

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CURTIEMBRES POR
ELECTROCOAGULACIÓN:

DISEÑO DE UN PROTOTIPO EXPERIMENTAL

JULIETH CAROLINA VARGAS RODRÍGUEZ

ESCUELA COLOMBIANA DE CARRERAS INDUSTRIALES

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL

BOGOTÁ, D.C.

2014

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CURTIEMBRES POR
ELECTROCOAGULACIÓN:

DISEÑO DE UN PROTOTIPO EXPERIMENTAL

JULIETH CAROLINA VARGAS RODRÍGUEZ

Proyecto de Investigación

Directora

M.Sc JOHANA NIÑO ABELLA

Codirectores

M.Sc JUAN SEBASTIÁN SOLIS

IQ GUSTAVO CAMELO

ESCUELA COLOMBIANA DE CARRERAS INDUSTRIALES

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL

BOGOTÁ, D.C.

2014

Nota de aceptación

Msc. Johana Niño Abella

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, 12 de septiembre de 2014

A la razón de mi vida, a lo más especial que tengo, hoy puedo decir que todos los logros de mi vida te los debo a Ti, y si no me hubieses encontrado no sería nadie y estaría vacía. Gracias por traerme hasta acá y por bendecir cada una de las cosas que inició. ¡QUE TODOS LOS FRUTOS DE MI VIDA, TE HONREN A TI!.

Jeremías 29:11

Julieth Carolina Vargas Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

Luego de dedicar todo mi trabajo a mi Padre amado, doy gracias a mi familia, primeramente a mi mamá, por enseñarme lo que es luchar por los sueños y no descansar hasta lograrlos. A mis hermanos, por ser fuente de inspiración y motivación de ser su ejemplo. A mi padre, que aun estando lejos le hago participe de mis logros.

Agradezco a Larry Becerra, mi novio y la persona que Dios trajo a mi vida, para acompañarme, amarme y apoyarme, lo hiciste de la mejor forma y hoy puedo compartir este éxito contigo porque también es tuyo. Gracias también a su familia, que con sus detalles aportó también al desarrollo de este trabajo.

Doy gracias, a mis amigos, fueron como ángeles en momentos de tormenta, fueron muchas las personas que se ofrecieron a ayudarme cuando menos lo esperaba y más lo necesite. A William Acevedo, Marcela Aguiar, Sindy Bermúdez, David Jamaica, Angélica Beltrán, mis compañeras Mónica Muñoz e Ingrid Vásquez; en ellos realmente pude comprobar que el que ha encontrado un amigo, ha encontrado un tesoro.

Agradezco a la profesora Johana Niño por su perseverancia y fijarse objetivos altos, por ensañarme a ser constante en los proyectos que uno inicia. Al ingeniero Sebastián Solís, por sus consejos, revisión y dedicación al proyecto. Al ingeniero Gustavo Camelo, por su colaboración desinteresada e incondicional, dejándonos desarrollar este proyecto en la Asociación. A la ingeniera Mónica Ballén, pues a pesar de los inconvenientes siempre estuvo presta a colaborarnos desde el laboratorio de química; a la coordinación ambiental, a cargo del ingeniero Alejandro Moreno, por su empatía, colaboración y apoyo con la investigación desarrollada; al laboratorio de electrónica por facilitar el uso de equipos y apoyarnos en la elaboración de los ensayos. En general a toda la ECCI y sus directivas por fomentar la investigación como estrategia de generación de conocimiento desde la academia.

Julieth Carolina Vargas Rodríguez

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	18
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	20
3. JUSTIFICACIÓN	26
4. OBJETIVOS	30
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	30
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	30
5. MARCO REFERENCIAL (CONCEPTUAL, LEGAL, HISTÓRICO, TEÓRICO, ESTADO ACTUAL, CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO).....	31
5.1 MARCO CONCEPTUAL	31
5.2 MARCO LEGAL.....	37
5.3 MARCO HISTÓRICO.....	40
5.4 MARCO TEÓRICO	42
5.4.1 Características aguas residuales de curtiembres.....	44
5.4.2 Sistemas De Tratamiento De Las Aguas Residuales.....	48
5.4.3 Historia de la electrocoagulación.....	64
5.4.4 La Electrocoagulación	65
5.4.5 Principios de la electrocoagulación	69
5.4.6 Diseño y operación del reactor de electrocoagulación	73
5.4.7 Factores que afectan la electrocoagulación	78
5.4.8 Sistema productivo de las curtiembres.....	85
5.5 MARCO CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICO	91
5.6 ESTADO ACTUAL.....	97
6. DISEÑO METODOLÓGICO	103
6.1 MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN.....	103
6.1.1 Preservación, almacenamiento y envío de muestras.....	105
6.1.2 Selección de Puntos de Muestreo.....	106
6.1.3 Metodologías de análisis del agua residual.....	109

6.1.4	Resultados de los laboratorios	123
6.1.5	Análisis De Resultados	125
6.2	MONTAJE DE LA CELDA	132
6.3	DISEÑO EXPERIMENTAL	144
7.	CÁLCULO VARIABLES.....	152
7.1	PARÁMETROS ELÉCTRICOS	152
7.1.1	Corriente en la fuente (A)	152
7.1.2	Tensión en la fuente (V_f)	153
7.1.3	Tensión en los electrodos (V_e).....	153
7.1.4	Tensión en las resistencias (V_r)	153
7.1.5	Resistencia (R).....	153
7.1.6	Potencia suministrada por la fuente (P_s).....	153
7.1.7	Consumo de energía (E)	154
7.1.8	Conductividad (C).....	154
7.1.9	Potencia de pérdidas (P_p).....	155
7.1.10	Potencia de los electrodos (P_e)	155
7.2	PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	155
7.2.1	Peso de electrodos (P_e).....	157
7.2.2	Cambio peso electrodos (C_p).....	157
7.2.3	Sulfuros	157
7.2.4	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	158
7.2.5	Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	158
7.2.6	Sólidos Sedimentables (SS).....	160
7.2.7	Potencial Redox	161
7.2.8	Temperatura.....	161
7.2.9	pH.....	161
7.2.10	Eficiencias de remoción	162
8.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS DE ELECTROCOAGULACIÓN	163
8.1	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ELECTROCOAGULACIÓN.....	163

