

**ELECTROCOAGULACIÓN COMO ALTERNATIVA ESTRATÉGICA PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS CRUDAS EN EL MUNICIPIO DE SAN MARTÍN
(CESAR)**

MARITZA GAMBOA GUALDRÓN

Ingeniera Química

JUAN JAVIER VÁSQUEZ PACHECO

Ingeniero Ambiental y de Saneamiento

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FISCOQUÍMICA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2017

**ELECTROCOAGULACIÓN COMO ALTERNATIVA ESTRATÉGICA PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS CRUDAS EN EL MUNICIPIO DE SAN MARTÍN
(CESAR)**

MARITZA GAMBOA GUALDRÓN

Ingeniera Química

JUAN JAVIER VÁSQUEZ PACHECO

Ingeniero Ambiental y de Saneamiento

**Monografía de grado presentada como requisito para optar al título de Especialista en
Ingeniería Ambiental**

Director:

HUMBERTO ESCALANTE HERNÁNDEZ

Ingeniero Químico

MSc Ingeniería Química

Ph.D Ingeniería Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FISCOQUÍMICA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2017

AGRADECIMIENTOS (Maritza Gamboa Gualdrón)

“Mis agradecimientos son para el REY DE GLORIA porque cada día ha inundado mi vida con la abundancia de sus bendiciones, este logro intelectual es una promesa que hoy la veo cumplida. La gloria es para mi PADRE CELESTIAL”

AGRADECIMIENTOS (Juan Javier Vásquez Pacheco)

“Mi gratitud va dirigida principalmente a Jehová Dios quien hizo posible este logro.

Gracias familia por creer en mis capacidades como ser humano y como profesional; gracias Jacqueline Quintero por tu amor y compañía incondicional”

Filipenses 4:13 “Todo lo puedo en Cristo que me fortalece”

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
2. JUSTIFICACIÓN	21
3. OBJETIVOS	22
3.1 OBJETIVO GENERAL	22
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	22
4. REVISIÓN DE ESTADO DEL ARTE	23
5. TRATAMIENTO DE AGUAS CRUDAS EN EL MUNICIPIO DE SAN MARTÍN (CESAR)	36
5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MUNICIPIO	36
5.1.1 Límites.	36
5.1.2 División político-administrativa	36
5.1.3 Condiciones meteorológicas.	37
5.1.4 Población	37
5.2 EMPRESA ENCARGADA DEL SERVICIO DE ACUEDUCTO EN SAN MARTÍN (CESAR)	38
5.3 FUENTE DE ABASTECIMIENTO HÍDRICO	39
5.4 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DEL AGUA	41
5.4.1 Captación	41
5.4.2 Aducción	42
5.4.3 Desarenador	43
5.4.4 Tratamiento	43
5.4.5 Tanque de almacenamiento	49
5.4.6 Conducción	50
5.4.7 Redes de distribución	51
5.4.8 Análisis fisicoquímico del agua tratada.	51
5.4.9 Análisis microbiológico del agua tratada.	52
6. TRATAMIENTO DE AGUA CONVENCIONAL	54

6.1 PROCESOS UNITARIOS	55
6.1.1 Coagulación.....	55
6.1.2 Floculación.....	55
6.1.3 Sedimentación	56
6.1.4 Filtración.....	56
6.1.5 Desinfección	56
7. ELECTROCOAGULACIÓN.....	57
7.1 REACCIONES ELECTROQUÍMICAS.....	57
7.1.1 Electrodeposición.....	58
7.1.2 Electroflotación	58
7.1.3 Electrooxidación.....	58
7.1.4 Electrodesinfección	58
7.2 ELECTROCOAGULADOR.....	61
7.3 TIPOS DE ELECTROCOAGULADORES	63
7.4 FACTORES QUE INTERVIENEN DURANTE EL PROCESO DE LA ELECTROCOAGULACION.....	64
7.4.1 Físicoquímica del efluente a tratar.....	64
7.4.2 Factores electroquímicos	65
7.4.3 Material de los electrodos y distancias entre ellos.....	66
7.4.4 Influencia de iones presentes en el sistema	66
7.4.5 Tiempo de electrolisis.....	67
7.4.6 Pasivación del electrodo	67
7.4.7 Efecto de la velocidad de agitación.....	67
7.4.8 Configuración eléctrica de los electrodos.....	68
8. ELECTROCOAGULACIÓN PARA EL ACUEDUCTO MUNICIPAL DE SAN MARTÍN (CESAR)	70
8.1 ETAPAS REEMPLAZADAS Y OPTIMIZADAS EN EL SISTEMA DE POTABILIZACIÓN DE SAN MARTÍN (CESAR).....	73
8.1.1 Sistema de potabilización APCES E.P.S. (sin electrocoagulación).....	74
8.1.2 Sistema de potabilización APCES E.P.S. (con electrocoagulación)	76
8.1.3 Etapas optimizadas en el sistema de potabilización de APCES E.P.S.	78
8.1.4 Diferencias técnicas.....	79

8.2 VENTAJAS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN EN APCES E.S.P.....	81
8.3 DESVENTAJAS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN EN APCES E.S.P.	83
8.4 RECOMENDACIONES PARA IMPLEMENTAR EL SISTEMA DE ELECTROCOAGULADOR EN LA PLANTA DE APCES E.P.S.	84
9. CONCLUSIONES	86
BIBLIOGRAFÍA.....	87

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Planta de tratamiento de agua cruda de APCES E.S.P.....	17
Figura 2. Nivel de riesgo en suministro de agua a nivel mundial (2010).....	18
Figura 3. Árbol de causas y consecuencias.....	20
Figura 4. Localización del municipio de San Martín (Cesar).....	36
Figura 5. Población del municipio de San Martín (Cesar).....	38
Figura 6. Quebrada Torcoroma.....	40
Figura 7. Diagrama de flujo del sistema de potabilización que posee actualmente el municipio de San Martín (Cesar).....	42
Figura 8. Medidor de caudal (APCES E.P.S).....	43
Figura 9. Dosificador de sulfato de aluminio (APCES E.P.S).....	44
Figura 10. Esquema del tanque de mezcla rápida (APCES E.P.S).....	45
Figura 11. Floculadores (APCES E.P.S).....	46
Figura 12. Sedimentadores (APCES E.P.S).....	47
Figura 13. Filtros (APCES E.P.S).....	48
Figura 14. Dosificador de cloro (APCES E.P.S).....	49
Figura 15. Vista superior del tanque subterráneo para almacenamiento (APCES E.P.S).....	50
Figura 16. Análisis fisicoquímico del agua tratada.....	51
Figura 17. Análisis microbiológico del agua tratada.....	52
Figura 18. Diagrama de flujo de un sistema de potabilización convencional.....	54

Figura 19. Esquema del proceso de la electrocoagulación.....	62
Figura 20. Electrocoagulator alimentado con energía solar fotovoltaica.	62
Figura 21. Tipos de reactores usados para el proceso de electrocoagulación.	64
Figura 22. Celda de electrocoagulación con configuración monopolar en paralelo (A) y monopolar en serie (B)	68
Figura 23. Celda de electrocoagulación con configuración bipolar en paralelo.	69
Figura 24. Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de agua cruda de APCES E.P.S. con la tecnología de electrocoagulación.	70
Figura 25. Diseño propuesto del tipo de reactor que podría emular el proceso de la electrocoagulación en la planta de tratamiento de APCES E.S.P.....	71

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tasas típicas industriales de remoción de contaminantes según EFLO International Ltd. (diseño y construcción de electrocoaguladores a nivel industrial).	32
Tabla 2. Consolidado del estado del arte sobre la tecnología de la electrocoagulación.	33
Tabla 3. Suscriptores en cada servicio por uso y estrato.....	39
Tabla 4. Etapas y flujos del tratamiento de la planta (sin electrocoagulación)	73
Tabla 5. Etapas y flujos del tratamiento de la planta (con electrocoagulación)	73
Tabla 6. Matriz comparativa entre el sistema de potabilización municipal (sin EC) con el sistema de potabilización municipal (con EC).	80

RESUMEN

TÍTULO: ELECTROCOAGULACIÓN COMO ALTERNATIVA ESTRATÉGICA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS CRUDAS EN EL MUNICIPIO DE SAN MARTÍN (CESAR). *

AUTORES: MARITZA GAMBOA, JUAN JAVIER VÁSQUEZ **

PALABRAS CLAVE: Electrocoagulación, potabilización, contaminación.

La presente investigación se basó en justificar la tecnología de la electrocoagulación como posible alternativa para el tratamiento efectivo de aguas crudas en el municipio de San Martín (Cesar), específicamente para brindar una solución que permita a través de la optimización del actual sistema de potabilización en la empresa APCES E.S.P. se logre ofrecer agua potable a los sanmartinenses, sin escatimar la calidad del servicio de agua potable por el grado actual de contaminación que presenta la quebrada Torcoroma. El proyecto estuvo enmarcado en el tipo de investigación descriptiva, fundamentada en la realización de entrevistas y visitas técnicas en APCES E.S.P.; recopilación y análisis de investigaciones realizadas a nivel de laboratorio, relacionadas con la eficacia de la electrocoagulación para tratar agua cruda, y efluentes contaminantes. Por último se desarrolló un escenario cualitativo en donde APCES E.S.P. no solo podría lograr proveer de agua potable con la electrocoagulación sino que además, etapas como la filtración y la desinfección se verían optimizadas por reducción en el uso de insumos y equipos. Se concluyó, que ante la viabilidad cualitativa de la electrocoagulación, es necesario buscar fuentes de alimentación energética sostenible para que las adecuaciones, operatividad y prestación del servicio no sean encarecidas llegado al caso de optar por dicha tecnología.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico – químicas. Escuela de Ingeniería Química
Director: Humberto Escalante Hernández

ABSTRACT

TITLE: RAW WATER TREATMENT FROM SAN MARTÍN (CESAR) TOWN SUPPORTED BY ELECTRO-COAGULATION AS A STRATEGIC ALTERNATIVE SYSTEM. *

AUTHORS: MARITZA GAMBOA, JUAN JAVIER VÁSQUEZ **

KEY WORDS: ELECTRO-COAGULATION, PURIFICATION, POLLUTION.

In this work, electro-coagulation system is a new technology used as alternative to raw water treatment from San Martin (Cesar) town. Namely, this reactor supplies a solution which helps to optimize the conventional purification system in APCES E.S.P enterprise due to high grade of pollution in Torcoroma River. The work of research was carried out firstly by interviews, technical visits to APCES E.S.P. Secondly, information review and laboratory analysis tests assessed in regard to electro-coagulation technology efficiency both raw water and wastewater. Finally, in this study was developed a qualitative water analysis. The results showed a significant diminution of pollution level in water using electro-coagulation reactor, also within filtration and disinfection process using of reagent and equipment were reduced noticeably. In conclusion, this technology was effective within raw water treatment. However, it is necessary to search other energetic feeding sources sustainable for facilities, operation system and benefit services being less expensive, in the case that technology is an option.

* Degree work

** Faculty of Physicochemical Engineering. Department of Chemical Engineering Department.

Director: Humberto Escalante Hernández.

INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores desafíos que enfrenta actualmente la humanidad es proporcionar agua potable a una inmensa población mundial. Por ello, hay una necesidad urgente de desarrollar técnicas innovadoras, más eficaces y económicas para el tratamiento de aguas crudas. Actualmente, la humanidad contrapone una seria problemática mundial que radica en proveer agua para una población creciente, como son agua potable, agua para el sector agropecuario y agua de uso industrial. Las exigencias de tratar el agua contaminada se hace cada vez más grande, imposibilitando el mayor reto de la sociedad de poder solventar, la demanda de agua potable a todas las regiones del Planeta.¹ Frente a tal situación, la humanidad ha tenido la necesidad de desarrollar técnicas de tratamiento de aguas residuales con el fin de minimizar los impactos ambientales y garantizar la disponibilidad del recurso para diferentes usos.

Un amplio abanico de tecnologías para el tratamiento de aguas se encuentran en la actualidad, todas compitiendo en eficiencia de remociones de contaminantes, costos accesibles, facilidades en mantenimiento, mínima demanda en espacio, entre otros atributos técnicos. Dentro de estas tecnologías se encuentra la coagulación química, tratamientos biológicos, osmosis inversa, filtración, ultrafiltración, adsorción, electrodiálisis, ozonización, carbón activado, y muchos más; sin embargo, existe una tecnología emergente que yace en la intercepción de tres tecnologías fundamentales de la electroquímica, y es la electrocoagulación. Esta tecnología ha logrado interesantes eficiencias de remoción en los últimos 20 años en comparación con las tecnologías

¹ CÁCERES QUIÑONES, Roxelys; VÁSQUEZ PACHECO, Juan J. Aplicación de la electrocoagulación para la remoción de partículas coloidales, contaminantes orgánicos y microorganismos patógenos presentes en la quebrada El Zarzal, en el Centro de Investigaciones Santa Lucía. Barrancabermeja, 2015, 127 p. Trabajo de grado (Ingeniero Ambiental y de Saneamiento). Instituto Universitario de la Paz. Escuela de ingeniería ambiental y de saneamiento. Programa de Ingeniería Ambiental y de Saneamiento.

tradicionales.² Bajo este contexto se quiere ahondar en la revisión bibliográfica enmarcada en el presente documento, sobre la posibilidad de considerar la tecnología de electrocoagulación como una posible alternativa para el tratamiento de aguas crudas en el municipio de San Martín (Cesar). El municipio de San Martín (Cesar) cuenta actualmente con una población total de 18548 habitantes, de los cuales 9012 habitantes hacen parte la población urbana.³ La empresa que administra actualmente el servicio de acueducto es la Administradora Publica Cooperativa Empresa Solidaria de San Martin (APCES E.S.P.) la cual, a través de su planta de tratamiento depura 120l/s⁴ de agua cruda procedente de la quebrada Torcoroma para el suministro de agua potable a los sanmartinenses.

Figura 1. Planta de tratamiento de agua cruda de APCES E.S.P.



Fuente: Programa de uso eficiente y ahorro de agua (2014) – APCES E.S.P. San Martín (Cesar).

² HOLT, Peter K.; BARTON, Geoffrey W.; MITCHELL, Cynthia A. The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology. *Chemosphere*, 2005, vol. 59, no 3, p. 355-367.

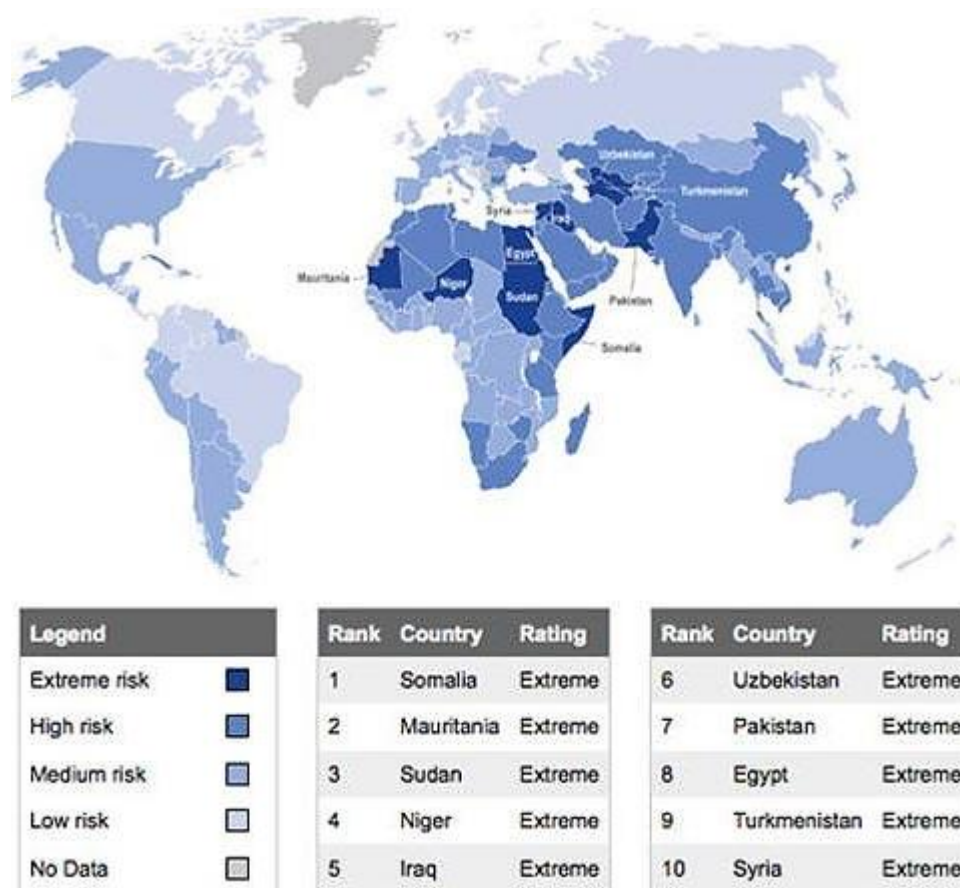
³ Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Censo general 2005 – perfil San Martín (Cesar) [En línea]. < https://www.dane.gov.co/files/censo2005/perfiles/cesar/san_martin.pdf > [citado en 10 de febrero de 2017]

⁴ Programa de uso eficiente y ahorro de agua (PUEAA 2014) – APCES E.S.P. San Martín (Cesar).

