

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS



**“APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELECTROCOAGULACIÓN AL
EFLUENTE DE LA PLANTA PILOTO DE LECHE “LA MOLINA””**

Presentada por:

David Jefferson Velásquez Flores

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Lima – Perú

2017

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELECTROCOAGULACIÓN AL
EFLUENTE DE LA PLANTA PILOTO DE LECHE “LA MOLINA””**

Presentada por:

David Jefferson Velásquez Flores

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Ph. D. Lizardo Visitación Figueroa
PRESIDENTE

Dra. Rosemary Vela Cardich
MIEMBRO

Mg. Sc. Wilfredo Baldeón Quispe
MIEMBRO

Ing. Lawrence Quipuzco Ushñahua
ASESOR

Esta investigación se la dedico a mi familia, que siempre está conmigo en los momentos más importantes de mi vida.

INDICE GENERAL

RESUMEN	I
SUMMARY	II
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION	2
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	2
III. REVISION DE LITERATURA	3
3.1. EFLUENTE DE LA INDUSTRIA LÁCTEA	3
3.2. ACTIVIDADES PRODUCTICAS EN LA PLANTA PILOTO DE LECHE	
UNALM	4
3.2.1. Elaboración de queso	5
3.2.2. Elaboración de yogurt	5
3.2.3. Embolsado de leche.....	6
3.3. TIPOS DE PARTÍCULAS SÓLIDAS EN EL AGUA.....	6
3.4. COLOIDES.....	6
3.4.1. Estabilidad de los coloides	7
3.4.2. Fuerzas que intervienen en los coloides.....	7
3.4.3. Capa doble en los coloides	8
3.5. ELECTROCOAGULACIÓN	8
3.5.1. Reacciones principales	9
3.5.2. Reacciones secundarias	10
3.6. FORMACION DEL COAGULANTE	11
3.7. MECANISMO DE DESESTABILIZACIÓN DE COLOIDES	13

3.7.1. Compresión de la capa doble	13
3.7.2. Desestabilización por adsorción.....	13
3.7.3. Captura en un precipitado de hidróxido metálico o captura por barrido.....	13
3.7.4. Puente entre partículas	14
3.8. EFECTIVIDAD DE LA COAGULACIÓN	14
3.9. FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN.....	14
3.9.1. Densidad de corriente.....	14
3.9.2. Arreglo de los electrodos	15
3.9.3. Presencia de cloruro de sodio.....	17
3.9.4. Efecto del pH.....	17
3.9.5. Pasivación de los electrodos.....	18
3.9.6. Efecto del tiempo de retención en el reactor	18
3.9.7. Temperatura	18
3.10. TIPOS DE REACTORES.....	19
3.10.1. Tipo batch.....	19
3.11. NORMATIVA NACIONAL	20
3.11.1. Valores máximos admisibles.....	20
3.12. NORMATIVA INTERNACIONAL	21
3.13. ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN	22
3.14. PRUEBAS ESTADÍSTICAS	26
3.14.1. Prueba de Kruskal-wallis	26
3.14.2. Prueba de Friedman.....	26
IV. MATERIALES Y METODOS	28
4.1. CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE DE LA PLANTA DE LECHE.....	28
4.1.1. Materiales	28
4.1.2. Metodología	29
4.2. ARMADO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN	30
4.2.1. Materiales	30

4.2.2. Metodología	31
4.3. DETERMINACIÓN DE LOS MEJORES PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACION	34
4.3.1. Materiales	35
4.3.2. Metodología	35
4.4. CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE TRAS LA ELECTROCOAGULACIÓN ..	36
4.4.1. Materiales	37
4.4.2. Metodología	38
4.5. CONSUMO ELÉCTRICO	38
V. RESULTADOS Y DISCUSIONES	39
5.1. CARACTERIZACION DEL EFLUENTE DE LA PLANTA DE LECHE	39
5.2. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO Y LA INTENSIDAD DE CORRIENTE	41
5.2.1. Prueba de Friedman.....	45
5.3. DETERMINACIÓN DEL PH	48
5.3.1. Prueba de Kruskal-Wallis	51
5.4. APLICACIÓN DEL METODO DE ELECTROCOAGULACION.....	52
5.4.1. DQO	54
5.4.2. DBO ₅	55
5.4.3. PH.....	56
5.4.4. Nitrógeno amoniacal	56
5.4.5. Fósforo total	58
5.4.6. Aceites y grasas.....	59
5.4.7. Aluminio	60
5.4.8. Sólidos suspendidos totales.....	61
5.4.9. Sólidos sedimentables	62
5.4.10. Temperatura	63
5.5. CONSUMO DE ENERGÍA.....	63

VI. CONCLUSIONES	64
VII. RECOMENDACIONES.....	65
VIII. BIBLIOGRAFÍA	66
IX.ANEXOS.....	70

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Composición del efluente generado por la industria láctea	4
Cuadro 2: Valores máximos admisibles para descargas al sistema de alcantarillado	21
Cuadro 3: Valores recomendables en el efluente de la industria láctea	22
Cuadro 4: Metodologías usadas para el análisis de los parámetros.....	30
Cuadro 5: Caracterización de los parámetros in situ del efluente de la planta de leche.....	40
Cuadro 6: Composición del efluente de la planta de leche.....	40
Cuadro 7: Caracterización de los parámetros de laboratorio monitoreo 1	41
Cuadro 8: Caracterización de los parámetros de laboratorio monitoreo 2	41
Cuadro 9: Promedios de remoción de la turbidez.....	42
Cuadro 10: Comparación por pares-tiempo.....	46
Cuadro 11: Mediana de remoción de turbidez según el tiempo	47
Cuadro 12: Comparación por pares-corriente	48
Cuadro 13: Mediana remoción de turbidez según la corriente	48
Cuadro 14: Porcentaje de remoción de turbidez a distintos valores de pH	49
Cuadro 15: Variación del pH al finalizar la prueba de electrocoagulación.....	51
Cuadro 16: Resultados prueba Kruskal-Wallis (Minitab)	51
Cuadro 17: Resultados de la caracterización del efluente sin tratar y el efluente tratado	54

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Doble capa de los coloides.....	8
Figura 2: Reacciones en el electrocoagulador	10
Figura 3: Diagrama de especies de aluminio.....	12
Figura 4: Arreglo monopolar conectado en paralelo	16
Figura 5: Arreglo monopolar conectado en serie	16
Figura 6: Arreglo bipolar conectado en paralelo	17
Figura 7: Investigaciones previas en electrocoagulación	23
Figura 8: Cubeta de vidrio	31
Figura 9: Electroodos	33
Figura 10: Sistema de electrocoagulación	34
Figura 11: Punto de monitoreo	39
Figura 12: Histograma de remoción de turbidez a una corriente de 1A.....	42
Figura 13: Histograma de remoción de turbidez a una corriente de 1.5A.....	43
Figura 14: Histograma de remoción de turbidez a una corriente de 2A.....	43
Figura 15: Histograma de remoción de turbidez a una corriente de 2.5A.....	44
Figura 16: Histograma de remoción de turbidez a una corriente de 3A.....	44
Figura 17: Comparación de los histogramas a los distintos valores de amperaje	45
Figura 18: Variación de la remoción de turbidez a distinto pH.....	50
Figura 19: Agua residual pH 3.5	50
Figura 20: Electrocoagulación del agua residual.....	52
Figura 21: Comparación del agua residual tratada y sin tratar	53
Figura 22: Valores de DQO antes y después del tratamiento.....	55
Figura 23: Valores de DBO ₅ antes y después del tratamiento.....	56
Figura 24: Valores de N-NH ₃ antes y después del tratamiento	58
Figura 25: Valores de fósforo total antes y después del tratamiento.....	58
Figura 26: Distribución de las especies de fosforo conforme al pH.....	59
Figura 27: Valores aceites y grasas antes y después del tratamiento	60
Figura 28: Valores de aluminio antes y después del tratamiento	61
Figura 29: Valores de sólidos suspendidos totales antes y después del tratamiento	62
Figura 30: Valores de sólidos sedimentables antes y después del tratamiento	62
Figura 31: Vista frontal de la cubeta de vidrio	70

Figura 32: Vista lateral de la cubeta de vidrio.....	71
Figura 33: Soporte de placas	71

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: DIMENSIONES DE LA CUBETA DE VIDRIO	70
ANEXO 2: COMPORTAMIENTO DEL EFLUENTE DE LA PLANTA PILOTO DE LECHE	72
ANEXO 3: RESULTADOS DE LA DETERMINACION DE LOS MEJORES PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACION.....	74
ANEXO 4: ANALISIS ESTADISTICO	81
ANEXO 5: RESULTADOS DEL LABORATORIO ACREDITADO.....	86

RESUMEN

Con el objetivo de evaluar la mejor remoción por electrocoagulación de los principales contaminantes del efluente de la planta piloto de leche “La Molina” se construyó un electrocoagulador a escala laboratorio. La configuración usada fue de 6 pares de electrodos Al-Fe conectados en paralelo con una configuración bipolar a una fuente de alimentación de corriente continua; el electrodo de Al funcionó como ánodo y el electrodo Fe como cátodo. El electrocoagulador tuvo una configuración de batch capaz de tratar 5,6 L de aguas residuales. Las mejores condiciones operacionales se alcanzaron bajo un pH de 8,5, tiempo 30 minutos e intensidad de corriente 3A. Usando estos resultados como el escenario más eficiente, el electrocoagulador redujo 45% de DQO, 42% de DBO₅, 96.2% de fósforo total, sólidos suspendidos totales 78.8%, aceites y grasas más del 95%. Sin embargo, otros parámetros aumentaron como el nitrógeno amoniacal en 2.76 veces y el aluminio en 24.3. Además de generarse sólidos sedimentables que antes de aplicarse la electrocoagulación no había.

Palabras clave: electrocoagulador, pH, tiempo, corriente.

SUMMARY

In order to evaluate the best removal by electrocoagulation of the main contaminants of the effluent of the pilot plant of " La Molina ", a laboratory-scale electrocoagulator was constructed. The configuration used was 6 pairs of Al-Fe electrodes connected in parallel with a bipolar configuration to a DC power supply; The Al electrode functioned as anode and the Fe electrode as the cathode. The electrocoagulator had a batch configuration capable of treating 5.6 L of wastewater. The best operating conditions were achieved under a pH of 8.5, time 30 minutes and current intensity 3A. Using these results as the most efficient scenario, the electrocoagulator reduced 45% COD, 42% BOD5, 96.2% total phosphorus, total suspended solids 78.8%, oils and fats more than 95%. However, other parameters increased as ammoniacal nitrogen by 2.76 times and aluminum by 24.3 times. Furthermore sedimentable solids were generated which were not in the wastewater before electrocoagulation.

Keywords: electrocoagulator, pH, time, current.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua es uno de los principales problemas que afecta a la salud humana como a los ecosistemas. Para enfrentar esta problemática se han ido desarrollado un sin número de técnicas, pues una demanda de este recurso producto del crecimiento poblacional y un uso importante por parte de las industrias lo amerita. De este grupo de técnicas, las técnicas electrolíticas han resultado ser muy eficientes para el tratamiento de aguas residuales.

La electrocoagulación, técnica electrolítica aplicada en esta investigación, es una tecnología emergente que se conoce desde principios del siglo XX y ha sido aplicada en el tratamiento de diversas aguas residuales. La electrocoagulación es sugerida como una alternativa al uso de la coagulación química, ya que cumple todo lo que hace ésta e incluso genera una menor cantidad de lodos debido a que éstos no son tan húmedos. Sin embargo, la dependencia a una fuente de energía o el alto costo según el lugar puede generar inconvenientes al querer implementarse la electrocoagulación como sistema de tratamiento. Por ende esta tecnología no se ha desarrollado ampliamente y aun falta mucho por investigar sobre sus procesos y mecanismos.

Dentro de la Universidad Nacional Agraria La Molina se realizan varias actividades productivas, siendo la producción de yogurt, queso y leche dentro de la planta piloto de leche una gran problemática con respecto al agua. La elaboración de estos productos genera aguas residuales con alta carga orgánica que sobrepasa los Valores Máximo Admisibles normado por VIVIENDA, ya que no se realiza un tratamiento previo a su vertimiento. Lo cual convierte a este efluente en una fuente importante de contaminación y en una oportunidad para aplicar el método de electrocoagulación.

II. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la mejor remoción por electrocoagulación de los principales contaminantes del efluente de la planta piloto de leche “La Molina”.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar al efluente del agua residual de la planta piloto de leche “La Molina” con respecto a los siguientes parámetros: DBO₅, DQO, aceites y grasas, nitrógeno amoniacal, pH, aluminio, fósforo total, sólidos sedimentables y sólidos suspendidos totales.
- Determinar las mejores condiciones de funcionamiento del sistema de electrocoagulación a escala laboratorio con respecto a los parámetros de pH, corriente y tiempo.
- Caracterizar al efluente del agua residual tratada de la planta piloto de leche “La Molina” mediante el método de electrocoagulación con respecto a los siguientes parámetros: DBO₅, DQO, aceites y grasas, nitrógeno amoniacal, pH, aluminio, fósforo total, sólidos sedimentables y sólidos suspendidos totales.

III. REVISION DE LITERATURA

3.1. EFLUENTE DE LA INDUSTRIA LÁCTEA

En las centrales lecheras se producen diariamente una considerable cantidad de aguas residuales, que suele oscilar entre 4 y 10 L por cada litro de leche tratada. La mayor parte de estas aguas proceden de la limpieza de aparatos, maquinas y salas de tratamiento, por lo que contienen restos de productos lácteos y productos químicos (ácidos, álcalis, detergentes, desinfectantes) aunque también se vierten aguas de refrigeración que si, no se recuperan de forma adecuada pueden suponer hasta 2-3 veces la cantidad de leche que entra en la central. En estos residuos también quedan englobados los generados por los locales sociales, baños, etc. (Villena, 1995)

Las aguas residuales de las industrias de tratamiento de leche presentan las siguientes características generales:

- Alto nivel de DBO₅ y DQO, debido a la presencia de componentes de la leche.
- Presencia de aceites y grasas.
- Altas concentraciones de fósforo y nitratos, principalmente debidos a los productos de limpieza y desinfección.
- Presencia de sólidos en suspensión, principalmente en elaboración de quesos
- Conductividad elevada (especialmente en las empresas productoras de queso debido al vertido de cloruro sódico procedente del salado del queso)
- Valores puntuales de pH extremos, debidos a las operaciones de limpieza. Uso de ácidos y bases en las limpiezas.

El agua residual generada en la fabricación de quesos es posible que contengan cantidades apreciables de lactosuero, sobre todo salino, lo que, además de incrementar notablemente la carga contaminante, supone la pérdida de un subproducto de alto valor económico.

Es recomendable, por tanto, que se evite la incorporación del lactosuero al agua residual y que se destine a la obtención de sustancias aprovechables. (Escuela Organización Industrial, 2008). El Cuadro 1 muestra los distintos componentes que se pueden encontrar en el efluente de la industria láctea.

Cuadro 1: Composición del efluente generado por la industria láctea

Parámetro	Unidad	Leche de consumo	Quesos	Derivados lácteos	Helados
pH	Unidades de pH	8.5	6.9	8.5	8
DQO	mg/l	1775	4500	4000	925
DBO ₅	mg/l	1050	2750	1750	620
Sólidos en suspensión	mg/l	435	850	825	425
Fósforo	mg/l	20	35	6.25	5.5
Nitrógeno total Kjeldahl	mg/l	65	100	100	75
Conductividad	mS/cm	1.65	3.15	1.25	1.2
Cloruros	mg/l	140	50	100	135
Nitratos	mg/l	50	105	90	75
Nitritos	mg/l	10	35	0.2	0.3
Aceites y grasas	mg/l	105	365	110	25
Detergentes	mg/l	3.5	7	7.5	6

FUENTE: Escuela Organizacional Industrial, (2008).

3.2. ACTIVIDADES PRODUCTIVAS EN LA PLANTA PILOTO DE LECHE UNALM

Morales (2014) detalló las actividades productivas que se realizan dentro de la planta piloto de leche La Molina que son elaboración de queso; elaboración de yogurt y embolsado de leche.

3.2.1. Elaboración de queso

Morales (2014) menciona que el queso se elabora a partir de leche fresca con una acidez menor a 18° Dornic y 3% de grasa. La leche pasa por un proceso de pasteurización a una temperatura de 72°C durante 15 segundos para destruir los gérmenes patógenos. Luego de la pasteurización la leche se lleva a una tina de incubación donde se reduce a la temperatura a 35°C (temperatura ideal para que se produzca la coagulación); se añade cloruro de calcio para fortalecer la coagulación en una proporción de 28 g por cada 100 litros de leche.

Para la coagulación se adicionan 2 gramos de cuajo (contiene enzimas coagulantes Quimosina o Renina) por cada 100 litros de leche, esta adición se realiza en constante agitación por un periodo de 2-3 minutos; luego se deja reposar de 45 a 60 minutos, en este paso ocurre el cambio de fase de líquido a un estado coloidal. La cuajada formada en la etapa anterior se corta en líneas verticales y horizontales para darle forma de cubo de 1cm de lado, luego se deja en reposo por 5 minutos para adquirir consistencia y permitir su agitación sin fragmentarse.

En el primer desuerado se separa 1/3 del volumen inicial de la leche y se elimina al alcantarillado (eventualmente este volumen puede ser destinado para la elaboración de queso ricota). A los 2/3 del volumen que queda en la tina, se le agregó agua a una temperatura de 70°C para elevar la temperatura a 38°C, en constante agitación por 10 minutos. En el segundo desuerado es donde se elimina el líquido hasta alcanzar el nivel de la cuajada; este suero vertido directamente al alcantarillado.

El saldo es la aplicación de sal en la cuajada con una relación de 1.4 a 1.6% del volumen inicial de la leche. La cuajada salada se coloca en moldes para darle la forma al producto final y se almacena a 1 a 4°C. Finalmente existe una relación que por cada 100 litros de leche se produjo 17 Kg de queso, los 83 Kg restantes es suero (1 Kg≈1 litro de leche) que es eliminado por el alcantarillado.

3.2.2. Elaboración de yogurt

La leche se pasteuriza a una temperatura de 85°C por 10 minutos, luego se deja enfriar hasta 43°C, a esta temperatura se inocula el cultivo láctico de bacterias para su incubación (*Streptococcus Salivarius* sub especie de *Termophilus*, *Lactobacillus Delbrueckii* sub especie de *Bulgaricus*). En la fermentación láctica el pH debe ser menor o igual a 4.6; luego se enfría hasta una temperatura menor a 20°C y se inicia el batido del yogurt con la

adición de frutas, saborizantes y aromas. En el envasado se pierde aproximadamente un 1% del volumen producido el cual se elimina al alcantarillado, finalmente el yogurt se almacena a una temperatura de 4 a 5°C (Morales, 2014).

3.2.3. Embolsado de leche

La leche pasa por un proceso de pasteurización a una temperatura de 85°C durante 10 segundos, para eliminar los gérmenes patógenos. Luego, la leche es derivada a los tanques de enfriamiento hasta alcanzar una temperatura de 4°C, finalmente ésta pasa por la máquina embazadora, la cual tiene una pérdida aproximadamente de 1% del volumen producido y que posteriormente es vertido al alcantarillado (Morales, 2014).

3.3. TIPOS DE PARTÍCULAS SÓLIDAS EN EL AGUA

El contenido de sólidos totales de un agua, natural o residual, es uno de los parámetros físicos más importantes. Los sólidos totales están compuestos por materias flotantes, materia en suspensión, en dispersión coloidal y en disolución. Los sólidos totales, o residuo seco, se pueden clasificar en sólidos suspendidos y filtrables. La fracción filtrable se compone de sólidos coloidales y disueltos. La fracción coloidal consiste en partículas con un diámetro que oscila de 10^{-3} a 1 μm . Los sólidos disueltos se componen de moléculas orgánicas, inorgánicas e iones que se encuentran presentes en disolución verdadera en el agua.

A los sólidos con tamaños mayores que 0.200 mm se les suele denominar arenas. Los limos, arcillas, bacterias, etc., quedan retenidos al filtrar el agua, su tamaño es superior a 0.1 μm . La fracción coloidal no puede eliminarse por sedimentación (Tejero et al, 2006).

3.4. COLOIDES

Los coloides son soluciones de macromoléculas o bien dispersiones de moléculas pequeñas que forman agregados (Viades, 2012). La turbidez y el color suelen estar asociados a las partículas coloidales. En estos pequeños tamaños de partículas, las propiedades superficiales y las cargas eléctricas tienen efectos más importantes que el peso relativo de la partícula en el agua. Las partículas coloidales presentan cargas superficiales electrostáticas que permite la existencia de fuerzas de repulsión entre ellas y les impide aglomerarse para sedimentar. Estas cargas son, en general, negativas. Un coloide puede estar en suspensión casi un tiempo infinito (Tejero *et al*, 2006).

3.4.1. Estabilidad de los coloides

Los coloides son estables en soluciones acuosas cuando su agregación o sedimentación es tan lenta que se ven como dispersiones virtualmente estables. Esto es importante al momento de considerar el tratamiento del agua residual y cruda porque estas partículas no pueden ser removidas en un tiempo razonable.

La estabilidad de los coloides en el agua es un balance entre las fuerzas de repulsión y atracción. La fuerza de atracción de Van de Waals, causado por los dipolos permanentes o inducidos, es importante a pequeñas distancias. La fuerza de repulsión por el traslape de la doble capa eléctrica, lo cual lleva la mayor concentración de iones de la misma carga, origina la repulsión entre partículas (Versäläinen, 2012).

3.4.2. Fuerzas que intervienen en los coloides

Se deben considerar las fuerzas electrostáticas que son repulsivas y las fuerzas de Van Der Waals de naturaleza atractiva.

a. Electrostática-repulsión

La repulsión electrostática se vuelve significativa cuando 2 partículas se acercan y sus doble capas eléctricas empiezan a sobrelaparse. El nivel de energía de repulsión incrementa drásticamente cuando las partículas se juntan cada vez más (Ravina, 1993).

La fuerza de repulsión es una función exponencial de la distancia entre las partículas con un rango que depende del espesor de la doble capa eléctrica (Versäläinen, 2012).

b. Van der Waals-atracción

Se debe al movimiento continuo de los electrones en sus orbitas, originando fuerzas que son siempre atractivas. Además pueden existir entre partículas de carga opuesta; entre partículas neutras y entre partículas con la misma carga. La fuerza de Van der Waals es débil, decrece con la distancia y es efectiva cuando las partículas están separadas menos de 10^{-6} mm. Es gran responsable de la adsorción de los iones y moléculas para los coloides. La fuerza de repulsión es de mayor magnitud que las fuerzas de Van der Waals (Perez, 1981).

3.4.3. Capa doble en los coloides

En la capa doble una parte de los iones estarían inmovilizados sobre la superficie (capa rígida o de Stern), pero estos iones no son suficientes para neutralizar toda la carga, siendo la carga restante neutralizada por una capa difusa que se extiende en la solución. En esta región, la distribución de iones estaría dado por el equilibrio entre el movimiento térmico aleatorio y entre las fuerzas electrostáticas. Por ello, el potencial próximo a la superficie de la partícula disminuye al aumentar su distancia respecto a la superficie, y llega finalmente a cero en el grueso de la disolución (Aguilar et al., 2012). En la Figura 1 se muestra una representación gráfica de la capa doble en los coloides.