8.2	ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS DE ELECTROCOAGULACIÓN	183
8.2.1	Desgaste de los electrodos	183
8.2.2	Consumo de energía	186
8.2.3	Corriente en la fuente	192
8.2.4	Conductividad	194
8.2.5	Potencia de pérdidas.....	197
8.2.6	Potencia de los electrodos y potencia suministrada por la fuente	198
8.2.7	Potencial redox.....	199
8.2.8	Temperatura.....	202
8.2.9	Tensión	203
8.2.10	pH.....	206
8.2.11	Tiempo	208
8.2.12	Pretratamiento.....	211
8.2.13	Conexión electrodos.....	213
8.2.14	DQO	215
8.2.15	Sulfuros	216
8.2.16	SST	217
8.2.17	SS	218
8.2.18	Cumplimiento de la normatividad ambiental.....	220
8.2.19	Eficiencias de remoción total.....	223
8.2.20	Ensayo estándar	225
9.	RECOMENDACIONES	227
10.	CONCLUSIONES	230
11.	BIBLIOGRAFÍA	233
12.	ANEXOS	240

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1. Indicador de calidad del agua, Río Tunjuelo.....	21
Ilustración 2. Árbol de problemas.....	24
Ilustración 3. Árbol de medios y fines	25
Ilustración 4. Principio del tratamiento de agua residual.....	51
Ilustración 5. Procesos electroquímicos presentes durante el paso de corriente en un efluente. A la izquierda del dibujo se muestra el proceso de flotación de las partículas suspendidas en el efluente y a la derecha se muestra el proceso de electrocoagulación.....	66
Ilustración 6. Esquema para el proceso de electrocoagulación	70
Ilustración 7. Representación de las reacciones en un sistema de electrocoagulación con electrodos de aluminio y hierro.....	72
Ilustración 8. Reactores para electrocoagulación tipo bach.....	75
Ilustración 9. Reactor tipo filtro prensa.....	75
Ilustración 10. Arreglo de electrodos y unidades de electrocoagulación.....	76
Ilustración 11. Posibles configuraciones de flujo dentro de un reactor	77
Ilustración 12. Representación de la pasivación del cátodo	82
Ilustración 13. Posibles configuraciones electrodos.....	82
Ilustración 14. Diagrama de entradas y salidas de las curtiembres	87
Ilustración 15. Río Tunjuelo	98
Ilustración 16. Estructura del semillero.	101
Ilustración 17. Matriz de parámetros por proceso productivo.	104
Ilustración 18. Materiales de laboratorio Tecur	105
Ilustración 19. Localización del punto de muestreo	107
Ilustración 20. Punto de muestreo	108
Ilustración 21. Muestreo de agua residual en la Estación de Bombeo San Benito.	109
Ilustración 22. Procedimiento para determinar pH.....	110
Ilustración 23. Procedimiento para determinar Conductividad y Sólidos Disueltos	111
Ilustración 24. Medición de conductividad	112
Ilustración 25. Medición de sólidos sedimentables	113
Ilustración 26. Metodología para determinar DQO (valoración de la solución de sulfato ferroso amónico)	114
Ilustración 27. Procedimiento para determinar DQO	115

Ilustración 28. Procedimiento para determinar DBO ₅	117
Ilustración 29. Medición DBO ₅ y oxígeno disuelto	118
Ilustración 30. Procedimiento para determinar Oxígeno disuelto.....	119
Ilustración 31. Metodología para determinar Grasas y Aceites.....	120
Ilustración 32. Medición Grasas y aceites.....	121
Ilustración 33. Procedimiento para determinar cromo total.....	122
Ilustración 34. Comportamiento por parámetro.....	125
Ilustración 35. UCH por parámetro	127
Ilustración 36. UCH Total por día.....	128
Ilustración 37. Comparación de resultados vs norma	129
Ilustración 38. % remoción según Resolución 3957 de 2009	131
Ilustración 39. % remoción según proyecto norma vertimientos	132
Ilustración 40. Esquema de distribución electrónica del montaje de electrocoagulación	138
Ilustración 41. Partes de un multímetro	152
Ilustración 42. Refrigeración de las muestras.	157
Ilustración 43. Procedimiento para determinar SST.....	159
Ilustración 44. Determinación de SST.....	160
Ilustración 45. Procedimiento para determinar SS.....	160
Ilustración 46 Determinación de SS.....	161
Ilustración 47. Agua durante electrocoagulación	179
Ilustración 48. Sedimentación de sólidos.....	180
Ilustración 49. Clarificación agua residual post-tratamiento.....	180
Ilustración 50. Flotación de sólidos, grasas y aceites	181
Ilustración 51. Trazas brillantes en muestras de SST.....	181
Ilustración 52. Electrodo de aluminio antes (izquierda) y después (derecha)	182
Ilustración 53. Electrodo de hierro antes (izquierda) y después (derecha)	182
Ilustración 54. Resultados cualitativos muestra No 18.....	183
Ilustración 55. Cambio de peso en los electrodos.....	184
Ilustración 56. Peso electrodos vs eficiencia de remoción.....	185
Ilustración 57. Consumo de energía	186
Ilustración 58. Consumo de energía vs eficiencias de remoción	187
Ilustración 59. Consumo de energía vs conductividad.....	188
Ilustración 60. Consumo de energía vs pH	189
Ilustración 61. Consumo de energía vs potencial redox	190
Ilustración 62. Consumo de energía y voltaje y corriente	191
Ilustración 63. Corriente en la fuente	192
Ilustración 64. Corriente vs eficiencias remoción	193
Ilustración 65. Conductividad	194

Ilustración 66. Cambio en conductividad	195
Ilustración 67. Conductividad vs eficiencias remoción	196
Ilustración 68. Conductividad vs SST	196
Ilustración 69. Potencia de pérdidas	197
Ilustración 70. Potencia de pérdidas, voltaje y corriente	198
Ilustración 71. Potencia suministrada por la fuente vs potencia electrodos	199
Ilustración 72. Potencial redox	200
Ilustración 73. Potencial redox vs eficiencias remoción	201
Ilustración 74. Potencial redox vs eficiencia remoción SST	202
Ilustración 75. Temperatura vs eficiencias remoción	203
Ilustración 76. Voltaje en los electrodos vs eficiencias de remoción	204
Ilustración 77. Voltaje en los electrodos vs potencial redox	205
Ilustración 78. pH vs eficiencias remoción	206
Ilustración 79. Cambios pH	208
Ilustración 80. Tiempo ensayos (5 minutos) vs eficiencias remoción	209
Ilustración 81. Tiempo ensayos (12 minutos) vs eficiencias remoción	210
Ilustración 82. Tiempo ensayos (12 minutos) vs eficiencias remoción	211
Ilustración 83. Pretratamiento vs eficiencias de remoción	213
Ilustración 84. Modo conexión electrodos vs eficiencias de remoción	214
Ilustración 85. Eficiencias de remoción DQO	215
Ilustración 86. Eficiencias de remoción sulfuros	216
Ilustración 87. Eficiencias de remoción SST	218
Ilustración 88. Eficiencias de remoción SS	219
Ilustración 89. Cumplimiento de la norma para DQO	220
Ilustración 90. Cumplimiento de la norma para sulfuros	221
Ilustración 91. Cumplimiento de la norma para SST	222
Ilustración 92. Cumplimiento de la norma para SS	222