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sistemas de potabilización contemporáneos se están convirtiendo en obsoletos debido a que es inevitable que las fuentes de abastecimiento de agua cruda se contaminen. Estas alteraciones originan daños técnicos, problemas de operación en las plantas de potabilización y disminuye la calidad del agua estipulada por las autoridades locales e internacionales.

Figura 2. Nivel de riesgo en suministro de agua a nivel mundial (2010)



Fuente: Maplecroft.

La consultora británica Maplecroft determinó en el año 2010 que los países con el suministro de agua más precario del planeta son Somalia, Mauritania y Sudán. Con respecto a Colombia, es irónico ver que presenta riesgo bajo a pesar de la enorme disponibilidad de agua dulce y demuestra que aunque disponemos de dicho potencial, la mayoría de las fuentes se encuentran contaminadas y los sistemas de depuración actual no cubren la calidad de agua requerida para consumo humano en el País.⁵

En Colombia, el Artículo 12 del decreto 1575 de 2007 (Ministerio de la Protección Social) define el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCA) como el grado de riesgo de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el no cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para consumo humano; esta información permite a los colombianos conocer qué tipo de agua beben en distintas jurisdicciones del país. Municipios como Tamalameque con un IRCA de 100% está en mayor riesgo, debido a que su agua es inviable sanitariamente, con riesgo de contraer Hepatitis A, Ulceras pépticas, Colitis, Pancreatitis, Cólera, Fiebre tifoidea y paratifoidea.⁶

En cuanto al municipio de San Martín (Cesar), el IRCA fue de 13,48.⁷ Según el Instituto Nacional de Salud el anterior valor se traduce en un tipo de agua no apta para consumo humano pero posee un nivel de riesgo bajo de generar enfermedades, es decir, que no tiene riesgo significativo al beberla. Sin embargo, este indicador hace alusión a una deficiencia técnica en el sistema de potabilización que emplea el municipio de San Martín (Cesar) debido al dinamismo

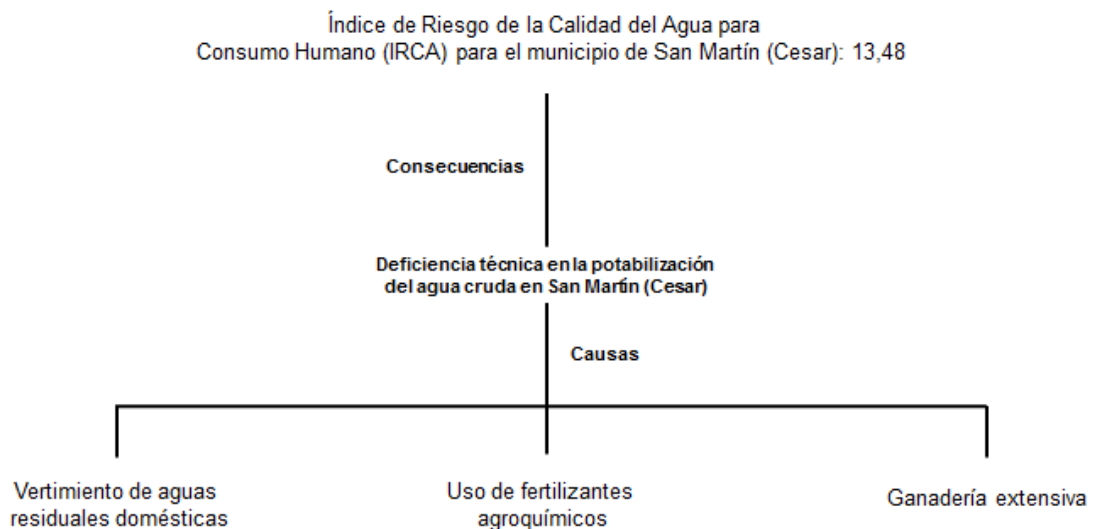
⁵ LA RESERVA.COM. Los 10 países con peor suministro de agua del mundo [En línea]. <http://www.lareserva.com/home/paises_peor_suministro_agua> [citado en 4 de febrero de 2017]

⁶ OBSERTAVORIO AMBIENTAL DE BOGOTÁ. Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano en Colombia – Decreto 1575 de 2007 [En línea]. <<http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/indicadores?id=249&v=1>> [citado en 27 de noviembre de 2016]

⁷ Instituto Nacional de Salud (2015).

pecuario⁸, vertimiento de aguas residuales domésticas de los asentamientos humanos adyacentes a la quebrada Torcoroma e implementación de sustancias agroquímicas para fortalecer el suelo destinado para cultivos de palma africana, maíz, sorgo, algodón, arroz, yuca y cítricos.⁹

Figura 3. Árbol de causas y consecuencias.



Por tanto, se propone la tecnología de la electrocoagulación en el presente documento como alternativa idónea y sencilla para fortalecer los procesos fisicoquímicos de la planta de tratamiento de agua de APCES E.S.P., necesarios para seguir tratando las aguas crudas de la quebrada Torcoroma con las condiciones desfavorables que presenta actualmente y ofrecer a los sanmartinenses agua potable sin riesgos a la salud pública local.

⁸ ENTREVISTA con Williams Salom Myers, Investigador social y coordinador de proyectos de la Corporación para la Investigación, Desarrollo y Liderazgo, Consolidar. Barrancabermeja, 8 de febrero de 2017.

⁹ ENTREVISTA con Omar Andrés Jaramillo Paternina, Profesional de apoyo de la Corporación para la Investigación, Desarrollo y Liderazgo, Consolidar. Barrancabermeja, 30 de enero de 2017.

2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente es inevitable que las cuencas hidrográficas, incluyendo la que funciona como fuente de abastecimiento de agua cruda para el consumo humano en el municipio de San Martín (Cesar) se contaminen, producto de las actividades agropecuarias que se llevan a cabo dentro de la divisoria de aguas de la quebrada Torcoroma¹⁰. Esto obliga a la administración municipal a identificar y seleccionar nuevas fuentes de abastecimiento de agua cruda, las cuales cada vez son más escasas; lo anterior, conlleva a buscar nuevas tecnologías apropiadas, eficientes y económicas para la solvencia de la demanda del recurso hídrico, apto para consumo humano de los sanmartinenses. La sugerencia de adaptar en la planta potabilizadora de APCES E.S.P. la tecnología de la electrocoagulación, alimentada con energía solar fotovoltaica suena quizás ambiciosa y compleja de materializar, sin embargo, gracias al amplio soporte científico que a nivel de laboratorio respalda esta tecnología, APCES E.S.P. puede obtener como beneficio la remoción de grandes concentraciones de materia orgánica, contaminantes inorgánicos y la eliminación de microorganismos patógenos¹¹ presentes en el agua del agua cruda proveniente de la quebrada Torcoroma. Estos beneficios mencionados anteriormente van asociados con el ahorro económico debido a que la aplicación de la tecnología de la electrocoagulación posiblemente no demandaría en APCES E.S.P. insumos como coagulantes, neutralizantes de pH y desinfectantes; otra ventaja adicional es la reducción de erogaciones por consumo de energía eléctrica por la alimentación de energía solar fotovoltaica al reactor electroquímico. Cabe mencionar que la propuesta enmarcada en el presente documento aborda dicha solución desde una perspectiva descriptiva y por ende carece de estudios técnicos que validen la viabilidad integral de la solución.

¹⁰ ENTREVISTA con Dennys Blanco Ramírez, Gerente de Administradora Pública Cooperativa Empresa Solidaria de San Martín (Cesar). San Martín (Cesar), 6 de febrero de 2017.

¹¹ EFLO International Ltd.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Proponer la electrocoagulación como posible alternativa estratégica para tratar aguas crudas en el Municipio de San Martín (Cesar).

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Revisar el proceso actual que utiliza el Municipio de San Martín (Cesar) para el tratamiento de las aguas crudas.
- Apropiar los fundamentos teóricos básicos de la tecnología de electrocoagulación de agua para uso potable.
- Proponer como tecnología para el tratamiento de las aguas crudas en el Municipio de San Martín (Cesar), la aplicación de la electrocoagulación.

4. REVISIÓN DE ESTADO DEL ARTE

La tecnología de la electrocoagulación ha tenido su aplicación dentro de las industrias de los lubricantes, las refinerías, los talleres de reparación automotriz, el transporte, distribución y almacenamiento de aceites, sector que da origen a aguas residuales que se caracterizan por su gran estabilidad química en sus emulsiones agua-aceite, lo que representa un problema ambiental en este campo. Por ende Bensadok, K. S, *et al.* (2001) ha planteado la tecnología para desestabilizar y remover dichas emulsiones del agua. También ha sido utilizada en la industria alimentaria; estas aguas se caracterizan por su alto contenido de DBO y DQO, además de sus altos porcentajes en grasas. Pretorius, W. A. *et al* (1991) obtuvo altas eficiencias en las remociones de sólidos suspendidos en 97.2%, y con similar éxito logró Fatih, *et al.* (2008) remociones de hasta del 56% en DQO, 95% de sulfatos procedente de los lixiviados de un relleno sanitario ubicado en Turquía.

Asimismo, la electrocoagulación ha tenido avances importantes en cuanto al tratamiento de aguas residuales de la industria de textiles y tintorería, donde Mahmut, *et al.* (2004) reflejó eficiencias importantes en la remoción del 75% de materia orgánica, y 98% de turbiedad. Además, ha sido probado en la potabilización de aguas cuyos estudios realizados por Nabil, *et al.* (2001) alcanzaron remociones de hasta un 80% de flúor, agente causante de fluorosis dental. Otras aplicaciones de la electrocoagulación están direccionadas a la disminución de nitratos que según Malakootian, *et al.* (2011) alcanzó remociones de hasta un 97% y Boro Erdem, *et al.* (2005) logrando remociones hasta de un 89% respectivamente, en aguas contaminadas con fertilizantes e insecticidas. El electroreactor de Irdemez, *et al.* (2005) logró la reducción del 86% de fósforo en

aguas resultante de la industria agropecuaria, siendo estos, los responsables de descargas de efluentes con altas concentraciones de carga orgánica, causando así la eutrofización en cuerpos de agua. Nafaa, *et al.* (2004) concluyó que la electrocoagulación aplicada a los efluentes que se originan en el sector de la galvanoplastia, permite remover concentraciones significativas de cromo (VI), siempre y cuando el tratamiento se divida en 2 baterías, la primera para oxidar Cr^{6+} a Cr^{3+} en medio ácido y la segunda para precipitar el hidróxido de cromo (III) en medio alcalino. La remoción eficiente de ciertos contaminantes en el agua a través de la electrocoagulación depende especialmente, de algunos parámetros como el pH, la conductividad, y concentración del contaminante en el efluente; también tiene relevancia la densidad de corriente, el espaciamiento y disposición de los electrodos. A continuación, se examinará aquellos parámetros que se relacionan más directamente con la efectividad de estas remociones.

Se ha considerado en la electrocoagulación que el pH es significativo debido a que determina la solubilidad de los hidróxidos metálicos (coagulantes) generados durante el proceso electroquímico. Examinar el comportamiento del proceso a través de este parámetro nos da idea si el efluente a tratar requiere ajuste o no de su pH para la correcta actividad de los hidróxidos metálicos en el agua, lo que repercute en costos adicionales en la operación.

En el ensayo experimental relacionado con la desestabilización de emulsiones agua-aceite, Bensadok, K. S, *et al.* (2001) evidenció incrementos de pH 7,0 a 11,0. Este aumento progresivo se debe a la producción de hidrón (H^+) resultante de la electrolisis del agua. Similar comportamiento se observó en la remoción de fluoruros presentes en agua potable donde Ghosh, *et al.* (2008) reportó un incremento de pH de 6,4 a 8,1. Adhoum, *et al.* (2004) estableció un rango amplio de pH para llevar a cabo la precipitación de materia coloidal desestabilizada, el cual fue de 4,0 a 8,0. Observó deficiencias en las remociones de metales fuera de

dicho rango, ya que a un pH menor a 4,0 se puede solubilizar el catión Al^{3+} , mientras que a un pH mayor a 8,0 se puede solubilizar el anión monómero $\text{Al}(\text{OH})_4^-$. No obstante, cuando el pH del afluente está dentro del rango estandarizado por el autor, se forman especies poliméricas $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$, y $\text{Al}(\text{OH})_3$, donde este último tiene mayor área superficial para una rápida adsorción de componentes solubles orgánicos atrapando así, las partículas coloidales. A lo largo de la revisión bibliográfica, el mayor número de investigaciones responde a un pH óptimo cercano al neutro debido a la fluidez con que los hidróxidos metálicos se forman en el agua. Otro parámetro interesante es la conductividad eléctrica que genera un incremento en la densidad de corriente; esto se traduce en una reducción de costos en cuanto a menor cantidad de energía eléctrica demandada para alimentar la tecnología de la electrocoagulación. (A mayor conductividad eléctrica en el agua, menor será la energía eléctrica requerida).

Algunos ensayos de laboratorio necesitaron de la adición de algún electrolito como el NaCl , CaCl_2 o KCl con el fin de incrementar la conductividad en el efluente a tratar. Malakootian, *et al.* (2011) encontró que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos que genera la presencia del ion carbonato (HCO_3^-) y el ion Sulfato (SO_4^{2-}), pues la presencia de los mismos disminuye la capacidad de oxidación del metal debido a que estos tienden a formar una capa aislante sobre la superficie del electrodo, lo que complica la formación de cationes coagulantes e induce a un mayor consumo de energía eléctrica durante la electrocoagulación.

Por el contrario, Pérez, *et al.* (2012) observó que el cloruro de sodio promueve la oxidación por pitting ^a disminuyendo la resistencia al paso de la corriente. La densidad de corriente es un parámetro importante ya que determina la tasa de dosificación del coagulante, tal como lo demuestra la Ley de Faraday; la mayoría de los trabajos de investigación revisados muestran que para obtener altas reducciones de DQO, turbidez, nitratos, metales, boro y nitrógeno amoniacal,

Yilmaz, A. Erdem, *et al.* (2005) y desestabilización de emulsiones Bensadok, K. S., *et al.* (2008) es indispensable someter a altas densidades de corriente los electrodos para alcanzar la oxidación anódica que da lugar a la formación de especies amorfas de hierro o aluminio (según el material del electrodo) sobre la superficie de los mismos. Sin embargo Morante, Gonzalo (2002) aconseja una densidad de corriente entre 20 - 25 A/m².

La densidad de corriente también afecta la tasa de generación de burbujas, debido a las altas velocidades de producción de hidrogeno causado por altas densidades de corriente que favorece la flotación y floculación de la materia Bensadok, K. S., *et al.* (2008). Manteniendo la misma línea, el trabajo de investigación relacionado con la desflourización de aguas, Mameri, Nabil, *et al.*, (2001), señala como desventaja las elevadas velocidades de producción de hidrogeno ya que en sus resultados de remoción de flúor, no se obtuvo la concentración exigida por la Organización Mundial de la Salud (1 ppm de F⁻) cuando se incrementó la densidad de corriente en los ensayos experimentales.

Con respecto a que material de electrodos es más conveniente, Fatih, *et al* (2008) comparó electrodos de hierro con electrodos de aluminio bajo similares condiciones operacionales para la remoción de contaminantes de un lixiviado de un relleno sanitario Odayeni (Estambul), Turquía. Los resultados obtenidos en la experimentación expusieron un 56% de remoción para los electrodos de aluminio, mientras que los electrodos de hierro expusieron un 35% de remoción. En base a lo anterior, el autor argumenta que los resultados obtenidos en los electrodos de hierro se relacionan con la alta densidad de hidróxido de hierro, en comparación con el hidróxido de aluminio, ya que es tiende a generar mucha mayor cantidad de lodos y tinta el agua con mayor facilidad. De la misma forma, en el tratamiento de aguas residuales procedente de la industria de textiles Mahmut, *et al.* (2004) evidenció que los electrodos de aluminio tuvieron mayores eficiencias de remoción

que los electrodos de hierro. Lo contrario reflejó, Ping, *et al.* (2005) en la remoción de nitratos donde no solo consiguió remover cromo con los electrodos de hierro si también reducir la peligrosidad de cromo (VI) a cromo (III). La cantidad de electrodos en el sistema juega un papel desestimable en las eficiencias de remociones. Se expresó hasta un 99,6% de remoción para dos pares de electrodos Fe-Al, frente a un 97 % con solo un par de electrodos de Fe-Al, según NYOMAN, I., *et al.* (2010). Caso contrario ocurrió en la remoción de nitratos ya que Malakootian, *et al* (2011) demuestra una relación directa entre el número de electrodos utilizados y la eficiencia en la remoción, indicando que, aunque aumenta la eficiencia y disminuye el tiempo, aumenta el consumo de energía y por lo tanto los costos de operación.