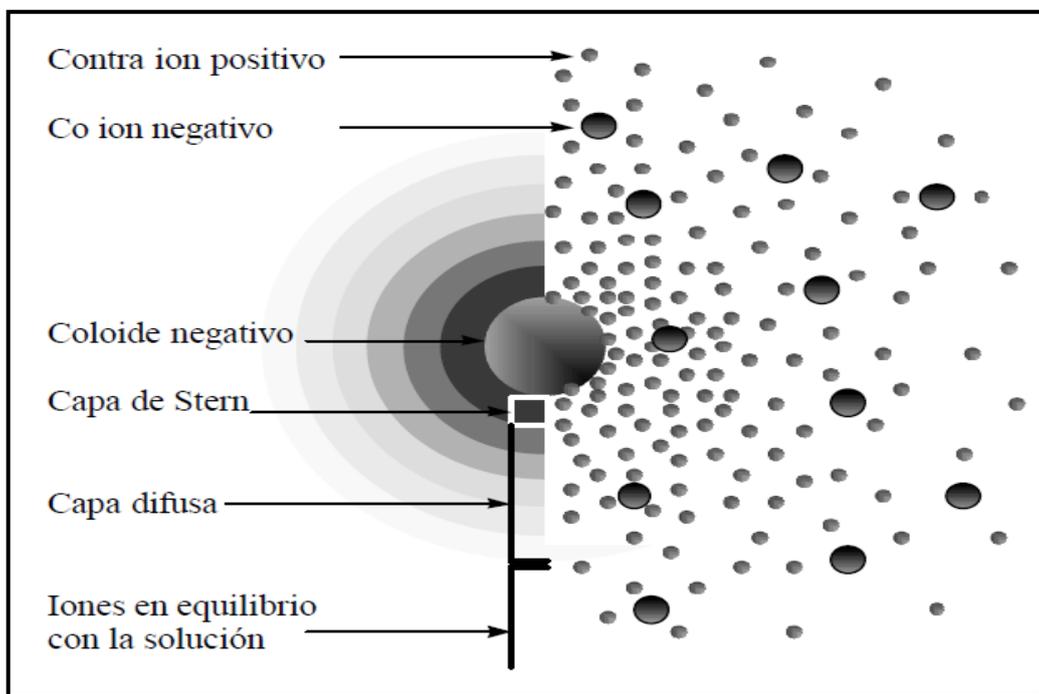


Figura 1: Doble capa de los coloides

FUENTE: Sandoval *et al.*, (2000).

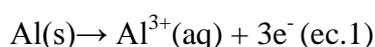
3.5. ELECTROCOAGULACIÓN

Es un tratamiento en el cual se aplica corriente eléctrica para tratar y flocular contaminantes sin tener que añadir coagulantes químicos (Butler *et al.*, 2011). Involucra la generación de coagulantes in situ por la disolución electrolítica de un metal siendo estos principalmente el aluminio y hierro. La generación del ion metálico se da en el ánodo y la producción de gas hidrogeno en el cátodo. El gas de hidrogeno ayuda haciendo flotar las partículas hacia la superficie del agua.

En el sistema de electrocoagulación ocurren múltiples reacciones electroquímicas en el ánodo y cátodo. Estos mecanismos pueden ser divididos en mecanismos principales que causan la desestabilización de los contaminantes y las reacciones secundarias como la formación de hidrogeno.

3.5.1. Reacciones principales

Los electrodos que producen los coagulantes están hechos principalmente de aluminio o hierro. Adicionalmente, se encuentran los electrodos inertes que son los cátodos. Para las reacciones que se explicarán a continuación se harán en base a la química del aluminio que fue el electrodo que produjo el coagulante en la presente investigación.



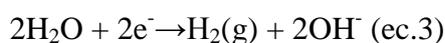
El primer paso para la formación del coagulante in situ es la disolución/oxidación del ánodo de sacrificio. La disolución anódica ideal por transferencia de cargas está dada por la ley de Faraday.

$$m = \frac{I \cdot t \cdot M}{z \cdot F} \text{ (ec.2)}$$

Donde m es la masa liberada en el ánodo (g), I es la corriente en (A), t es el tiempo de reacción (s), M es la masa molar (g/mol), z es el número de valencia y F es la constante de Faraday (C/mol) (Heffron, 2009).

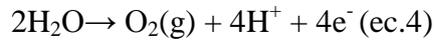
La tasa de producción de coagulante puede exceder a la masa teórica dada por la ley de Faraday y depende no sólo de la corriente sino que también del pH y composición del electrolito (Heffron, 2009). La oxidación química del cátodo en solución puede contribuir significativamente a la cantidad total del coagulante en el sistema. Además microambientes ácidos y alcalinos se forman alrededor del ánodo y cátodo respectivamente, y promueven un ataque químico a los electrodos. El aluminio en particular es anfótero y se corroe debajo de pH 4 y por encima de un pH 8.5 (Heffron, 2009).

Mientras que los iones son liberados en el ánodo, iones hidroxilo e hidrogeno son creados a través de la hidrólisis en el cátodo. (Heffron, 2009).



3.5.2. Reacciones secundarias

Con una mayor aplicación de voltaje reacciones secundarias han sido observadas, incluyendo hidrólisis en el ánodo para formar gas de oxígeno (Heffron, 2009):



Esta ecuación secundaria compite por la corriente con la reacción primaria en el ánodo (disolución oxidativa). Por lo cual, reacciones secundarias disminuyen la eficiencia Faraday en el reactor y no son típicamente favorables. (Cataldo Hernández et al., 2012, citado por Heffron, 2009). Si las reacciones 3 y 4 fueran las únicas reacciones, entonces el pH se mantendría constante, porque por cada electrón que pasa por la celda, un H^+ y un OH^- serían producidos (Heffron, 2009). En la figura 2, se muestra las reacciones que experimenta el metal, en el presente caso el aluminio, dentro del electrocoagulador.

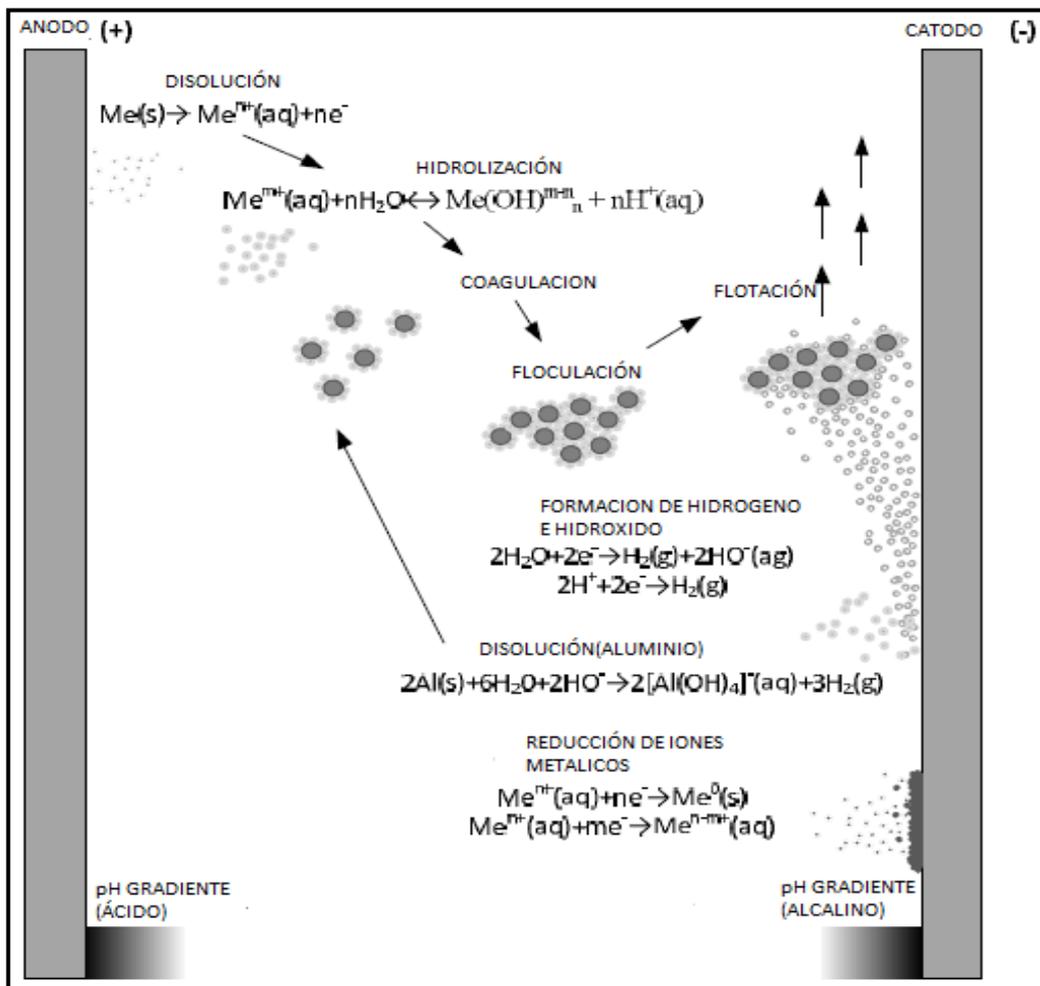
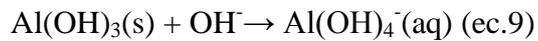
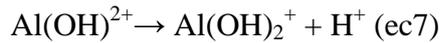
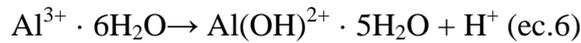


Figura 2: Reacciones en el electrocoagulador

FUENTE: Vepsäläinen, (2012).

3.6. FORMACION DEL COAGULANTE

Los cationes metálicos forman complejos hidratados en la solución. Estos iones hidratados pasan por hidrólisis para formar especies hidroximetálicas. En el caso del aluminio, las reacciones son las siguientes. El agua de la hidratación será omitida después de las dos primeras reacciones por simplicidad:



Entre pH 5 y 6, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ y $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ son las especies mononucleares de aluminio predominantes. De pH 5.2 a 8.8, $\text{Al}(\text{III})$ insoluble es el predominante. Encima de pH 9, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ predomina. AlSO_4^+ puede ser predominante a pH menor 5.5. Por lo cual la presencia de iones sulfato pueden incrementar la solubilidad del aluminio a pH menores de 5.5. Tanto los hidróxidos de aluminio y hierro precipitan dentro de un pH 6 a 9 (Heffron, 2009). La Figura 3 muestra la distribución de las distintas especies de aluminio que se pueden encontrar según el pH en solución.

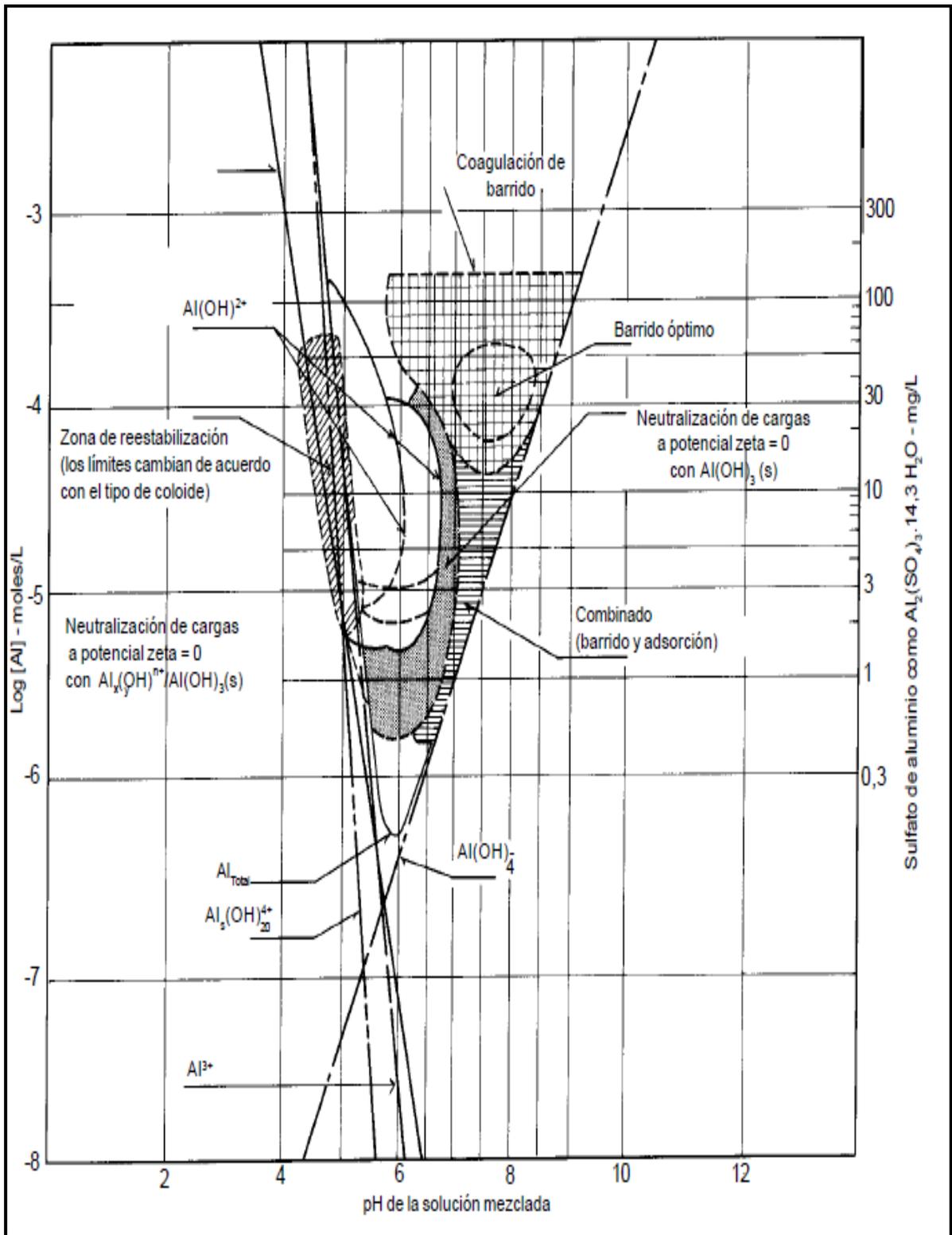


Figura 3: Diagrama de especies de aluminio

FUENTE: Barboza, (2011).

3.7. MECANISMO DE DESESTABILIZACIÓN DE COLOIDES

Existen cuatro mecanismos que ayudan a la desestabilización de los coloides que son la compresión de la capa doble; desestabilización por adsorción; captura en un precipitado de hidróxido metálico y el puente entre partículas.

3.7.1. Compresión de la capa doble

Involucra la adición de grandes cantidades de electrolitos indiferentes. La indiferencia se refiere al hecho que los iones retienen su identidad y no adsorben al coloide. Este cambio en la concentración iónica comprime la doble alrededor del coloide. Esto genera una disminución o eliminación de la barrera energética repulsiva. Es importante indicar que esta compresión reduce el tamaño de la esfera y no necesariamente reduce su carga. En general, la compresión de la capa doble no es una técnica práctica de coagulación para el tratamiento de aguas, pero tienen aplicación en el tratamiento de agua industriales, si las descargas con contra iones divalentes o trivalentes están a disposición (Ravina, 1993).

3.7.2. Desestabilización por adsorción

Los coagulantes inorgánicos como el aluminio y polímeros cationicos suelen trabajar por neutralización de cargas. Ésta involucra la adsorción de un coagulante con carga positiva en la superficie del coloide. Este encubrimiento neutraliza la carga negativa del coloide, resultando en una carga neta cercana a cero. La neutralización es la llave para optimizar los tratamientos sedimentación, filtración por medio granular o flotación por aire.

Una sobredosis de coagulante puede revertir la carga del coloide y redispersarse como coloides positivos, resultando en un sistema que no floculará fácilmente (Ravina, 1993).

3.7.3. Captura en un precipitado de hidróxido metálico o captura por barrido

Cuando la dosis aluminio o hierro excede el producto de solubilidad de sus hidróxidos metálicos como el $\text{Al}(\text{OH})_3$ y el $\text{Fe}(\text{OH})_3$, se produce una precipitación rápida de los hidróxidos gelatinosos. Las partículas coloidales son envueltas por los precipitados y como este mecanismo no depende de la neutralización de la carga de los coloides, la condición óptima de la coagulación puede no corresponder a aquella donde es mínimo el potencial zeta.

En este caso, la presencia de otros aniones aparte de los hidróxidos, particularmente el sulfato, es efectiva para aumentar la velocidad de precipitación. Por otro lado, puesto que las partículas coloidales pueden servir como núcleos para formar precipitados, un aumento

en la concentración de partículas coloidales puede favorecer la precipitación (Barrenechea, 2004).

3.7.4. Puente entre partículas

La formación de puentes se da cuando un coagulante forma fibras que atrapan un gran número de coloides, capturándolos y uniéndolos a éste. Los coagulantes inorgánicos primarios y polielectrolitos orgánicos tienen la capacidad de formar puentes. Un mayor peso molecular significa moléculas más largas que podrán formar buenos puentes. El uso de los puentes es comúnmente usado en conjunto a la neutralización de cargas para formar flóculos que sedimente más rápidos y resistentes a cortes.

El funcionamiento es el siguiente. El aluminio u otro polímero cationico de bajo peso molecular se añade para reducir la carga y formar los flóculos. Luego una pequeña cantidad de un polímero de alto peso molecular es añadido, generalmente un anión, que se añade para formar puentes entre los flóculos formados. El hecho que el polímero sea de carga negativa no es significativo, ya que los pequeños coloides ya han sido atrapados como microflóculos (Ravina, 1993).

3.8. EFECTIVIDAD DE LA COAGULACIÓN

Tradicionalmente la efectividad del proceso de coagulación se ha medido por medio de la remoción de la turbidez o del color. La efectividad en términos de comparar el efluente filtrado y el agua desde su fuente. Con respecto a la turbidez, la premisa siempre ha sido que la remoción de la turbidez conlleva a la remoción de las partículas orgánicas, aunque no ha sido estudiado extensamente (Hendricks, 2006).

3.9. FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN

Entre los principales factores que afectan el rendimiento de un sistema de electrocoagulación ya sea de manera positiva o negativa se pueden mencionar a la densidad de corriente, arreglo de los electrodos, presencia de cloruro de sodio, pH, pasivación de los electrodos, tiempo y temperatura.

3.9.1. Densidad de corriente

La densidad de corriente afecta la producción de coagulantes, la velocidad y cantidad de burbujas de hidrogeno. La cantidad de iones Al^{3+} y Fe^{2+} producidos por sus respectivos electrodos depende de la corriente aplicada al sistema de electrocoagulación. Para un

determinado voltaje, una alta densidad corriente es producida en un área pequeña comparada con un reactor de un área grande.

Si la corriente producida es demasiado grande, entonces hay una posibilidad de desperdicio de energía, ya que una parte es usada para incrementar la temperatura del agua. Por lo tanto en un pequeño reactor cuando la corriente aumenta hay un significativo decrecimiento en la eficiencia de ésta. Cuando se opera un electrocoagulador por periodos largos, se necesita mantener una densidad de corriente en el reactor en un rango de 20-25 A/m². La remoción de contaminantes del agua residual depende de la cantidad de iones producidos. El tamaño de las burbujas también es influenciado por la densidad de corriente, ya que ocurre un decrecimiento del tamaño de las burbujas con el incremento de la densidad de corriente (Gunukula, 2011).

La energía eléctrica que se suministra a la celda electroquímica puede hacerse de dos modos que son por corriente alterna o continua. Cuando el suministro utilizado es corriente continua se produce en el cátodo una impermeabilización, lo que genera una menor eficiencia de remoción (Barboza, 2011).

3.9.2. Arreglo de los electrodos

Los electrodos se pueden arreglar de un modo monopolar o bipolar. En el modo monopolar, una placa conductiva es introducida entre los electrodos y es o bien conectada a un electrodo o a la fuente de corriente continua. Los electrodos monopolar pueden estar conectados en serie o en paralelo. En el arreglo monopolar en paralelo (Figura 4), la corriente eléctrica es dividida entre todos los electrodos en relación a la resistencia de cada una de las celdas. El arreglo monopolar en serie (Figura 5) es eléctricamente similar a una sola celda con muchos electrodos e interconexiones. En arreglos en serie, una mayor diferencia de potencial es requerida para que haya flujo de corriente debido a que las celdas en serie tienen mayor resistencia eléctrica. En el arreglo bipolar (Figura 6), sólo dos electrodos se encuentran conectados a la fuente de corriente eléctrica, sin conexión alguna con los electrodos de sacrificio. Este tipo de arreglo facilita las labores de mantenimiento. Cuando una corriente pasa, los lados de los electrodos se cargan con cargas opuestas (Gunukula 2011, Kabdaşlı, *et al.*, 2012).

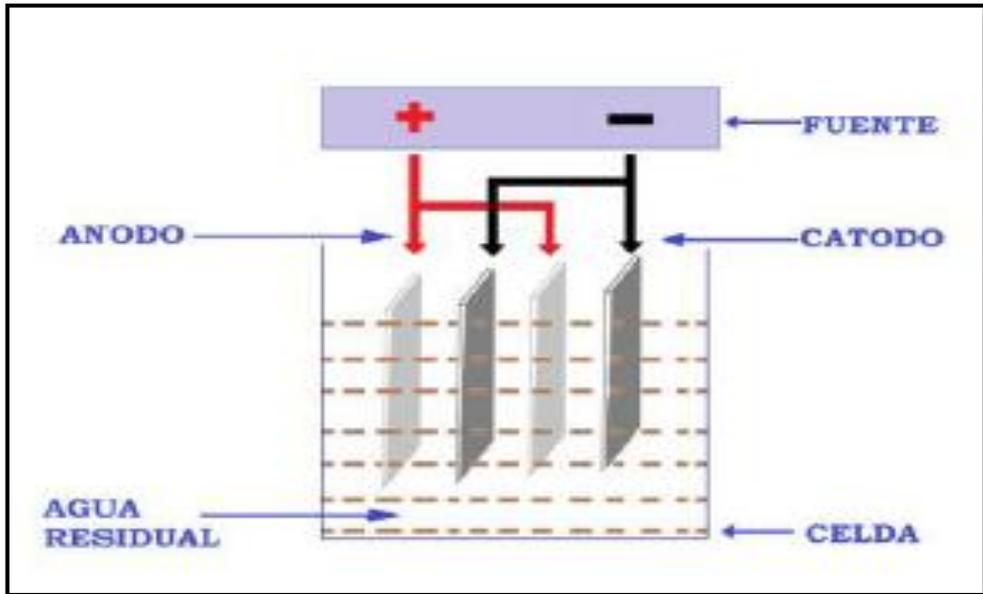


Figura 4: Arreglo monopolar conectado en paralelo

FUENTE: Aguilar, (2015).

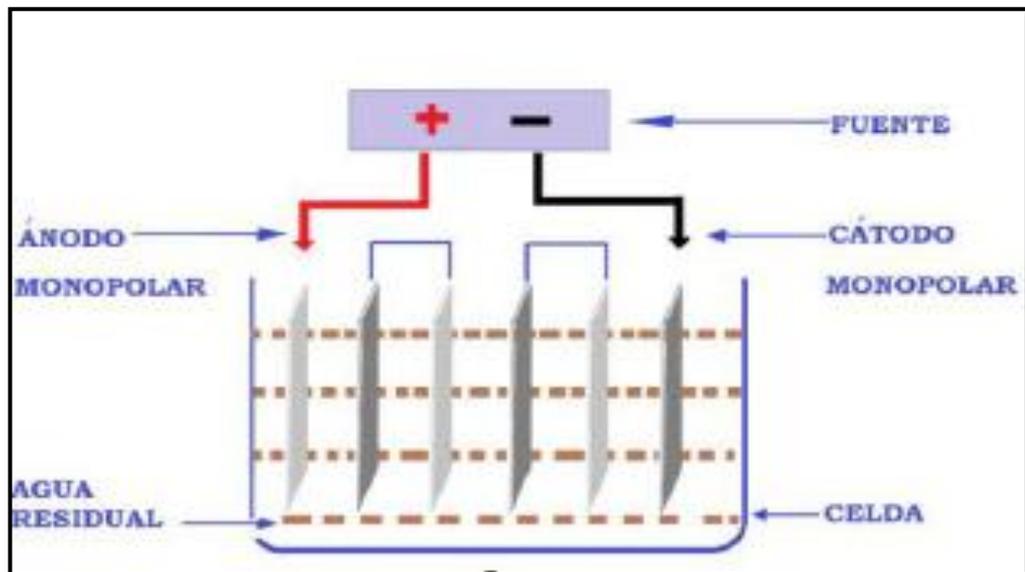


Figura 5: Arreglo monopolar conectado en serie

FUENTE: Aguilar,(2015).