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Marco legal aplicable a las curtiembres de San Benito en el componente agua.....	37
Tabla 2. Tipos de agua residual.....	43
Tabla 3. Composición media de los efluentes de curtiembres:	45
Tabla 4. Efectos sobre el medio ambiente de las aguas residuales de curtiembre	46
Tabla 5. Operaciones y procesos unitarios y sistemas de tratamiento utilizados para eliminar la mayoría de los contaminantes presentes en el agua residual	49
Tabla 6. Principales tratamientos para aguas residuales de curtiembres.	52
Tabla 7. Comparación técnica y económica de tratamientos de aguas residuales.	56
Tabla 8. Eficiencia de remoción por electrocoagulación de los parámetros de interés.	63
Tabla 9. Ventajas y desventajas del tratamiento por electrocoagulación.....	68
Tabla 10. Descripción general de los procesos de las curtiembres	85
Tabla 11. Caracterización del agua por etapa de proceso.....	90
Tabla 12. Revisión bibliográfica de prototipos de electrocoagulación.....	92
Tabla 13. Equipos, materiales y reactivos utilizados en la caracterización	104
Tabla 14. Parámetros a medir con generalidades de preservación de muestra ..	106
Tabla 15. Resultados de pH	110
Tabla 16. Resultados Sólidos Disueltos.....	112
Tabla 17. Resultados DQO	116
Tabla 18. Prueba neutralización H ₂ SO ₄	116
Tabla 19. Resultados DBO ₅	118
Tabla 20. Resultados Oxígeno Disuelto.....	119
Tabla 21. Resultados Grasas y Aceites	121
Tabla 22. Resultados Cromo Total	123
Tabla 23. Métodos utilizados para el análisis de sulfuros y SAAM del AR.	123
Tabla 24. Resultados de laboratorio	124
Tabla 25. Clasificación por UCH por rangos de valores	126
Tabla 26. Comparación de cumplimiento con normatividad actual y proyecto de ley	130
Tabla 27. Primer montaje de electrocoagulación.....	133
Tabla 28. Montaje de electrocoagulación definitivo.	139
Tabla 29. Listado de variables para los ensayos	144
Tabla 30. Rangos de las variables independientes.....	145
Tabla 31. Rangos de las variables independientes establecidos.....	146

Tabla 32. Métodos de medición para las variables	147
Tabla 33. No de ensayos de electrocoagulación a realizar.....	148
Tabla 34. No de análisis físico-químicos.....	148
Tabla 35. Condiciones para cada ensayo	148
Tabla 36. Preservación de muestras en ensayos de electrocoagulación	156
Tabla 37. Características de la muestra inicial.....	163
Tabla 38. Resumen de ensayos de electrocoagulación.....	164
Tabla 39. Ensayos comparación pretratamiento.....	212
Tabla 40. Ensayos comparación conexión electrodos	213
Tabla 41. Eficiencia de remoción por ensayo	224
Tabla 42. Eficiencias de remoción total por ensayo	225
Tabla 43. Selección de los 5 mejores ensayos	226
Tabla 44. Consumo de energía de los 5 mejores ensayos	226

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO A. Formato ensayos electrocoagulación
- ANEXO B. Resultados laboratorios sulfuros
- ANEXO C. Resultados de ensayos de electrocoagulación
- ANEXO D. Vídeos electrocoagulación
- ANEXO E. Tabla consolidada de resultados

RESUMEN

Las aguas residuales de curtiembres, se caracterizan por contener una alta carga contaminante derivada de parámetros como el cromo, sulfuros, DQO, DBO₅, entre otros. Las descargas de estas aguas sin el tratamiento necesario y el cumplimiento de la legislación ambiental, derivan un sin número de afectaciones ambientales, sociales y económicas.

El presente trabajo de investigación, se realizó en la localidad de Tunjuelito, en el barrio San Benito, ubicado al sur-occidente de Bogotá D.C., en este sector se encuentra la mayor cantidad de empresas que procesan cuero en la ciudad, la mayoría de estas son MYPEs y empresas familiares que no cuentan con un tratamiento adecuado de las aguas residuales generadas y por tanto se vierten al río Tunjuelo sin cumplir con la normatividad.

En base a lo anterior, el principal objetivo de la investigación se encaminaba disminuir la contaminación de las aguas residuales producida por las MYPEs del sector curtiembres en San Benito, con una alternativa técnica, ambiental, económicamente viable y de amplia cobertura.

Este trabajo se ha venido desarrollando desde hace 2 años en conjunto con los industriales de las curtiembres de San Benito, y aunque inicialmente el trabajo comprendía el diseño de una planta convencional para el tratamiento de las aguas residuales, con el objetivo de incorporar criterios de desarrollo sostenible, ciclo de vida y producción más limpia, se inició la investigación de tratamientos avanzados, que permitieran el reusó posterior del agua y la sostenibilidad ambiental de la planta de tratamiento.

Se realizó una evaluación exhaustiva a nivel nacional e internacional, identificando las mejores tecnologías para tratamientos de aguas residuales para curtiembres. De lo anterior, surgió la idea de investigar el tratamiento de electrocoagulación de aguas residuales, aplicable a las curtiembres de San Benito.

En la práctica inicialmente, se realizó un acercamiento en el área de estudio, identificando las entradas y salidas del proceso, el manejo de efluentes colectivo, sistemas de tratamiento existentes y proyectos a futuro. Posteriormente se estableció el punto de muestreo y se realizó un muestreo compuesto para caracterizar las aguas residuales del sector, del cual se determinaron los

parámetros críticos y que requerían removerse para el cumplimiento de la normatividad ambiental.

El paso siguiente, fue construir la celda de electrocoagulación, de acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, tomando en cuenta las variables que jugaban un papel importante en el tratamiento (tensión, corriente, material de los electrodos, conexión de los electrodos, volumen de la celda, entre otros), finalmente se realizaron pruebas para determinar que el prototipo funcionaba y establecer el prototipo final para realizar los ensayos.

Se procedió a la planeación del diseño experimental de los ensayos de electrocoagulación, estableciendo las variables de interés, independientes y dependientes. Así mismo se estableció la metodología para realización de los mismos. Desde el 28 de julio al 6 de agosto se realizaron los ensayos de electrocoagulación en las instalaciones del laboratorio de absorción atómica de la ECCI.