Solo el trabajo de investigación realizado por Pérez, *et al.* (2012) sobre la remoción de sílice en aguas de purga de torres de enfriamiento, se detalló que la primera hora de operación es baja cuando los electrodos están nuevos, debido a que inicialmente, los electrodos tienen una capa protectora que se va eliminando conforme va progresando el proceso de corrosión. En cuanto a la distancia entre los electrodos se debe aclarar que ningún trabajo experimental realizó pruebas de evaluación de la distancia optima entre electrodos para conseguir mayores remociones de contaminante, pero si cabe destacar, que en la mayoría de los trabajos de investigación revisados, estas distancias no superaron los 10 cm. La configuración (monopolar, bipolar) puede tener un efecto justificado sobre la cantidad de formación del lodo, corrosión del electrodo y la remoción del contaminante.

El tipo de conexión eléctrica utilizada en el trabajo de investigación sobre la remoción de flúor en el tratamiento de agua potable, Ghosh *et al.* (2008) encuentra que se remueve mayor cantidad de flúor cuando se utiliza una conexión bipolar, y esto corresponde a la configuración de las celdas electrolíticas que

actúan juntas, por ende, se tiene mayor área superficial y mayor intensidad de corriente, comparada con una conexión monopolar favorecida por una adecuada oxidación anódica. En cuanto a las consideraciones de diseño de un electroreactor, propuestas por HOLT, Peter K. et al, (2005), se debe considerar tres grandes criterios:

- Operación Batch o Continuo.
- El rol que juega la generación electrolítica de burbujas.
- Los medios de separación de los agregados contaminantes.

Basado en la revisión de la literatura acerca de los diseños de los electroreactores, claramente la opción más simple y de bajo costo consiste en un sistema de reactores tipo Batch con láminas verticales (electrodos). Pocos autores hacen recomendaciones sobre diseño, modificaciones, o que tipo de reactor utilizar, a excepción de GAO, Ping, et al. (2005); en el trabajo de investigación sobre la remoción de Cr^{6+} , la unidad electrolítica tuvo modificaciones considerables ya que se subdividió en dos partes, la primera para permitir la reducción de cromo (III) con los electrodos de hierro en medio ácido y la segunda para dar lugar a la precipitación del cromo (VI). Finalmente, CHEN, Xueming *et al* (2002) aporta que la operación tipo Batch debe realizarse para tratar concentraciones de contaminantes específicos y además de ello, debe estar acoplado a una unidad de sedimentación o de flotación. Las burbujas de hidrogeno formadas en el cátodo puede adsorber las especies floculadas e inducir a su flotación, como también reducir la suciedad sobre la superficie del cátodo. La alta velocidad de producción de aluminio permitido por la alta corriente favorece la flotación y la floculación de

materia, tal como se observó en el trabajo de investigación de BENSADOK, K. S., *et al.* (2008) sobre la remoción de aceites por medio de esta tecnología. La separación por sedimentación es una opción común, con el factor de que los gases producidos en el proceso, prima pequeñas densidades de corriente, lo cual origina bajas densidades de burbujas que conducen a su vez, a un bajo momentum flux hacia arriba; condición que impulsa la sedimentación sobre la flotación, dando a entender que las burbujas de hidrogeno formadas en el cátodo da permiso a la flotación o sedimentación, dependiendo de la densidad de corriente. HOLT, Peter K. *et al.* (2005). En relación con la concentración inicial de los contaminantes y la eficiencia en la remoción de los mismos, es inversamente proporcional y en esto coinciden la mayoría de los trabajos revisados, como también existe una relación directa de la concentración inicial del contaminante con respecto al tiempo de tratamiento, expresado por Ghosh, D. *et al.* (2008), donde concentraciones iniciales de 4 ppm de flúor requirió de 35 minutos mientras que para concentraciones de 8 ppm del mismo agente químico necesitó 45 minutos para llegar a la misma remoción.

Los costos de montaje y operación son fundamentales en la aplicación de esta tecnología, es por eso que cada caso en particular requiere de un análisis minucioso de los aspectos técnicos y económicos del proceso. Mahmut, *et al.*(2004) reportó costos por concepto del material de 1.8 US\$/Kwh para los electrodos de aluminio, frente al costo de 0.3 US\$/Kwh para los electrodos de hierro, lo que concuerda con Chen Guohua *et al.*(2002) quien advirtió que la eficiencia de la corriente para los electrodos de aluminio oscila entre 120-140%, mientras que para el hierro es alrededor del 100%, debitado por el efecto corrosión pitting sobre los electrodos de aluminio; especialmente cuando el cloro está presente. WA.Pretorius *et al.* (2001) comparó la electrocoagulación con la coagulación química y reportó que el precio para producir Fe^{2+} electrolíticamente es mayor que el sulfato férrico, y menor que el cloruro férrico. También cabe

mencionar que los costos de energía necesarios para la conexión bipolar fueron del 21% más alto y podría estar relacionado con la mayor área superficial comparado con la conexión monopolar, como lo señaló el autor del trabajo de investigación de tratamiento de agua potable con contenido de flúor. GHOSH, D.; *et al.* (2008). Es pertinente aludir que no se encontraron análisis de costo-beneficio relacionados con la electrocoagulación, por tanto se podría asegurar del todo que la producción de hidróxidos metálicos sea más costosa a través de corrientes eléctricas continuas, que empleado corrientes eléctricas directas; como el caso del uso de paneles solares fotovoltaicos. El efecto de las condiciones de flujo sobre la eficiencia de la electrocoagulación del agua residual ha sido escasamente investigado, solo BENSADOK, K. S., *et al.*(2008) experimentó el progreso de la remoción de DQO y turbidez frente a altas velocidades de flujo, donde atribuyó resultados muy positivos cuando se aumenta la velocidad de la circulación del efluente, 130 cm³/min frente a 750cm³/min dando eficiencias de remociones de turbidez del 70% y 80% respectivamente; de igual manera, porcentajes de remoción de DQO de 70% y 80%.

El autor en sus resultados justifica este avance con la velocidad de transporte y transferencia de fenómenos de varias especies de celdas electroquímicas, debido a que se induce a un gran número de colisiones entre las partículas de Al(OH)₃ y las gotas de aceite desestabilizadas de este modo mejorando la floculación. Un caso diferente ocurrió en la desflourización de agua potable, donde MAMERI, Nabil, *et al.* (2001) tomó como desventaja la formación del gas debido a una separación insoluble del complejo fluoruro-aluminio, no obstante, demasiada formación de gas compromete la eficiencia de la electrocoagulación en cuanto a la remoción de flúor del agua. MORANTE, Gonzalo *et al.* (2002) relacionó el tamaño de las burbujas, pH y densidad de corriente, permitiéndole concluir que las burbujas de hidrogeno son pequeñas a pH neutro, en cambio, para las burbujas de hidrogeno su tamaño incrementa con el pH.

Así mismo el tamaño de las burbujas de gas también depende de la densidad de corriente, donde un decreciente tamaño de burbujas de gas fue encontrado con el incremento de la densidad de corriente. También se precisó que las diminutas y uniformes burbujas generadas eléctricamente dan mucho mayor desempeño en la oxidación de contaminantes e incremento de oxígeno disuelto en el agua, que disolver aire de flotación en el sistema. La electrocoagulación con aire a inyección acorta el tiempo de retención y minimiza la masa residual, de modo que se reducen los costos de operación. Una revisión de la literatura revela que el potencial de la electrocoagulación con inyección de aire como una alternativa para un tratamiento convencional aún no ha sido adecuadamente explorado debido a razones técnicas y económicas. MORANTE, Gonzalo *et al* (2002). El incremento en la eficiencia de remoción de contaminantes en la electrocoagulación con aire a inyección se justifica para remover específicamente arsénico del agua. PARGA, Jose R., *et al.* (2005). La presencia de patógenos en el agua cruda ha sido un problema significativo en la potabilización del agua; *Escherichia coli* y *Legionella pneumophila* son los comúnmente causantes de infecciones gastrointestinales y su crecimiento se ve favorecido por la presencia de materia orgánica.

(Yasmine Delaedt, 2008) realizó un estudio sobre la desinfección electroquímica para eliminar del agua de grifo microorganismos patógenos como *Escherichia coli* y *Legionella pneumophila*, donde logró la destrucción con cloro (un importante componente formado por la electrolisis) la membrana celular de las bacterias. Lo interesante del ensayo experimental de este estudio radicó en la presencia de cloruros, y aunque en el agua solo estuvo presente una concentración de 45 mg/l, dicha cantidad fue suficiente para lograr la oxidación a cloro libre quien finalmente es el causante de la desinfección del agua y cuyas concentraciones finales oscilaron entre 0.03mg/l a 0.5 mg/l.

(Vásquez, Juan; Cáceres, Roxelys, 2015) determinaron que en la electrocoagulación alimentada con energía solar fotovoltaica, los procesos de oxidación avanzada (POA) favorece la eliminación de microorganismos patógenos debido a la producción del radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$). Gracias a su alto poder oxidante, eliminó microorganismos patógenos de una muestra puntual de agua cruda captada de la quebrada El Zarzal logrando reducir 1180 UFC/100ml a solo 20 UFC/100ml al cabo de 6 horas de operación. En la actualidad, existen electrocoaguladores a escala industrial empleados para tratamiento controlado de efluentes. Industrias tales como Intereco Snc, Gerber Pumps International Inc. y Powell Water Systems Inc. se dedican al diseño y construcción de equipos electrocoaguladores en América del Norte y Europa, más sin embargo, no tienen soportes que evidencien su aplicabilidad en plantas depuradoras de agua cruda.

Tabla 1. Tasas típicas industriales de remoción de contaminantes según EFLO International Ltd. (diseño y construcción de electrocoaguladores a nivel industrial).

Contaminante	Antes	Después	% de remoción
Amoníaco	49	19,4	60,41
Benceno	90,1	0,36	99,6
DBO	1050.0	14	98,67
Cadmio	0,13	0,004	96,81
Nitrato	21.00	12	42,86
Hierro	68,34	0,194	99,72
Lindano (plaguicida)	0,143	0,001	99,3
Magnesio	13,15	0,0444	99,66
Mercurio	0,72	0,0031	98,45
Turbidez (NTU)	35,38	0,32	99,1
Hidrocarburo	72,5	0,2	99,72
Dirigir	0,59	0,0032	99,46
Cromo	139	0,1	99,92

Fuente: EFLO International Ltd.

Tabla 2. Consolidado del estado del arte sobre la tecnología de la electrocoagulación.

Agua residual	Contaminante	pH y conductividad	% remoción	Configuración eléctrica	Densidad de corriente, voltaje y/o amperaje	Clase de reactor	Referencia
Aguas de textiles	Turbidez: 5700 NTU DQO: 3422 mg/l TSS: 1112 mg/l TOC: 900 mg/l	pH: 6,95 conductividad: 3990 μ S/cm. Temp: 25°C	Para Aluminio: pH: 6,0 98% NTU 61-65%COD Para Hierro: PH: 3,0 – 7,0 98-75% NTU 77-47% COD	Monopolar paralelo	Corriente Directa 100 A/m ² 30V 6A	Tipo Batch 200 rpm	Mahmut, Bayramoglu
Aguas aceitosas	Turbidez: 26400 NTU DQO: 60282 mg/l	pH: 7,0 Temp: 25°C	99% NTU 92% DQO	Monopolar paralelo	Corriente Directa 100 A/m ²	Batch con recirculación del líquido 250rpm	K. Bensadok
Agua de purga de torre de enfriamiento	Sílice: 120 mg/l CaCO ₃ :1195 mg/l STD: 1320 mg/l Sulfatos: 1320 mg/l	Conductividad: 2200 μ S/cm	-	Monopolares con inversión de polaridad cada 25 min	Corriente Directa 23 A/m ² 3.0-4.0 V	Flujo pistón, vertical. Vf: 0.23 m/s Vf: 0.63 m/s TRH: 63 seg	Sara Pérez C
Agua de pozo	Sílice: 50 mg/l CaCO ₃ :100 mg/l STD: 450 mg/l Sulfatos: 25 mg/l	Conductividad: 1000 μ S/cm					
Agua potable	10 mg/l Fluoruros	pH: 8,0 25°C Conductividad 900 μ S/cm	90% Fluoruros	Monopolar. Bipolar dos electrodos conectados a DC y dos con polarización inducida	Corriente directa 625 A/m ²	Tipo Batch	D. Ghosh

Agua potable	3 mg/l Fluoruros 80 mg/l HCO_3^-	pH: 7,2 20°C Conductividad 3000 $\mu\text{S/cm}$	97% F^- 0,8 mg/l F^- 65% HCO_3^- 80 mg/l HCO_3^-	Monopolar Bipolar	53 A/m^2 Q: 6,6 L/h 19,1 A/m^2 Q: 6,6 L/h	Continuo V: 2,4 l	N. Mameri
Solución sintética con Nitrato de Potasio	150mg/l HNO_3^- 2 mg/l TDS	pH: 7,43	89,7% HNO_3^-	Bipolar	40 V	Tipo Batch	M. Malakootian
Aguas residuales de galvanoplastia	33mg/l Cu^{2+} 41 mg/ Zn^{2+} 24 mg/l Cr^{6+} 302 mg/l DQO	pH: 4,0 - 8,0	94% Cu^{2+} 95% Zn^{2+} 92% Cr^{6+} 64% DQO	Bipolar	4,8 A/dm^2	Tipo Batch	Nafaâ Adhoum
Solución sintética con Tetraborato de Sodio	100 mg/l Boro	pH: 8,0	97% Boro	Monopolar paralelo	1,2-6,0 mA/cm^2 0-5 A 0-30 V	Tipo Batch 150 rpm	A. Erdem Yilmaz
Solución sintética de Dicromato de Potasio	0-100 mg/l Cr^{6+}	pH: 5,0-8,0 Reduce Cr^{6+} a Cr^{3+} en medio ácido. Precipita Cr^{3+} en medio alcalino. 1.5 mS/cm	97% Cr^{6+}	Monopolar Serie	30 A/m^2 0.1 A	Continuo. TRH: 1.2h. 50 ml/min	Ping Gao
Solución sintética de Fosfato de Potasio	100 mg/l $\text{PO}_4\text{-P}$	pH: 7,0	93% Fosfato.	Monopolar	0,75 A	Tipo Batch 150 rpm	Şahset Irdemez
Agua residual de una empresa de sacrificio de animales	4000 mg/l SS	98°C pH: 7,05	97,2% SS	Monopolar paralelo	Corriente directa 125 A/m^2	Tipo Batch 400 rpm	IN Widiasta

Lixiviados (relleno sanitario)	12861 mg/l DQO 5270 mg/l DBO ₅ 32 mg/l SO ₄ 3100 mg/l C ⁺ 8700 mg/l CaCO ₃ 2240 mg/l Amonio-N 345 mg/l SS 1320 NTU	23°C pH: 8,2 19.62 mS/cm	95% SO ₄ 59% DQO con electrodos AL 35% DQO con electrodos Fe 14% NH ₃ -N con electrodos Fe 14% NH ₃ -N con electrodos Al	Tipo Batch	Corriente directa 631 A/m ² 0-30 V 0-3.0 A	Tipo Batch 200 rpm	Fatih Lihan
Agua residuales de plantas de nutrientes	Nitrógeno Fosforo	110 mS/cm	-	Corriente directa. Bipolar serie	72 V 150 A 140 A/m ²	Tipo Batch	WA.Pretorius
Arsénico de agua subterránea	0.05 ppm Arsénico (III)	pH: 5,5 – 7,1 600-4000 µS/cm	95.54 % As (sin aire) 99.77% As (con aire)	Bipolar	20-30 V 5 A 3.7-4.6 mA/cm ²	Reactor de flujo continuo	Parga y Cocke
Aguas residuales municipales	Turbidez 51 NTU DQO: 3422 mg/l TSS: 143 mg/L DBO Total: mg/L 98 Cloruros: mg/L 1238	pH 7,0 conductividad 4000 µS/cm 25°C	99% NTU 98-99% DBO 92% TSS	Monopolar paralelo	Corriente Directa 0.8 A	Tipo Batch	Alaadin A. Bukhari
Agua de grifo	E. Coli 10 ⁴ CFU/ml Legionella Pneumophila 10 ⁹ CFU/ml. Cloruros 45 mg/l Sulfatos 71 mg/l Calcio 136 mg/l Magnesio 14 mg/l Sodio 19 mg/l Potasio 3 mg/l Alcalinidad 316 mg/l	21°C 0,23-0,43 mg/l de cloro libre	< 10 CFU/mg de Escherichia Coli < 10 CFU/mg de Legionella pneumophila	Monopolar paralelo	Corriente Directa 0,5 A y 3,1 V para E.coli. 0,3 A Y 2,7 V para Legionella pneumophila.	Tipo Batch con recirculación del líquido. 250 rpm Desinfecta 0,150m ³ /h	K. Bensadok

5. TRATAMIENTO DE AGUAS CRUDAS EN EL MUNICIPIO DE SAN MARTÍN (CESAR)

5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MUNICIPIO

Figura 4. Localización del municipio de San Martín (Cesar)



Fuente: Google Maps.

5.1.1 Límites. El municipio de San Martín (Cesar) limita al sur con el municipio de San Alberto (Cesar), al oriente con el municipio de Ocaña (Norte de Santander), al norte con los municipios de Aguachica (Cesar) y Río de Oro (Cesar), y al occidente con Santander, con límites en el río Lebrija.