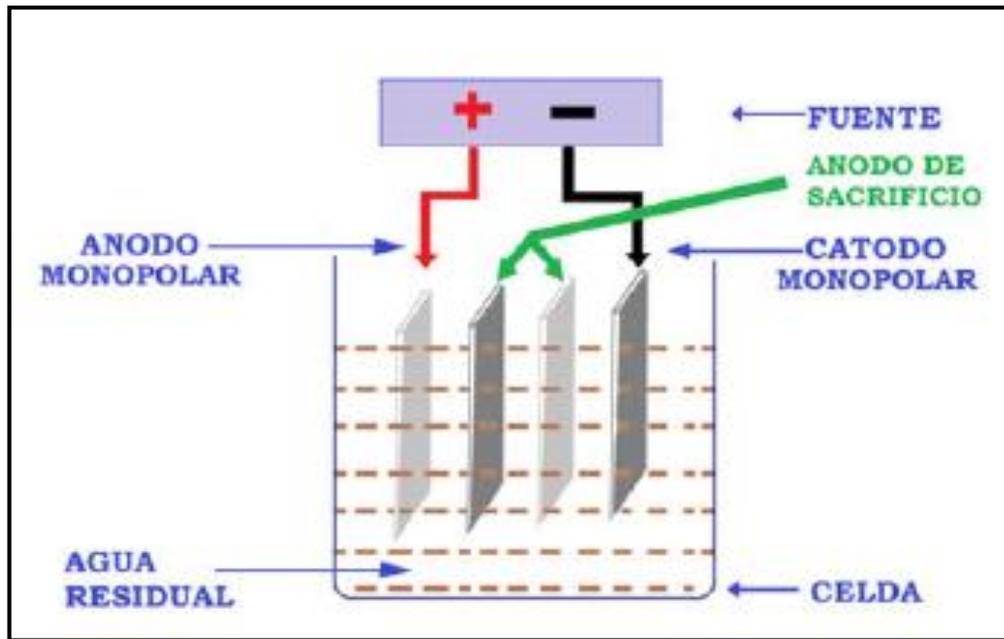


Figura 6: Arreglo bipolar conectado en paralelo

FUENTE: Aguilar, (2015).

3.9.3. Presencia de cloruro de sodio

El cloruro de sodio incrementa la conductividad del agua residual por la disminución de la resistencia interna. La sal es el mejor electrolito debido a su alta eficiencia y bajo impacto ambiental. Pequeñas cantidades del ion cloruro disminuye el efecto adverso del aniones HCO_3^- , SO_4^{2-} . La existencia de iones carbonato y sulfato podrían llevar a la precipitación de los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} que forman una capa aislante en la superficie de los electrodos. Esta capa incrementa de gran manera el potencial entre los electrodos disminuyendo la eficiencia de la corriente (Chen, 2003).

3.9.4. Efecto del pH

La solubilidad y especiación del coagulante es altamente dependiente del pH. Hidróxidos de aluminio y hierro son menos solubles cerca o ligeramente mayor al pH neutro (Heffron, 2009).

El pH durante el proceso de electrocoagulación se incrementa en aguas acidas, efecto atribuido a la generación de hidrogeno molecular que se origina en el cátodo y en el cual se termina liberando OH^- (Barboza, 2011). Chen *et al.* (2000) menciona que en condiciones alcalinas es formado $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ que tiene gran importancia ya que reducen el pH al momento de su formación por el uso de OH^- .

Existen otros mecanismos por el cual varía el pH. Una de estas es la transferencia de CO_2 . En condiciones ácidas, el CO_2 se encuentra saturado y puede liberarse debido a la turbulencia generada por acción de las burbujas de H_2 que originan un incremento de pH. Adicionalmente hay iones presentes en el agua residual como Cl^- , HCO_3^- , HSiO_4^- , NO_3^- , que pueden intercambiarse con el OH^- en el $\text{Al}(\text{OH})_3$ para liberar el OH^- , lo que originaría un incremento en el pH. A valores altos de pH el Ca^{2+} y Mg^{2+} presentes en el agua residual pueden coprecipitar junto al $\text{Al}(\text{OH})_3$ en forma de hidróxidos disminuyendo el pH.

3.9.5. Pasivación de los electrodos

Uno de los principales problemas de operación es la pasivación de los electrodos. Éste es un serio problema que concierne a la longevidad del proceso. La pasivación se ha observado durante la electrocoagulación usando hierro; depósitos de carbonato de calcio y magnesio se formaron en el cátodo y una capa de óxido en el ánodo. Kabdaşlı *et al.*, (2012) sugirieron varios métodos para prevenir o minimizar la pasivación de los electrodos como cambiar la polaridad de los electrodos, limpieza hidromecánica de los electrodos, limpieza mecánica de los electrodos o usar agentes inhibidores.

3.9.6. Efecto del tiempo de retención en el reactor

El tiempo de residencia en el reactor está ligado a la cantidad de sólidos formados, debido a que se favorece a la disolución de electrodos así como a la floculación y precipitación de los sólidos. También se producen más gases, que al ascender, llevan las partículas de óxido a la superficie en forma de espuma y a su vez promueve el crecimiento de los flóculos y su posterior precipitación (Aguilar, 2015).

3.9.7. Temperatura

Vepsäläinen (2012) mencionó que el efecto de la temperatura ha sido estudiado en algunos artículos. Por ejemplo la remoción del boro se incrementó de 84 a 96% en el rango de 293-333K. Sin embargo, ocurrió una disminución en la remoción en color, DQO y fenol disminuyeron de 10 a 20% cuando la temperatura se incrementó de 293 a 333K del agua residual de una fábrica de papel. Los autores concluyeron que a bajas temperaturas las disoluciones del ánodo ocurren lentamente, pero no presentaron resultados como la concentración de aluminio para soportar esta conclusión.

Ha sido sugerido cuando la temperatura es demasiado alta, existe una reducción de los grandes poros del $\text{Al}(\text{OH})_3$ que causa la formación de flóculos densos que se depositarían en la superficie del electrodo.

Al parecer un incremento de temperatura puede tener tanto efectos positivos como negativos en la eficiencia de la remoción. Es posible que el efecto de la temperatura dependa en el mecanismo de remoción del contaminante. (Vepsäläinen, 2012)

3.10. TIPOS DE REACTORES

Los reactores para la electrocoagulación pueden clasificarse en primera instancia como reactores tipo *batch* o reactores de sistema continuo. La selección de uno de estos tipos de reactor depende de las características del contaminante y de su concentración, así como de las cantidades de agua residual a tratar. Se hará énfasis en el reactor tipo *batch*, ya que fue el utilizado en la presente investigación.

Una segunda clasificación de los reactores está dada en función de la flotación. Una vez que el contaminante ha sufrido el proceso de coagulación existen dos formas de separarlo del medio acuoso, a saber: flotación y sedimentación. Así pues, los reactores pueden diseñarse como reactores con sólo coagulación, o con coagulación y flotación. Son llamados reactores de sólo coagulación aquellos que no aprovechan la electrocoagulación para generar burbujas que separen los agregados (flóculos) del contaminante por flotación, mientras que los reactores en los que se aprovechan las burbujas generadas para realizar la flotación de los agregados del contaminante, reciben el nombre de reactores de coagulación y flotación. (Restrepo, citado por Aguilar 2015).

3.10.1. Tipo batch

El reactor tipo *batch*, trabaja con un volumen determinado de agua residual que se puede tratar en una prueba. Tiene como desventaja que sus condiciones cambian con el tiempo, pero tiene también la ventaja de ser sencillo y de bajo costo para el tratamiento localizado de aguas. (Restrepo, citado por Aguilar 2015).

El tipo de reactor utilizado para realizar la electrocoagulación en una operación por *batch*, en su forma más simple, está formado por una celda electroquímica con un ánodo y un cátodo dispuestos en forma vertical y conectada a una fuente de energía externa (Arango, citado por Aguilar 2015).

El diseño formado por un par de electrodos no es el más adecuado a la hora del proceso, ya que para obtener una adecuada disolución del metal se requiere de electrodos de gran área

superficial, es por esta razón que se utilizan celdas con electrodos monopolares en paralelo o conectados en serie. (Mollah, citado por Aguilar 2015).

3.11. NORMATIVA NACIONAL

La normativa ambiental vigente que aplica al siguiente trabajo es el DS N°001-2015-Vivienda que es una modificatoria del DS N°021-2009 que aprobó los valores máximos admisibles. Esta normativa se aplica ya que el agua residual de la planta piloto de leche se vierte a la red de alcantarillado (VIVIENDA, 2015)

3.11.1. Valores máximos admisibles

Entiéndase por valor máximo admisible (VMA) como aquel valor de la concentración de elementos, sustancias o parámetros físicos y/o químicos, que caracterizan a un efluente no domestico que va a ser descargado a la red de alcantarillado sanitario, que al ser excedidos causa daño inmediato o progresivo a las instalaciones, infraestructura sanitaria, maquinarias y equipos de los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales, y tiene influencia negativa en los procesos de tratamiento de aguas residuales (VIVIENDA, 2015).

En el Cuadro 2 se muestran los VMA dictaminados por el ministerio de vivienda, construcción y saneamiento.

Cuadro 2: Valores máximos admisibles para descargas al sistema de alcantarillado

Parámetro	Unidad	Expresión	Valor máximo admisible
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	DBO ₅	500
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	DQO	1000
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	S.S.T	500
Ácidos y Grasas	mg/L	A Y G	100
Aluminio	mg/L	Al	10
Arsénico	mg/L	As	0.5
Boro	mg/L	B	4
Cadmio	mg/L	Cd	0.2
Cianuro	mg/L	CN	1
Cobre	mg/L	Cu	3
Cromo hexavalente	mg/L	Cr ⁺⁶	0.5
Cromo total	mg/L	Cr	10
Manganeso	mg/L	Mn	4
Mercurio	mg/L	Hg	0.02
Níquel	mg/L	Ni	4
Plomo	mg/L	Pb	0.5
Sulfatos	mg/L	SO ₄ ⁻²	1000
Sulfuros	mg/L	S	5
Zinc	mg/L	Zn	10
Nitrógeno amoniacal	mg/L	NH ₄ ⁺¹	80
pH		pH	6 a 9
Sólidos sedimentables	mL/L/h	S.S	8.5
Temperatura	°C	T	<35

FUENTE: VIVIENDA, (2015).

3.12. NORMATIVA INTERNACIONAL

World Bank Group (2007), conocido en español como Grupo del Banco Mundial, da la referencia internacional de valores del agua residual en caso se encuentren realizando buenas prácticas por la industria láctea. En el cuadro 3, se puede apreciar los valores dados por el Banco Mundial.

Cuadro 3: Valores recomendables en el efluente de la industria láctea

Parámetro	Unidad	Valor
pH	Unidades de pH	6 a 9
DBO ₅	mg/l	50
DQO	mg/l	250
Nitrógeno total	mg/l	10
Fosforo total	mg/l	2
Aceites y grasas	mg/l	10
Sólidos suspendidos totales	mg/l	50
Incremento de temperatura	°C	< 3
Coliformes totales	UFC/100mL	400
Antibióticos	A determinar en base a un caso específico	

FUENTE: Grupo del Banco Mundial, (2007).

3.13. ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN

Piña *et al.* (2011) hicieron una recopilación de distintos estudios realizados en electrocoagulación alrededor del mundo considerando los distintos parámetros que se usaron durante cada una de esas pruebas. Los resultados de la recopilación se muestran en la Figura 7.

La mayoría de los estudios reportan principalmente 4 parámetros que son la densidad de corriente; electrodos usados; el flujo volumétrico utilizado y contaminantes analizados. La densidad de corriente varia, ya que depende de la configuración del sistema de electrocoagulación implementado por cada investigador. Con respecto a los electrodos utilizados, el aluminio ha sido el más usado durante las investigaciones lo cual se debe posiblemente a su menor precio, disponibilidad en el mercado y a su buen funcionamiento. El flujo volumétrico más usado ha sido el *Batch* o por lotes en el cual se usa una cantidad definida de agua a tratar, lo que facilita la medición de los contaminantes siendo esta principal razón por la que se usó en esta investigación.

Autor	Voltaje (V)	Material de Electrodo	Distancia entre Electrodo (cm)		Tamaño de electrodo (cm)	pH	Contaminante	Tiempo de residencia (min)	Flujo volumétrico (L/s)	Resultados
	Densidad de corriente (A/cm ²)		Tipo de conexión	Área activa por electrodo (cm ²)	Cond. (μS/cm)			Temperatura (°C)		
Gorodovyykh V. E. (1987)	NR	Acero inoxidable y grafito	NR	NR	NR	7 - 12	Cu, Pb, Sn, Zn, Mn, Sb, Bi	NR	1.25E-4 a 8.33E-4	Se alcanzó una alta remoción de los metales a condiciones de pH de 11-11.5 aplicando corriente asimétrica alterna.
	0.021-0.035		NR	NR	NR					
Renk Russell (1988)	NR	Hierro, aluminio, grafito y titanio	NR	NR	NR	NR	M. pesados, SS, color, CN ⁻ , Ra, U, Se, PO ₄ ³⁻ , F ⁻ , COT, DBO, g. y aceites, SO ₄ ²⁻ , dureza, etc.	NR	NR	La EC no tiende a remover materiales que no forman precipitados tales como Na, K, solventes de peso ligero como tolueno y benceno. Sin embargo, bajo ciertas condiciones la EC convertirá iones cloruro a gas cloro, nitros a amonio además de oxidar o reducir compuestos orgánicos.
	NR		NR	NR	NR					
Biswas N. (1991)	0 - 100	Acero inoxidable	NR	NR	3 a 11	NR	Remoción de aceite de emulsiones	16	Batch	La desestabilización de las emulsiones de aceite fue posible mediante el uso de sulfato férrico únicamente, pero se requirieron de dosis muy elevadas. La mayor eficiencia de remoción encontrada fue del 99%, utilizando 150 mg/L de sulfato férrico y a una corriente directa de 100 V durante 16 minutos.
	(0 a 6 A)		NR	NR	NR					
Wang Sanfan (1991)	0 a 3.1	Hierro y aluminio	0.5	15.5 x 14	NR	NR	Dureza y alcalinidad	NR	0.005	Utilizando electrodos de Fe y aireación con la recirculación y mezcla de los flocs del sedimentador en el agua cruda, se remueve un 75% de dureza aplicando 22E-4 A/cm ² y 2.2 V.
	2 a 22E-4		NR	217	NR					
Pouet M-F. (1992)	40	Aluminio	NR	NR	NR	NR	DQO, SS, turbiedad	169	0.0556	La combinación de la electrocoagulación-flotación-microfiltración mostró ser una buena alternativa para el tratamiento intensivo de aguas residuales por su alta eficiencia y a lo compacto del sistema.
	6E-4 a 0.0015		serie	3240	NR					
Matteson, Michale J. (1995)	15 a 50	Acero inoxidable	8	NR	10	NR	Partículas ultra finas	NR	Batch	La velocidad de coagulación puede ser descrita por una ecuación cinética de segundo orden que incorpora la migración electroforética de partículas hacia el ánodo y la subsiguiente liberación de partículas descargadas hacia el seno de la solución. La electrocoagulación en una serie de celdas agitadas con electrodos en paralelo arrojó resultados semejantes a los precedidos con los modelos derivados teóricamente.
	NR		serie	24	NR					
Pouet M. -F. (1995)	40 a 80	Aluminio	NR	NR	7.7 a 8.0	NR	Turbiedad, DQO y SS	NR	0.27	La dosis óptima de Al fue de 45-63 mg/L utilizando Al ₂ (SO ₄) ₃ como coagulante. En la electrocoagulación con una corriente de 8 A se obtiene una cantidad teórica de Al de 54 mg/L y en la práctica se utilizó solo una dosis de 27 mg/L. Se removió el 75% de la DQO.
	0.0053		bipolar	1500	NR					
Tsai C. T. (1996)	1, 2, 5, 10 y 15	Cobre, Hierro y Aluminio	2	NR	8.2-8.5	NR	DQO	1 - 20	Batch	Se alcanzaron eficiencias de remoción entre el 30 y 50% donde el par Fe-Cu como electrodos presentó una mayor eficiencia.
	NR		NR	80	52.63			4		
Baklan V. Yu (1996)	3.0 y 3.5	Hierro y Aluminio	NR	NR	NR	NR	Cianuros, aminas, alcoholes, aldehidos, sulfuros	NR	NR	La electrocoagulación es muy efectiva para la clarificación de aguas residuales de compuestos orgánicos complejos
	0.0120		NR	NR	NR					

Figura 7: Investigaciones previas en electrocoagulación

FUENTE: Piña *et al.*, (2011)

Continuación

Autor	Voltaje (V)		Material de Electrodo	Distancia entre Electrodo (cm)		Tamaño de electrodo (cm)	pH	Contaminante	Tiempo de residencia (min)		Flujo volumétrico (L/s)	Resultados
	Densidad de corriente (A/cm ²)			Tipo de conexión	Área activa por electrodo (cm ²)				Cond. (µS/cm)	Temperatura (°C)		
Paul A. B. (1996)	NR		Aluminio	2	NR	NR	6.5 - 7.5	Turbiedad	NR	NR	Batch	Se alcanzó una alta remoción de turbiedad además de que se demostró que los sistemas de tratamiento a pequeña escala son más baratas que los sistemas tradicionales.
	NR			paralelo	200 y 2400				30,000 a 20,000			
Hosny Ashraf Y. (1996)	2.2 - 12.5		Acero inoxidable y Plomo	1.5	NR	NR	4.5	Emulsiones aceite en agua	40	NR	Batch y 1.67E-4 a 8.334E-4	Fueron hechos modelos de correlación para relacionar los parámetros de operación con el porcentaje de remoción de aceite. Los resultados experimentales coincidieron con los modelos teóricos desarrollados.
	0.0025 - 0.03			NR	120				NR			
Bertazzoli (1997)	-0.2 a -1.35		Carbón	NR	NR	NR	4 y 5	cobre, plomo, zinc	20 - 40	NR	0.016 - 0.166	Bajo los potenciales de reducción sugeridos por los estudios de voltametría hidrodinámica, la concentración de los iones metálicos fue reducida de 50 a 0.1 mg/L durante tiempos de recirculación de 20 a 40 minutos, dependiendo de la porosidad del electrodo y de la velocidad de flujo. Mayor remoción se obtuvo a altas porosidades del cátodo y a altas velocidades de flujo.
	NR			NR	75				NR			
Burns S. E. (1997)	20 a 30 y 6 a 8	0.00057 a 0.015	Grafito	13	7.6 x 2.5	NR	NR	Producción de burbujas	NR	NR	Batch	La cantidad de burbujas producido en electroflotación es una función de la potencia aplicada y de la fuerza iónica.
Poon Calvin P. C. (1997)	NR		Acero inoxidable y platino	3	32.4 x 12	NR	NR	Ni, Zn, Pb, Cu, CN	Batch: 60 - 75	NR	Batch/ 1.8E-2 2.3E-3	Se generaron ecuaciones por análisis de regresión lineal múltiple para cada uno de los elementos contaminantes (Ni, Cu, CN, Zn, Pb) en función de la altura de la solución dentro del reactor y de la potencia aplicada.
	0.011- 0.024			NR	388.8	NR	NR		Continuo: 20			
Ögütveren Bakir Ülker (1997)	10 a 30		Hierro y aluminio	NR	NR	NR	NR	Aceite en emulsión	1 a 11	NR	Batch	El electrodo de aluminio produjo una mayor eficiencia de remoción que el electrodo de hierro. Cuando el agitador fue usado como ánodo para ambos materiales la velocidad de remoción se incrementó además de que el tiempo de tratamiento y el consumo de energía disminuyeron.
	NR			NR	NR	NR	NR		NR			
Kovatcheva Valeria K. (1999)	NR		Hierro	1	NR	NR	2.8 y 3.2	SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻	60	NR	Batch	Se observó que las ondas sonoras aplicadas al electrolito no destruyeron significativamente la fase de hidróxidos formados y no intervino en los procesos de absorción iónica-molecular donde se absorben las partículas coloidales.
	0.010 y 0.040			NR	50	NR	NR		20			
Ciorba, G. A. (2000)	NR		Aluminio al 99.3%	0.5	NR	NR	4.2	DQO	10	NR	Batch	La eficiencia en el tratamiento de agua residual sintética alcanzó valores de 40 al 60% (como remoción de DQO) dependiendo de las condiciones operación establecidas.
	0.001 y 0.003			NR	300	NR	NR		22			
Phutdhawong W. (2000)	22		Aluminio	3	NR	NR	NR	Compuestos fenólicos	45, 60, 120	NR	Batch	A partir del análisis del método utilizado para la recuperación de los compuestos fenólicos estudiados se sugiere que no todos los compuestos fenólicos son preferentemente oxidados y existe un cierto grado de selectividad.
	0.00167			NR	300	NR	NR		NR			
Balasubramiam N. (2001)	NR		Hierro y acero inoxidable	NR	NR	NR	4.5	Arsénico	> 420	NR	Batch	La remoción electroquímica de Arsénico bajo estas condiciones alcanzó el 99%. El pH de la solución se incrementó gradualmente conforme la electrólisis avanzó.
	0.0125			NR	NR	NR	NR		NR			
Mameri, N. (2001)	NR		Aluminio al 99.5 %	2	NR	NR	5 - 7.6	Flúor	4, 5, 12	NR	Batch y 0.0017 - 0.222	El proceso de electrocoagulación para la remoción de flúor resultó ser eficiente (60%). El proceso consumió 40 Kg. de aluminio por 1000 m ³ de agua tratada.
	0.0053-0.006			NR	75 y 900	3000	NR		20			