Seguidamente, se analizaron las muestras provenientes de los ensayos, es importante aclarar que éstas fueron preservadas y almacenadas de acuerdo a lo establecido por la GTC 2 de Icontec. El análisis de SST fue realizado en el laboratorio de química de la ECCI, mientras la DQO y sulfuros fueron analizados en el laboratorio Antek S.A.

Cuando se contaba con los resultados de laboratorio, se ingresaron los datos de variables de todos los ensayos de electrocoagulación a una base de datos en excel, que permitió correlacionar las variables y graficar los comportamientos de las mismas, esto facilitó su análisis, y a partir de este trabajo se determinaron los mejores ensayos de electrocoagulación, estableciendo las variables óptimas para tratamiento de aguas residuales.

Los resultados obtenidos en el proceso investigativo, permiten concluir que a través de un tratamiento por electrocoagulación, es posible remover los parámetros de interés, en algunos casos con altas eficiencias, sin embargo es importante continuar con la investigación, de manera que se estandarice el tratamiento con el fin de mejorar las eficiencias de remoción que permitan el reuso del agua residual.

1. INTRODUCCIÓN

Los vertimientos de agua residual sin tratamiento y con altas cargas contaminantes, generan impactos ambientales negativos para los ecosistemas que los reciben; así mismo estas descargas se relacionan directamente con la salud de las personas que se encuentran dentro del área de impacto. Dado lo anterior no sólo las instituciones gubernamentales y privadas, sino que cada uno de nosotros debe preocuparse por la conservación del medio ambiente y en especial del agua, ya que es un recurso del que dependemos todos.

La carga contaminante en los vertimientos, está condicionada a las materias primas usadas en el proceso, así como su peligrosidad y cantidad. De acuerdo a estas características, deberá elegirse el tratamiento más adecuado para su implementación.

Las curtiembres, son centros de procesado de pieles de animales, donde se transforman en cuero. En la ciudad de Bogotá, el centro más grande de procesamiento de cuero, se encuentra en San Benito (localidad de Tunjuelito), se concentran allí más de 200 establecimientos, en su mayoría catalogados como micro o pequeña empresa, donde finalmente se obtienen elementos útiles para el ser humano como por ejemplo prendas de vestir, calzado y accesorios.

En las actividades de las curtiembres, tienen lugar diferentes materias primas y sustancias químicas como el cromo, taninos, sulfuros y cal. Las aguas residuales de este proceso, contienen una carga orgánica alta (DBO5, DQO, Sólidos), derivada del procesamiento de las pieles y su contenido de vello, grasas y otros. Así mismo de las sustancias químicas que se manejan, que aumentan su contaminación por cromo y sulfuros, entre otros.

La gestión ambiental ha evolucionado en los últimos años, para incorporar criterios de uso eficiente de recursos, impactos ambientales de todo el ciclo de vida del producto y producción más limpia. Por esta razón, el tratamiento de aguas residuales, debe dejar de ser una solución a final de tubo para convertirse en la posibilidad de reusar y recuperar recursos (agua y materias primas); este tipo de soluciones sólo son posibles cuando se usan tratamientos avanzados o complementarios.

La electrocoagulación es una alternativa de tratamiento avanzado para aguas residuales, que se ha caracterizado por sus altas eficiencias de remoción de contaminantes y su versatilidad en diferentes tipos de aguas; así mismo se destaca por la viabilidad económica y técnica que requiere para su operación. El tratamiento de aguas por electrocoagulación no necesita productos químicos para su funcionamiento, esto no sólo reduce los costos asociados, sino a su vez la contaminación secundaria.

El presente trabajo, muestra los resultados obtenidos de la investigación realizada con electrocoagulación como alternativa de tratamiento de aguas residuales de curtiembres, específicamente para el sector de San Benito en Bogotá D.C.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

San Benito cuenta con aproximadamente 200 industrias dedicadas al curtido del cuero, de las cuales según datos de la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), más del 90% de ellas realiza sus vertimientos, sobrepasando en altas cantidades las concentraciones máximas permitidas por las resoluciones 3956 de 2009 y la 3957 de 2009; lo anterior, debido a la falta de recursos, accesibilidad y deficiencia de tratamiento de agua residual.

Las curtiembres representan uno de los procesos productivos, con mayor índice de contaminación sobre los diferentes componentes, uno de ellos es la generación de vertimientos industriales, que actualmente presentan una problemática ambiental y social alta. La descarga de cromo, sulfuros, materia orgánica, entre otros, ocasionan consecuencias sobre el río Tunjuelo, el cual presenta la mayor carga contaminante de cromo total (110 kg/día en promedio) respecto a la carga media de cromo total del río Bogotá (39,01 kg/día) (1).

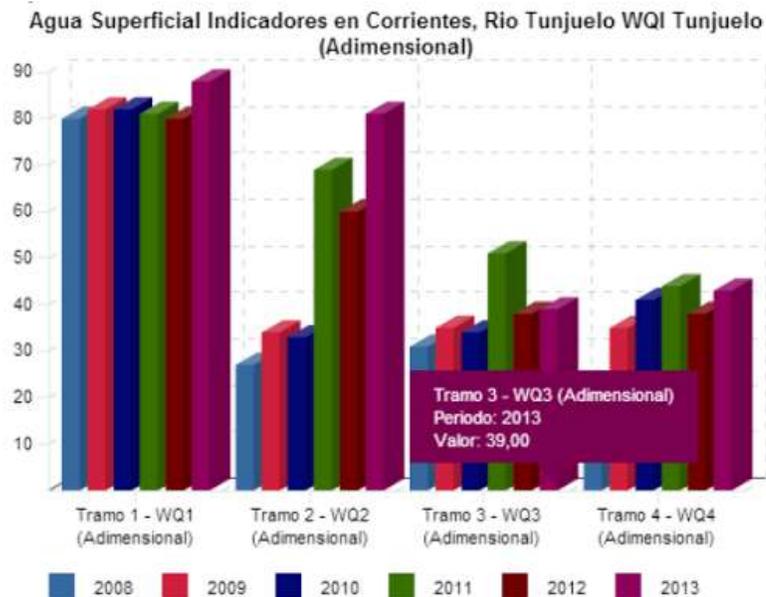
De acuerdo al comunicado emitido por el Consejo de Estado, relacionado con la recuperación del Río Bogotá, este es uno de los sistemas hídricos más contaminados del mundo, causando un grave deterioro ecológico y daño a su ecosistema, esto está directamente asociado con problemas de ordenamiento territorial, uso de suelo e inclusive la deficiencia de políticas públicas que impulsen la gestión del recurso hídrico especialmente en la capital de la nación. Este comunicado, reconoce que uno de los problemas más graves asociados a la contaminación del río Bogotá, es el incumplimiento de la normativa ambiental, en las diferentes problemáticas que se presentan en las cuencas alta, media y baja, registrando explícitamente el caso de las curtiembres de San Benito y Villa pinzón (2).