5.1.2 División político-administrativa. La división político-administrativa de San Martín (Cesar) está representada por la cabecera municipal, la cual tiene una extensión actual de 905,55 km², está conformado por veinte barrios (La Floresta, San Vicente, Buenos Aires, La Esperanza, San Alonso, 20 de Mayo, La Cumbre, Las Orquídeas, William Quintero, El Socorro, El Porvenir, Villa Marcela, Luis Doria,

San José, Villa Luci, Villa Torcoroma, San Jorge, Villa Nueva, 25 de Mayo y El Bosque), y diez corregimientos (San José de las Américas, Terraplén, Los Bagres, La Curva, Aguas Blancas, Cuatro Bocas, Puerto Oculto, Minas, Torcoroma y Pita Limón).¹²

5.1.3 Condiciones meteorológicas. Tomando del marco referencial de los pisos térmicos y la relación IDEAM, donde relaciona temperaturas y alturas, mediante la fórmula ($Y = -0.0060X + 29.1890$; Y= Temperatura, X= elevación en m) introduciendo rangos altitudinales, se determina que el municipio presenta las unidades climáticas cálidas, templadas y frías, entre 24 y 18°C.¹³

- **Hidrografía.** Se han identificado 5 microcuencas en el área municipal las cuales hacen parte de la Subcuenca del Río Lebrija: microcuenca El Caimán, microcuenca La Huila, microcuenca quebrada Torcoroma, microcuenca quebrada Aguas Negras, microcuenca San Albertico.¹⁴

5.1.4 Población. El municipio de San Martín (Cesar) cuenta con una población de 18548 habitantes de los cuales el 52% corresponde al sexo masculino y el 48% restante al sexo femenino. Según el estudio demográfico de proyecciones 2005-2020 del censo 2005 (DANE), el 51.41% corresponde a la zona rural y el 48.59% a la zona urbana.¹⁵

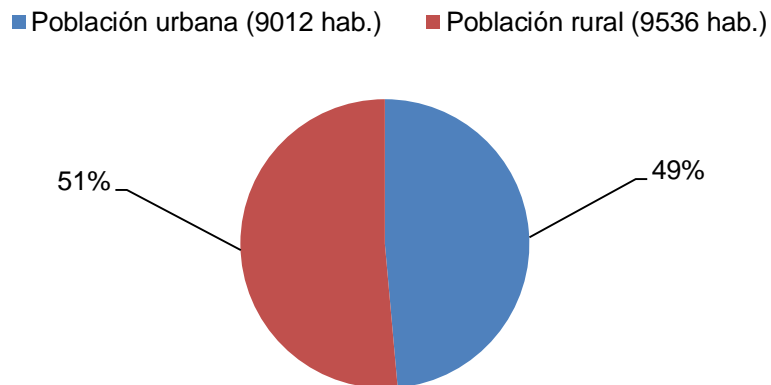
¹² *Ibíd.*, p. 6.

¹³ *Ibíd.*, p. 6.

¹⁴ *Ibíd.*, p. 7.

¹⁵ Censo general 2005 – perfil San Martín (Cesar). *Op. cit.*, p. 1

Figura 5. Población del municipio de San Martín (Cesar)



Fuente: Resultados y proyecciones (2005-2020) del censo 2005 (DANE).

5.2 EMPRESA ENCARGADA DEL SERVICIO DE ACUEDUCTO EN SAN MARTÍN (CESAR)

En el municipio de San Martín (Cesar), la prestación del servicio de acueducto se realiza a través de la Administradora Pública Cooperativa Empresa Solidaria de San Martín (APCES E.S.P.). La empresa funciona como unidad de servicios públicos domiciliarios adscrita a la Administración Municipal como dependencia regida por lo establecido en la Ley 142 de 1994 (Ley de servicios públicos domiciliarios) y las normas complementarias, registrada en la cámara de comercio como unidad de servicios públicos. En la actualidad la empresa de servicios públicos APCES E.S.P. cuenta con 2363 usuarios para el servicio de acueducto, 1963 usuarios para alcantarillado y 2517 usuarios para el servicio de aseo¹⁶, distribuidos de la siguiente manera por usos y estratos:

¹⁶ PUEAA (2014) – APCES E.S.P. San Martín (Cesar), Op. cit., p. 9

Tabla 3. Suscriptores en cada servicio por uso y estrato.

Uso/ Estrato	Totales por servicio		
	Acueducto	Alcantarillado	Aseo
Uso: 01 residencial			
Estrato uno	1624	1253	1828
Estrato dos	603	586	586
Estrato tres	58	60	60
Total (Uso: 01 residencial)	2285	1889	2474
Uso: 02 comercial			
Categoría única	55	21	21
Total (Uso: 02 comercial)	55	21	21
Uso: 03 oficial			
Categoría única	20	20	21
Total (Uso: 03 oficial)	20	20	21
Uso: 04 industrial			
Categoría única	3	3	1
Total (Uso: 04 industrial)	3	3	1
Totales			
	2363	1933	2517

Fuente: Programa de uso eficiente y ahorro de agua – APCES E.S.P. San Martín (Cesar).

5.3 FUENTE DE ABASTECIMIENTO HÍDRICO

La fuente de abastecimiento del acueducto municipal es la quebrada Torcoroma. La captación se realiza mediante una toma lateral, su capacidad nominal es de 90 litros por segundo, la aducción está conformada por una tubería PVC - RD21 de 12 pulgadas revestida en concreto que llega al desarenador y del desarenador se utiliza un canal de concreto de 40 x 40 centímetros para llegar a la planta de tratamiento. De la planta de tratamiento a la cabecera municipal se utiliza tubería PVC RD21 de 10, 8 y 6 pulgadas y la conducción en el área de la cabecera municipal a las redes domiciliarias se realiza en tubería PVC RD21 de 3 y 2

pulgadas. La capacidad de transporte es de 35 litros por segundo, el diámetro desde el desarenador hasta la planta de tratamiento es de 12 pulgadas y con una longitud de 3734 metros lineales. La Corporación Autónoma Regional del Cesar – CORPOCESAR a través de la resolución No. 864 de fecha 18 de octubre de 2005: Otorga derecho para aprovechar las aguas de la corriente denominada Torcoroma en beneficio del Acueducto Municipal de San Martín (Cesar).

Figura 6. Quebrada Torcoroma.



Fuente: APCES E.S.P. San Martín (Cesar).

El presente derecho se otorga a título de concesión a nombre de la Empresa de Servicios Públicos del municipio de San Martín “EMPUSAM E.S.P” (NIT 0824006090-1) con un caudal de 28 l/s destinados a satisfacer las necesidades hídricas de un máximo poblacional de 9.078 habitantes. Luego a través de la resolución 048 del 27 de enero de 2006: Modifica el artículo 9 de la resolución 864 de fecha 18 de octubre de 2005 el cual quedó así: “Otorgar derecho para aprovechar las aguas de la corriente denominada Torcoroma en beneficio del

Acueducto Municipal de San Martín (Cesar).¹⁷ El presente derecho se otorga a título de concesión a nombre de la ADMINISTRADORA PÚBLICA COOPERATIVA EMPRESA SOLIDARIA DE SAN MARTÍN CESAR “APCES E.P.S.” (NIT 0830514235-1) con un caudal de 28 l/s destinados a satisfacer las necesidades hídricas de un máximo poblacional de 9.078 Habitantes” Más tarde en la resolución No. 1314 del 12 de octubre de 2010: Modifica en los términos que a continuación se indican, el periodo de vigencia y el caudal derivado de la corriente denominada Torcoroma en beneficio del Acueducto Municipal de San Martín (Cesar), a nombre de la Administradora Publica Cooperativa Empresa Solidaria de San Martín Cesar “APCES E.P.S.” con identificación tributaria No. 083 0514235-1 , concesionado mediante Resolución No 864 de fecha 18 de octubre de 2005 modificada parcialmente por Acto Administrativo No 048 del 27 de enero de 2006.¹⁸

5.4 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DEL AGUA

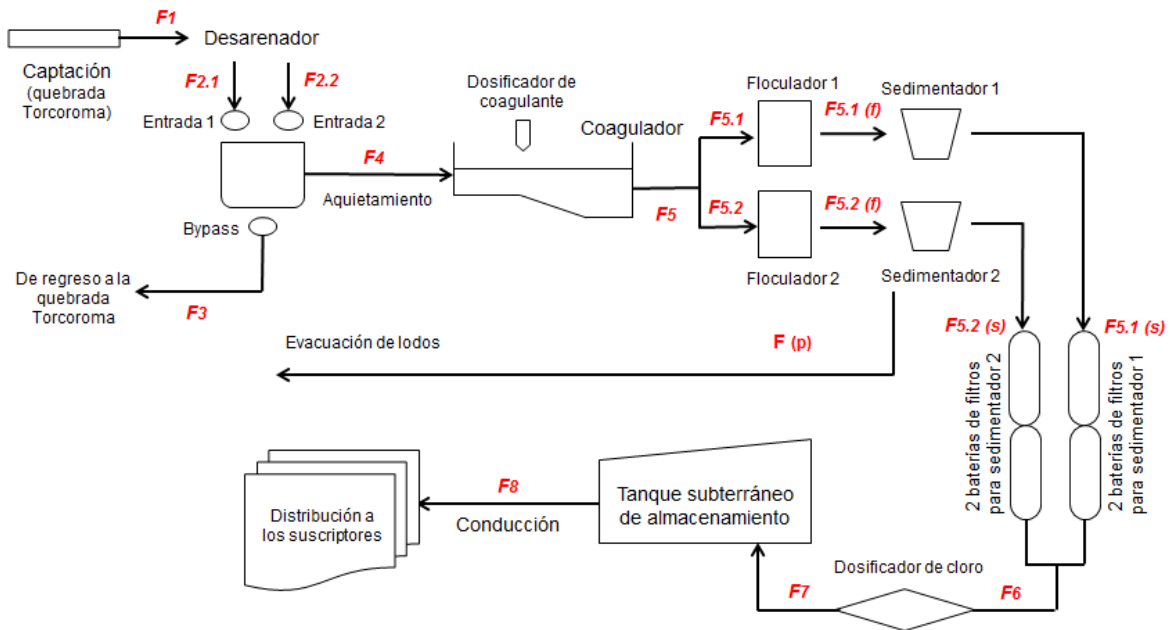
5.4.1 Captación. La captación se hace mediante una toma de recolección lateral que consiste en rejillas dispuestas paralelas a la corriente, construida en la orilla del cauce en concreto reforzado, ubicada a 13 kilómetros de la cabecera municipal. Cuenta con un dique de 22 metros que dirige las aguas hacia la captación. El agua captada entra a una cámara de aquietamiento de 3.8 x 3.5 x 3.7 metros de alto, cuenta con dos compartimientos, el primero en forma de canal, cuya función es la de actuar como primer desarenador y el segundo

¹⁷ *Ibíd.*, p. 13.

¹⁸ *Ibíd.*, p. 14.

compartimiento es al que llega el agua, que pasa por rebose y en donde se encuentra la salida para el desarenador.¹⁹

Figura 7. Diagrama de flujo del sistema de potabilización que posee actualmente el municipio de San Martín (Cesar)



5.4.2 Aducción. La línea de aducción se encuentra dividida en dos tramos, bocatoma - desarenador - planta. La aducción está conformada por una tubería PVC – RD21 de 12 pulgadas revestida en concreto que llega al desarenador y del desarenador se utiliza un canal de concreto de 40 x 40 cm para llegar a la planta de tratamiento. El segundo tramo se encuentra construido en el mismo material y en diámetros de 12 pulgadas, con una longitud de 3734 metros lineales. Este tramo cuenta con una ventosa rustica a la salida del desarenador y una válvula de purga de 6 pulgadas.²⁰

¹⁹ *Ibíd.*, p. 16.

²⁰ *Ibíd.*, p. 16.

5.4.3 Desarenador. La cámara de Bypass de 17 m de largo x 0.7 m de ancho se maneja mediante dos compuertas y una válvula de salida de 14", cuenta con una salida hacia el río, al igual que la zona de salida, para efectos de mantenimiento. El desarenador está diseñado para un caudal de 90 l/g, se ubica a 13 km de la cabecera municipal, tiene cotas de entrada y salida de 194,03 y 194,23 m, respectivamente.²¹

5.4.4 Tratamiento.

Figura 8. Medidor de caudal (APCES E.P.S).



Fuente: Programa de uso eficiente y ahorro de agua – APCES E.S.P. San Martín (Cesar).

El sistema de acueducto cuenta con una planta de tratamiento que se encuentra en óptimo estado y dispone de los siguientes procesos: floculación, sedimentación, filtración, desinfección. La planta cuenta con un medidor de caudal a la entrada, el cual registra la cantidad mediante una regleta calibrada l/s, el

²¹ *Ibíd.*, p. 17.

medidor registra un promedio de 90 l/s.²² El sistema de acueducto de APCES E.P.S, clasifica los procedimientos de la siguiente manera:

- **Aquietamiento.** El dispositivo de quietamiento es una cámara cubica de concreto de dimensiones 1.1 m x 1.3 m x 1.35 m, de profundidad, la cual genera una velocidad final en la superficie de 0,073 m/s y una velocidad en la pantalla deflectora, compuesta por 12 orificios de 3" de diámetro, de 0,48 m/s.²³
- **Dosificación.**

Figura 9. Dosificador de sulfato de aluminio (APCES E.P.S)



Fuente: APCES E.S.P. San Martín (Cesar).

En la planta la dosificación se hace manual y artesanalmente. Para obtener la solución a dosificar, se cuenta con un mezclador helicoidal de tres paletas, el cual trabaja con motor eléctrico, cuando el motor esta fuera de servicio, la solución se

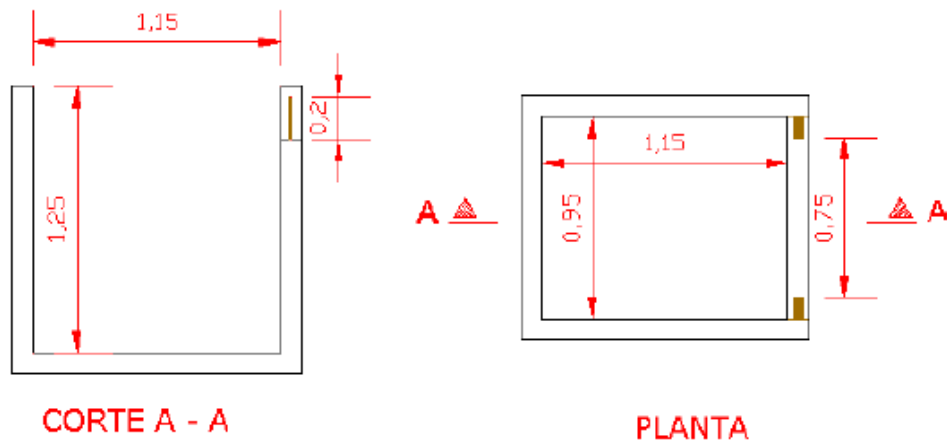
²² *Ibíd.*, p. 18.

²³ *Ibíd.*, p. 21.

fabrica manualmente removiendo con pala. La dosificación se hace por medio de una tubería de PVC de ½” con un tapón rustico.²⁴

- **Mezcla rápida.**

Figura 10. Esquema del tanque de mezcla rápida (APCES E.P.S)



Fuente: Programa de uso eficiente y ahorro de agua – APCES E.S.P. San Martín (Cesar).

La mezcla rápida se realiza por medio de un vertedero de paredes contraídas y delgadas, precedido por una cámara de reducción de forma rectangular que actúa también como cámara de aquietamiento. El vertedero es seguido por un canal de sección rectangular con dimensiones 0,9 m x 1,1 m x 4,75 m, que distribuye el caudal en los floculadores. La dosificación se realiza en el punto de caída del vertedero. El vertedero cuenta con una lámina de agua que oscila entre los 17 y 20 cm de altura, la velocidad de aproximación al vertedero oscila entre los 0,07 y los 0,1 m/g. El siguiente es el esquema del dispositivo de mezcla rápida.²⁵

²⁴ Ibíd., p. 21.

²⁵ Ibíd., p. 23.

- **Mezcla lenta.**

Figura 11. Floculadores (APCES E.P.S).



Fuente: APCES E.S.P. San Martín (Cesar).

La planta cuenta con dos floculadores tipo Alabama, de 9 compartimientos cuadrados c/u. Los compartimientos cuentan con cajas de salida superior, establecidas a diferentes alturas y ubicadas en oposición a las entradas de cada compartimiento. Los floculadores tienen cada uno un área superficial de $20,25 \text{ m}^2$ y un volumen de $48,15 \text{ m}^3$, (para sumar un total de $40,5 \text{ m}^2$ de área efectiva y $96,3 \text{ m}^3$ de volumen total); por donde se hace circular el agua en flujo turbulento,

provocando mezcla completa a través de cada unidad mediante una entrada por la parte superior dirigida al fondo.²⁶

- **Sedimentación.** La sedimentación se realiza por medio de dos unidades, cada una se encuentra conectada a un floculador. Estas unidades son sedimentadores de alta tasa, de flujo ascendente y placas inclinadas de acero; cuentan con 75 placas de 1,2 x 2,4 m, inclinadas a 60° con un espacio de 6 cm entre ellas.²⁷

Figura 12. Sedimentadores (APCES E.P.S).