Continuación

Autor	Voltaje (V)		Material de Electrodo	Distancia entre Electrodo (cm)		Tamaño de electrodo (cm)		pH		Contaminante	Tiempo de residencia (min)	Flujo volumétrico (L/s)	Resultados
	Densidad de corriente (A/cm ²)			Tipo de conexión	Area activa por electrodo (cm ²)	Cond. (µS/cm)	Temperatura (°C)						
Lescuras-Darrou, V (2001)	2.5 - 3.6		Hierro y Ti-Pt	NR	NR	NR	DQO	120 - 300		Batch	Utilizados como coagulantes los ferratos lograron la remoción de DQO (45%) con un consumo bajo de energía entre los procesos anódicos y catódicos.		
	0.013 a 0.053			NR	56	NR		NR					
Xiong Ya (2001)	0 - 20		Acero inoxidable	14	NR	4.5	DQO y Color	30		Batch	En términos de costos y de eficiencia, la combinación de coagulación de Fe ³⁺ con el tratamiento electroquímico usando como electrodo carbón activado granular resultó ser el más eficiente para el tratamiento de aguas conteniendo colorantes y materia orgánica.		
	NR			NR	NR	580		NR					
Tsouris C. (2001)	2.5 a 7.5		Hierro	NR	7.6 x 4.8	10-12	Iones cobre	15.67		Batch y 8.334E-5	La concentración de hierro y la carga magnética se incrementa con la temperatura, el voltaje y la conductividad de la solución, además la carga magnética disminuyó en presencia de otros iones, lo cual indica que algunos cationes y aniones interfieren con la formación de magnetita reduciendo la producción de este coagulante.		
	0.002 a 0.014			NR	36.48	NR		30, 60 y 90					
Morante, G. Gonzalo (2002)	2.7		Hierro y Aluminio	0.5	NR	10.86	Grasas y aceites, DQO	15		Batch	Eliminaciones de 90% en el contenido de grasas y aceites y 70 % en DQO. Aunque se presentaron incrementos en el contenido de metales, tales como hierro o aluminio, por el hecho de trabajar con electrodos de sacrificio.		
	0.00023			NR	140	1.2E6		19.7					
Jiang, J. Q (2002)	NR		Aluminio al 96.0%	NR	NR	7.5	Materia orgánica disuelta y otros	0.87		0.167	Para el rango de condiciones usadas, el sistema ECF resultó ser más efectivo que un proceso convencional DAF en el tratamiento de agua residual a pequeña escala; el costo total de operación para ECF (incluyendo el costo de corrección de pH) fue de 3 a 6 veces más bajo que el sistema DAF.		
	0.00025 y 0.001			Paralelo	1680	70 000		3-10					
Chartrand, M.M. (2003)	NR		Titanio; Pt, carbón, Ni, Pb y acero Inoxidable	NR	NR	1.9 y 1.7	Residuos ácidos mineros	65		1.0E-5	Se logró a) subir el pH de residuos ácidos de minas por la reducción de H ⁺ a H ₂ ; b) capturar hierro para prevenir su deposición en el ambiente; c) producir lodos fuera de la celda electrolítica para evitar la contaminación de los electrodos y d) producir lodos con menos contenido de humedad.		
	0.0041 a 0.073			NR	NR	NR		NR					
Chowwana-poonpohn S. (2003)	16		Aluminio	3	NR	NR	Taninos	90		Batch	Algunos taninos fueron extraídos y recuperados más fácilmente que otros debido a su actividad oxidante.		
	0.00667			NR	300	NR		NR					
Jumpatong K. (2003)	17.5-19.0		Aluminio	4	30 x 10	4, 7 y 10	Metales pesados	120		Batch	La velocidad de remoción del Pb, Cu, Co, Ni, Fe y Zn fue mucho mayor a pH de 10. En los tres valores de pH se logró un porcentaje de precipitación del 99%, excepto para el Fe que fue de 98%. La máxima precipitación del Cr(VI) fue del 46%. No se realizaron análisis de costos.		
	0.0073 a 0.02			monopolar	300	NR		NR					
P. Ratna (2004)	0 a 15		Hierro Aluminio y Titanio	0.5	NR	6 a 8	As (III) y As (V)	NR		Batch	Con electrodos de Fe se removió mas del 99% de As III y V para una dosis de 38.4 mgFe/L, con electrodos de Al el 37% y con Ti el 58%. La densidad de corriente no tiene un efecto significativo en la remoción, pero si incrementa la velocidad de remoción.		
	0.00065 a 0.00153 (Fe) 0.00219 (Al y Ti)			NR	36	NR		NR					
GH Azarian (2007)	NR		Aluminio	2 a 4	14 x 24	7 a 8	Algas	15 a 30		8.3 a 26.6	Las eficiencias de remoción de sólidos suspendidos totales (SST) y clorofila fueron de 99.5% y cerca del 100% mediante la aplicación de 550 W/dm ² . El agua cruda		
	NR			NR	336	NR		50					

3.14. PRUEBAS ESTADÍSTICAS

Porras *et al.* (2013) explican cada una de las pruebas estadísticas realizadas en esta tesis que fueron las no paramétricas. Estas son las pruebas que se ocupa de aquellos procedimientos donde no se prioriza la naturaleza de la distribución (supuesto de normalidad) como requisito para poder realizar la inferencia de las cuales fueron usadas la prueba de Kruskal Wallis y de Friedman.

3.14.1. Prueba de Kruskal-wallis

Esta prueba es el equivalente no paramétrico del diseño completamente al azar de un solo factor de análisis de varianza.

a. Supuestos

Las muestras a ser evaluadas son aleatorias y mutuamente excluyentes

Las variables respuesta esta medida en una escala al menos ordinal

3.14.2. Prueba de Friedman

La prueba de Friedman es la contraparte no paramétrico de un análisis diseño de bloques completamente al azar (DBCA). Esta prueba es apropiada siempre que los datos que se midan, al menos, en una escala ordinal y puedan disponerse significativamente en una clasificación de dos criterios como se hace en un experimento en bloques completamente al azar.

a. Supuestos

Los b bloques son mutuamente independientes, es decir los resultados de un bloque no influyen en los resultados de los otros bloques

La escala de la medida es al menos ordinal, de modo que las observaciones pueden ser ordenadas dentro de cada bloque.

b. Procedimiento para el desarrollo de la prueba

Para cada bloque, los k grupos son ordenados en un rango de 1 a k

Los rangos asignados a las observaciones en cada uno de los k grupos se suman por separado para dar k sumas de rangos

Aplicar el estadístico de prueba que se basa en estos rangos es el siguiente:

$$A = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^b [R(X_{ij})]^2 \quad (\text{ec.10})$$

$$B = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^k Ri^2 \quad (\text{ec.11})$$

$$S = \frac{(K-1) \left[bB - \frac{b^2 k (k+1)^2}{4} \right]}{A - \frac{bk(k+1)^2}{4}} \quad (\text{ec.12})$$

Donde b es el número de filas (bloques) y k el número de columnas (tratamientos o grupos)

Comparar este valor calculado con el valor X^2 tabulados con k-1 grados de libertad y $1-\alpha$. Si $S > X^2(1-\alpha, k-1)$ se rechaza H_0 . ($X^2_{\text{tab}} = X^2(1-\alpha, k-1)$)

c. Comparaciones múltiples

Si la hipótesis nula es rechazada, la prueba de Friedman presenta un procedimiento para comparar los tratamientos por pares. Se dirá que los tratamientos i y j difieren significativamente si se cumple que:

$$|Ri - Rj| > t\left(1 - \frac{\alpha}{2}, (b-1), (k-1)\right) \sqrt{\frac{2b(A-B)}{(b-1)(k-1)}} \quad (\text{ec.13})$$

Donde $|Ri - Rj|$ es la diferencia entre la sumatoria de rangos en valor absoluto que corresponde a cada factor que serán comparados.

IV. MATERIALES Y METODOS

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE DE LA PLANTA DE LECHE

La caracterización del efluente se realizó con la finalidad de tener una línea base la cual pueda ser comparada con los resultados obtenidos tras el tratamiento de electrocoagulación.

4.1.1. Materiales

Los materiales usados para la caracterización fueron:

- Pinzas
- Protección: Mandil, mascarilla y guantes
- Conservación: Acido sulfúrico, acido nítrico, hielo y cooler
- Capsula de porcelana
- Cono imhoff
- Pipeta
- Botellas Winkler
- Vaso precipitado
- Reactivos de DQO
- Bagueta
- Reactor de DQO marca HACH
- Botellas de plástico con contrapa
- 3 Botellas de vidrio de boca ancha
- Agua destilada
- Filtros de fibra de vidrio de 47 mm de diámetro y 1 um de porosidad
- Bombilla de succión
- Agua destilado
- Mufla
- Cronometro
- Estufa

4.1.2. Metodología

La recolección de la muestra compuesta para la prueba final se realizó en 2 fechas, pues hubo un problema en la medición de la DBO_5 . Ambos muestreos se realizaron un día lunes, debido a que en este día se realizan todas las actividades productivas en la planta de leche (elaboración de queso, yogurt y empaquetado de leche). Debido a que el efluente de la planta piloto de leche es muy heterogéneo, se decidió tomar una muestra compuesta cada 30 min. Cada muestra simple estaba conformada por 4 L tomados desde las 8:30 am hasta la 1:30 pm para los parámetros de DQO, nitrógeno amoniacal, fósforo total, aluminio, SST y SS durante el primer monitoreo. En el caso de aceites y grasas, se realizó 3 muestras simples a las 8:30 am, 11:30 am y 1:30 pm, ya que para este parámetro no es conveniente un muestro compuesto y se eligió el valor más representativo. El segundo monitoreo se realizó con la finalidad de medir la DBO_5 , que no se pudo medir durante el primer monitoreo, y la DQO para tener un valor de referencia. El segundo monitoreo duró desde las 8:30 am hasta la 1 pm, pues este día el efluente dejó de salir un poco más temprano a la 1 pm. A la par se fueron midiendo los parámetros in situ de pH, conductividad, temperatura y turbidez durante el primer monitoreo. Durante el segundo monitoreo se redujo el tiempo de toma de muestra a 15 minutos a un volumen 1 L por cada muestra simple, debido a que durante este monitoreo ya no se midieron los parámetros in situ. Generándose así la posibilidad de tomar una mayor cantidad de muestras simples. Además, durante el primero monitoreo se observó que exista una variabilidad significativa cada 15 min por lo cual reducir el tiempo de muestreo a 15 min mejoraría la representatividad de la muestra. El volumen se redujo a 1 L por la cantidad de parámetros analizar era menor. Una vez realizado cada muestro, las muestras fueron llevadas a los laboratorios correspondientes para su posterior análisis según las metodologías del Cuadro 4.

Cuadro 4: Metodologías usadas para el análisis de los parámetros

Parámetro	Unidad	Metodología	Laboratorio
Demanda química de oxígeno	mg/L	SM N°5220-D	Ingeniería ambiental
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	SM N° 5210 B	Ingeniería ambiental
pH	Unidades de pH	SM N° 4500 H+ B	Ingeniería ambiental
Temperatura	°C	SM N° 2550 B	Ingeniería ambiental
Conductividad	mS/cm	SM N° 2510 B	Ingeniería ambiental
Aceites y grasas	mg/L	SM N° 5520-B	Envirotest
Fosforo total	mg/L	SM N°4500-P/B-E	Envirotest
Nitrógeno amoniacal	mg/L	SM N°4500-NH3_D	Envirotest
Aluminio	mg/L	EPA 200.7 (1994)	Envirotest
Sólidos suspendidos totales	mg/L	SM N°2540 D	Ingeniería ambiental
Sólidos sedimentables	mL/L*H	SM N°2540 F	Ingeniería ambiental

4.2. ARMADO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN

El sistema de electrocoagulación utilizado en la presente investigación estuvo conformado por 4 partes que fueron la cubeta de vidrio, cableado del electrocoagulador, los electrodos y la fuente de corriente continua.

4.2.1. Materiales

Los materiales usados para el armado del sistema de la electrocoagulación fueron los siguientes.

- Vidrio de 5mm
- Caño de plástico
- Silicona de vidrio
- 10 metros de cable 18 AWG
- Cuchilla
- Soldador
- 12 conectores cocodrilo
- 2 conectores banana
- Placa de aluminio
10cm*10cm*3mm
- Placa de hierro 10cm*10cm*3mm
- Fuente DC 3A marca HP

4.2.2. Metodología

Para un mejor entendimiento se procede a explicar cómo fue armada cada una de las partes a continuación:

a. Cubeta de vidrio

El tratamiento del efluente de la planta piloto de leche se realizó en una cubeta de vidrio con unas dimensiones de 21.2 cm de ancho, 15.2 cm de largo y 21.9 cm de altura con un espesor de vidrio de 5 mm que se puede apreciar en la Figura 8. Con el fin de que los electrodos pudieran estar suspendidos durante las pruebas se diseñaron 4 rieles de acrílico que soportaron el peso de los electrodos. La celda de electrocoagulación se diseñó para poder tratar 5.6 litros de efluente y está basado en el prototipo que construyó Aguilar (2015). El vidrio fue el material seleccionado, pues permitía apreciar con claridad todos los procesos que ocurren durante el proceso de electrocoagulación. Esta cubeta de vidrio se construyó conforme a las dimensiones que se muestran en el Anexo 1.



Figura 8: Cubeta de vidrio

b. Cableado del electrocoagulador

El cable 18 AWG de 10 m se cortó en trozos de 1.3 m, 40 cm, 50 cm, 45cm, 55 cm y 60 cm, lo sobrante se guardó en caso hubiese ocurrido una mala conexión. Luego se pelaron 10 cm de cable en cada extremo de los 7 trozos anteriormente obtenidos con el fin de liberar los 2 cables mellizos que son de diferente color. Por un lado de cada cable se pelaron los cables mellizos hasta mostrar el cobre con excepción del trozo de 1.3 m. En el trozo de 1.3 m, a una distancia de 30 cm desde cualquier extremo, se hizo otro pelado de 10 cm para liberar los cables mellizos dentro del cable de 18 AWG que luego fueron pelados hasta dejar el cobre al descubierto. Esta última sección pelada de cobre se cortó por la mitad y fue el punto donde se conectaron todos los cables. Los partes peladas de cobre de los cables se amarraron en forma de trenza según el cable mellizo que le correspondía y para asegurar la conexión se soldó. Por cuestiones de seguridad se envolvió la soldadura con cinta aislante. Finalmente se conectaron las bananas al extremo de cable más largo y las pinzas cocodrilo a los extremos más cortos.

c. Electrodo

Los materiales utilizados como electrodos fueron aluminio y hierro. Las dimensiones de los electrodos fueron de 10 cm de largo y 10 cm de ancho con 3 mm de espesor. El espaciado entre placas fue de 10 mm según lo sugería Aguilar (2015) y Arango (2007). Se utilizaron un total de 12 placas metálicas como electrodos, 6 de aluminio y 6 de hierro, tomando al aluminio como ánodo (electrodo de sacrificio) y el hierro como cátodo que fueron conectados de manera monopolar en paralelo a la fuente de corriente continua por el cableado anteriormente mencionado. En la Figura 9, se muestran las placas de aluminio y hierro.



(A)



(B)

Figura 9: Electrodo

(A) Placa de hierro

(B) Placa de aluminio

d. Fuente de corriente continua

La fuente de corriente continua utilizada durante esta investigación fue prestada por el departamento de física de la UNALM. Como características principales tiene una capacidad de regular hasta 60 V y 3A. Al ser esta fuente de corriente continua analógica se tuvo que trabajar con valores cada 0.5A, ya que no se podía elegir valores menores por un posible error de precisión. En la Figura 10, se muestran todas las partes del sistema de electrocoagulación unidas listas para el funcionamiento.



Figura 10: Sistema de electrocoagulación

4.3. DETERMINACIÓN DE LOS MEJORES PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACION

Con la finalidad de hallar el mejor rendimiento del método de electrocoagulación se tuvo que definir los parámetros de funcionamiento que tienen mayor efecto en este proceso. Los parámetros evaluados fueron el tiempo, corriente y pH. La turbidez se usó como parámetro control para evaluar la eficiencia de remoción del electrocoagulador. El agua utilizada durante las pruebas fue el agua residual de la planta piloto de leche que se vertía al drenaje a las 10:00 am. Se eligió este horario porque es una hora en la cual el suero de leche aun no se mezcla con el efluente, ya que si se tomaba una muestra con gran concentración de suero leche existía la posibilidad de sobrepasar la capacidad de medición del turbidímetro. Debido al color amarillento característico del suero que sobrepasa fácilmente la capacidad de lectura del turbidímetro de 1000 UNT (unidad nefelométrica de turbidez).

Con el propósito de saber si la red de cableado funcionaba correctamente, se realizaba una prueba de 15 minutos bajo 3 amperios con agua de caño.

4.3.1. Materiales

Los materiales utilizados en las pruebas experimentales fueron los siguientes.

- Agua residual de la planta de leche
- NAOH 0.5M
- HCL 0.5M
- Sistema de electrocoagulación
- Papel Tissue
- Agua destilada
- Cuchilla
- Cocodrilos pequeños
- Cronómetro
- pH HACH
- Turbidímetro

4.3.2. Metodología

La determinación de estos 3 parámetros se realizó en dos fases. En la primera, se determinó el tiempo y corriente eléctrica, y en la segunda fase el pH.

a. Determinación del tiempo y la intensidad de corriente

La turbidez se midió a los siguientes tiempos 0, 5, 10, 15, 20, 30,40 y 50 minutos para las corriente de 1, 1.5, 2, 2.5 y 3A. Al ser la fuente de corriente continua analógica, se prefirió trabajar con valores de amperaje enés de densidad de corriente, ya que trabajar con valores exactos de densidad de corriente hubiera sido muy difícil. Con lo cual se obtuvo 40 mediciones, pero con el fin de obtener una mayor fiabilidad en los datos se repitió este *set* de mediciones 5 veces. Cada *set* se hizo a un pH distinto 4.5, 5.5, 6.5, 7.5 y 8.5. La cantidad final de mediciones obtenidas fue de 200. Cada vez que se terminaba de medir un *set* se procedía a cambiar los conectores cocodrilos de las placas de aluminio, pues se terminaban desgastando. Las placas de hierro y aluminio tuvieron que ser raspadas cada vez que terminaban un *set* debido a la formación de una capa blanquecina (pasivación) en éstas.

Debido a que las características del efluente de la planta de leche son irregulares, se decidió recolectar dos baldes de 20 litros cada uno por cada *set*. El contenido de ambos

balde se mezclaron en un recipiente de mayor volumen antes de ingresar a la celda de electrocoagulación. Todo esto se realizó porque incluso tras un pequeño tiempo de diferencia, las características del efluente llegaban a variar significativamente. Para la determinación tanto del tiempo y corriente se utilizó la prueba no paramétrica de Friedman y consecuentemente una comparación por pares.

b. Determinación del pH

En primer momento se pensó utilizar los resultados obtenidos con los distintos valores de pH de las pruebas para determinar el tiempo y la corriente. Sin embargo, los valores tan variables de turbidez no permitían atribuir en totalidad la remoción al pH. Mientras más turbio sea el efluente hay mayor posibilidad que la remoción se incremente, debido al efecto barrido que funciona mejor bajo estas condiciones.

Puesto que el mejor tiempo y la mejor corriente se encontraban definidos, sólo era necesario variar el pH hasta encontrar aquel en cual se dé la mayor remoción. Se decidió medir dentro del rango de 3,5 a 9,5 cada 1 pH de diferencia, debido a que dentro del rango de 6.5 a 8.5 ocurre la formación de hidróxido de aluminio que es el principal coagulante, los demás valores se tomaron para ver el comportamiento del sistema de electrocoagulación a pH ácidos y alcalinos. Se desarrolló 5 *sets* que consistían en las 7 evaluaciones de pH dentro del rango 3,5 a 9,5. Se utilizó el HCl y el NaOH a 0.5 N como agentes modificadores del pH. Para esta prueba se recolectaron 56 litros del efluente, en 2 baldes 20L y 2 baldes 8L, los 4 baldes tuvieron que ser mezclados en un recipiente más grandes para poder homogenizar la muestra a tratar. Una vez finalizado el tratamiento, se midió el pH de salida debido a que este tiende a ser distinto al pH de entrada. Al igual que en la determinación del tiempo y la corriente se realizó el cambio de las pinzas cocodrilo una vez finalizado un *set*. La prueba estadística para la determinación del pH de trabajo fue la de Kruskal Wallis usando el programa estadístico minitab 17 en su período de prueba.

4.4. CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE TRAS LA ELECTROCOAGULACIÓN

Esta es la última parte de la fase experimental la cual permitió determinar la eficiencia de remoción del electrocoagulador por medio de la comparación de los parámetros de la caracterización inicial y la caracterización final realizada a los parámetros obtenidos tras aplicarse el método de electrocoagulación.

4.4.1. Materiales

Los materiales usados durante la aplicación del método de electrocoagulación se muestran a continuación.

- Pinzas
- Protección: Mandil, mascarilla y guantes
- Conservación: Acido sulfúrico, acido nítrico, hielo y cooler
- Capsula de porcelana
- Cono imhoff
- Pipeta
- Botellas Winkler
- 7 Botellas de plástico con contrapa
- 1 Botellas de vidrio de boca ancha color ambar
- Agua destilada
- Filtros de fibra de vidrio de 47 mm de diámetro y 1 μ m de porosidad
- Bombilla de succión
- Agua destilada
- Vaso precipitado
- Reactivos de DQO
- Bagueta
- Cocodrilos pequeños
- Reactor de DQO marca HACH
- Mufla
- Cronometro
- Estufa
- Desecador
- Incubadora DBO
- Equipo de filtración
- Balanza analítica
- Desecador
- pH HACH

4.4.2. Metodología

El efluente de la planta piloto de leche paso por el sistema de electrocoagulación bajo los mejores valores de pH, tiempo y corriente. Por cada parámetro se realizó una prueba de electrocoagulación. Una vez recolectada el agua tratada se envió a los laboratorios correspondientes para su análisis. Las metodologías utilizadas para la medición de cada parámetro fueron las mismas que se usaron en la caracterización del efluente de la planta de leche.

4.5. CONSUMO ELÉCTRICO

Adicionalmente se calculó el consumo de energía por parte del sistema de electrocoagulación para el caso hipotético en que se quiera tratar 1 m³ de agua residual.

El consumo de energía se realizó en base a la siguiente formula.

$$E = \frac{V*I*T}{Q} \text{ (ec.14)}$$

E: Energía consumida en un cierto tiempo para un volumen de agua KWh/m³

V: Voltaje en Voltios

I: Intensidad de corriente en Amperios

T: Tiempo en horas

Q: Volumen de agua tratada en L

Para un cálculo monetario se considera el precio de 0.471 soles por KWh, precio actual.

V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. CARACTERIZACION DEL EFLUENTE DE LA PLANTA DE LECHE

El primer día de monitoreo inició a las 8:30 am finalizando a las 13:30 pm como se muestra en el Cuadro 5. El proceso productivo inicio a las 10:00 am y culminó a las 12:10 pm, la principal característica durante este período son los elevados valores de turbidez. Antes de las 10:00 am y después de las 12:10 pm el efluente generado es agua de lavado de los equipos con menores valores de turbidez. Además se puede observar que durante el monitoreo las características del efluente no son las mismas a lo largo del tiempo e incluso durante la hora de producción. Otra dato interesante que se obtiene del Cuadro 5 es el valor de conductividad a las 12:10 pm que es el momento en el cual el efluente estaba cargado con suero de leche.

Si bien en el segundo de monitoreo no se analizaron mediciones in situ, se tomaron fotos para visualizar las características del efluente a lo largo del día. Ver Anexo 3.



(A)



(B)

Figura 11: Punto de monitoreo

(A) Vista exterior

(B) Vista interior

Cuadro 5: Caracterización de los parámetros in situ del efluente de la planta de leche

Hora	pH	Conductividad (mS/cm)	Temperatura (°C)	Turbidez (UNT)
08:30	7.88	3	24.6	5.89
9:00	8.77	3.2	26.4	45.5
09:30	8.28	3.1	28.6	5.6
10:00	7.11	3.2	27	Más de 1000
10:30	8.5	3.1	26	67
11:00	7.57	3	30.9	960
11:30	6.97	3.1	30.8	1000
12:00	8.55	3.1	31.1	30.7
12.:10	7.5	17.1	30.4	1000
12:30	9.2	3.1	30.2	21.8
13:00	8.98	3.2	26.4	41.4
13:30	9.3	3	27.4	20

Las proporciones del efluente de la planta de leche fueron distintas en los 2 días de monitoreo debido a la irregularidad del efluente. En el Cuadro 6, se muestra las 3 formas en que se manifestaba el efluente de la planta de leche que fueron agua de lavado, agua de producción y suero de queso. Además se aprecia una mayor proporción de suero queso en el segundo día de monitoreo, siendo esto información importante, ya que una mayor cantidad de suero de leche influirá en los valores de la DBO₅ y la DQO por su alto contenido de carga orgánica.

Cuadro 6: Composición del efluente de la planta de leche

Tipo de agua	Monitoreo 1		Monitoreo 2	
	Volumen (L)	%	Volumen (L)	%
Agua de lavado	20	41.6	7	36.84
Agua de producción	24	50	9	47.37
Suero de queso	4	8.3	3	15.79
Total	48	100	19	100

En el Cuadro 7 y Cuadro 8 se muestran los resultados obtenidos de los laboratorios de los dos días de monitoreo.