Todos los productos químicos usados durante los procesos de curtiembres en la zona industrial, son factores de riesgo para la salud de aquellas personas, que tienen contacto directo durante el proceso productivo, lo mismo que para la población circundante que tiene contacto, a través de los gases que salen al medio ambiente y por los residuos que contaminan las aguas del río; otros problemas asociados a la presencia de las curtiembres, son los diferentes vectores que se hallan en la zona, debido principalmente a la inadecuada disposición de residuos con alta carga orgánica, lo cual influye directamente en la calidad de vida de las personas.

Dentro de las problemáticas ambientales identificadas por la comunidad de la localidad de Tunjuelito, en el sector de San Benito, se encuentran principalmente: manejo de residuos sólidos, contaminación sonora, presencia de vectores (roedores) y olores ofensivos; dichas problemáticas identificadas por la misma comunidad, además de causar un enorme impacto ambiental en toda la cuenca del río, generan molestias en la población, trayendo como consecuencia: daños en el sistema respiratorio, estrés, malestar general y limitando las condiciones de saneamiento básico en la zona (3).

Con respecto a la calidad del recurso hídrico, es importante decir que en los puntos más bajos de río, el oxígeno disuelto tiene valores prácticamente no detectables, indicando el deterioro que sufre el río, donde las condiciones son teóricamente anaeróbicas. Según el informe de calidad de recurso hídrico de Bogotá 2009-2010, de la Universidad de los Andes, concluye que el río Tunjuelo tiene una calidad de agua buena en la parte alta de la cuenca, sin embargo de este punto hasta la parte baja de la cuenca, la calidad se considera como pobre (4).

Ilustración 1. Indicador de calidad del agua, Río Tunjuelo.



Valores Entre 95 y 100: Excelente; 80 y 94: Buena; 65 y 79: Aceptable; 45 y 64: Marginal; 0 y 44: Pobre

Fuente: Observatorio Ambiental de Bogotá.

Uno de los compuestos más dañinos generados por las curtiembres, es el cromo, especialmente cuando se genera hexavalente, este compuesto que proviene de los baños de curtición y recurtido, cuando se mezcla con aguas residuales que contengan proteínas (aguas residuales domésticas), se da lugar a una reacción rápida que forma precipitados cromo-proteína, que aumentan la generación de lodos; los materiales que se forman son altamente resistentes a la degradación de las bacterias, obstruyendo el proceso de tratamiento biológico. Algunos hidróxidos de cromo que precipitan, persisten en el ambiente e interrumpen las cadenas alimenticias de los peces y posiblemente inhiben la fotosíntesis (5).

Para magnificar el impacto generado por las curtiembres, el Centro Nacional de Producción Más Limpia concluyo en su informe: “Proyecto Gestión Ambiental en la Industria de Curtiembre en Colombia”, que por cada 200 Kg de cuero acabado, se generan 40 Kg de solventes emitidos a la atmósfera, 640 Kg de residuos sólidos y 138 kg de agua residual; el volumen de agua que se consume en todo el proceso y que es eliminado en las descargas, es de 15 a 40 m³ por tonelada de piel fresca. Estas cantidades en la mayoría de los casos sobrepasará la resiliencia del ecosistema, y por lo tanto las perturbaciones sobrepasarán la capacidad del mismo para recuperarse, generando grandes impactos ambientales en el componente hídrico, que se traducirán en cadena a los demás componentes medio ambientales, sociales y económicos (5).

El impacto ambiental que causan las curtiembres, no solo es reconocido por los habitantes del sector de San Benito, sino en toda la ciudad de Bogotá, teniendo en cuenta que en dicho sector, el 50% de las casas de la zona de curtiembres tienen doble propósito: residencial y con actividad económica, el 7,8% de estas empresas, están ubicadas en la zona de ronda de la quebrada Chiguaza y del río Tunjuelo (6), relacionado con el interés de verter clandestinamente los residuos líquidos y sólidos al río. Como resultado se obtiene, que actualmente los vertimientos de las curtiembres de San Benito, se mezclen con aguas domésticas generadas por las unidades residenciales de la zona.

Teniendo en cuenta la problemática económica y socio-ambiental, que causa la industria de curtiembres en el sector de San Benito, se concluye que las medidas técnicas y ambientales deben ser económicamente viables, y deben ejecutarse en