Fuente: APCES E.S.P. San Martín (Cesar).

La zona de lodos es de forma cónica y cuenta con un sistema de limpieza hidráulico, accionado por una válvula desde la parte superior del sedimentador. Las dimensiones de la zona de lodos es de 6 m de largo, 4.85 m de ancho y 2.1 m

²⁶ *Ibíd.*, p. 23.

²⁷ *Ibíd.*, p. 23.

de altura central, para un volumen total de 20.4 m³. Los lodos son extraídos por medio de una tubería de 10" conectada a un depósito de 2 m de altura.²⁸

- **Filtración.**

Figura 13. Filtros (APCES E.P.S)



Fuente: APCES E.S.P. San Martín (Cesar).

La planta cuenta con 4 unidades de filtración convencional, dos para cada uno de los sedimentadores, con dimensiones de 3.15 m x 2.3 m y 5.35 m de altura. Los filtros son de flujo descendente, tienen lecho filtrante compuesto por grava, arena y antracita. El sistema de recolección consta de falsos fondos hechos en viguetas triangulares perforadas cada 7 cm con agujeros de ½". Los filtros cuentan con un sistema de auto lavado, en donde el agua filtrada por las unidades en operación, lava con flujo ascendente el filtro en limpieza, mediante la inyección de agua por medio de las perforaciones del falso fondo. El agua de lavado es recolectada en la canaleta y evacuada por medio de una tubería de 14" de A.C. El agua filtrada se

²⁸ *Ibíd.*, p. 23.

recolecta en un canal común que luego actúa por rebose sobre un canal para transportarle hacia el tanque.²⁹

- **Desinfección.**

Figura 14. Dosificador de cloro (APCES E.P.S)



Fuente: APCES E.S.P. San Martín (Cesar).

Como complemento del tratamiento de agua potable, se realiza el proceso de desinfección mediante la aplicación de cloro gaseoso; se agrega por medio de una tubería de $\frac{3}{4}$ ", la cual lleva consigo agua del tanque aéreo, donde antes de entrar al agua que se está tratando recibe la carga de 45 libras de presión de cloro gaseoso.³⁰

5.4.5 Tanque de almacenamiento. El tanque de almacenamiento del municipio de San Martín, está ubicado en la planta de tratamiento, se encuentra enterrado y dispone de una capacidad de 1000 m^3 , con dimensiones de 20 m de largo x 20 m

²⁹ *Ibíd.*, p. 26.

³⁰ *Ibíd.*, p. 27.

de ancho y una profundidad de 3 metros. El tanque de almacenamiento suplente las necesidades del municipio cuando se presentan deficiencias en el suministro o cuando se realiza mantenimiento en la planta de tratamiento.³¹

Figura 15. Vista superior del tanque subterráneo para almacenamiento (APCES E.P.S).



Fuente: APCES E.S.P. San Martín (Cesar).

5.4.6 Conducción. La conducción tiene aproximadamente 7000 metros lineales, está constituida por varios tramos en diferentes diámetros y materiales. Desde la planta de tratamiento a la población, el agua es transportada por tuberías de 10", 8" y 6" en tubería de PVC RD21 y termina en acometidas domiciliarias de 1/2".³²

³¹ *Ibíd.*, p. 19.

³² *Ibíd.*, p. 20.

5.4.7 Redes de distribución. Las redes de distribución del municipio cuentan con aproximadamente 30000 metros lineales de tubería tanto A.C. como de PVC en diferentes diámetros que van desde 1" hasta 10".³³

5.4.8 Análisis fisicoquímico del agua tratada.

Figura 16. Análisis fisicoquímico del agua tratada.



Fuente: SIAMA Ltda.

³³ Ibíd., p. 20.

5.4.9 Análisis microbiológico del agua tratada.

Figura 17. Análisis microbiológico del agua tratada.

Servicios Integrados para la Industria del Agro, Minero-Energética y el Medio Ambiente
 NIT: 804.016.152-8

REPORTE DE RESULTADOS

Ciudad y Fecha de emisión: Bucaramanga, 10 de Marzo de 2016	No. 099929
Solicitante: APCEB	Tipo de muestra: Agua
Dirección: Calle 13 Nro. 7 – 29	Identificación: AGUA TRATADA
Teléfono: 5548581	Descripción: Tratada
Lugar de muestreo: MUESTRA TOMADA EN EL PUNTO #20770-0005, VÍA EL CAIRO	Responsable de muestreo: Solicitante
Fecha de muestreo: 08 de Marzo de 2016	Procedimiento de muestreo: Solicitante
Fecha de recepción: 09 de Marzo de 2016	Tamaño de la muestra: 300 mL
Fecha de análisis: 09 – 10 de Marzo de 2016	Envase o empaque: Vidrio
Análisis solicitado: Microbiológico	Lote: //
Condiciones de la muestra: Adecuadas	

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

ANÁLISIS	MÉTODO	RESULTADOS	VALORES DE REFERENCIA
RECuento TOTAL DE MESOFILOS	St. Mth. 9215 D	10 UFC / 100 mL	Máx. 100
COLIFORMES TOTALES	St. Mth. 9222 B	0 UFC / 100 mL	0
<i>Escherichia coli</i>	St. Mth. 9222 D	0 UFC / 100 mL	0

OBSERVACIONES: Las variables analizadas se encuentran dentro de los valores aceptables según los requisitos microbiológicos de la Resolución 2115/07.

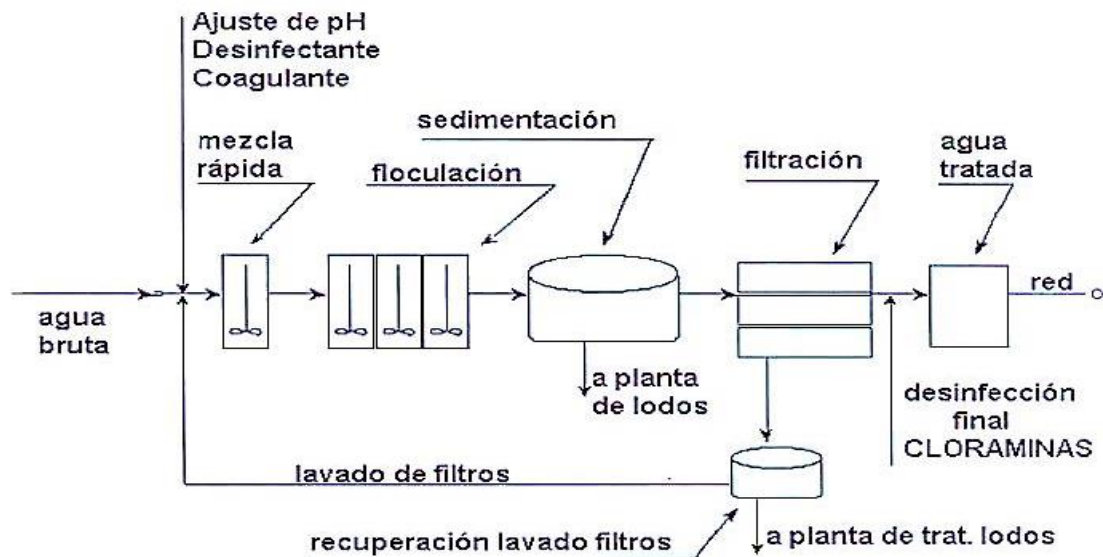
Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA.

Fuente: SIAMA Ltda.

Los parámetros mencionados en las figuras 16 y 17 están por dentro de los valores de referencia estipulados en la Resolución 2115 de 2007 – Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible). Es importante indicar que APCES E.S.P. nunca ha realizado análisis fisicoquímicos y microbiológicos al agua captada de la quebrada Torcoroma.

6. TRATAMIENTO DE AGUA CONVENCIONAL

Figura 18. Diagrama de flujo de un sistema de potabilización convencional



Fuente: Modulo recurso del agua III (tratamiento de agua potable, operación, procesos, talleres y monitoreo) – UIS.

Una planta de tratamiento es un sistema de operaciones o procesos unitarios convenientemente seleccionados y separados, con el fin de remover los contaminantes presentes en el agua cruda hasta llevarlos a los límites aceptables estipulados por la normativa.³⁴ La siguiente figura describe un sistema de potabilización convencional donde están involucrados los procesos unitarios necesarios para obtener agua potable óptima para consumo humano.

³⁴ Resolución 2115 de 2007 – Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

6.1 PROCESOS UNITARIOS

Las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas actuales de las aguas superficiales hace necesario someterlas a una serie de procesos unitarios, con el fin de purificarlas para que los seres humanos la puedan consumir. Estos procesos unitarios consisten en:

6.1.1 Coagulación. Es el aglomeramiento de las partículas suspendidas y coloidales presentes en el agua mediante la adición de coagulantes. En este proceso entran en contacto instantáneo las partículas del polímero (coagulante) con las partículas de color y/o turbiedad que contenga el agua. Se realiza en la cámara de mezcla rápida y se favorece con la agitación la cual se realiza mecánicamente con motor o hidráulicamente. Las especies coloidales halladas en el agua cruda y en el agua de desecho incluyen arcillas, sílice, hierro y otros metales pesados, color y sólidos orgánicos, como los residuos de organismos muertos.³⁵

6.1.2 Floculación. Es la aglutinación de partículas inducida por una agitación lenta de la suspensión coagulada. Puede ser que el floculo formado por la aglomeración de varios coloides no sea lo bastante grande como para asentarse con la rapidez deseada. Un floculante reúne partículas floculadas en una red, formando puentes de una superficie a otra y enlazando las partículas individuales en aglomerados. El alumbre, las sales de hierro y los polímeros de peso molecular alto son floculantes comunes. La floculación es estimulada por una mezcla lenta

³⁵ MENDOZA GOMEZ, Mónica Marcela; IBAÑEZ PINEDO, William. Modulo Recurso del agua III. "Tratamiento de agua potable, operación, procesos, talleres y monitoreo". Bucaramanga, 2006, pág. 163. Monografía, Especialización en Ingeniería Ambiental. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química.

que un poco a poco los flóculos, una rápida mezcla rompe el floc y difícilmente se forman en su tamaño y fuerza inicial.³⁶

6.1.3 Sedimentación. Proceso en el cual los sólidos suspendidos en el agua se decantan por gravedad, previa adición de químicos coagulantes. Presenta condiciones de reposo en el agua, para remover mediante la fuerza gravitacional las partículas en suspensión cuya densidad es mayor que la del agua.³⁷

6.1.4 Filtración. Consiste en la remoción de partículas suspendidas, coloidales y microorganismos objetables presentes en el agua, que no han quedado retenidas en el proceso de sedimentación, y consiste en hacer pasar el agua a través de un medio poroso de material granular. En consecuencia, el trabajo que los filtros desempeñan depende directamente de la mayor o menor eficiencia de los procesos preparatorios (coagulación, floculación).³⁸

6.1.5 Desinfección. La desinfección es el último proceso del tratamiento del agua y tiene como objetivo garantizar la calidad de la misma desde el punto de vista microbiológico asegurando la salud del consumidor. Es un proceso físico y/o químico, no biológico, mediante el cual se eliminan los microorganismos patógenos presentes en el agua, o sea aquellos que puedan causar enfermedades.³⁹

³⁶ *Ibíd.*, p. 70.

³⁷ *Ibíd.*, p. 88.

³⁸ *Ibíd.*, p. 4.

³⁹ *Ibíd.*, p.4.

7. ELECTROCOAGULACIÓN

La electrocoagulación es un proceso mediante el cual son desestabilizadas las partículas contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso. Induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados.⁴⁰

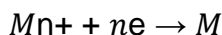
7.1 REACCIONES ELECTROQUÍMICAS

Las reacciones electroquímicas involucradas en la tecnología de la electrocoagulación son las de reducción-oxidación, conocidas como redox, las cuales se basan en transferencia de electrones entre un conjunto de especies químicas, en las cuales se presentará una especie oxidante y una reductora, que a su vez alcanzarán una forma reducida y una forma oxidada respectivamente. Para que se lleve a cabo este tipo de reacciones debe haber una especie que ceda sus electrones y otra que los acepte. El reductor es la especie química que tiende a ceder electrones de su estructura química al medio, quedando con carga mayor a la que tenía, mientras, el oxidante es la especie que tiende a captar esos electrones, quedando con carga menor.⁴¹ Relacionados con la electroquímica, se pueden diferenciar los siguientes procesos de tratamiento:

⁴⁰ BAYRAMOGLU, Kobyra; CAN, Sozbir. "Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater". Separation and Purification Technology. Vol 37, pp. 117-125, 2004.

⁴¹ RESTREPO, Ana; ARANGO RUIZ, Alvaro; Garces Guiraldo, Luis. La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. Producción + limpia, 2006, vol. 1, no 2, p. 58-77.

7.1.1 Electrodeposición. Es efectiva para recuperar metales pesados de flujos de aguas residuales. Los mayores progresos en estos procesos es cuando el cátodo se puede utilizar del mismo metal a recuperar o grafito.⁴²



7.1.2 Electroflotación. El proceso de Electroflotación (EF) es un proceso simple por el cual los contaminantes flotan en la superficie del agua adsorbidos sobre las pequeñas burbujas de hidrógeno y oxígeno generadas respectivamente en el cátodo y en el ánodo en el proceso de descomposición electrolítica del agua.⁴³

7.1.3 Electrooxidación. Es una técnica que se usa en el tratamiento de aguas residuales en combinación con otras tecnologías; es efectiva en la degradación de contaminantes "difíciles" sobre la superficie de algunos electrodos.⁴⁴

7.1.4 Electrodesinfección. En este tipo de reacción es similar a la oxidación indirecta; en el ánodo se genera cloro gas por la oxidación de los iones cloruros, que disueltos en el agua genera el par hipoclorito/hipocloroso. La mayor parte de las aguas contienen suficiente cantidad de ion cloruro para lograr la desinfección.⁴⁵ En el cátodo la reducción del agua para formar hidrogeno da lugar a la formación de iones hidroxilos OH^- que, son atraídos hacia el ánodo. Como consecuencia, se genera un perfil de pH entre cada ánodo y cada cátodo, que favorece a la

⁴² PARGA, Jose R. Arsenic removal vía electrocoagulation from heavy metal contaminated groundwater in La Comarca Lagunera México. Journal of Hazardous Materials, 2005, vol. 124, no 1, p. 247-254

⁴³ Fichas técnicas de procesos unitarios de plantas de tratamiento de efluentes líquidos de la industria textil/Revista Inditex. No. FT-AVA-002. La Coruña, 2015. 24 p.

⁴⁴ *Ibíd.*, p. 5.

⁴⁵ *Ibíd.*, p. 5.

aparición de diferentes especies químicas en el reactor provocando diferentes procesos en su interior.⁴⁶ Se considera que en el proceso de la electrocoagulación se intervienen tres etapas, donde las dos primeras comprenden de reacciones químicas y la última comprende un proceso físico:

- Oxidación electrolítica del metal del ánodo.
- Desestabilización de los contaminantes y emulsiones.
- Formación de flóculos por agregación de partículas del contaminante o adsorción de estas en el coagulante.

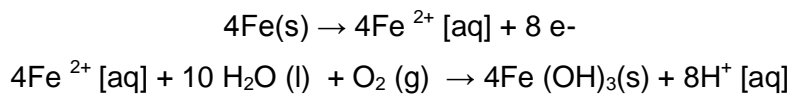
Los materiales más comúnmente utilizados como electrodos en la electrocoagulación son hierro y aluminio. Por esta razón se tratarán de manera especial las reacciones que se desarrollan. En el caso en el cual el hierro actúa como ánodo, se han propuesto dos mecanismos que explican la formación in situ de dos posibles coagulantes, estos pueden ser hidróxido ferroso $\text{Fe}(\text{OH})_2$ o hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$. En cuanto a la oxidación del hierro en un sistema electrolítico, produce hidróxido de hierro $\text{Fe}(\text{OH})_n$ donde $n=2$, o $n=3$, dos mecanismos han sido propuestos para la producción del hierro $\text{Fe}(\text{OH})_n$.⁴⁷

- **Mecanismo A:**

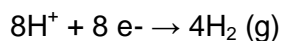
⁴⁶ PÉREZ CASTREJÓN, Sara; GELOVER SANTIAGO, Silvia Lucila; MARTÍN DOMÍNGUEZ, Alejandra. Efecto de la velocidad de flujo y de la calidad del agua en la pasivación de un reactor de electrocoagulación. Tecnología, Ciencia, Educación, 2012, vol. 27, no 2, p. 89-93.

