
- [31] Sawyer, C.; McCarty, P.; Parkin, G.; 2000; Química para ingeniería ambiental; Bogotá- Colombia; Ed. McGraw Hill.
- [32] Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR); 2008; Reseña Toxicológica del Aluminio; Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU.; Servicio de Salud Pública.
- [33] Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR); 2007; Reseña Toxicológica del Bario y Compuestos de Bario; Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU.; Servicio de Salud Pública.
- [34] Hernán Ramos, J.; Curso de Capacitación y desarrollo de habilidades en actividades de perforación y mantenimiento de pozos.
- [35] Millheim, K.K.; 1979; Directional drilling; Oil and Gas Journal.
- [36] Bourgoyne Jr., A.T.; Chenevert, M. E.; Milheim, K. K; Young Jr., F. S.; Applied Drilling Engineering; SPE Textbook series.
- [37] T H HILL ASSOCIATES, Inc. Standar DS-1; 1996; Drill Stem Design and Inspection; Third Edition.

- [38] Gilmour, Alan; Senior Technical Advisor; Drilling Waste Management; Dewatering Manual Cap: Dewatering Systems; pag. : 71 – 80.
- [39] Solids control handbook; 1998; Dowell ITM-1158; Schlumberger; pag.: 3 – 23.
- [40] Drilling Fluids Processing Handbook; 1998; Dowell ITM-1158; Schlumberger; pag: 19-54.
- [41] Programa de fluidos de perforación Pozo Bretaña Norte 95-2-1XD; 2013; Baker Hughes.
- [42] Fluidos – Manual de ingeniería; Cap I: Producto aplicaciones y pruebas, pág.: 12 – 23; Cap II: Sistema de fluidos base agua, pág.: 34 – 48; Baker Hughes INTEQ - 008902097S Rev. B, 1998.

FUENTES DE INFORMACION

1. <http://www.minem.gob.pe>
2. <http://www.minam.gob.pe>
3. <http://www.ana.gob.pe>
4. <http://www.bakerhughes.com>
5. <http://www.grantierra.com/operations/peru>
6. <http://www.acs.org/content/acs/en/publications.html>
7. <http://www.electrochem.org/>
8. <http://omicron.ch.tuiasi.ro/EEMJ/>
9. <http://www.aaees.org/publications-environmentalengineerandscientist.php>
10. <http://www.atsdr.cdc.gov/es>