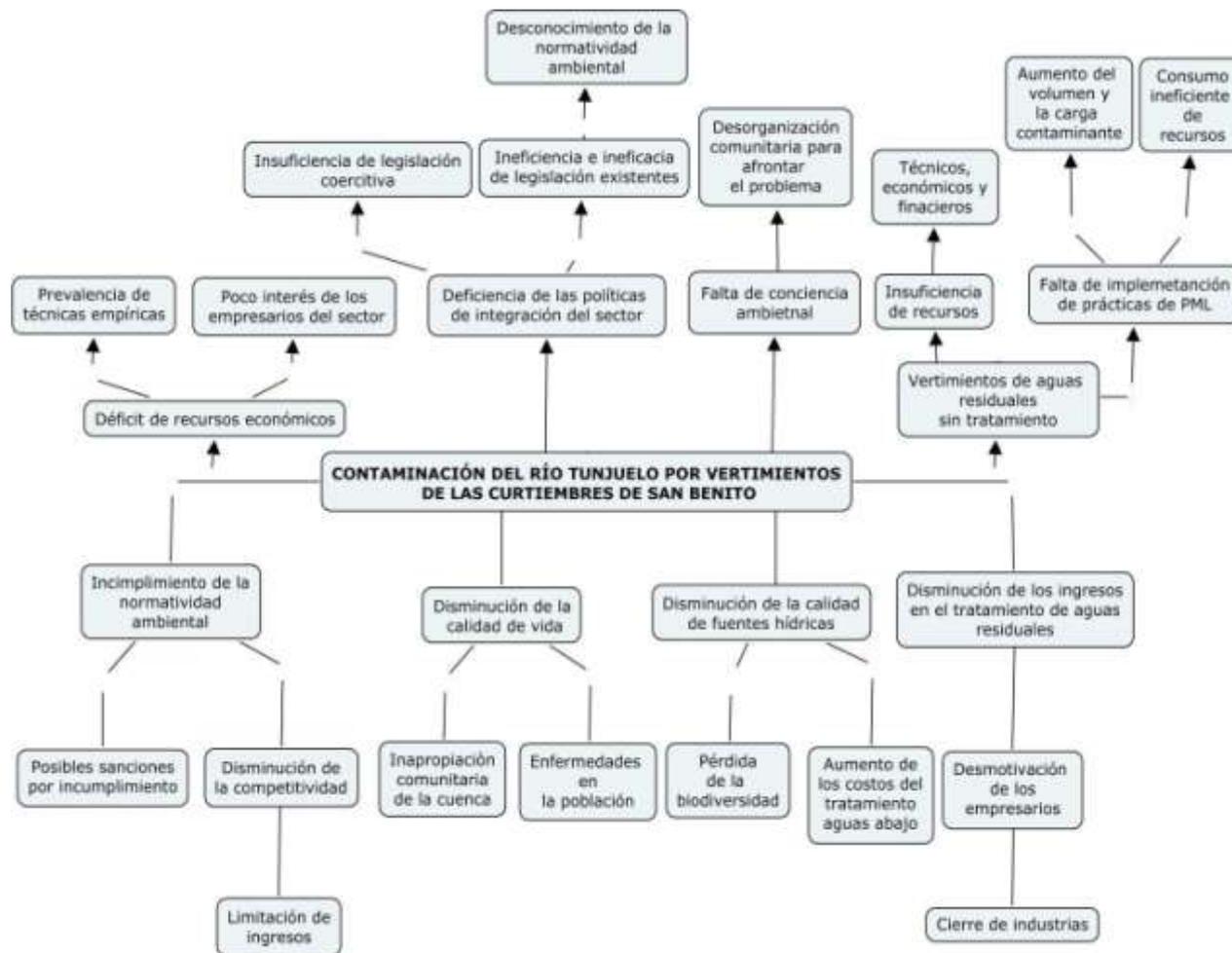
el menor tiempo posible, con el fin de mitigar el impacto ambiental causado por más de 60 años de las curtiembres del sector.

La Ilustración 2 muestra el árbol de problemas, desde el que se abordó la problemática, teniendo en cuenta que el proyecto de investigación, contempla la solución técnica, sin embargo es importante que se aborde desde diferentes soluciones transversales desde los enfoques: político, económico, social y técnico.

La Ilustración 3 muestra el árbol de medios y fines, con las posibles soluciones al problema, desde la perspectiva de las causas mencionadas en el árbol de problemas.

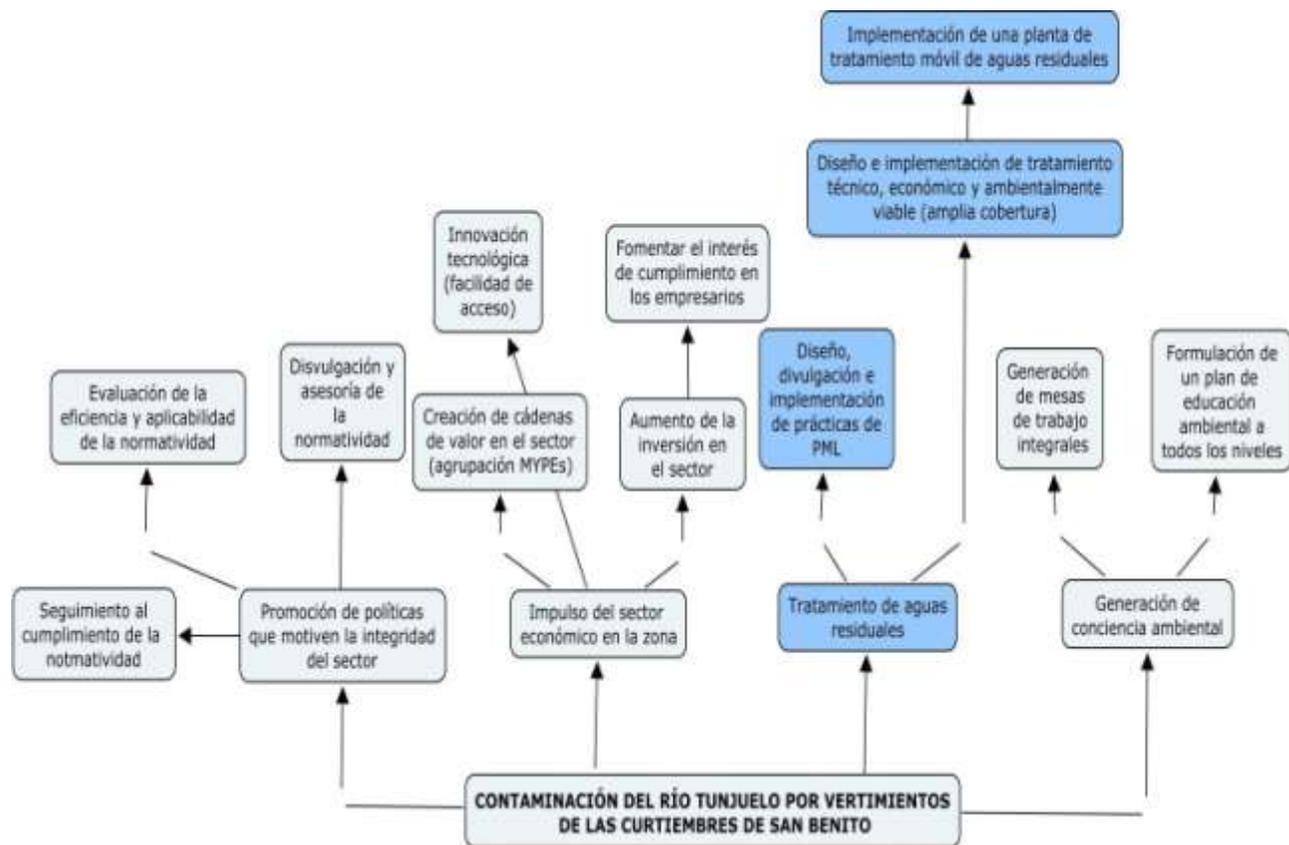
Pregunta problema: ¿Cómo disminuir la contaminación de las aguas residuales producida por las MYPEs del sector curtiembres de San Benito, con una alternativa técnica, ambiental, económicamente viable y de amplia cobertura?