⁴⁷ RESTREPO MEJÍA, Ana Patricia; ARANGO RUIZ, Alvaro; GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando. La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. Artículo de revisión. [En línea]. <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/514/1/pl_v1n2_58-77_electrocoagulacion.pdf> [citado en 10 de febrero de 2017]

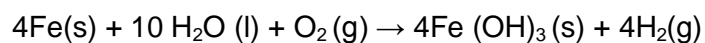
(Ánodo)



(Cátodo)

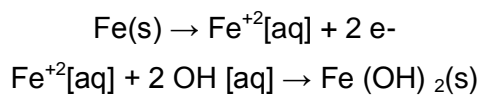


(Total)

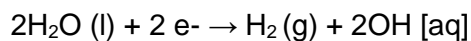


- **Mecanismo B:**

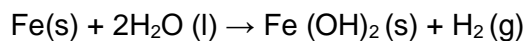
(Ánodo)



(Cátodo)



(Total)



Luego de la formación de los hidróxidos de hierro, los coloides se aglomeran, especialmente con carga negativa. La electrocoagulación del agua usando

electrodos de aluminio ha sido reportado por numerosos autores, la dilución electrolítica del ánodo de aluminio produce las especies monómeras catiónicas como Al^{+3} y $\text{Al}(\text{OH})_3$ a bajo pH. Los iones Al^{+3} en combinación con los OH^- reaccionan para formar algunas especies monoméricas como $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, y otras poliméricas, tales como $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$, $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$, que por procesos de precipitación forman el $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$, como se muestra en la reacción del ánodo.⁴⁸

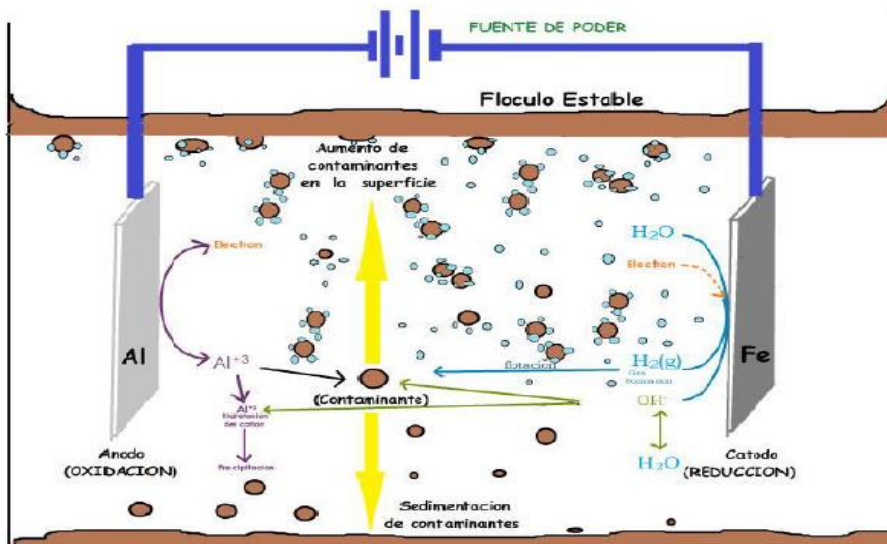
7.2 ELECTROCOAGULADOR

Un reactor de electrocoagulación es una celda electrolíticamente constituida por un ánodo y un cátodo, cuando los electrodos se conectan a una fuente de poder externa, el material del ánodo será electrolíticamente corroído por oxidación y el material del cátodo estará sujeto a reducción. En los electrodos ocurren una serie de reacciones que proporcionan iones positivos y negativos, el ánodo provee iones metálicos y a este electrodo se le conoce como electrodo de sacrificio ya que esta placa metálica se disuelve; mientras que la placa que conforma el cátodo permanece sin disolver.⁴⁹

⁴⁸ PRIETO GARDÍA, Francisco; CALLEJAS HERNÁNDEZ, Judith; REYES CRUZ, Víctor; MARMOLEJO SANTILLÁN, Yolanda. Electrocoagulación: una alternativa para depuración de lactosuero residual. En: Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica. Vol. 5, No. 3, 51-77. 6 de diciembre de 2012; ISSN 0718-378X.

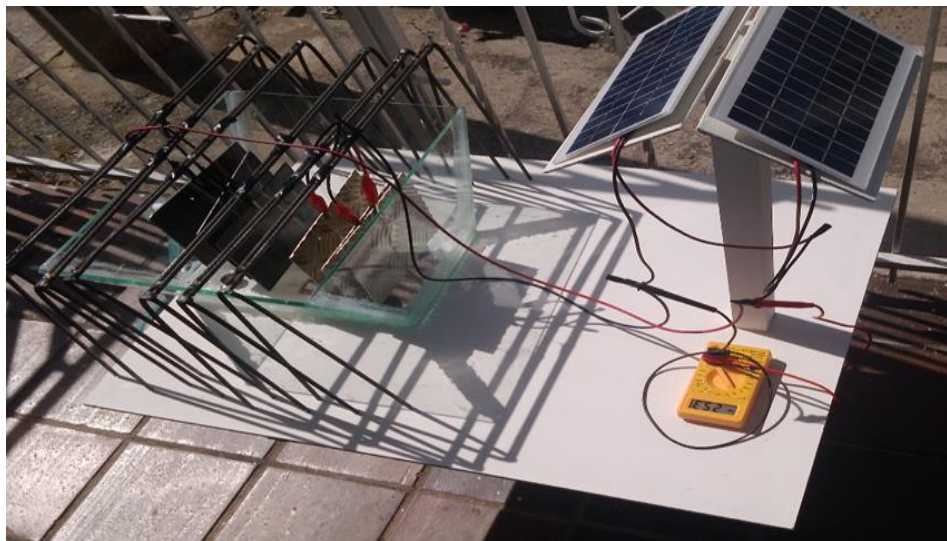
⁴⁹ BENSADOK, K. S; BENAMMAR; F, Lapique; G, Nezzal. Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminium plate electrodes. Journal of hazardous materials, 2008, vol. 152, no 1, p. 423-430.

Figura 19. Esquema del proceso de la electrocoagulación.



Fuente: Study on Treatment of Slaughterhouse Wastewater by Electro-coagulation Technique.

Figura 20. Electrocoagulador alimentado con energía solar fotovoltaica.



Fuente: Aplicación de la electrocoagulación para la remoción de partículas coloidales, contaminantes orgánicos y microorganismos patógenos presentes en la quebrada el zarzal, en el Centro de Investigaciones Santa Lucía.

A diferencia de la coagulación química, proceso en el cual el coagulante es adicionado al sistema como agente químico, en la electrocoagulación el coagulante es formado in situ mediante las reacciones dadas por la disolución de iones del metal que conforma el electrodo de sacrificio. En la figura anterior podemos observar no solo la generación de coagulantes, en el reactor electroquímico ocurre otros procesos como la generación de óxido por la oxidación del agua, en las proximidades del ánodo, y la formación de iones hidrógenos H^+ que son atraídos hacia el cátodo.⁵⁰

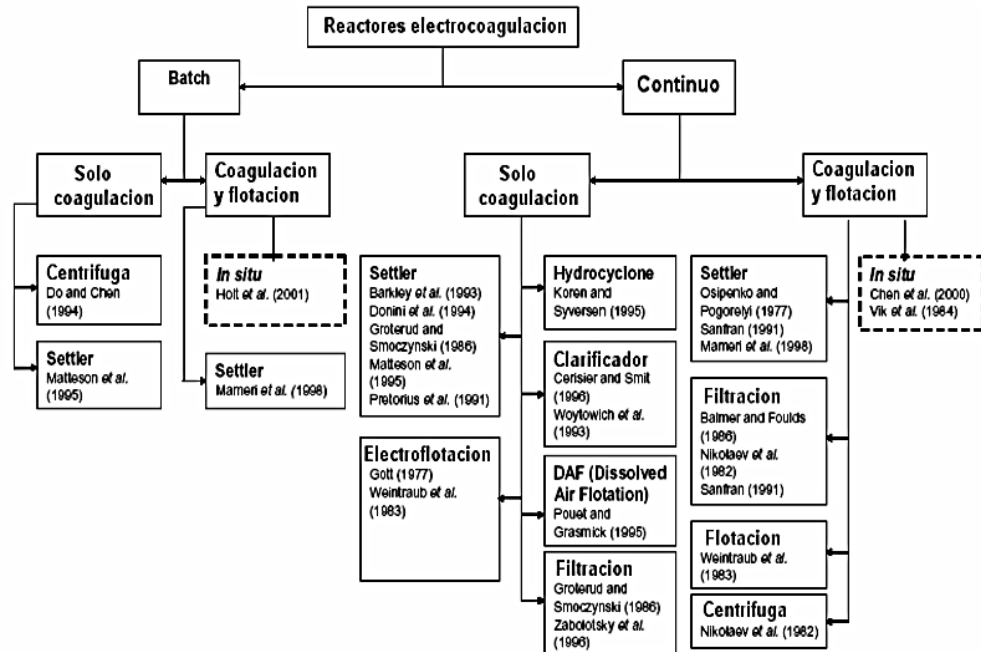
7.3 TIPOS DE ELECTROCOAGULADORES

La mayor cantidad de aplicaciones de la electrocoagulación son en continuo y trabajan en condiciones de estado estable o pseudo estable. La aplicación de la electrocoagulación en batch opera típicamente con un volumen constante de agua por ciclo de tratamiento y tiene una desventaja frente a los reactores en continuo desde el punto de vista de operación y diseño, ya que las condiciones dentro del tanque cambian con el tiempo, es decir, tiene un comportamiento dinámico. Una diferencia importante entre los reactores se debe a si en el reactor se lleva a cabo o no el proceso de flotación.⁵¹

⁵⁰ AGUILAR ASCON, Edwar Alejandro. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala de laboratorio para el tratamiento de agua. Lima, 2015, 102 h. Tesis de maestría. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de ingeniería geológica, minera, metalúrgica y geográfica.

⁵¹ ARISTIZABAL, Adriana y BERMÚDEZ, María Catalina. Estudio de la factibilidad de un sistema de electrocoagulación para tratamiento de aguas procedentes de lavanderías industriales con fines de reúso. Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Química. Medellín. 2007.

Figura 21. Tipos de reactores usados para el proceso de electrocoagulación.



Fuente: The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology.

7.4 FACTORES QUE INTERVIENEN DURANTE EL PROCESO DE LA ELECTROCOAGULACION

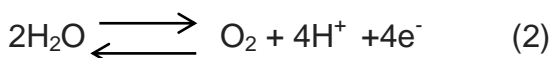
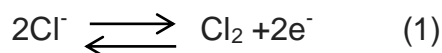
7.4.1 Fisicoquímica del efluente a tratar. Las condiciones de operación de la electrocoagulación dependen de la química del medio acuoso, especialmente de la conductividad, el pH, y la temperatura. La conductividad de la solución es un parámetro muy importante en el proceso de electrólisis. La solución debe tener cierta conductividad mínima para que se produzca el flujo de la corriente eléctrica. La conductividad baja de algunas aguas se ajusta añadiendo suficiente cantidad de sales de cloruro de sodio NaCl o cloruro de calcio CaCl₂ que además de aumentar la conductividad del agua, disminuye los efectos adversos de los iones carbonatos HCO³⁻ o sulfatos SO⁴⁻, donde estos iones conducen a la precipitación de Ca⁺² y Mg⁺² generando una capa insoluble alrededor de los electrodos.

Mahmut, *et al.* (2004). El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. Se ha determinado en algunos casos que la mayor eficiencia en la remoción de un contaminante se da dentro de un rango específico a pH=7. Mahmut, *et al.* (2004). Por otro lado, a pesar de que no se ha investigado a profundidad el efecto de la temperatura en la Electrocoagulación se ha encontrado que la eficiencia de la corriente aplicada para el aluminio se incrementa hasta los 60°C, efecto que se atribuye a la destrucción de la película de óxidos de aluminio que se forman en la superficie de los electrodos. Nabil, *et al.* (2001). En cuanto a la concentración del medio acuoso inicial, la eliminación de contaminantes disminuye con un aumento en la concentración inicial del contaminante para una densidad de corriente constante. Esto es debido al hecho de que el número de flocos de hidróxido metálico formados pueden ser insuficientes para sedimentar el mayor número de moléculas de contaminantes en concentraciones iniciales más altas de contaminantes. Fatih, *et al.* (2008).

7.4.2 Factores electroquímicos. La densidad de corriente es un parámetro muy importante, ya que determina la tasa de dosificación de coagulante, la tasa de producción de burbujas, el tamaño y el crecimiento de los flóculos. Con un aumento en la densidad de corriente el ánodo aumenta la tasa de disolución. Esto conduce a un aumento en el número de flóculos de hidróxido de metal que conlleva un incremento en la eliminación de contaminantes. Tsouris, C., *et al.* (2001). La densidad de corriente relaciona la cantidad de corriente eléctrica aplicada por unidad de área de los electrodos ($A/\text{área}$), esta tiene incidencia sobre el fenómeno de la pasivación, es decir a densidades de corrientes altas hay una mayor probabilidad que se presente la pasivación del material, mientras que densidades de corrientes bajas implica un mayor volumen del reactor y por lo tanto mayores tiempos de residencia. Ping, *et al.* (2005).

7.4.3 Material de los electrodos y distancias entre ellos. Las utilizaciones de electrodos de aluminio tienden a ser minimizada con respecto a los del hierro, debido a los problemas de disposición de los lodos conteniendo ese metal y a la alta pasivación de los electrodos. En cuanto a la distancia entre electrodos también juega un papel significativo en la electrocoagulación ya que el campo electrostático depende de la distancia entre el ánodo y el cátodo. Al aumentar la distancia de los electrodos por encima de la óptima se produce una reducción en la eliminación de contaminantes debido al hecho de que el tiempo de viaje de los iones aumenta con un aumento en la distancia entre los electrodos, y se forman menos flóculos.⁵²

7.4.4 Influencia de iones presentes en el sistema. En solución acuosa ciertos iones como el sulfato SO_4^{2-} y carbonatos HCO_3^- disminuyen la capacidad de oxidación del metal, ya que estos en presencia de Ca^{2+} o Mg^{2+} forman una película aislante en la superficie de los electrodos que los pasiva, lo que complica la formación de cationes coagulantes. Por el contrario, la presencia de NaCl promueve la oxidación por pitting y disminuye la resistencia al paso de la corriente lo que disminuiría los costos relacionados con la aplicación del voltaje. La presencia de sal también ayuda a disminuir el consumo de energía al aumentar la conductividad, además, cuando hay cloruros en el agua se pueden presentar las reacciones siguientes en presencia de una corriente eléctrica, lo que favorece la desinfección. Yasmine Delaedt, *et al* (2008). A continuación se describirá brevemente la reacción de formación de Cloro libre:



⁵² ILHAN, Fatih; UGUR KURT, Omer Apaydin; M. Talha Gonullu. Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes. Journal of hazardous materials, 2008, vol. 154, no 1, p. 381-389.



7.4.5 Tiempo de electrolisis. La eficiencia de eliminación de contaminantes es también una función del tiempo de electrólisis por lo tanto la eficiencia aumenta con el tiempo de electrolisis, hasta un valor óptimo, alcanzando un valor de saturación con rendimiento constante. Por consiguiente, a mayor tiempo aumenta la generación de flóculos resultando en un incremento en la eficiencia de eliminación de contaminantes.⁵³

7.4.6 Tiempo de retención. Después de la finalización del proceso de electrocoagulación para un tiempo particular de electrólisis, la solución se mantiene durante un período fijo (tiempo de retención) para permitir la sedimentación de las especies coaguladas. A medida que el tiempo de retención se incrementa la eficiencia de eliminación de los de contaminantes.⁵⁴

7.4.7 Pasivación del electrodo. Es la acumulación de una capa inhibidora (por lo general un óxido) en la superficie del electrodo. La pasivación es indeseable para la disolución del ánodo y el funcionamiento de electrocoagulación. El control primario de pasivación es el modo galvanostático de la operación.⁵⁵

7.4.8 Efecto de la velocidad de agitación. La agitación tiene una influencia positiva debido que al aumentar la movilidad de los iones generados, se forman los flóculos mucho antes, resultando en un aumento en la eficiencia de

⁵³ ILHAN, Fatih; UGUR KURT, Omer Apaydin; M. Talha Gonullu. *Ibíd.*, p. 382.

⁵⁴ ILHAN, Fatih; UGUR KURT, Omer Apaydin; M. Talha Gonullu. *Ibíd.*, p. 384.