Cuadro 7: Caracterización de los parámetros de laboratorio monitoreo 1

Parámetro	Monitoreo 1
DQO	3100 mg/L
DBO ₅	-
pH	7.5
N-NH ₃	1.817 mg/L
Fosforo total	13.24 mg/L
Aceites y grasas	20 mg/L
Sólidos suspendidos totales	536.7 mg/L
Aluminio	0.773 mg/L
Sólidos sedimentables	0 mL/L*H
Temperatura	27.9 °C
Conductividad	4.3 mS/cm

Cuadro 8: Caracterización de los parámetros de laboratorio monitoreo 2

Parámetro	Monitoreo 2
DQO	5720mg/L
DBO ₅	5285 mg/L
pH	6.5
Temperatura	28.2°C
Conductividad	6 mS/cm

5.2. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO Y LA INTENSIDAD DE CORRIENTE

A continuación se muestra en el Cuadro 9 los promedios de remoción de turbidez obtenidos durante la primera fase de la determinación de las mejores condiciones de funcionamiento del electrocoagulador. Para poder ver los datos originales ir al Anexo 3.

Cuadro 9: Promedios de remoción de la turbidez

Tiempo (min)	Corriente				
	1 A	1.5 A	2 A	2.5 A	3 A
0	0%	0%	0%	0%	0%
5	-3.7%	-7.6%	11.9%	22.9%	26.7%
10	-10.7%	-1.2%	28.6%	58.2%	67.9%
15	-11.4%	37.3%	57.3%	77.1%	81.0%
20	16.6%	67.9%	70.5%	83.2%	84.5%
30	62.7%	81.1%	78.0%	84.8%	86.3%
40	80.5%	83.5%	77.8%	83.5%	85.15
50	86.3%	85.6%	78.0%	84.0%	82.55

Los resultados concuerdan con lo esperado que es una reducción de la turbidez con el tiempo. Sin embargo, cuando el amperaje aplicado era bajo de 1 a 1.5 A, Figura 12 y Figura 13, ocurre un incremento de la turbidez. Una de las posibles causas es la baja velocidad de producción de burbujas en estos amperajes, que no llevaron a la superficie los flóculos generados y se mantuvieron en la zona de toma de muestra. Esto permitió que el aluminio generado contribuya con la generación de la turbidez. Pasado 15 min y 10 min para 1A y 1.5 A los flóculos generados empezaron a decantar y así iniciando la disminución de la turbidez. Las curvas de remoción llegan a estabilizarse con el tiempo cerca a un 80% de remoción en promedio.

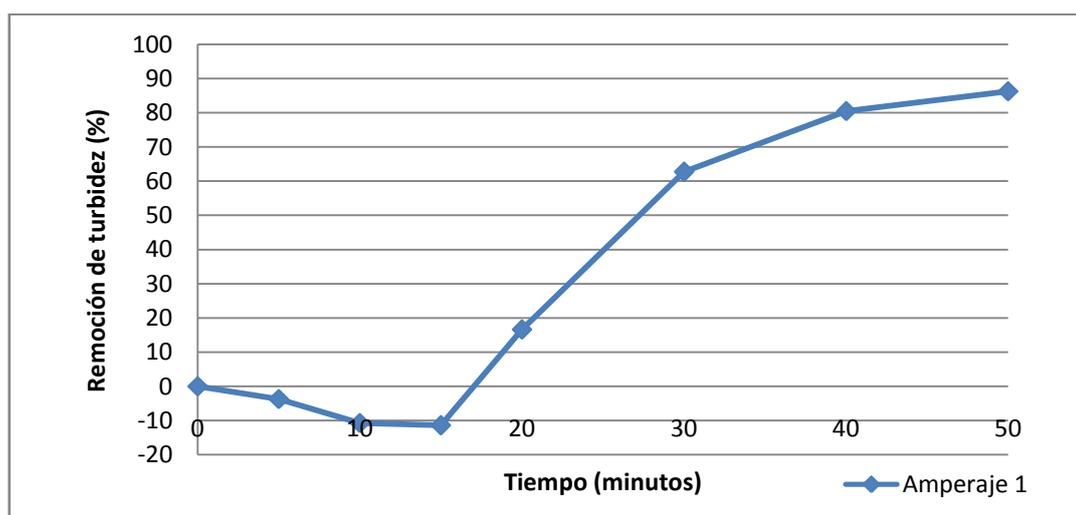


Figura 12: Histograma de remoción de turbidez a una corriente de 1A

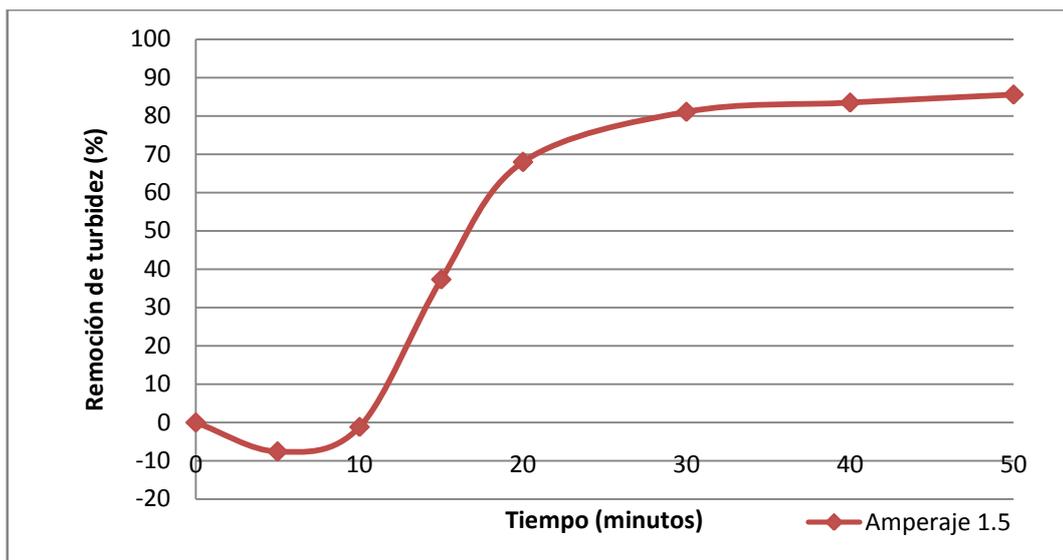


Figura 13: Histograma de remoción de turbidez a una corriente de 1.5A

Cuando el amperaje fue mayor 2A, 2.5A y 3A, que se observan en la Figura 14, Figura 15 y Figura 16, no hubo incremento de turbidez en todo el período de prueba. Una observación importante ocurre en la curva de 3A Figura 16, que llega a su máxima remoción a los 30 min de tratamiento y tras esto empieza a incrementarse la turbidez. Este comportamiento podría explicarse por la gran concentración de aluminio en el agua. Si bien el aluminio generado contribuye a la desestabilización de partículas coloidales en una proporción adecuada, una gran cantidad de aluminio vuelve estabilizar a las partículas por un exceso de cargas positivas.

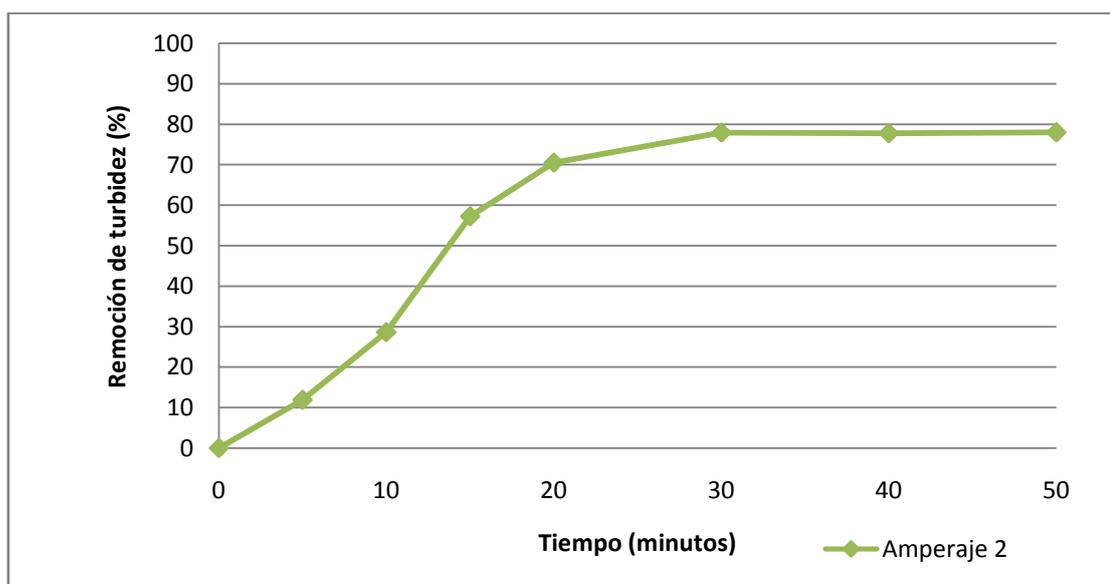


Figura 14: Histograma de remoción de turbidez a una corriente de 2A

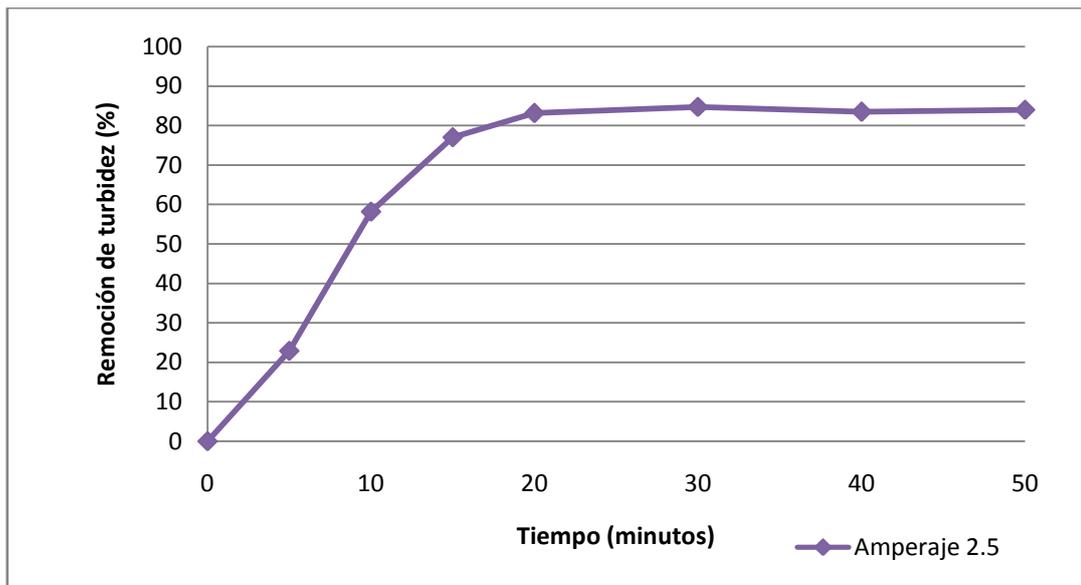


Figura 15: Histograma de remoción de turbidez a una corriente de 2.5A

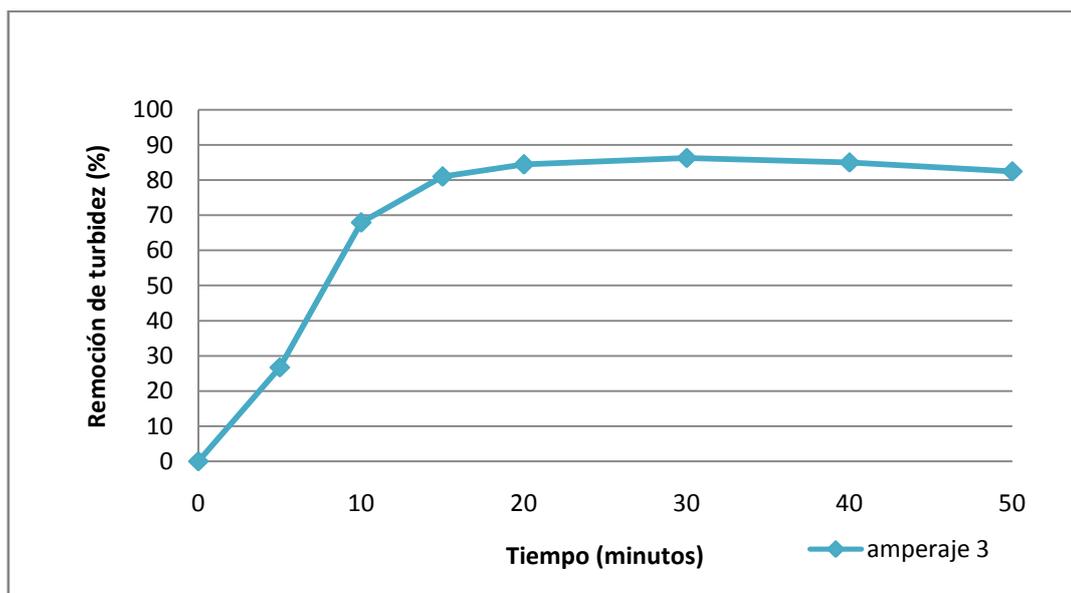


Figura 16: Histograma de remoción de turbidez a una corriente de 3A

En la Figura 17 se hizo un traslape de todas las curvas obtenidas y se apreció que al aumentarse la corriente las curvas de remoción tienden a desplazarse a la izquierda dando a entender que la remoción de la turbidez se da en un tiempo más corto conforme aumente la corriente.

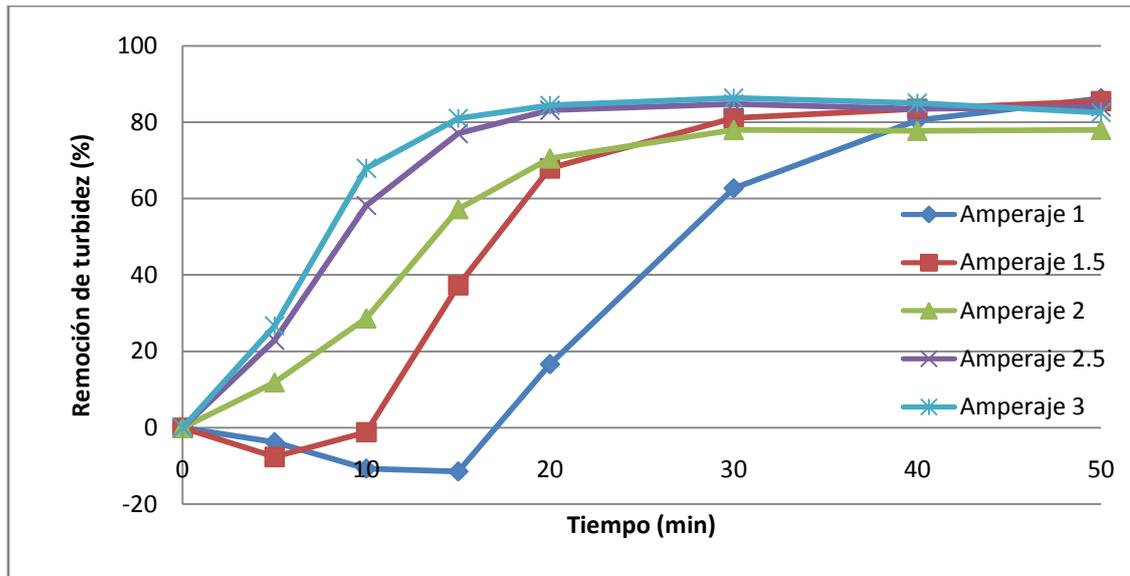


Figura 17: Comparación de los histogramas a los distintos valores de amperaje

5.2.1. Prueba de Friedman

Debido a que no se cumplió una distribución normal ver Anexo se tuvo que recurrir a esta prueba no paramétrica. La prueba de Friedman fue aplicada 2 veces durante esta investigación. En la primera ocasión, se utilizó independiente al tiempo y se usó como bloques los valores de corriente. En la segunda ocasión se invirtió el escenario utilizando a la corriente como variable independiente y a los distintos valores de tiempo como bloques.

a. Tiempo

Se planteó una hipótesis inicial para saber si existía diferencia entre los valores obtenidos.

Ho: La remoción obtenida bajo los distintos valores de tiempo es la misma

Hi: La remoción obtenida bajo los distintos valores de tiempo no es la misma

$$S=50.25 > \chi^2(0.95,7)=14.0671$$

Como el valor de S es mayor se rechaza la Ho.

A nivel de significancia del 0.05 se puede afirmar que la remoción obtenida bajo los distintos valores de tiempo no es la misma. Por lo cual se amerita una comparación por pares.

Al momento de realizarse la comparación por pares entre los distintos tiempos, ver Cuadro 10, se encontró que no existe diferencia significativa entre los 3 valores de tiempo con mayor remoción que son 30, 40 y 50 minutos como se puede observar en el Cuadro 11. Por lo cual estadísticamente cualquiera de estos 3 valores de tiempo podrían considerarse lo mismo al momento de la elección del mejor tiempo de remoción.

Cuadro 10: Comparación por pares-tiempo

Comparaciones (tiempo en minutos)	Ri-Rj	ALS(Fr)	Significancia
0 vs 5	0	6.0468	NS
0 vs 10	3	6.0468	NS
0 vs 15	7	6.0468	*
0 vs 20	16	6.0468	*
0 vs 30	25	6.0468	*
0 vs 40	23	6.0468	*
0 vs 50	26	6.0468	*
5 vs 10	3	6.0468	NS
5 vs 15	7	6.0468	*
5 vs 20	16	6.0468	*
5 vs 30	25	6.0468	*
5 vs 40	23	6.0468	*
5 vs 50	26	6.0468	*
10 vs 15	4	6.0468	NS
10 vs 20	13	6.0468	*
10 vs 30	22	6.0468	*
10 vs 40	20	6.0468	*
10 vs 50	23	6.0468	*
15 vs 20	9	6.0468	*
15 vs 30	18	6.0468	*
15 vs 40	27	6.0468	*
15 vs 50	25	6.0468	*
20 vs 30	9	6.0468	*
20 vs 40	13	6.0468	*
20 vs 50	10	6.0468	*
30 vs 40	2	6.0468	NS
30 vs 50	1	6.0468	NS
40 vs 50	3	6.0468	NS

Cuadro 11: Mediana de remoción de turbidez según el tiempo

Tiempo (min)	Mediana remoción turbidez (%)
0	0
5	11.87
10	28.64
15	57.25
20	70.53
30	81.06
40	83.47
50	84.02

b. Corriente

Al igual que en el caso del tiempo se planteó una hipótesis inicial para saber si existía diferencia entre los valores obtenidos.

Ho: La remoción obtenida bajo los distintos valores de corriente es la misma

Hi: La remoción obtenida bajo los distintos valores de corriente no es la misma

$$S=14.97 > \chi^2(0.95,4)=9.4877$$

Como el valor de S es mayor se rechaza la Ho.

A nivel de significancia del 0.05 se puede afirmar que la remoción obtenida bajo los distintos valores de corriente no es la misma. Por lo cual se amerita una comparación por pares.

Al realizarse la comparación por pares, ver Cuadro 12, no se obtuvo diferencia significativa entre los dos valores más altos de remoción que son 2.5A y 3A que se aprecia en el Cuadro 13. Esto indica que ambos valores podrían considerarse lo mismo al momento de la elección del máxima corriente de remoción desde un punto de vista estadístico.

Cuadro 12: Comparación por pares-corriente

Comparaciones	Ri-Rj	ALS(Fr)	Sig
1A vs 1.5A	4	9.576	NS
1A vs 2A	3	9.576	NS
1A vs 2.5A	15	9.576	*
1A vs 3A	18	9.576	*
1.5A vs 2A	1	9.576	NS
1.5A vs 2.5A	11	9.576	*
1.5A vs 3A	14	9.576	*
2A vs 2.5A	12	9.576	*
2A vs 3A	15	9.576	*
2.5A vs 3A	3	9.576	NS

Cuadro 13: Mediana remoción de turbidez según la corriente

Corriente	Mediana remoción turbidez (%)
1A	8.3
1.5A	52.62
2A	63.89
2.5A	81.71
3A	82.8

Finalmente para poder definir los mejores valores de tiempo y corriente fue necesario ver los histogramas de remoción. Al ver el histograma con una corriente de 3A (Figura 16), se puede observar que la máxima remoción ocurre a los 30 minutos y tras esto ocurre una disminución en la remoción de la turbidez, descartándose así los tiempos de 40 y 50 minutos. Lo mismo ocurre en el histograma de 2.5A (Figura 15), a tiempos mayores de 30 minutos se obtienen valores de remoción inferiores. Al compararse el valor de remoción obtenido bajo 3A y 30 min Vs 2.5A y 30 min, la mayor remoción se dio bajo el primer escenario estableciéndose así los valores 3A y 30 min como mejores parámetros de funcionamiento.

5.3. DETERMINACIÓN DEL PH

En esta segunda fase de la determinación de las mejores condiciones de funcionamiento del electrocoagulador, se usaron los valores de 30 min y 3A como valores constantes y el

valor de pH como variable. En el Cuadro 14, se ven los porcentajes de remoción alcanzados a los distintos valores de pH durante las 5 pruebas realizadas. Ver los resultados originales en el Anexo 3.

Cuadro 14: Porcentaje de remoción de turbidez a distintos valores de pH

pH	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Promedio
3.5	94.6%	96.9%	90.3%	92%	91.5%	93.06%
4.5	95.1%	97%	85.7%	78%	92.8%	89.72%
5.5	95.3%	96.6%	90.6%	82.9%	93.3%	91.74%
6.5	92.6%	96.6%	94.5%	91%	93.2%	93.58%
7.5	93.8%	97.3%	95.4%	94.9%	94.2%	95.12%
8.5	92.8%	96.6%	96.6%	97%	94.9%	95.58%
9.5	95.7%	97.2%	97%	95.5%	96%	96.28%

La Figura 18 está elaborada en base a los valores promedios del Cuadro 14 en la cual se distingue como ocurre una disminución en la eficiencia de remoción desde pH 9.5 siendo el mayor hasta el pH 4.5, pero el pH de 3.5 no sigue la dinámica y tiene un valor de remoción que llega a superar los valores de pH 4.5 y 5.5. A un valor de pH 3.5, la desestabilización de proteínas era bastante notoria llegándose a formar dos fases en la solución, ver Figura 19, lo cual favoreció a la remoción de la turbidez.

Lo resaltante en el proceso de electrocoagulación es la variación del pH una vez ha culminado el tratamiento como se observa en el Cuadro 15. A bajos pH existe un incremento; a pH cercanos a la neutralidad ocurre un efecto buffer que se puede apreciar en los pH 6.5 y 7.5. Finalmente a pH alcalinos tiende a existir una disminución del pH.