Ilustración 2. Árbol de problemas



Fuente: Autora

Ilustración 3. Árbol de medios y fines



Fuente: Autora

3. JUSTIFICACIÓN

La localidad de Tunjuelito cuenta con 4.165 empresas, siendo la décimo séptima localidad en número de empresas de Bogotá, con el 1,7% del total de la ciudad. El 99% de las empresas de esta localidad son micro y pequeñas (7), según el informe “Inversión pública y calidad de vida en las localidades de Bogotá”, de la Cámara de Comercio de Bogotá (7), las principales brechas en calidad de vida de la localidad están asociadas a la educación, tamaño y la composición del hogar, la disponibilidad de espacio verde y el mejor ingreso disponible de la población entre otras, con relación a este último, tal como se mencionó anteriormente, las microempresas son una fuente representativa de generación de empleo y una gran parte de ellas está representada por la industria de curtiembres, siendo está el 20% de la totalidad de empresas de la localidad, y así mismo, de este porcentaje, el 84% son microempresas, convirtiendo a la localidad de Tunjuelito en el más alto centro de procesamiento y curtiembre de cueros de la ciudad (8). Dado lo anterior, es importante que se integren soluciones accequibles y de amplia cobertura, que permita el fortalecimiento de las MYPEs de curtiembres en San Benito, de manera que no cause un problema social por efectos de desempleo.

La planta de tratamiento móvil de aguas residuales, no sólo daría solución a los problemas asociados a los vertimientos generados sin tratar de las curtiembres, sino también a los relacionados con otros componentes como: el suelo, la resignificación de la cuenca del río Tunjuelo, la calidad de aire que respiran los habitantes de los barrios ubicados en la ribera del río Tunjuelo; ya que si bien, la condición ambiental actual del río, no está relacionada directamente con la emisión de material particulado, si genera emisión de gases de metales volátiles y malos olores que pueden impactar en la salud de un número importante de personas (3).

Teniendo en cuenta, que el diagnóstico publicado por el Consejo de Estado en el año 2012, sobre la recuperación río Bogotá, reconoce la afectación de las curtiembres de San Benito y los vertimientos de la cuenca media del río, este informe incluye dentro de las soluciones integrales para la descontaminación del río, la construcción de la PTAR Canoas, dirigida a reducir la carga contaminante de los vertimientos de parte de la cuenca del Río Tunjuelo y el Río Fucha. La reducción de la carga contaminante de los vertimientos de las curtiembres de San Benito, no sólo disminuirá las concentraciones a remover en la planta Canoas,

sino que permitirá que el Río Tunjuelo recupere parte de su caudal ecológico y disminuya los costos de operación en la misma.

Los vertimientos generados por las curtiembres, que se descargan al alcantarillado, generan incrustamiento, taponamiento de la tubería y deterioro de materiales como el concreto, estos problemas se reducirían significativamente, así mismo, parámetros como la DQO, DBO y sólidos suspendidos, disminuirían, aumentando el contenido de oxígeno disuelto en el agua, promoviendo la recuperación de la vida acuática y previniendo procesos de eutrofización.

Por las razones anteriores, surge la iniciativa de diseñar una planta de tratamiento para aguas residuales que sea técnica, ambiental, económicamente viable y de amplia cobertura, que permita su movilización, es decir que no sea estática y específica para una empresa en particular sino que el servicio sea asequible para la gran mayoría de estas MYPES, permitiendo así el acceso a este tipo de servicio, cuando se requiera e independiente del lugar de generación, haciendo de la connotación móvil, un concepto de innovación y flexibilidad en cuanto a cobertura, acceso y facilidad económica, en tanto que se financie por la mayoría de MYPES, haciendo que los costos de operación y mantenimiento sean distribuidos equitativamente entre las MYPES que adquieran el servicio.

Otro de los objetivos de la planta de tratamiento móvil, es que cuente con tecnologías de tratamiento avanzadas, que permita recuperar en gran medida los recursos y así mismo reintroducirlos al ciclo productivo, es así como el proyecto abarca ejes como: reusó de agua, aprovechamiento de lodos y uso de energía solar entre otros, estas opciones no sólo reducirían el impacto de las curtiembres como proceso productivo, sino a su vez repercutiría en todo el ciclo de vida del producto.

El presente proyecto de investigación buscó la implementación de tecnologías emergentes en tratamiento de aguas residuales, que permitan implementar prácticas de producción más limpias en la industria de las curtiembres. Por esta razón dentro de la revisión bibliográfica realizada, se revisaron las tecnologías acordes con estos principios, evaluando su competitividad económica, tecnológica, ambiental, entre otros.

Finalmente, el tratamiento seleccionado para manejar las aguas residuales de curtiembres, fue el tratamiento electrolítico, mejor conocido como electrocoagulación. Este surge como una de las mejores alternativas para el

tratamiento de efluentes de tipo industrial debido a: su versatilidad, áreas de operación pequeñas, y además no es necesario el uso de aditivos químicos para lograr la separación, ya que la energía eléctrica constituye el único reactivo utilizado.

El proceso de electrocoagulación, puede ser definido como la desestabilización de especies químicas suspendidas o disueltas presentes en una solución, producto de la aplicación de una diferencia de potencial eléctrico a través de un sistema cátodo-ánodo inmerso en la solución de agua a tratar (9).

La investigación y estudio detallado de la electrocoagulación, han aportado un acervo de información que permite establecer la gran cantidad de ventajas al decidirse por su aplicación, las cuales pueden resumirse en aspectos tan representativos como la purificación y el reciclaje del agua, junto a la posibilidad de ahorro de la misma, en sitios con poca disponibilidad. Además, la disminución de la contaminación en los arroyos, ríos y mares, lugares en donde los contaminantes se presentan en altos niveles. Por otra parte la supresión del almacenaje y el mismo uso de productos químicos (10).

Respecto a los beneficios en la descontaminación del agua, la electrocoagulación logra remover los contaminantes en el agua hasta en un 99%, respecto a la remoción de aceites en aguas residuales de operaciones de limpieza, refinerías y procesamiento de alimentos es generalmente entre 95 y 99%; referente a metales pesados como arsénico, cadmio, plomo, cromo, níquel y zinc son generalmente reducidos entre 95 y 99% y finalmente la remoción de bacterias y virus en la potabilización de aguas municipales es de 99.9% (11).

Es importante mencionar, que de llegarse a implementar la electrocoagulación como alternativa de tratamiento de aguas residuales de curtiembres en San Benito, las industrias podrían beneficiarse con incentivos tributarios como la exención del IVA, teniendo en cuenta que la resolución 481 del 2002, establece que las empresas que inviertan en tecnologías ambientales que reduzcan y prevengan la contaminación, podrán acceder a dichos beneficios¹.