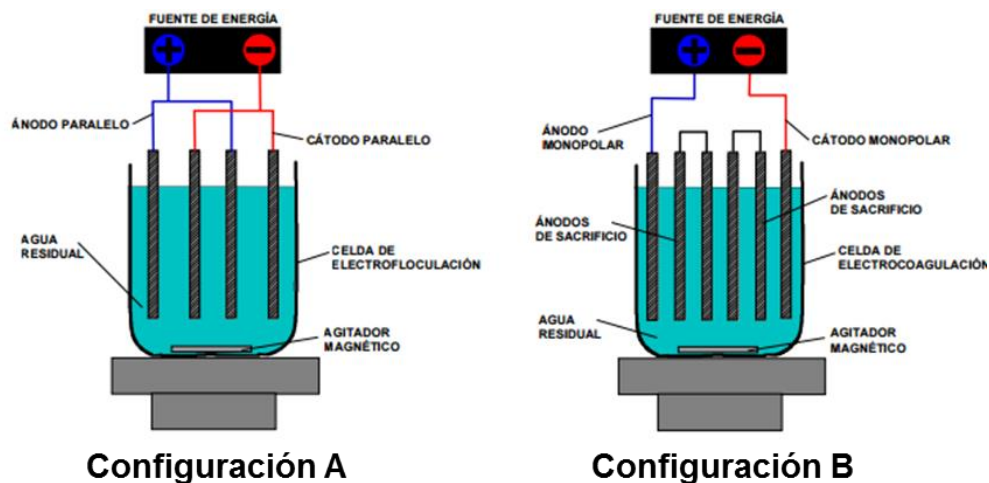
⁵⁵ Fichas técnicas de procesos unitarios de plantas de tratamiento de efluentes líquidos de la industria textil. *Op. cit.*, p. 14

eliminación de contaminantes para un tiempo particular de electrólisis, pero con un aumento en la velocidad de agitación más allá del valor óptimo, hay una disminución en la eficiencia de eliminación de contaminantes como los flóculos quedan degradados por la colisión entre sí debido a la alta velocidad de agitación.⁵⁶

7.4.9 Configuración eléctrica de los electrodos.

- **Reactor monopolar - electrodos en paralelo:** La corriente es dividida entre todos los electrodos en relación a la resistencia individual de la celda.
- **Reactor monopolar - electrodos en serie:** Los electrodos de sacrificio son internamente conectados con otros electrodos, requiere alta diferencia de potencial para dar un flujo de corriente debido a que este arreglo tiene alta resistencia. La misma corriente fluye a través de todos los electrodos. A continuación, se presentan los esquemas de conexiones en serie y paralelo, además de, las diferentes configuraciones.

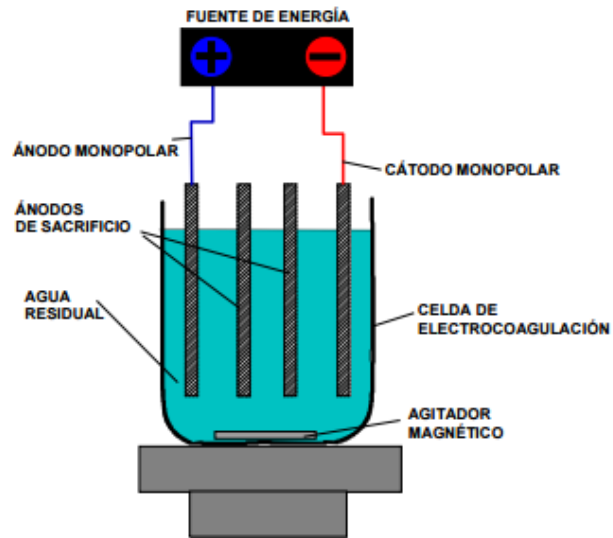
Figura 22. Celda de electrocoagulación con configuración monopolar en paralelo (A) y monopolar en serie (B)



⁵⁶ Ibíd., p. 14.

Fuente: Study on Treatment of Slaughterhouse Wastewater by Electro-coagulation Technique.

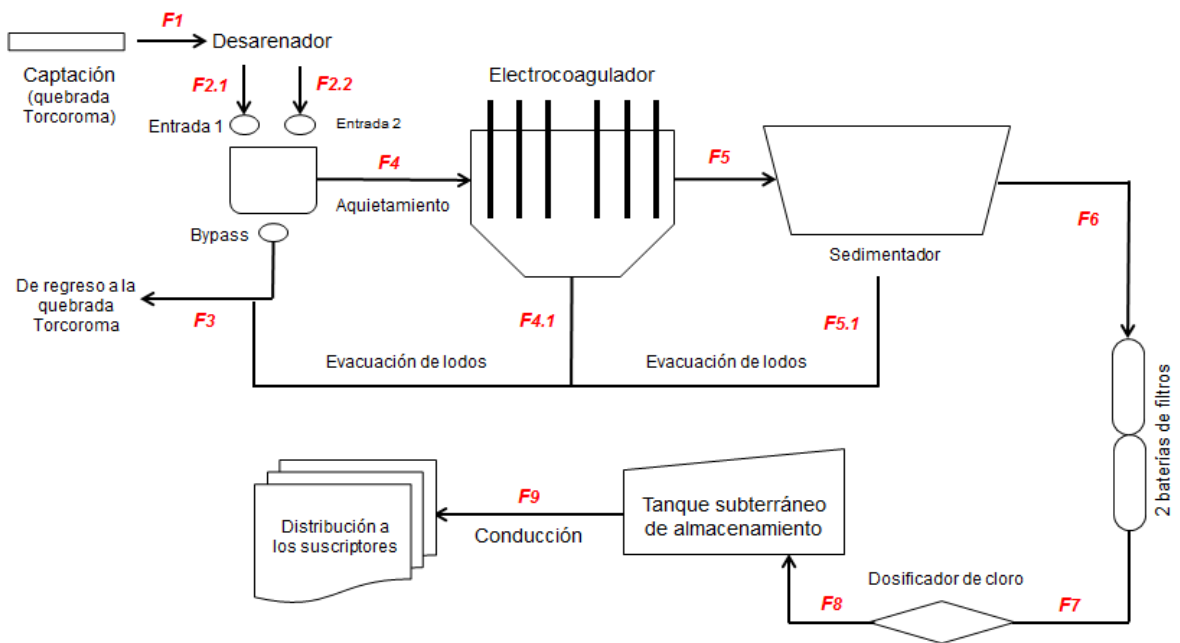
Figura 23. Celda de electrocoagulación con configuración bipolar en paralelo.



Fuente: Study on Treatment of Slaughterhouse Wastewater by Electro-coagulation Technique.

8. ELECTROCOAGULACIÓN PARA EL ACUEDUCTO MUNICIPAL DE SAN MARTÍN (CESAR)

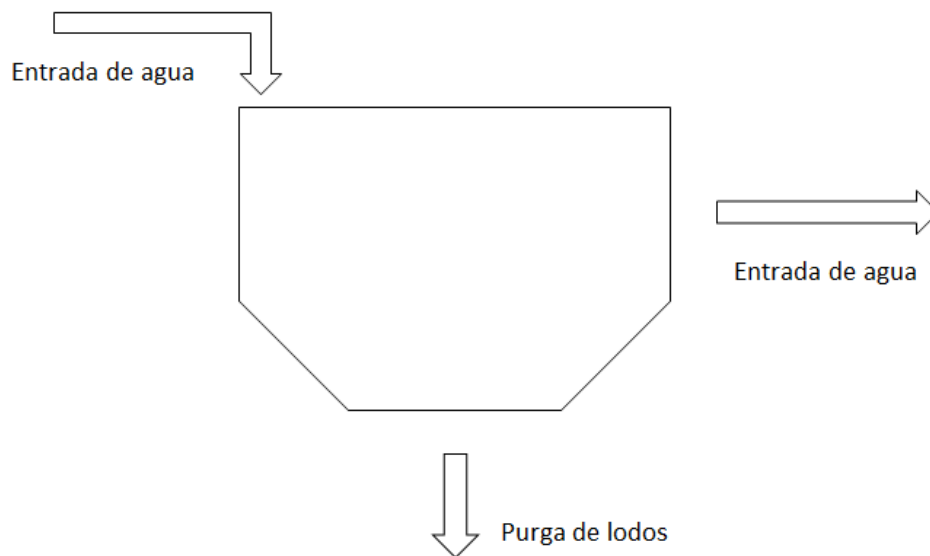
Figura 24. Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de agua cruda de APCES E.P.S. con la tecnología de electrocoagulación.



Después de haberse revisado diversas investigaciones realizadas, tanto a nivel industrial como a nivel de laboratorio acerca de la electrocoagulación, se determinó aplicar esta tecnología desde una óptica cualitativa en la planta de la Administradora Pública Cooperativa Empresa Solidaria de San Martín (Cesar) APCES E.P.S. Someramente, el electrocoagulador propuesto para el sistema de potabilización de San Martín (Cesar) tiene una base trapezoidal con el fin de que el mismo reactor facilite también la decantación de una gran parte de la dispersión coloidal desestabilizada; los ánodos propuestos (10 unidades de son aspecto

laminar) están elaborados en aluminio y los cátodos propuestos (10 unidades de aspecto laminar) están elaborados en titanio. Se eligió el aluminio como material de los ánodos debido a la estabilidad química superior que ofrece el hidróxido de aluminio frente al hidróxido de hierro (si se llegase a usar hierro como material de los ánodos), en aguas con mayor grado de contaminación.⁵⁷

Figura 25. Diseño propuesto del tipo de reactor que podría emular el proceso de la electrocoagulación en la planta de tratamiento de APCES E.S.P.



Se escogió el titanio como material de los cátodos debido a la capacidad de resistencia a la corrosión⁵⁸; el hierro no se escogió como material para los cátodos porque es muy susceptible a corroerse con facilidad, incrementado considerablemente el color aparente del agua tratada⁵⁹; el aluminio no se escogió

⁵⁷ CÁCERES QUIÑONES, Roxelys; VÁSQUEZ PACHECO, Juan J. Op. cit., p. 75

⁵⁸ CORRREA, Faber; CAICEDO, Julio Cesar; APERADOR, William. Mejoramiento de la resistencia a la corrosión del acero AISI 4140 utilizando multicapas de titanio/nitruro de titanio [base de datos en línea]. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 46 pp. 7-14. Diciembre, 2008 [citado en 25 de diciembre de 2016] Disponible en Scientific Electronic Library Online.

⁵⁹ *Ibíd.*, p. 67.

como material para los cátodos debido a que con el tiempo, el aluminio empieza a pasivarse naturalmente, afectando gradualmente la eficiencia de la electrocoagulación.⁶⁰

Los electrodos del sistema de potabilización de APCES E.P.S. están configurados de forma monopolar en paralelo y entre cada uno hay una separación de 20 mm. El número de electrodos no repercute en la eficiencia de la electrocoagulación⁶¹, sin embargo, el tamaño de los mismos en proporción a la cantidad del agua a tratar si varía la eficiencia de la tecnología. Por último, la fuente de alimentación energética del reactor es corriente alterna.

La entrada del agua al reactor se propuso de tal forma que el agua pueda ingresar por gravedad y así evitar el uso de equipos de bombeo que puedan incrementar los gastos de operación en el tratamiento. De igual manera, la salida del agua (después de haber sido electrocoagulada) está situada de tal forma que los flocs de alta o de baja densidad que se retienen durante el proceso de electrocoagulación no puedan transitar hacia el sedimentador.

Adicionalmente, el reactor cuenta con una válvula para purgar los lodos acumulados durante la electrocoagulación. En la figura 24 se logra apreciar la planta de APCES E.S.P. con la tecnología de la electrocoagulator; este mismo, sustituyendo algunas etapas y simplificando algunos procesos que están contemplados en la figura 7. A continuación se describirá que posibles efectos conlleva dicha modificación en el sistema de potabilización del municipio de San Martín (Cesar).

⁶⁰ ILHAN, Fatih; UGUR KURT, Omer Apaydin; M. Op. cit., p. 384

⁶¹ CÁCERES QUIÑONES, Roxelys; VÁSQUEZ PACHECO, Juan J. Op. cit., p. 77

8.1 ETAPAS REEMPLAZADAS Y OPTIMIZADAS EN EL SISTEMA DE POTABILIZACIÓN DE SAN MARTÍN (CESAR)

En seguida se identificarán las etapas de tratamiento que compone el sistema de potabilización de APCES E.P.S. actual, frente al sistema de potabilización de APCES E.P.S. con electrocoagulación.

Tabla 4. Etapas y flujos del tratamiento de la planta (sin electrocoagulación)

Etapas en el tratamiento de la planta (sin electrocoagulación)	Flow IN	Flow OUT
1. Captación	F1	
2. Desarenador	F2.1 y F2.2	F3 y F4
3. Vertedero (coagulación)	F4	F5
4. Floculación	F5.1 y F5.2	F5.1(f), F5.2(f)
5. Sedimentación	F5.1(f), F5.2(f)	F5.1(s) y F5.2(s) y F(p)
6. Filtración	F5.1(s) y F5.2(s)	F6
7. Desinfección	F7	F8

Tabla 5. Etapas y flujos del tratamiento de la planta (con electrocoagulación)

Etapas en el tratamiento de la planta (con electrocoagulación)	Flow IN	Flow OUT
1. Captación	F1	
2. Desarenador	F2.1 y F2.2	F3 y F4
3. Electrocoagulación	F4	F4.1 y F5

4. Sedimentación	F5	F5.1 y F6
5. Filtración	F6	F7
6. Desinfección	F7	F8
-	-	-

8.1.1 Sistema de potabilización APCES E.P.S. (sin electrocoagulación). Según la figura 7 del presente documento, el sistema de potabilización del municipio de San Martín (Cesar) sin electrocoagulación se constituye de 7 etapas de tratamiento, las cuales fueron esclarecidas en el apartado (5.4 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DEL AGUA p. 42) del presente documento. Sin embargo, en la tabla 4 aparece mencionados unos flujos de entrada y unos flujos de salida (16 en total) que no habían sido explicados hasta ahora. Cada flujo comprende las transformaciones del agua cruda a medida que va ingresando a cada etapa; estos flujos serán descritos a continuación.

- **Flujos en la etapa de captación (sin EC).** El flujo F1 (Flow IN) comprende el agua cruda proveniente de la quebrada Torcoroma que ingresa al sistema de potabilización APCES E.S.P.

- **Flujos en la etapa de desarenador (sin EC).** El flujo F2.1 (Flow IN) y F2.2 (Flow IN) hacen referencia a la división del agua captada de la quebrada Torcoroma en una bifurcación de 12 pulgadas de diámetro cada una, por donde ingresa el fluido al desarenador. F3 (Flow OUT) es el flujo que sale del desarenador a través de una tubería de 6 pulgadas de diámetro y funciona como Bypass, para la respectiva purga del desarenador o para redireccionar el agua que ingresa a la planta hacia la fuente de captación cuando se realicen mantenimientos o reparaciones. F4 (Flow IN) es el agua

libre de material flotante, arenas y otras impurezas de gran magnitud; lista para ser dosificada con sulfato de aluminio.

- **Flujos en la etapa de vertedero (coagulación) (sin EC).** El flujo F5 (OUT) es el agua con sulfato de aluminio ya dosificado.
- **Flujos en la etapa de floculación (sin EC).** F5.1 (Flow IN) y F5.2 (Flow IN) representan la bifurcación que existe en la planta para dividir el flujo de agua ya dosificado con alumbre y así, pueda distribuirse homogéneamente en los 2 equipos de floculación. F5.1 (f) (Flow OUT) y F5.2 (f) (Flow OUT) son los flujos que salen de los floculadores hacia los 2 sedimentadores, respectivamente.
- **Flujos en la etapa de sedimentación (sin EC).** F5.1 (s) (Flow OUT) y F5.2 (s) (Flow OUT) son los flujos de agua ya clarificados. F (p) es el sistema de purga que permite evacuar los lodos que se han acumulado.
- **Flujos en la etapa de filtración (sin EC).** El flujo F6 (Flow OUT) comprende el agua filtrada.
- **Flujos en la etapa de desinfección (sin EC).** F7 (Flow IN) es el agua filtrada dispuesta a ser desinfectada con cloro y F8 (Flow OUT) es el agua ya desinfectada y preparada para ser almacenada o distribuida.

8.1.2 Sistema de potabilización APCES E.P.S. (con electrocoagulación).

Según la figura 24 del presente documento, el sistema de potabilización del municipio de San Martín (Cesar) con electrocoagulación se constituye de 6 etapas de tratamiento. No obstante, en la tabla 5 aparece mencionados unos flujos de entrada y unos flujos de salida (11 en total) que no habían sido explicados hasta ahora. Cada flujo comprende las transformaciones del agua cruda a medida que va ingresando a cada etapa; los flujos de las etapas de captación y desarenador son iguales a los del sistema de potabilización sin electrocoagulación, pero a partir de la etapa 3, los flujos tienden a comportarse de la siguiente manera.

- **Flujos en la etapa de electrocoagulación.** El Flujo F4 (Flow IN) hace alusión al agua que ingresa al electrocoagulador y el flujo F5 (Flow OUT) es el agua que ha sido electrocoagulada; F4.1 (OUT) es aquel conducto en donde se purgan los lodos compilados, producto del proceso de la electrocoagulación. Cuando inicia el proceso de electrocoagulación, la corriente alterna ingresa a los ánodos de aluminio para reducir el aluminio al medio acuoso, a la par, en los cátodos ocurre la electrolisis producto del paso de la corriente alterna, aportando este fenómeno al agua OH^- e hidrón; este último, es responsable del burbujeo característico de la electrocoagulación en marcha.⁶² El radical hidroxilo reacciona con el aluminio disociado en el agua para formar el coagulante hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$). La producción del radical hidroxilo es constante y este, durante su corta instancia en el agua mineraliza los compuestos orgánicos contaminantes en su mínima expresión: CO_2 y CO .⁶³ También mineraliza las cadenas poliméricas de las cuales está compuesta la pared celular de los microorganismos patógenos presentes en el agua reduciendo

⁶² *Ibíd.*, p. 80.