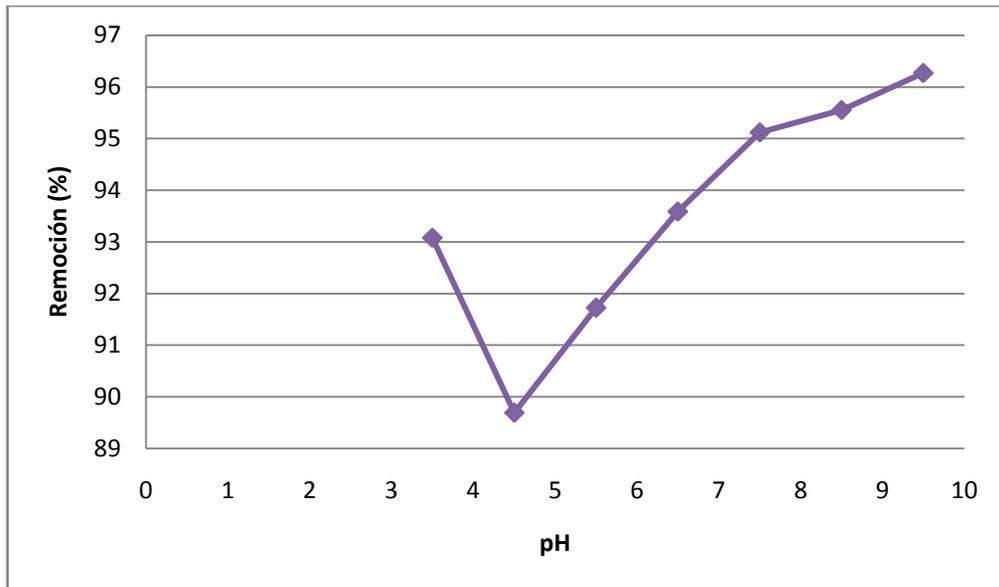


Figura 18: Variación de la remoción de turbidez a distinto pH

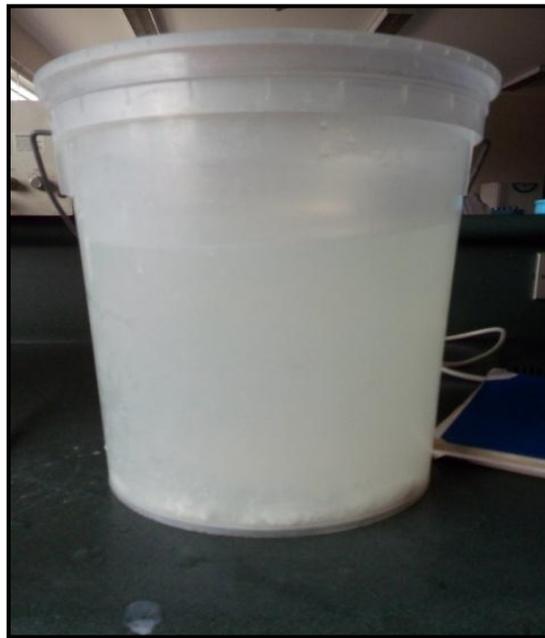


Figura 19: Agua residual pH 3.5

Cuadro 15: Variación del pH al finalizar la prueba de electrocoagulación

pH pre-tratamiento	pH Post-tratamiento		
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
3.5	4.65	4.79	6
4.5	5.53	5.94	6.49
5.5	6.84	6.47	7.08
6.5	7.06	6.91	7.1
7.5	7.56	8	7.95
8.5	8.3	8.29	8.71
9.5	7.97	8.65	8.99

5.3.1. Prueba de Kruskal-Wallis

Se realizó la prueba de Kruskal Wallis para la determinación del mejor valor de pH, ya que no presentó una distribución normal y fue necesario el uso de pruebas no paramétricas.

La hipótesis planteada para este caso fue la siguiente:

Ho: La remoción obtenida bajos los distintos valores de pH es la misma

Hi: La remoción obtenida bajos los distintos valores de pH no es la misma

Al ser P valor mayor que 0.05, ver Cuadro 16, no se rechaza Ho dando a entender que todos los valores de remoción obtenidos se consideran iguales estadísticamente. Entonces el valor a tomarse será el que tenga la mediana más alta, la cual se da a un pH 8.5.

Cuadro 16: Resultados prueba Kruskal-Wallis (Minitab)

pH	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z
3.5	5	92.02	13.2	-1.13
4.5	5	92.78	13	-1.18
5.5	5	93.3	13.6	-1.04
6.5	5	93.23	14.4	-0.85
7.5	5	94.86	20.8	0.66
8.5	5	96.55	23.4	1.27
9.5	5	95.95	27.6	2.26
General	35		18	
H=9.98 GL=6 P=0.126				

5.4. APLICACIÓN DEL METODO DE ELECTROCOAGULACION

Una vez determinados los valores de corriente, tiempo y pH se procedió a realizar la prueba de electrocoagulación bajo el mejor escenario de eficiencia. En la Figura 20 se observa el antes y después de electrocoagular el agua residual de la planta piloto de leche.



Figura 20: Electrocoagulación del agua residual

(A) Antes del tratamiento

(B) Después del tratamiento

Adicionalmente se muestra la Figura 21 en donde hay tres muestras. De derecha a izquierda agua sin tratar, agua tomada inmediatamente tras las electrocoagulación y el agua que sedimenta durante 30 minutos tras la electrocoagulación. Lo cual indica que va a ser necesario un post-tratamiento para poder retirar todo el material que sigue sedimentando tras la electrocoagulación.



Figura 21: Comparación del agua residual tratada y sin tratar

El Cuadro 17 es un resumen en donde se indican los valores de la caracterización del agua residual sin tratar y tratada, además incluye los valores dados por la normativa nacional dada por los VMA e internacional dada por el banco mundial.

Cuadro 17: Resultados de la caracterización del efluente sin tratar y el efluente tratado

Parámetro	Muestra sin tratar (1)	Muestra sin tratar(2)	Muestra tratada(1)	Muestra tratada (2)	Remoción (1) (%)	Remoción (2) (%)	Valores máximos admisibles	Reporte del banco mundial
DQO	3100 mg/L	5720	1520 mg/L	3148	51	45	1000 mg/L	250 mg/L
DBO ₅	-	5285	-	3020	-	42	500 mg/L	50 mg/L
pH	7.5	6.5	6.85-7.94	8.26-8.38	-	-	6 a 9	6 a 9
N-NH ₃	1.817 mg/L	-	6.839 mg/L	-	(-)276.4	-	80 mg/L	-
Fosforo total	13.24 mg/L	-	0.497 mg/L	-	96.2	-	-	2
Aceites y grasas	20 mg/L	-	menor 1mg/L	-	más del 95%	-	100 mg/L	10 mg/L
S.S	0 ml/L*h	-	32 ml/L*h	-	Incremento	-	8.5	
S.S.T	536.7 mg/L	-	114	-	78.8	-	500	50
Aluminio	0.773 mg/L	-	19.6	-	(-)2436.9	-	10	-
Temperatura	27.9 °C	28.2	29°C	28.6	Incremento	Incremento	menor a 35	incremento de 3

(1) Resultados del primer monitoreo

(2) Resultados del segundo monitoreo

(-) Incremento

Finalmente se procedió a analizar el por qué de la variación de cada uno de los parámetros.

5.4.1. DQO

A pesar de que en ambos casos se realizaron muestras compuestas en el segundo monitoreo se obtuvo un valor de 5720 mg/L de DQO que casi duplica el valor del primer monitoreo con 3100 mg/L. Esto está ligado a la irregularidad del propio efluente, ya que en el segundo día se captó más suero de queso lo cual terminó elevando la DQO final. Una vez realizado el tratamiento de electrocoagulación se obtuvieron las remociones de 51% y 45% para el primer y segundo día de monitoreo hasta valores de 1520 mg/L y 3148 mg/L de DQO respectivamente, que no fueron lo suficiente para cumplir con los VMA de 1000 mg/L de DQO. Tchamango et al. (2009) obtuvo una remoción del 61% y menciona que la remoción de la DQO es baja debido a la presencia de carbohidratos junto con algunos

compuestos orgánicos disueltos. Tchamango et al. (2009) menciona el estudio realizado por Chen en la remoción de DQO de un efluente de restaurantes que fueron tratados por electrocoagulación usando electrodos de aluminio en la que se atribuía el 72% de remoción a la insuficiente remoción de los compuestos orgánicos disueltos. Por otro lado Tchamango et al. (2009) menciona otro estudio realizado Sengil y Ozacar's cuyos resultados tras usar electrodos de hierro alcanzaron valores del 98 a 99% en la remoción de DQO que son muy superiores a los resultados obtenidos por Chen. Este alto rendimiento se atribuye a la oxidación anódica del hierro que favorece a la remoción de carbohidratos y compuestos orgánicos solubles. Sin embargo, la turbidez se incrementaba al final del tratamiento por la oxidación de Fe II a Fe III debido al oxígeno disuelto, además que el hidróxido de hierro formado colorea la solución que se torna amarillenta (Tchamango et al. 2009).

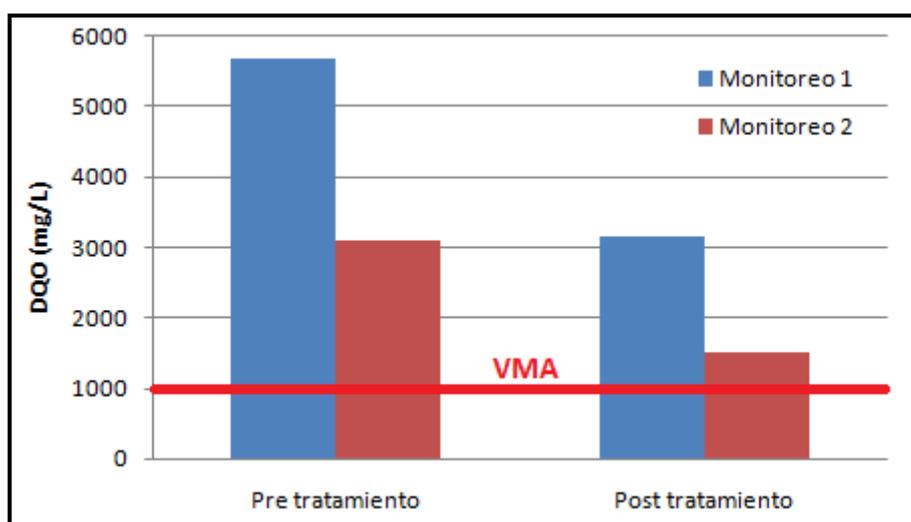


Figura 22: Valores de DQO antes y después del tratamiento

5.4.2. DBO₅

El valor de DBO₅ obtenido antes del tratamiento fue de 5285 mg/L muy superior a lo indicado por los VMA de 500 mg/L. Una vez realizado el tratamiento ocurrió una reducción del 42%, pero esta no fue suficiente para cumplir con los VMA pues se obtuvo un valor de 3020 mg/L. La baja remoción, como ya se explicó con la DQO, obtenida con electrodos de aluminio es debido a la presencia de compuestos orgánicos disueltos.

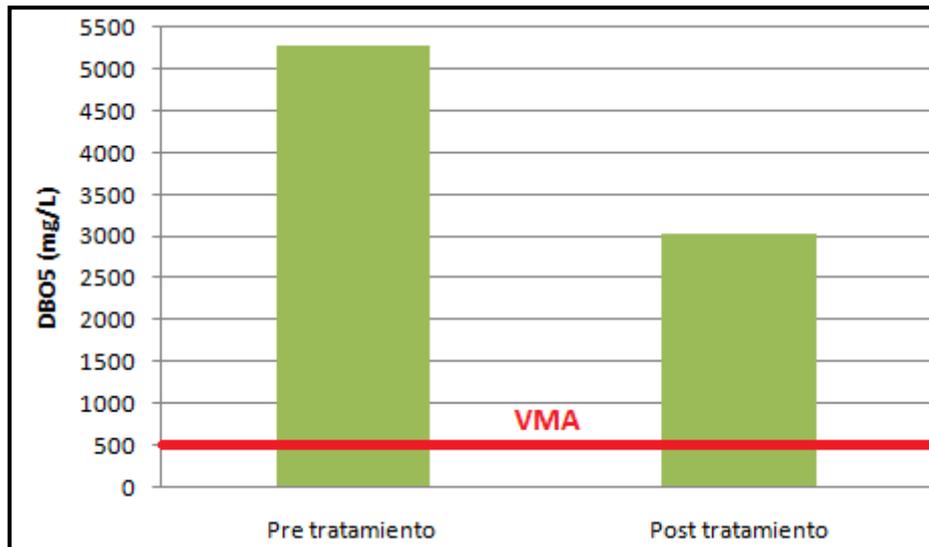


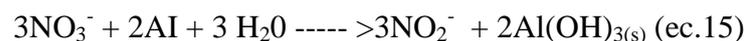
Figura 23: Valores de DBO₅ antes y después del tratamiento

5.4.3. PH

Los valores del pH inicial de 6.5 y 7.5 se elevaron hasta valor de 8.5 para cumplir el mejor escenario de eficiencia. A partir de este pH de 8.5 ocurrió una disminución hasta valores de pH entre 6.85-7.94 para el primer monitoreo y 8.26-8.38 para el segundo monitoreo. En ambos casos el pH final se encuentra dentro del rango que plantea los VMA. Esta reducción de pH se debe porque la electrocoagulación se dio bajo condiciones alcalinas en las que predomina Al(OH)_4^- que necesita OH^- para su formación reduciéndose así el pH.

5.4.4. Nitrógeno amoniacal

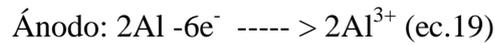
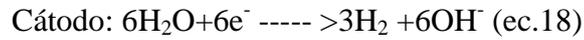
El valor de nitrógeno amoniacal antes como del tratamiento tuvo un valor de 1.817 mg/L cumpliendo con lo establecido por los VMA de 80 mg/L. Una vez ocurrido el tratamiento ocurre un incremento hasta un valor de 6.839 mg/L cumpliendo aun lo establecido por los VMA, ver Figura 24. Sin embargo, lo interesante de este parámetro es el incremento que sufre tras el tratamiento. Emamjomeh y Sivakumar (2005) explican que el principal mecanismo de la remoción del nitrato por el proceso de electrocoagulación se debe a una posible oxidación del aluminio en el ánodo que puede reducir el nitrato en la solución



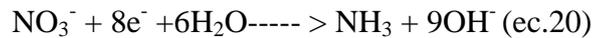
General



Las reacciones con los electrones incluidos



En la zona pre anódica, los iones nitratos se reducen a amonio



La producción de hidróxido de aluminio



La zona en la que se reduce el nitrato está cerca al cátodo que tiene carga negativa. Por lo que la reacción no debería darse acabo por repulsión de cargas iguales, carga negativa del cátodo y carga negativa del nitrato (NO_3^-). Sin embargo, el medio donde ocurren las reacciones es turbulento por la producción de burbujas en el ánodo y cátodo. Este movimiento es capaz de vencer la fuerza electrostática y permite al nitrato llegar a esta zona cerca del cátodo para que pueda llevarse a cabo la reacción.

Otro posible incremento puede deberse a la digestión aerobia que efectúan los microorganismos aerobios, descomponen la materia orgánica para la obtención de energía en su provecho. Las rutas que son parte de este tipo de metabolismo, implican la oxidación de las proteínas, las grasas y los carbohidratos, que producen como sustancias terminales: agua, bióxido de carbono, sulfatos y amoníaco. Si persisten las condiciones oxidantes, el amoníaco producido por los compuestos nitrogenados y que no escapa a la atmósfera en forma de gas, se oxida a nitritos y posteriormente a nitratos (Universidad Autónoma de Chihuahua, 2009).

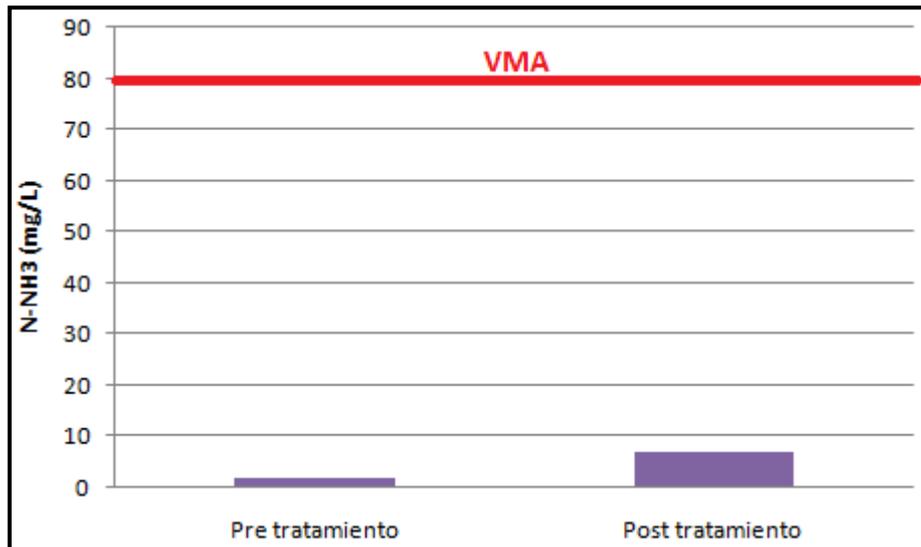


Figura 24: Valores de N-NH3 antes y después del tratamiento

5.4.5. Fósforo total

El banco mundial según su normativa internacional indica un valor de 2 mg/L con respecto al fósforo total el cual es sobrepasado por un valor de 13.24 mg/L obtenidos antes del tratamiento. Una vez tratado ocurre una reducción del 96.2% llegando a un valor de 0.497 mg/L cumpliendo los valores del banco mundial, ver Figura 25.

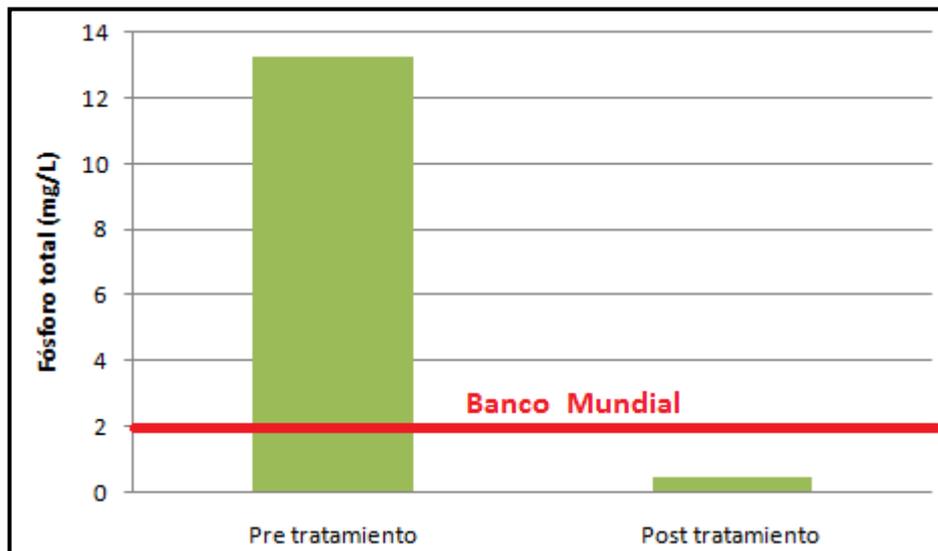


Figura 25: Valores de fósforo total antes y después del tratamiento

El pH de trabajo fue de 8.5 por lo cual las especies de fósforo durante el tratamiento fueran $\text{H}_2\text{PO}_4^{-2}$ y HPO_4^{-} , ver Figura 26. La formación de iones hidroxilo por parte del cátodo

favoreció la formación del ion fosfato que termina reaccionando con el aluminio en la solución para poder formar el fosfato de aluminio que tiende a precipitar generando así la reducción del fósforo. (Tchamango *et al.* 2009).

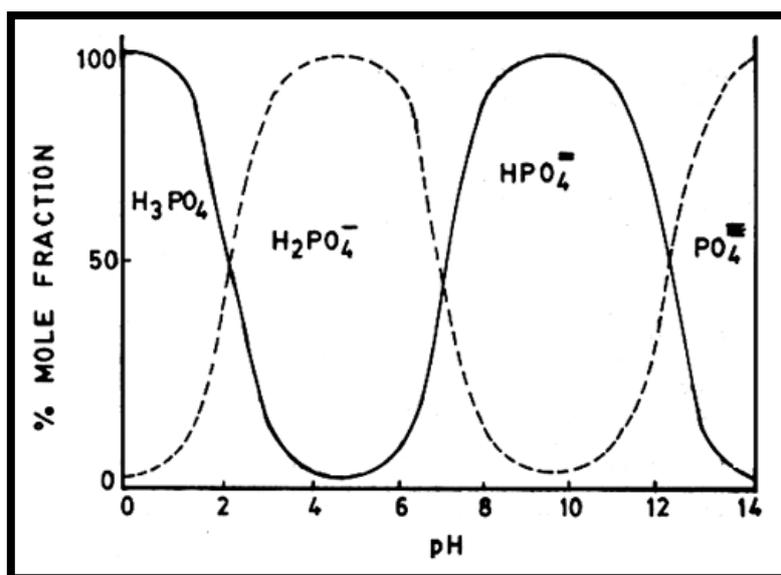
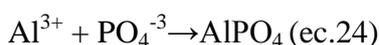


Figura 26: Distribución de las especies de fosforo conforme al pH

FUENTE: University of Delaware 2015.

5.4.6. Aceites y grasas

Los valores obtenidos de aceites y grasas antes del tratamiento resultó en una concentración 20 mg/L. Una vez tratada la muestra se obtuvo una reducción hasta un valor menor a 1 mg/L. Estos valores obtenidos tanto antes y después del tratamiento resultaron ser muy inferiores a los que indican los VMA con 100 mg/L, ver Figura 27. La reducción se debe a que los aceites y grasas se acumulan en la superficie del agua que en este caso es favorecida por la producción de burbujas se llevan a las partículas hacia la superficie. Además la toma de muestra del agua tratada se da a una altura media y no en la superficie donde se encuentran los aceites y grasas.

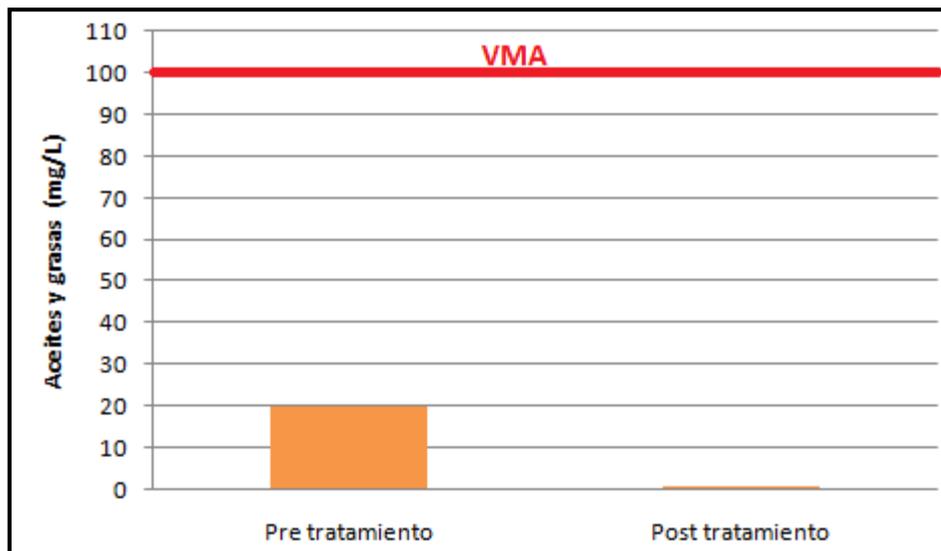


Figura 27: Valores aceites y grasas antes y después del tratamiento

5.4.7. Aluminio

Los valores de aluminio fueron de 0.773 mg/L antes de la prueba de electrocoagulación cumpliendo con los valores establecidos por los VMA de 10 mg/L; sin embargo, tras el tratamiento estos son superados por casi el doble con un valor de 19.6 mg/L, ver Figura 28. La alta concentración de aluminio tras el tratamiento se debe a que la muestra fue tomada inmediatamente tras finalizarse el proceso de electrocoagulación sin dar tiempo a una sedimentación. El principal contribuyente de aluminio al sistema es el electrodo de aluminio que sufre una oxidación para liberar iones aluminio en el agua. Usando ec.2 se obtiene una concentración de 89.9 mg/L muy superior a la que se obtuvo en la salida del reactor. Esto se debe a que mayor parte del aluminio se encuentra en la parte inferior o inferior del reactor debido a la precipitación o ascensión hasta la superficie por acción de las burbujas.