⁶³ *Ibíd.*, p. 80.

sustancialmente las unidades formadoras de colonias patógenas en el agua a tratar; lo dicho anteriormente se conoce como procesos de oxidación avanzada (POA).⁶⁴ Cuando el hidróxido de aluminio actúa sobre la dispersión coloidal, esta se desestabiliza, permitiendo así la formación de flocs; algunos flocs, al formarse tienden a atrapar cationes H^+ y moléculas de CO_2 y CO haciendo que estos flocs adquieran una densidad más baja que los flocs formados con normalidad.⁶⁵ Es por esto que se tiende a formar dos tipos de floc: flocs de alta densidad (aquellos que tienden a decantarse en el fondo del reactor o en el sedimentador) y flocs de baja densidad (aquellos que tienden a compilarse en la superficie del reactor o en el sedimentador).

Cabe considerar que gran parte de los lodos que se generan en la electrocoagulación quedan contenidos en el reactor ya que mientras ocurre la electrolisis del agua y la producción consecuente del coagulante, la materia orgánica, los contaminantes y los agentes microbianos van siendo removidos.⁶⁶

- **Flujos en la etapa de sedimentación (con EC).** F5 (Flow IN) es el agua electrocoagulada, dispuesta a ser sedimentada para el aseguramiento de la decantación de los flocs formados en la etapa anterior. F5.1 (Flow OUT) es aquel conducto que sirve como purga de los lodos que se van acumulando en el sedimentador.

⁶⁴ Kusvuran, Erdal. Gulnaz, Osman. Irmak, Sibel. Atanur, Osman M. Yavuz, H. Ibrahim. Erbatur, Oktay. Comparison of several advanced oxidation processes for the decolorization of Reactive Red 120 azo dye in aqueous solution. Elsevier, B109 (2004) 85–93

⁶⁵ CÁCERES QUIÑONES, Roxelys; VÁSQUEZ PACHECO, Juan J. Op. cit., p. 95

⁶⁶ *Ibíd.*, p. 81.

- **Flujos en la etapa de filtración (con EC).** F6 (Flow IN) es el flujo clarificado que se dispone a ser filtrado. En la figura 24 se puede observar que ya no son 2 pares de baterías de filtros como en el sistema de potabilización municipal, sino que esta vez se emplea una sola batería debido a que la electrocoagulación posee un mayor poder desestabilizante que la coagulación química convencional.⁶⁷ Por ende, no se hace necesario el uso de una segunda batería de filtros. F7 (Flow OUT) comprende el agua filtrada que se dispone luego a ser desinfectada.
- **Flujos en la etapa de desinfección (con EC).** F8 (Flow OUT) es el agua que ha sido clorada. En esta etapa se requiere mucho menos cantidad de cloro que en la etapa de desinfección (sin EC) gracias a los procesos de oxidación avanzada que permitieron eliminar gran parte de los microorganismos patógenos presentes en el agua.⁶⁸

8.1.3 Etapas optimizadas en el sistema de potabilización de APCES E.P.S.

Las etapas del sistema de potabilización municipal que fueron optimizadas son:

- **Optimización de la etapa de sedimentación.** Esta etapa solo se necesita un equipo de sedimentación gracias a la rapidez con que el coagulante actúa conforme a su producción. El sedimentador es solo un equipo de apoyo para no sobrecargar de lodos el electrocoagulador y poder cerciorarse de que los flocs que se producen puedan ser decantados en su mayoría.

⁶⁷ Gerber Pumps International Inc. Beneficios de la electrocoagulación. [En línea]. <<http://www.gerberpumps.com/electrocoagulation-benefits.html>> [citado en 2 de noviembre de 2016]

⁶⁸ CÁCERES QUIÑONES, Roxelys; VÁSQUEZ PACHECO, Juan J. Op. cit., p. 96

- **Optimización de la etapa de filtración.** Al igual que en la optimización de la etapa de sedimentación, el gran poder desestabilizante de la electrocoagulación deja menor cantidad de impurezas suspendidas en el agua⁶⁹, por tanto, la cantidad de filtros va a ser menor que en el sistema de tratamiento municipal.
- **Optimización de la etapa de desinfección.** En esta etapa de desinfección no se requiere igual cantidad de cloro para desinfectar el agua debido a que la presencia de radicales hidroxilo en el agua elimina casi en su totalidad los microorganismos patógenos presentes en el agua⁷⁰; al haber menores concentraciones de unidades formadoras de colina, menores concentraciones de cloro serán necesarias para desinfectar el agua de manera segura.

8.1.4 Diferencias técnicas. La siguiente matriz comparativa (tabla 6) se construyó con base en el resultado del análisis de las investigaciones, relacionadas con la electrocoagulación aplicada a diversos campos de la industria; las características impuestas en la matriz fueron tomadas de forma arbitraria por los autores y son las siguientes:

⁶⁹ Powell Water Systems, Inc.

⁷⁰ CÁCERES QUIÑONES, Roxelys; VÁSQUEZ PACHECO, Juan J. Op. cit., p. 83

Tabla 6. Matriz comparativa entre el sistema de potabilización municipal (sin EC) con el sistema de potabilización municipal (con EC).

Característica	Sistema de potabilización municipal (sin EC)	Sistema de potabilización municipal (con EC)
Eficiencia	La eficiencia es óptima, siempre y cuando la fuente de abastecimiento hídrico no sea contaminada.	La eficiencia es aceptable, aún, cuando la fuente de abastecimiento hídrico haya sido contaminada.
Tiempo de remoción	(Consultar tiempos de remoción)	(Consultar tiempos de remoción)
Estado fisicoquímico y microbiológico del agua cruda	La calidad de la fuente de abastecimiento compromete el proceso.	La calidad de la fuente de abastecimiento no compromete el proceso.
Costos	Es económico.	Es muy económico.
Mantenimiento	Los mantenimientos además de costosos, deben ser periódicos para que la planta funcione en óptimas condiciones.	No requiere de mantenimientos especializados.

Talento humano	Debe contar con profesionales altamente preparados en ingeniería ambiental, química ambiental y saneamiento básico.	El personal no requiere de mayor preparación académica, no obstante, es necesario que se capacite en el uso y funcionamiento de la tecnología.
Insumos	Requiere de diversos insumos, en especial, coagulantes químicos, polímetros, neutralizantes de pH, desinfectantes, entre otros.	La tecnología tiene la capacidad de producir su propio coagulante y estabilizar su pH de forma autónoma. Necesita pequeñas cantidades de desinfectante.
Operación	Sistema complejo de operar.	Sistema fácil de operar.
Consumo de energía	El consumo de energía es alto debido a la necesidad de alimentar equipos como agitadores y dosificadores.	El consumo de energía es bajo ya que los electrodos demandan pocas cantidades de energía eléctrica.

8.2 VENTAJAS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN EN APCES E.S.P.

Las ventajas que el sistema de tratamiento municipal puede posiblemente presentar por emplear dentro de sus procesos la electrocoagulación, son:

- Ahorro de dinero.
- No se requieren agentes coagulantes o neutralizantes en la electrocoagulación.
- Mayor eficiencia de remoción que la coagulación convencional.
- Practicidad en los procesos.
- Fácil operación y mantenimiento.
- Genera lodos más compactos y con menor cantidad de agua.
- Elimina metales pesados y otras sustancias contaminantes de alta peligrosidad, como el petróleo.
- Elimina mayor cantidad de microorganismos patógenos.
- Menor cantidad de personal dedicado al proceso.

- Eliminación de isotopos radiactivos.
- Capacidad para trabajar incluso bajo bruscos aumentos de concentración química (llegando incluso a los muy altos niveles que harían que una planta tradicional como la de APCES E.S.P. no funcione correctamente).
- Fácil amplitud en la capacidad de las instalaciones existentes.

8.3 DESVENTAJAS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN EN APCES E.S.P.

Las desventajas que el sistema de tratamiento municipal puede posiblemente presentar por emplear dentro de sus procesos la electrocoagulación, son:

- Reposición paulatina de los electrodos de sacrificio (ánodos).
- Limpieza periódica de la capa de lodos superficial que se forma en el reactor (sino se hace puede que el burbujeo producto de la electrólisis estabilice de nuevo los flocs en el agua).
- APCES E.S.P. es una dependencia pública.
- Formación técnica y académica inexistente en el talento humano de la planta, relacionada con la electrocoagulación.

8.4 RECOMENDACIONES PARA IMPLEMENTAR EL SISTEMA DE ELECTROCOAGULADOR EN LA PLANTA DE APCES E.P.S.

Si la empresa APCES E.P.S. llega a considerar la aplicación de la electrocoagulación en el sistema de tratamiento de agua cruda actual, deberá tener en cuenta algunas consideraciones:

- Se necesita monitorear el agua de la quebrada Torcoroma para calcular los porcentajes de remoción actuales en las etapas de tratamiento.
- Realizar pruebas de ensayo a nivel de laboratorio con un equipo electrocoagulador a escala piloto que permita definir el diseño adecuado para el acueducto municipal.
- Analizar la viabilidad del uso de energía solar fotovoltaica como fuente de energía para el sistema de electrocoagulación, en aras de dar un sentido autosostenible y sustentable al proyecto.
- A pesar de la facilidad con la que opera el sistema de electrocoagulación, es importante controlar los efluentes que ingresan en la cabecera de la cuenca hidrográfica Torcoroma ya que de no ser así, los tiempos de electrocoagulación se incrementarán y por ende, los costos también.

- Elaborar una estrategia técnica que permita asegurar el suministro del recurso hídrico potable mientras se está adecuando el sistema a la planta.
- Es importante establecer un plan de emergencia para el caso en que los electrodos incurran en la pasivación y esto origine interrupciones en la potabilización del agua, como por ejemplo un plan de mantenimiento preventivo y periódico de los electrodos con líquidos anti incrustante, o la inversión de la polaridad de los electrodos.
- Gestionar los recursos económicos necesarios a través de organizaciones no gubernamentales apoyen proyectos tecnológicos para la sostenibilidad.

9. CONCLUSIONES

- Aunque la tecnología de la electrocoagulación podría ser costosa en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica sea alto, tiene la gran ventaja de poder ser alimentada de energías limpias, lo cual se convertiría en una excelente alternativa para municipios pequeños con menor de 1000 suscriptores o corregimientos y fincas.
- La electrocoagulación es una tecnología muy generosa en cuanto a que en ella sucede no solo la clarificación del agua cruda, sino que también se puede llegar a obtener altos porcentajes de remoción de contaminantes peligrosos y la eliminación de microorganismos patógenos.
- La revisión bibliográfica de las investigaciones realizadas alrededor de esta tecnología ofrece remociones muy por encima del 90% de los contaminantes, lo cual hace de la electrocoagulación una alternativa interesante y efectiva para el tratamiento de no solo agua crudas sino también de aguas residuales y lixiviados.

BIBLIOGRAFÍA

ARANGO, Álvaro; GARCÉS, Luis Fernando y RESTREPO, Ana Patricia. La Electrocoagulación: retos y oportunidades. Artículo de revisión. Producción + Limpia. Julio - Diciembre 2006 -Vol. 1 No.

ARBOLEDA, Jorge. Teoría y Práctica de la Purificación del agua. Bogotá: ACODAL. 1994.

CÁNEPA, Lidia. Procesos unitarios-floculación (Submódulo 3.2.2 B). En: PROGRAMA REGIONAL OPS / EHP / CEPIS DE MEJORAMIENTO DE CALIDAD DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO (1981). 1981. P. 3-4.

CANO, Andrés F. *et al.* Tratamiento de aguas residuales por medio de electrocoagulación. [En línea] [Consultado el 20- septiembre-2014] [Disponible en Internet]: <http://proyectodeinvestigacionaplicada.blogspot.com/2010/10/proyecto-de-electrocoagulacion.html>.

CAÑIZARES, P.; MARTÍNEZ, F; JIMÉNEZ, C.; LOBATO, J.; RODRIGO, M.A. Coagulation and Electrocoagulation of Wastes Polluted with Colloids, *Sen Science and Technology*, 42 (2007) 2157.

CASTRO DE ESPARZA, María Luisa. Parámetros físico-químicos que influyen en la calidad y en el tratamiento del agua. Lima, CEPIS, 1987.

COX R, Charles. Práctica y Vigilancia de las generaciones de tratamiento. La Habana, Cuba; Científico. Técnica. 1979.

CRICHTON, R.R. Investigaciones sobre los efectos del aluminio en el hombre en: Unite of Biochimic. Enero de 1997.

CHEN, M. L. Decolourization of Dye – Countaining Solution by Electrocoagulation. Journal of Applied Electrochemistry.No. 24. 1994.

DÁVILA, J.A. Tratamiento de vinazas de destilería por electrocoagulación/flotación/oxidación. Tesis realizada para optar al título de Magister en ingeniería énfasis Ingeniería Química. Universidad del Valle, 2008.

DAZA C. Rafael Fernando y FLOREZ G. Albert Edinson. Evaluación fisicoquímica y microbiológica de los cuerpos de aguas superficiales del Centro Experimental Santa Lucía de Barrancabermeja Santander. Trabajo de grado. Ingeniería Ambiental y de Saneamiento. Barrancabermeja: Instituto Universitario de la Paz. Escuela de Ingeniería Ambiental y de Saneamiento. 2004. 164 p.

RESOLUCIÓN 2115 DE3 2007. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRTORIAL.

DELGADILLO, Liliana. Estudio del tratamiento de aguas residuales por Electrocoagulación (Sistema AP). Febrero, 1998.

EIELEN, A. Vik. Electrocoagulation of potable water. Water Res, Vol.18 No.11, 1984.

FRANK R. SPELLMAN. Manual de agua potable. Ed. Acribia. 2004. 253.P. I.S.B.N. 9788420010335.

GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando. Fotocatálisis y Electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales: investigaciones y aplicaciones. Corporación Universitaria Lasallista. Revista Lasallista de Investigación. Colombia. Vol. 4. 2007. Págs. 69-70. I.S.S.N. 1794-4449.

GILPAVAS, Edinson. Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales. Escuela de Ingeniería. Universidad EAFIT ISSN 1692-0694. Medellín 2008. Documento 65 – 072008.

GONZÁLEZ LEAL, Gladys Rocío. Microbiología del Agua, conceptos y aplicaciones. 1 Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia. 2012. 412P.

GRAY NICK F. Calidad del agua potable: Problemas y Soluciones. Ed. Acribia. 1996. 388. P. I.S.B.N. 978842008219.

MANUAL DE PROCEDIMIENTOS ANALÍTICOS PARA AGUAS Y EFLUENTES. Ministerio de vivienda, ordenamiento territorial y medio ambiente. [En línea] [Consultado el 30-enero-2015] [Disponible en internet]:http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/docs/pdfs/manual_dinama.pdf

MARTÍNEZ NAVARRO, Fabiola. Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional. Universidad Castilla de la Mancha. España. 2007. 279.

MORANTE G, Gonzalo. Electrocoagulación de aguas residuales. Ed. Revista colombiana de física. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Vol. 34, No. 2. 2002.

NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 3903. Procedimiento para el ensayo de coagulación-floculación en un recipiente con agua o método de jarras. Ed. Instituto

Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). 2010. I.C.S.: 13.060.040

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Guías para la calidad del agua potable. 2 Ed. Vol. 1, OMS. 1995.

OROZCO JULIO, Álvaro. La densidad de carga del electrólito como parámetro de control del proceso de electrocoagulación. Revista Ainsa. Vol.5 N° 2 .1985. 30. p.

PEREZ, Jorge Arturo. Manual de Potabilización del agua. Universidad Nacional de Colombia. 3 Ed. 1997. 504 P.

PÉREZ LOZANO, Víctor M. Eliminación de compuestos orgánicos en aguas residuales por electrocoagulación (EC). Universidad de Alicante. Régimen Legal del Medio Ambiente. Decreto 1594 de 1984. Artículo 72. Legislación 2001.

RESTREPO OSORNO, Hernán Alonso. Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. 2009. 109. p.

REVISTA, Universidad de Caldas, julio-diciembre de 2005. Págs. 145-158.

RIOS, Yeison y VALENCIA, Julián. Electrocoagulación de aguas contaminadas con tintas flexográficas combinado con oxidación por adición de H₂O₂. Tesis realizada para optar el título de Ingenieros Químicos. Universidad del Valle, 2010.

ROBLEDO ROJAS, Jairo Alberto. Purificación del agua. 2 Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia. 2006. 474 P.

ROBLEDO ROJAS, Jairo Alberto. Purificación del agua. 3 Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia. 2009. 484 P.

SIERRA RAMIREZ, Carlos A. Calidad del agua, evaluación y diagnóstico. 1 Ed. Universidad de Medellín. 2011. 457. P. **I.S.B.N.** 9789588692067.

SOLER, Ana y CASTRO, Kako. Ánodo-cátodo. Electrólisis y galvanografía. La memoria química esculpida por electrones. 1 Ed. Comanegra. 2013. 336.P. I.S.B.N. 978-84-15097-97-6.

TABORDA, Gonzalo. *Et al.* Aplicación de métodos electroquímicos en la remoción de materia orgánica en los jugos producto del beneficio del fique: alternativa biotecnológica para mitigar la contaminación en los afluentes hídricos. Nova-publicación científica en Ciencias Biomédicas. Universidad de Caldas julio-diciembre de 2011. Vol. 9. I.S.S.N. 1794-2470. Págs. 113-214.

VARGAS, Lidia. Tratamiento de agua para consumo humano: Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. Tomo I. organización panamericana de la salud. Lima. 2004. p 30.