Desde un punto de vista ambiental, los altos niveles de concentración de aluminio han generado una nueva problemática por su toxicidad a altas concentraciones que debe ser abordada con tratamientos posteriores que terminen separando el coagulante remanente en el efluente, esto podría ser logrado con un tanque sedimentador. Además de realizarse una disposición adecuada a los lodos generados cuyas concentraciones de aluminio son aún mayores.

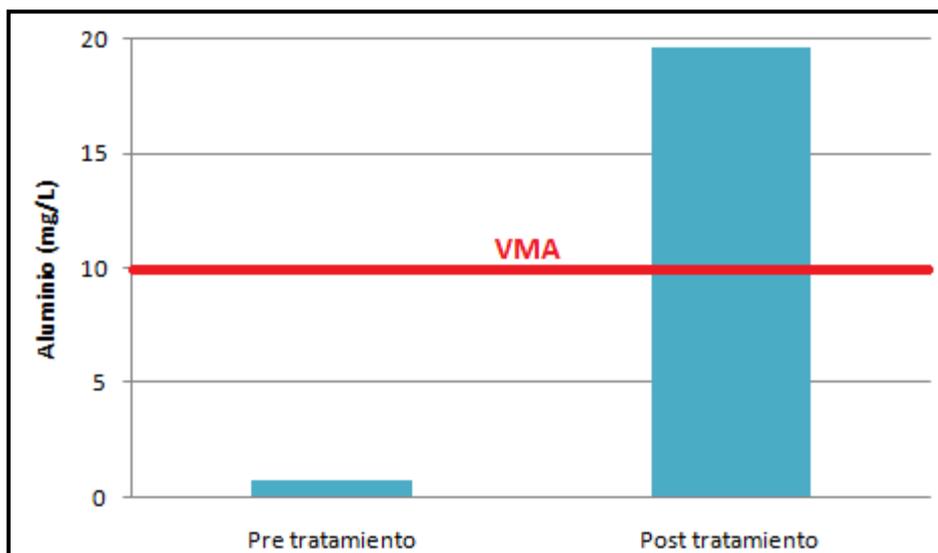


Figura 28: Valores de aluminio antes y después del tratamiento

5.4.8. Sólidos suspendidos totales

Los valores de sólidos suspendidos totales antes del tratamiento superaron por muy poco los valores establecidos por los VMA con 536.7 mg/L y 500 mg/L respectivamente. Tras el tratamiento se logró alcanzar una remoción del 78.8% hasta un valor de 114 mg/L que fue suficiente para cumplir con los VMA. Bin (2009) llegó a obtener una remoción entre el 80 y 83% de remoción muy similar a la que se obtuvo en esta investigación. Bin (2009) explica que la remoción se da cuando los iones del ánodo reaccionan con los coloides para poder formar flóculos que pueden ser fácilmente removidos de la solución. Los flóculos generados mediante la electrocoagulación están en mayor parte suspendidos en la superficie que mediante un desnatado pueden ser retirados. Hay otra parte que de los flóculos que sedimenta una vez se detiene la generación de burbujas que permite la sedimentación y barrido de los flóculos

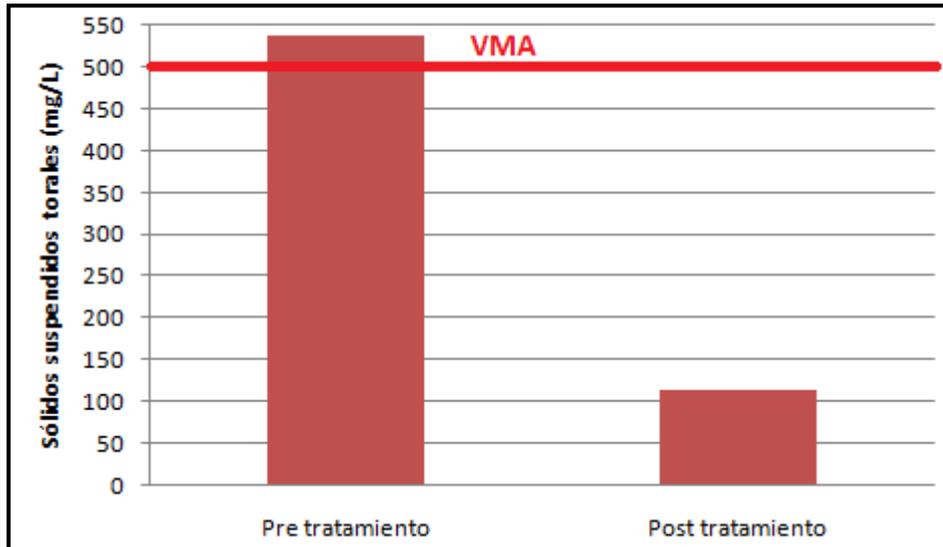


Figura 29: Valores de sólidos suspendidos totales antes y después del tratamiento

5.4.9. Sólidos sedimentables

El efluente de la planta de leche es una mezcla homogénea que no presentó sedimentación alguna. Por otro lado una vez ocurrido el tratamiento, se visualizó una fase líquida y otra sólida. Los sólidos sedimentables tras el tratamiento alcanzaron valores de 32 mL/L*H que superaron los VMA con un valor de 8.5 mL/L*H, ver Figura 30. Gran parte de estos sólidos sedimentables está conformada por el hidróxido de aluminio formado en la solución junto con los flocúlos de los sólidos suspendidos que no ascendieron por acción de las burbujas. Estos altos valores de sólidos sedimentables pueden generar problemas en las tuberías por una posible generación de obstrucciones en éstas.

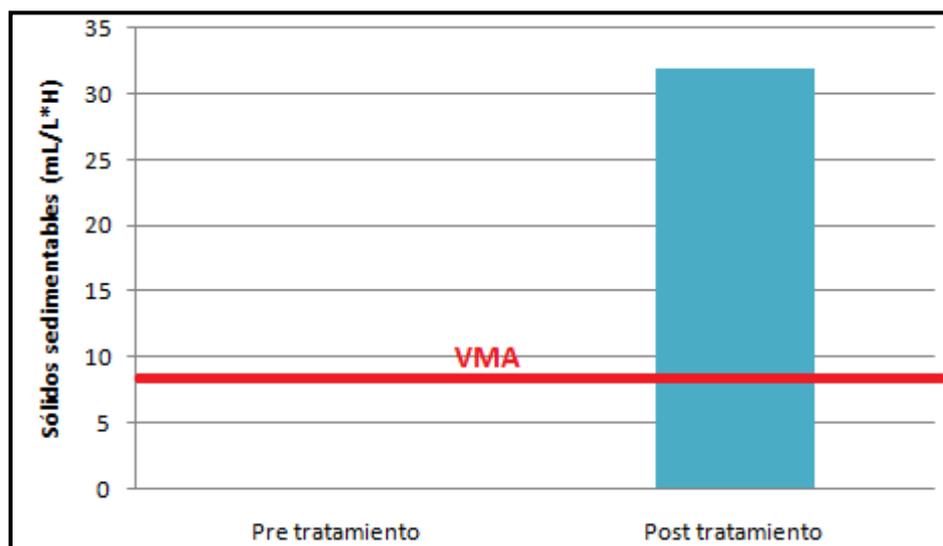


Figura 30: Valores de sólidos sedimentables antes y después del tratamiento

5.4.10. Temperatura

El aumento de temperatura generado tras la prueba de electrocoagulación no fue muy alto incrementándose desde 27.9°C hasta 29°C en el primer monitoreo y desde 28.2°C hasta 28.6°C en el segundo monitoreo, ambos casos se encontraron muy por debajo de los VMA de 35°C. El incremento se debe principalmente que una parte de la corriente se ha utilizado para el calentamiento del agua, éste aumento de temperatura será cada vez más grande al aumentarse la corriente haciendo cada vez más ineficiente el tratamiento.

5.5. CONSUMO DE ENERGÍA

Considerando que se trabajó bajo un tiempo de 30 min, corriente de 3 A, voltaje de 2.5 V y con 5.6 L de agua residual se pudo determinar el consumo de energía usando ec.14.

$$E = \frac{2.5V * 0.5H * 3A}{5.6L}$$

$$E = 0.67 \text{ KWh/m}^3$$

Por lo tanto el costo eléctrico de tratamiento de un m³ de agua residual sería S/ 0.341 considerando el precio de S/0.471 por Kwh, precio actual.

VI. CONCLUSIONES

1. Se caracterizó el efluente de la planta de leche obteniéndose parámetros que sobrepasan la normativa nacional de los VMA. Entre éstos hay que resaltar la DBO₅ y DQO que presentaban valores muy altos debidos principalmente a la presencia de suero de leche que tiene una carga orgánica muy elevada. Los SST también superaron los VMA, pero por muy poco. El fósforo total superó los valores internacionales sugeridos por el banco mundial, este parámetro no está considerado dentro de los VMA. Los demás parámetros analizados que fueron aluminio, pH, sólidos sedimentables, N-NH₃, aceites y grasas cumplían con los VMA.
2. Se determinaron los mejores parámetros de funcionamiento para el sistema de electrocoagulación los cuales fueron 30 minutos, 3A y 8.5 pH.
3. Se caracterizó el efluente tras ser tratado por el sistema de electrocoagulación obteniéndose disminución de algunos parámetros. La DBO₅ y DQO disminuyeron en concentración, pero no llegaron a cumplir los VMA. Los SST, pH, aceites y grasas disminuyeron hasta cumplir los VMA. El fósforo total se redujo a una concentración que le permitía cumplir los valores sugeridos por el banco mundial. Sin embargo, otros parámetros sufrieron un incremento en sus concentraciones. Los sólidos sedimentables y aluminio pasaron de cumplir los VMA a sobrepasar estos valores. El N-NH₃ se incrementó, pero este incremento no fue lo suficientemente grande para superar los VMA que ya se cumplían antes del tratamiento.

VII. RECOMENDACIONES

1. Medir el valor de la DQO antes que la DBO₅ para tenerlo como referencia, ya que la DBO₅ del efluente de la planta de leche es muy variable y dependiente de la concentración de suero de queso.
2. Hacer investigaciones utilizando al hierro como electrodo de sacrificio pues hay estudios que sustentan que este material es mejor coagulante cuando el agua residual presenta compuestos orgánicos solubles. También existe la posibilidad de hacer una combinación de hierro y aluminio como ánodos de sacrificio.
3. Debido a que algunos contaminantes no cumplieron con los VMA va a ser necesario el uso de otros tratamientos posteriores a la electrocoagulación, pues estos pueden llegar a generar nuevas problemáticas como la alta concentración aluminio que llega a ser tóxico o generar problemas de estancamiento en las tuberías por los altos valores de sólidos sedimentables.
4. Realizar estudios sobre el lodo generado del proceso de electrocoagulación con respecto a su capacidad de producir metano. El metano producido podría generar energía eléctrica para el funcionamiento del electrocoagulador.
5. No tocar el sistema de electrocoagulación cuando esté en funcionamiento por medidas de seguridad, sólo trabajar directamente con la fuente de corriente continua porque siempre hay peligro de descarga eléctrica.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar, MI; Sáez, J; Llórens, M; Soler, A; Ortuño JF. (2002). Tratamiento físico químico de aguas residuales coagulación-floculación. 1ed. España, Universidad de Murcia. 151p.
2. Aguilar, E. (2015). Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. Tesis Magister. Lima, Perú, UNMSM. 102p. Consultado 10 oct. 2016. Disponible en http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/cybertesis/4303/3/Aguilar_ae.pdf
3. Arango, A; Garcés, L. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de una planta de una industria láctea. Revista Universidad EAFIT 47(147):56-67. Consultado 9 de sep. 2016. Disponible en <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/764/672>
4. Berrenechea, A. (2004). Tratamiento de aguas para consumo humano plantas de filtración rápida manual I Teoría: capítulo 4 coagulación. In Vargas, L (coord.). 153-220p. Consultado 15 oct. 2016. Disponible en <http://bibliotecavirtual.minam.gob.pe/biam/bitstream/id/5657/BIV00012.pdf>
5. Barboza, I. (2011). Reducción de la carga de los contaminantes de las aguas residuales de la planta de tratamiento de Totorá-Ayacucho empleando la técnica de electrocoagulación. Tesis Magister. Lima, Perú, UNI. 131p. Consultado 5 ago. 2016. Disponible en http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/338/1/barboza_pg.pdf
6. Bin, M. (2009). Electrocoagulation for suspended solid removal in domestic wastewater treatment. Tesis Magister. Malasia, Universiti Technology Malaysia. 53p. Consultado 10 ene. 2017. Disponible en <http://eprints.utm.my/11997/1/MuhammadTaufiqRahmalanMFKA2009.pdf>

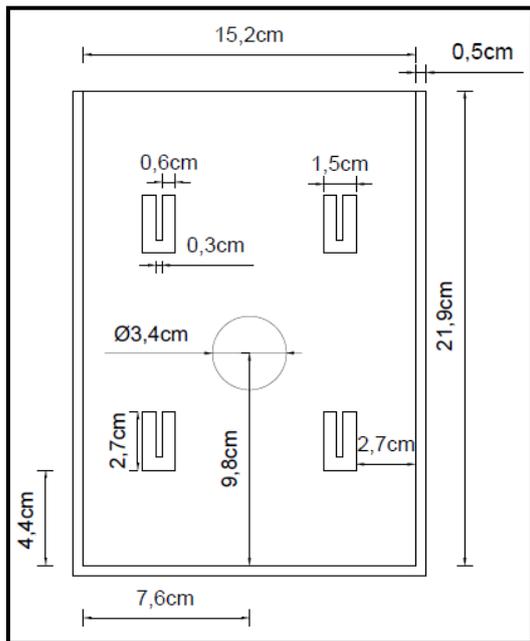
7. Butler,E; Hung, YT; Yu-Li, Ruth; Suleiman,M. (2011). Electrocoagulation in wastewater treatment. Tesis Magister. Water 3: 495-525p. Consultado 15 ene. 2017 Disponible en <http://www.mdpi.com/2073-4441/3/2/495>
8. Chen,X; Chen,G; Lock, P. (2000). Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. Separation and Purification Technology 19:65-76p. Consultado 15 ene. 2017. Disponible en <https://static1.squarespace.com/static/52fe73f6e4b05f81d6be283d/t/549edb91e4b00c1193aba8d3/1419697041330/Separation+of+Pollutants+from+Restaurant+Wastewater+by+Electrocoagulation.pdf>
9. Escuela Organización Industrial. (2008). Los vertidos del sector lácteo. Sevilla, España. 22p. Consultado 14 ene. 2017. Disponible en http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:48159/componente48157.pdf
10. Emamjomeh,M; Sivakumar,M.(2005). Electrocoagulation (EC) technology for nitrateremoval. 8p. Consultado 12 ene. 2017. Disponible en <http://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=2722&context=engpapers>
11. Gunukula, S.(2011).Electrocoagulation /Flotation treatment of synthethic surface water. Tesis Master. Ohio, USA, Cleveland State University. 116p. Consultado 12 ene. 2017. Disponible en <http://engagedscholarship.csuohio.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1481&context=etdarchive>
12. Hendricks, D.(2006).Water treatment: physical and chemical (civil and environmental engineering). CRC Press.1266p.
13. Heffron,J. (2009). Removal of trace heavy metals from drinking water by electrocoagulation.. Tesis magister. Wisconsin, USA, Marquette University.93p. Consultado 20 oct. 2016. Disponible en http://epublications.marquette.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1310&context=theses_open
14. Kabdaşlı,I; Arslan-Alaton ,I; Ölmez-Hancı,T; Tünay,O. (2012). Electrocoagulation application for industrial wastewaters: a critical review. Environmental technology review 1(1):2-45p. Consultado 20 oct. 2016. Disponible en <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/21622515.2012.715390>

15. Morales,E. (2014).Evaluación de la tratabilidad del efluente generado por la Planta Piloto de Leche UNALM aplicando un reactor UASB. Tesis ingeniero. Lima, Perú, UNALM.90p.
16. Perez,A.(1981). II coagulación y floculación. 36-95p. Consultado 18 oct. 2016. Disponible en http://www.bdigital.unal.edu.co/70/4/45_-_3_Capi_2.pdf
17. Porras,J; Angeles,H;Chue,J;Febres,G; Vega,E; Lopez de Castilla,C. (2013). Libro de texto del curso de métodos estadísticos para la investigación. 4ed. Lima, Perú, UNALM.240p.
18. Piña,M; Martin,A;Gonzales,CA;Prieto,F;Guevara,A;Garcia,JE.(2011). Revisión de variable de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. Revista mexicana de ingeniería química 10(2):257-271p. Consultado 23 oct. 2016. Disponible en <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v10n2/v10n2a10.pdf>
19. Ravina,L.(1993). Everything you want to know about coagulation & flocculation.... . 4 ed.Virgina, USA,Zeta-Meter.37p. Consultado 18 oct. 2016. Disponible en <http://www.zeta-meter.com/coag.pdf>
20. Sandoval ,L; Montellano,L; Piña, M; Sánchez,L. (2000). Potencial Zeta como una herramienta para determinar la aglomeración de las partículas en la reducción del volumen de lodo a disponer. 15p. Consultado 20 oct. 2016. Disponible en www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicona/R-0150.pdf
21. Tejero ,I;Suarez,J;Jácome,A,Temprano,J. (2006). Introducción a la ingeniería sanitaria y ambiental: Tema 18 coagulación-floculación.14p Consultado 25 oct. 2016. Disponible en <https://www.docsity.com/es/coagulacion-floculacion-ingenieria-sanitaria-y-ambiental-apuntes-tema-18/155114>
22. Tchamango,S; Nanseu-Nikki,C; Ngammen,E; Hadjiev,D; Darchen, A. (2009). Treatment of dairy effluents by electrocoagulation using aluminium electrodes. Science of Total Environment (408) 947:952. Consultado 14 ene. 2017. Disponible en <https://efluentesindustrialactea.wikispaces.com/file/view/treatment+of+dairy+effluents+by+electrocoagulation+using+aluminium+electrodes.pdf>
23. Universidad Autónoma de Chihuahua, (2009). Microbiología en los sistemas de tratamiento de agua. 11p.
24. University of Delaware. (2015). Phosphorus cycling in the agricultural landscape.4p. Consultado 12 ene. 2017. Disponible en <http://extension.udel.edu/factsheets/phosphorus-cycling-in-agriculture/>

25. Vepsäläinen, M. (2012). Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and wastewaters. Tesis Doctor. Mikkeli, Finland, University of Jyväskylä. 96p. Consultado 15 oct. 2016. Disponible en <http://www.vtt.fi/inf/pdf/science/2012/S19.pdf>
26. VIVIENDA (Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento). DECRETO SUPREMO N° 001-2015-VIVIENDA. Perú 10 en. 2015.
27. Viades, J. (2012). Físicoquímica de los alimentos unidad 4 coloides. 14p. Consultado 18 oct. 2016. Disponible en http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad4.Coloides_23499.pdf
28. Villena, L. (1995). I. Jornadas sobre contaminación ambiental por la ganadería e industrias agroalimentarias. 198p. Consultado 14 oct. 2016. Disponible en <http://www.insacan.org/racvao/anales/1995/08-1995.pdf>
29. World Bank Group. (2007). Environmental, Health, and Safety Guidelines for Dairy Processing. Consultado 20 oct. 2016. Disponible en <http://www.fpeac.org/dairy/EnvironmentalHealthSafety-DairyProcessing.pdf>

IX.ANEXOS

ANEXO 1: DIMENSIONES DE LA CUBETA DE VIDRIO



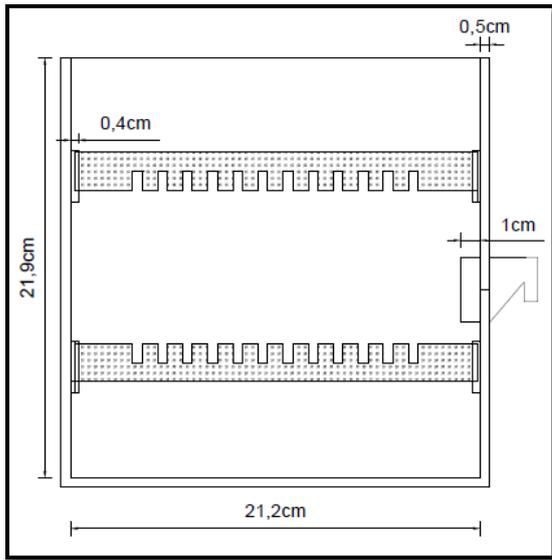
(A)

(B)

Figura 31: Vista frontal de la cubeta de vidrio

(A) Diseño en Autocad

(B) Cubeta real



(A)

(B)

Figura 32: Vista lateral de la cubeta de vidrio

(A) Diseño en Autocad.

(B) Cubeta real

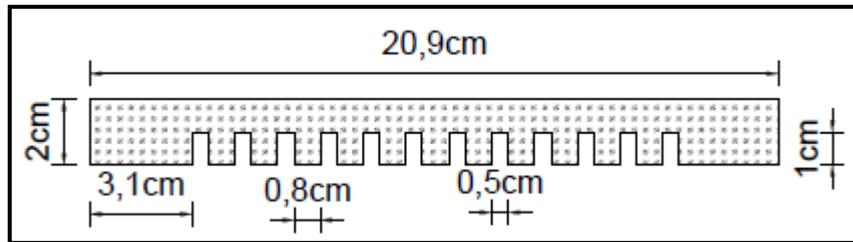


Figura 33: Soporte de placas

ANEXO 2: COMPORTAMIENTO DEL EFLUENTE DE LA PLANTA PILOTO DE LECHE



Agua residual 8:30am



Agua residual 8:45am



Agua residual 9:00am



Agua residual 9:15am



Agua residual 9:30am



Agua residual 9:45am



Agua residual 10:00am



Agua residual 10:15am



Agua residual 10:30am



Agua residual 10:45am



Agua residual 11:00am



Agua residual 11:15am



Agua residual 11:30am



Agua residual 11:45am



Agua residual 12:00m



Agua residual 12:15pm



Agua residual 12:30pm



Agua residual 12:45pm



Agua residual 1:00pm

**ANEXO 3: RESULTADOS DE LA DETERMINACION DE LOS MEJORES
PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE
ELECTROCOAGULACION**

Tiempo y corriente

Medición	pH	Tiempo (min)	Turbidez(UNT)	Remoción (%)	Amperaje (A)
1	8.5	0	146	0	1
2	8.5	5	122	16.4	1
3	8.5	10	155	-6.2	1
4	8.5	15	177	-21.2	1
5	8.5	20	139	4.8	1
6	8.5	30	82	43.8	1
7	8.5	40	53	63.7	1
8	8.5	50	47	67.8	1
9	8.5	0	120	0	1.5
10	8.5	5	145	-20.8	1.5
11	8.5	10	169	-40.8	1.5
12	8.5	15	130	-8.3	1.5
13	8.5	20	78	35	1.5
14	8.5	30	59	50.8	1.5
15	8.5	40	55	54.2	1.5
16	8.5	50	45	62.5	1.5
17	8.5	0	71	0	2
18	8.5	5	97	-36.6	2
19	8.5	10	120	-69	2
20	8.5	15	90	-26.8	2
21	8.5	20	59	16.9	2
22	8.5	30	49	31	2
23	8.5	40	49	31	2
24	8.5	50	49	31	2
25	8.5	0	159	0	2.5
26	8.5	5	158	0.6	2.5
27	8.5	10	106	33.3	2.5
28	8.5	15	61	61.6	2.5
29	8.5	20	50	68.6	2.5
30	8.5	30	53	66.7	2.5
31	8.5	40	62	61	2.5
32	8.5	50	57	64.2	2.5

Continuación

33	8.5	0	162	0	3
34	8.5	5	152	6.2	3
35	8.5	10	74	54.3	3
36	8.5	15	56	65.4	3
37	8.5	20	45	72.2	3
38	8.5	30	41	74.7	3
39	8.5	40	46	71.6	3
40	8.5	50	68	58	3
41	7.5	0	501	0	1
42	7.5	5	547	-9.2	1
43	7.5	10	594	-18.6	1
44	7.5	15	619	-23.6	1
45	7.5	20	494	1.4	1
46	7.5	30	199	60.3	1
47	7.5	40	108	78.4	1
48	7.5	50	63	87.4	1
49	7.5	0	521	0	1.5
50	7.5	5	592	-13.6	1.5
51	7.5	10	572	-9.8	1.5
52	7.5	15	294	43.6	1.5
53	7.5	20	132	74.7	1.5
54	7.5	30	57	89.1	1.5
55	7.5	40	44	91.6	1.5
56	7.5	50	40	92.3	1.5
57	7.5	0	417	0	2
58	7.5	5	401	3.8	2
59	7.5	10	330	20.9	2
60	7.5	15	140	66.4	2
61	7.5	20	75	82	2
62	7.5	30	46	89	2
63	7.5	40	52	87.5	2
64	7.5	50	52	87.5	2
65	7.5	0	453	0	2.5
66	7.5	5	384	15.2	2.5
67	7.5	10	207	54.3	2.5
68	7.5	15	98	78.4	2.5
69	7.5	20	48	89.4	2.5
70	7.5	30	50	89	2.5
71	7.5	40	52	88.5	2.5

Continuación

72	7.5	50	51	88.7	2.5
73	7.5	0	453	0	3
74	7.5	5	384	15.2	3
75	7.5	10	207	54.3	3
76	7.5	15	98	78.4	3
77	7.5	20	48	89.4	3
78	7.5	30	50	89	3
79	7.5	40	52	88.5	3
80	7.5	50	51	88.7	3
81	6.5	0	867	0	1
82	6.5	5	1000	-15.3	1
83	6.5	10	1000	-15.3	1
84	6.5	15	996	-14.9	1
85	6.5	20	604	30.3	1
86	6.5	30	160	81.5	1
87	6.5	40	83	90.4	1
88	6.5	50	38	95.6	1
89	6.5	0	898	0	1.5
90	6.5	5	971	-8.1	1.5
91	6.5	10	874	2.7	1.5
92	6.5	15	374	58.4	1.5
93	6.5	20	110	87.8	1.5
94	6.5	30	47.6	94.7	1.5
95	6.5	40	37	95.9	1.5
96	6.5	50	34	96.2	1.5
97	6.5	0	749	0	2
98	6.5	5	600	19.9	2
99	6.5	10	242	67.7	2
100	6.5	15	85	88.7	2
101	6.5	20	50.4	93.3	2
102	6.5	30	37	95.1	2
103	6.5	40	38.3	94.9	2
104	6.5	50	41.5	94.5	2
105	6.5	0	722	0	2.5
106	6.5	5	475	34.2	2.5
107	6.5	10	168	76.7	2.5
108	6.5	15	57.6	92	2.5
109	6.5	20	49	93.2	2.5
110	6.5	30	38.2	94.7	2.5

Continuación

111	6.5	40	39.8	94.5	2.5
112	6.5	50	40	94.5	2.5
113	6.5	0	739	0	3
114	6.5	5	474	35.9	3
115	6.5	10	135	81.7	3
116	6.5	15	57.2	92.3	3
117	6.5	20	39.9	94.6	3
118	6.5	30	35.4	95.2	3
119	6.5	40	36.8	95	3
120	6.5	50	40.2	94.6	3
121	5.5	0	321	0	1
122	5.5	5	347	-8.1	1
123	5.5	10	397	-23.7	1
124	5.5	15	392	-22.1	1
125	5.5	20	364	-13.4	1
126	5.5	30	188	41.4	1
127	5.5	40	76.7	76.1	1
128	5.5	50	46.1	85.6	1
129	5.5	0	268	0	1.5
130	5.5	5	265	1.1	1.5
131	5.5	10	219	18.3	1.5
132	5.5	15	105	60.8	1.5
133	5.5	20	65.4	75.6	1.5
134	5.5	30	46.6	82.6	1.5
135	5.5	40	39.2	85.4	1.5
136	5.5	50	43.9	83.6	1.5
137	5.5	0	313	0	2
138	5.5	5	232	25.9	2
139	5.5	10	140	55.3	2
140	5.5	15	77.5	75.2	2
141	5.5	20	84.6	73	2
142	5.5	30	49.8	84.1	2
143	5.5	40	47.8	84.7	2
144	5.5	50	45.6	85.4	2
145	5.5	0	319	0	2.5
146	5.5	5	216	32.3	2.5
147	5.5	10	117	63.3	2.5
148	5.5	15	74.6	76.6	2.5
149	5.5	20	56.4	82.3	2.5

Continuación

150	5.5	30	42.4	86.7	2.5
151	5.5	40	42.4	86.7	2.5
152	5.5	50	43.5	86.4	2.5
153	5.5	0	319	0	3
154	5.5	5	206	35.4	3
155	5.5	10	104	67.4	3
156	5.5	15	61.8	80.6	3
157	5.5	20	51	84	3
158	5.5	30	44.2	86.1	3
159	5.5	40	47.8	85	3
160	5.5	50	46.1	85.5	3
161	4.5	0	930	0	1
162	4.5	5	953	-2.5	1
163	4.5	10	835	10.2	1
164	4.5	15	700	24.7	1
165	4.5	20	373	59.9	1
166	4.5	30	126	86.5	1
167	4.5	40	58.1	93.8	1
168	4.5	50	46	95.1	1
169	4.5	0	642	0	1.5
170	4.5	5	621	3.3	1.5
171	4.5	10	489	23.8	1.5
172	4.5	15	436	32.1	1.5
173	4.5	20	214	66.7	1.5
174	4.5	30	76.4	88.1	1.5
175	4.5	40	61.8	90.4	1.5
176	4.5	50	44.2	93.1	1.5
177	4.5	0	630	0	2
178	4.5	5	338	46.3	2
179	4.5	10	199	68.4	2
180	4.5	15	109	82.7	2
181	4.5	20	78.9	87.5	2
182	4.5	30	58.4	90.7	2
183	4.5	40	58.8	90.7	2
184	4.5	50	53.5	91.5	2
185	4.5	0	319	0	2.5
186	4.5	5	216	32.3	2.5
187	4.5	10	117	63.3	2.5
188	4.5	15	74.6	76.6	2.5

Continuación

189	4.5	20	56.4	82.3	2.5
190	4.5	30	42.4	86.7	2.5
191	4.5	40	42.4	86.7	2.5
192	4.5	50	43.5	86.4	2.5
193	4.5	0	319	0	3
194	4.5	5	206	35.4	3
195	4.5	10	104	67.4	3
196	4.5	15	61.8	80.6	3
197	4.5	20	51	84	3
198	4.5	30	44.2	86.1	3
199	4.5	40	47.8	85	3
200	4.5	50	46.1	85.5	3

pH

Prueba	pH	Turbidez pre tratamiento UNT	Turbidez post tratamiento UNT
1	3.5	637	34.2
1	4.5	547	26.8
1	5.5	626	29.4
1	6.5	476	35
1	7.5	587	36.4
1	8.5	574	41.4
1	9.5	630	27.3
2	3.5	922	28.3
2	4.5	910	27.7
2	5.5	897	30.9
2	6.5	931	31.7
2	7.5	928	25.3
2	8.5	957	33
2	9.5	958	26.6
3	3.5	630	60.9
3	4.5	660	94.7
3	5.5	732	69.1
3	6.5	718	39.4
3	7.5	664	30.4
3	8.5	726	25
3	9.5	669	20.3

Continuación

4	3.5	510	40.7
4	4.5	554	122
4	5.5	574	98.2
4	6.5	564	51
4	7.5	566	29.1
4	8.5	619	18.6
4	9.5	624	27.9
5	9.5	454	38.7
5	9.5	485	35
5	9.5	436	29.2
5	9.5	431	29.2
5	9.5	419	24.1
5	9.5	410	21
5	9.5	410	16.6

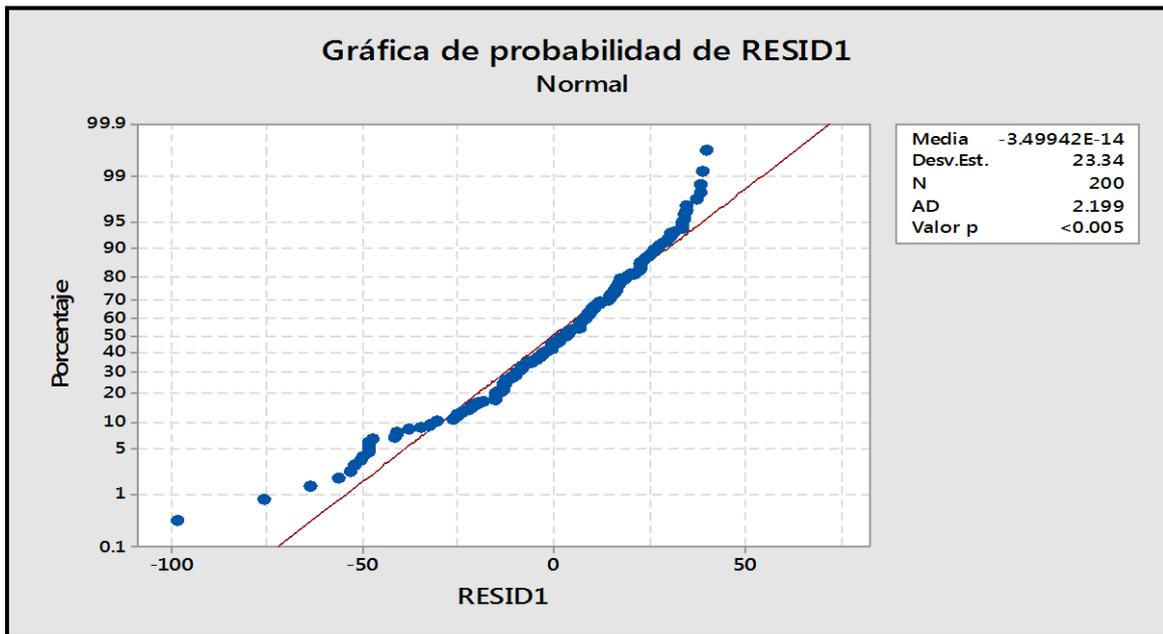
ANEXO 4: ANALISIS ESTADISTICO

1. Prueba estadística para la corriente y el tiempo.

En primera instancia se debe verificar la distribución de los errores.

Ho: Los errores se distribuyen normalmente.

Hi: Los errores no se distribuyen normalmente.



Al ser p valor menor que 0.05 se rechaza Ho. De tal modo que a un nivel de significancia de 0.05 se puede afirmar que los errores no se distribuyen normalmente. De modo que será necesario el uso de las pruebas no paramétricas.

2. Prueba de Friedman

a. Variable independiente tiempo- corriente en bloque

Corriente	Tiempo							
	0min	5min	10min	15min	20min	30min	40min	50min
1A	0	-3.73	-10.71	-11.41	16.6	62.71	80.49	86.31
1.5A	0	-7.64	-1.17	37.3	67.94	81.06	83.47	85.55
2A	0	11.87	28.64	57.25	70.53	77.97	77.76	77.98
2.5A	0	25.66	60.3	78.87	84.54	85.7	84.71	85.47
3A	0	31.77	71.04	82.59	85.41	86.8	86.28	83

Nota: Remoción en porcentaje

Luego se ordena los resultados en cada bloque

Corriente	Tiempo							
	0min	5min	10min	15min	20min	30min	40min	50min
1A	4	3	2	1	5	6	7	8
1.5A	3	1	2	4	5	6	7	8
2A	1	2	3	4	5	7	6	8
2.5A	1	2	3	4	5	8	6	7
3A	1	2	3	4	6	8	7	5
Suma de rangos	10	10	13	17	26	35	33	36

Usando ec 14, ec 15 y ec 16 se obtiene que.

$$A=754$$

$$B=729.6$$

$$S= 50.25$$

$$K=8$$

$$b=5$$

El valor ALS(Fr) se obtiene resolviendo la parte derecha de la ec.13 que se termina comparando con la diferencia de la sumatoria de rango que corresponde a cada factor.

$$ALS(Fr)=6.0468$$

b. Variable independiente corriente- tiempo en bloque

Tiempo	Corriente				
	1A	1.5A	2A	2.5A	3A
0min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5min	-3.73	-7.64	11.87	25.66	31.77
10min	-10.71	-1.17	28.64	60.30	71.04
15min	-11.41	37.30	57.25	78.87	82.59
20min	16.60	67.94	70.53	84.54	85.41
30min	62.71	81.06	77.97	85.70	86.80
40min	80.49	83.47	77.76	84.71	86.28
50min	86.31	85.55	77.98	85.47	83.00

Nota: Remoción en porcentaje

Luego se ordena los resultados en cada bloque

Tiempo	Corriente Amperios				
	1A	1.5A	2A	2.5A	3A
0 min	3	3	3	3	3
5min	2	1	3	4	5
10min	1	2	3	4	5
15min	1	2	3	4	5
20min	1	2	3	4	5
30min	1	3	2	4	5
40min	2	3	1	4	5
50min	5	4	1	3	2
Suma de rangos	16	20	19	30	35

Usando la ec 14, ec 15 y ec 16 se obtiene que.

$$A=430$$

$$B=392.75$$

$$S= 14.97$$

$$K=5$$

$$b=8$$

El valor ALS(Fr) se obtiene resolviendo la parte derecha de la ec.13 que se termina comparando con la diferencia de la sumatoria de rango que corresponde a cada factor.

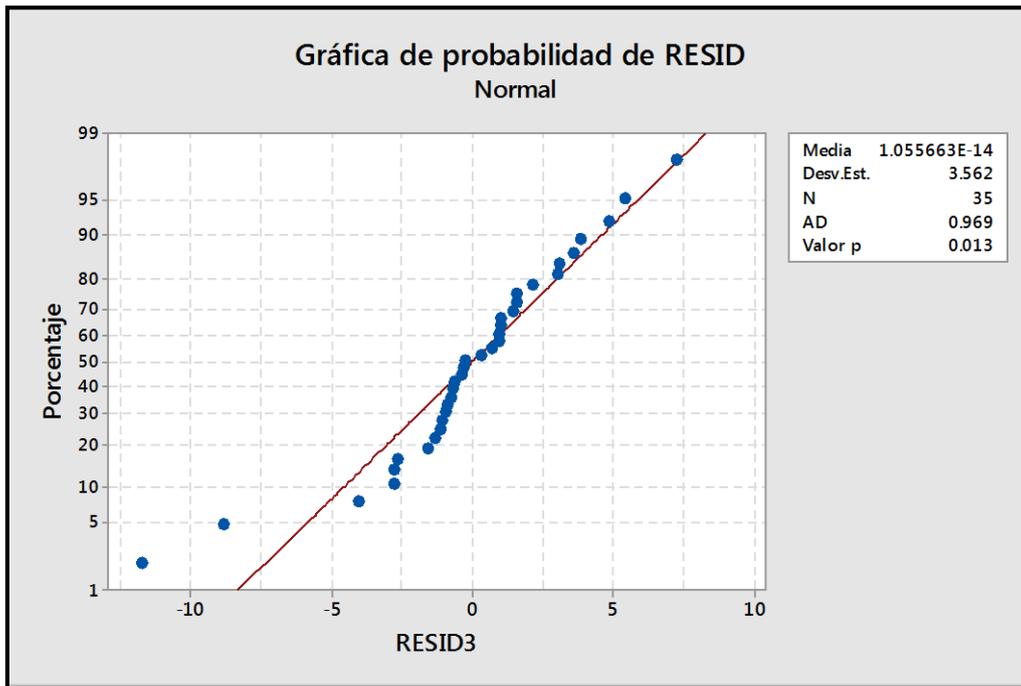
$$ALS(Fr)=9.576$$

3. Prueba estadística para el pH

En primera instancia se debe verificar la distribución de los errores.

Ho: Los errores se distribuyen normalmente.

Hi: Los errores no se distribuyen normalmente



Al ser p valor menor que 0.05 se rechaza H_0 . De tal modo que a un nivel de significancia de 0.05 se puede afirmar que los errores no se distribuyen normalmente. De modo que será necesario el uso de las pruebas no paramétricas.

4. Diagrama de cajas

Con la finalidad de tener una mejor idea de cómo estuvieron distribuidos los datos se realizó estos diagramas, no se usaron para la toma de decisiones,

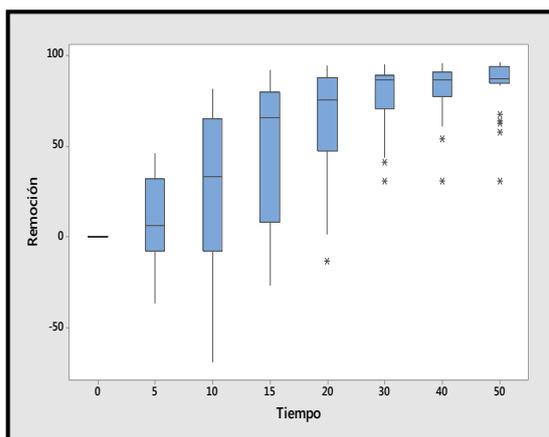


Diagrama de cajas de la remoción de turbidez debido al tiempo.

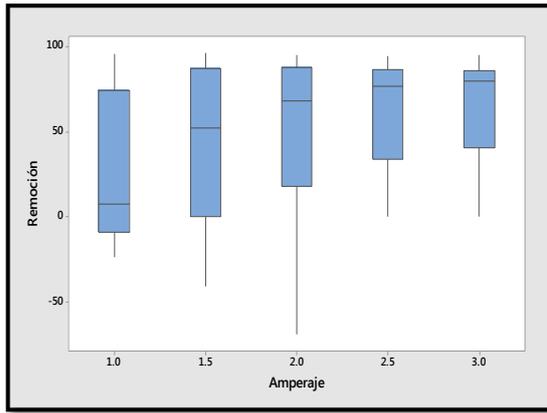


Diagrama de cajas de la remoción de turbidez debido a la corriente.

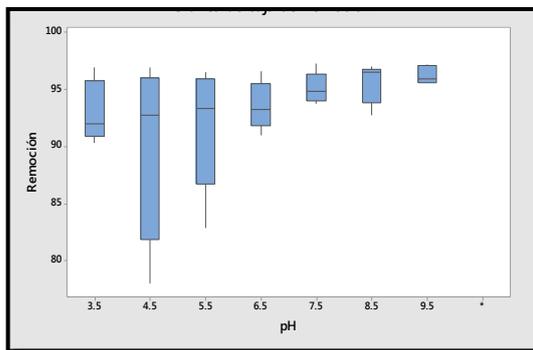


Diagrama de cajas de la remoción de turbidez debido al pH

ANEXO 5: RESULTADOS DEL LABORATORIO ACREDITADO



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO
PERUANO DE ACREDITACION INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE-056



Registro N° LE-056

INFORME DE ENSAYO N° 163897 CON VALOR OFICIAL

Nombre del Cliente : DAVID JEFFERSON VELÁSQUEZ FLORES
Dirección : Reservado por el cliente
Solicitado Por : DAVID JEFFERSON VELÁSQUEZ FLORES
Referencia : Corización N° 3160-16
Proyecto : Reservado por el cliente
Procedencia : Reservado por el cliente
Muestreo Realizado Por : DAVID JEFFERSON VELÁSQUEZ FLORES
Cantidad de Muestra : 10
Producto : Agua Residual
Fecha de Recepción : 2016/12/20
Fecha de Ensayo : 2016/12/20 al 2016/12/27
Fecha de Emisión : 2016/12/28

La muestra fue recepcionada en buenas condiciones

I. Resultados

Código de Laboratorio	163897-01	163897-02	163897-03	163897-04	163897-05	163897-06
Código de Cliente	Mp1	Mp2	Mp3	M compuesta	M compuesta sin tratar	M compuesta tratada
Fecha de Muestreo	19/12/2016	19/12/2016	19/12/2016	19/12/2016	19/12/2016	19/12/2016
Hora de Muestreo (h)	08:30	11:30	13:30	07:20	16:00	18:24
Tipo de Producto	Agua Residual Industrial					
Tipo Ensayo	Unidad	L.C.M.	Resultados			
Fisicoquímicos						
Aceites y Grasas	mg/L	1 ⁰⁰	<1	20	<1	---
Fósforo Total	mg/L	0,010	---	---	---	13,24 0,497

Leyenda: L.C.M. = Límite de cuantificación del método, L.D.M. = Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.C.M. o L.D.M. Indicado "00"=Resolución cuantificable, "—"= No Analizado, ">"= Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica, "00"= Límite de Detección de Método.

"/"/=No Aplica

Código de Laboratorio	163897-07	163897-08	
Código de Cliente	M compuesta sin tratar	M compuesta tratada	
Fecha de Muestreo	19/12/2016	19/12/2016	
Hora de Muestreo (h)	16:00	18:21	
Tipo de Producto	Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial	
Tipo Ensayo	Unidad	L.C.M.	Resultados
Fisicoquímicos			
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,020	1,817 6,839

Leyenda: L.C.M. = Límite de cuantificación del método, L.D.M. = Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.C.M. o L.D.M. Indicado "00"=Resolución cuantificable, "—"= No Analizado, ">"= Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica, "00"= Límite de Detección de Método.

Código de Laboratorio	163897-09	163897-10	
Código de Cliente	M compuesta sin tratar	M compuesta tratada	
Fecha de Muestreo	19/12/2016	19/12/2016	
Hora de Muestreo (h)	16:00	20:10	
Tipo de Producto	Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial	
Tipo Ensayo	Unidad	L.D.M.	Resultados
Metales Totales (ICP-AES)			
Al Aluminio	mg/L	0,001	0,773 19,61

Leyenda: L.C.M. = Límite de cuantificación del método, L.D.M. = Límite de detección del método, "—"= No Analizado, "<"= Menor que el L.C.M. o L.D.M. Indicado, ">"= Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica.

FQ-LAB-54
F.E.: Oct 09
F.R.: 7/Abr 16

Calle B Mz C lote 40 Urb. Panamericana - Lima 31 - Perú , Central Telefónica (511) 522-3758 / 523-1828

info@envirotest.com.pe / www.envirotest.com.pe

Página 1 de ;

INFORME DE ENSAYO N° 163897 CON VALOR OFICIAL

II - Métodos y Referencias

Tipo Ensayo	Norma Referencia	Título
Fisicoquímicos		
Aceites y Grasas	SM 5520-B	Liquid-Liquid, Partition-Gravimetric Method
Fósforo	SM 4500-P/B- E	Phosphorus Ascorbic Acid Method
Nitrógeno Amoniacal	SM 4500-NH3_D	SM4500 NH3_D. Ammonia-Selective Electrode Method
Metales (ICP-AES)		
Metales	EPA Method 200.7; Rev. 4.4., 1994	Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry

SIGLAS: "SM": Standard methods for the examination of Water and Wastewater APHA, AWWA, WEF 22nd Ed. 2012
"EPA": U.S. Environmental Protection Agency. Methods for Chemical Analysis.

Alfonso Vilca M.
GCSSA
C.Q.P. N° 587

Los resultados presentados corresponden sólo a la muestra indicada, según la cadena de custodia correspondiente.

Estos resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto.

El tiempo de custodia de la muestra es de un mes calendario desde el ingreso de la muestra al Laboratorio.

El tiempo de perecibilidad de la muestra está en función a lo declarado en los métodos normalizados de ensayo y rige desde la toma de muestra.

Está prohibido la reproducción parcial del presente documento, salvo autorización de Envirotest S.A.C.

**** FIN DEL INFORME ****