La finalidad primordial del presente trabajo de investigación, ha consistido en diseñar un prototipo experimental para el tratamiento de aguas residuales de

¹ Estos beneficios dependen de la fuente de financiación del proyecto teniendo en cuenta que los recursos pueden ser financiados por el sector público.

curtiembres, que permita reducir el consumo de agua con su reutilización en los procesos.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una celda de electrocoagulación prototipo, que a pequeña escala pueda ser técnica, ambiental y económicamente viable, para el tratamiento de aguas residuales, generadas por las MYPEs del sector curtiembres en San Benito.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las aguas residuales de las curtiembres, ubicadas en el sector de San Benito en Bogotá.
- Realizar los ensayos de electrocoagulación con las aguas residuales de la industria curtiembres del sector de San Benito.
- Analizar la eficiencia de remoción de los ensayos de electrocoagulación realizados.
- Establecer los parámetros de diseño óptimos para el prototipo experimental, de acuerdo con las siguientes variables: pretratamiento, material y configuración de los electrodos, intensidad de corriente, tensión y tiempo, entre otras.

5. MARCO REFERENCIAL (CONCEPTUAL, LEGAL, HISTÓRICO, TEÓRICO, ESTADO ACTUAL, CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO)

5.1 MARCO CONCEPTUAL

ACUARIO: Asociación de Curtiembres Amigos del Río Bogotá, se refiere a la asociación conformada por los industriales de las curtiembres de San Benito.

Agua residual: Desechos líquidos provenientes de las actividades industriales (12).

Biorreactores: Recipiente en el cual se lleva a cabo una reacción catalizada por enzimas o células, libres o inmovilizadas, junto con los mezcladores, equipos de toma de muestra y aparatos de control) (13).

Buffer: Es la mezcla en concentraciones relativamente elevadas de un ácido débil y su base conjugada, es decir, sales hidrolíticamente activas. Tienen la propiedad de mantener estable el pH de una disolución frente a la adición de cantidades relativamente pequeñas de ácidos o bases fuertes (14).

Carga contaminante: Es el producto de la concentración másica promedio de una sustancia por el caudal volumétrico promedio del líquido que la contiene determinado en el mismo sitio; en un vertimiento se expresa en kilogramos por día (kg/d) (15).

Caudal: Es la cantidad de fluido que avanza en una unidad de tiempo.

Concentraciones máximas: Es el valor máximo de la relación existente entre la masa de un elemento, compuesto o sustancia y el volumen del líquido que lo contiene.

Cuenca: Es una unidad territorial donde se desarrolla un sistema de captación y concentración de aguas superficiales en el que interactúan recursos naturales y asentamientos humanos dentro de un complejo de relaciones, donde los recursos hídricos aparecen como factor determinante (16).

Curtición: Es el proceso de convertir la piel putrescible en cuero imputrescible.

Curtiembres: Lugar en el que se realiza el proceso de curtido del cuero.

Ciclo de vida: El ciclo de vida es un concepto que permite medir el impacto ambiental de un producto desde que sus materias primas son extraídas de la naturaleza hasta que regresa a ella como un desecho (17).

Electroforética: Técnica para separar moléculas iónicas mediante la migración diferencial en un soporte sólido de acuerdo con el tamaño y la carga iónica de las moléculas en el campo eléctrico. Las moléculas separadas se localizan mediante su teñido o revelado (18).

Fotocatálisis: Es una reacción catalítica que involucra la absorción de luz por parte de un catalizador o sustrato, en este caso dicha reacción se produce con el fin de descontaminar las aguas residuales.

Flóculos: Grumo de materia orgánica formado por agregación de sólidos en suspensión (14).

Impacto ambiental: Es la modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza.

Micro y pequeñas empresas (MYPEs): Es unidad económica, natural o jurídica, que tiene como objeto desarrollar actividades de extracción, transformación, producción, comercialización de bienes o prestación de servicios, cuenta entre 1 y 50 trabajadores, con activos totales menores a 5.001 salarios mínimos legales mensuales vigentes (19).

Oxígeno disuelto: Se refiere a la cantidad de oxígeno disuelta en el agua, y a su vez se convierte en un indicador de contaminación de la misma (20).

Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR): Son unidades de transformación de los efluentes industriales y domésticos.

Parámetros Inorgánicos de aguas residuales

Tensoactivos (SAAM): La concentración de tensoactivos evidencia la presencia de compuestos relacionados con detergentes, que además de ser sustancias usadas para limpieza, son compuestos de materiales orgánicos superficialmente activos en soluciones acuosas, además, alteran la tensión superficial del agua y permiten la formación de burbujas estables de aire (21).

Grasas y Aceites (GyA): Las grasas y aceites se definen como la materia orgánica total extraíble con un solvente orgánico. Por su parte, los hidrocarburos del petróleo se definen como las grasas y aceites, menos la concentración de compuestos polares que son retenidos por la sílica gel, tales como ácidos grasos de origen vegetal y animal, ceras de bajo peso molecular, ésteres y otros compuestos químicos que podrían aportar significativamente a la banda de estiramiento de C-H, dentro y fuera del plano, a aproximadamente 2903 cm⁻¹ en el espectro Infrarrojo (21).

Cromo: Como constituyentes importantes del agua residual industrial se encuentran un número importante de metales pesados aunque su cuantificación sea a niveles de traza. Cualquier catión que tenga un peso atómico superior a 23 (peso atómico del cromo 51.9961) se considera un metal pesado; así, las aguas residuales contienen gran número de metales pesados diferentes. Entre ellos se puede destacar el cromo que se encuentra catalogado como sustancia contaminante que debe tenerse obligatoriamente en consideración para fijar valores límites de vertimiento, cuando se mezcla con aguas residuales que contengan proteínas (aguas residuales domésticas), se da lugar a una reacción rápida que forma precipitados cromo-proteína, que aumentan la generación de lodos; los materiales que se forman son altamente resistentes al rompimiento biológico de las bacterias, obstruyendo el proceso de tratamiento. Algunos hidróxidos de cromo que precipitan persisten en el ambiente e interrumpen las cadenas alimenticias de los peces y posiblemente inhiben la fotosíntesis (21).

Sulfuros: Los compuestos azufrados son contaminantes muy comunes en los efluentes industriales, predominando los sulfatos en las descargas de las industrias minera, alimenticia, de fermentación y del papel. Bajo condiciones reductoras, las corrientes ricas en sulfatos pueden derivar en sulfuros, que son compuestos tóxicos, corrosivos y que generan mal olor. La determinación incluye todo el sulfuro presente como ácido sulfhídrico, sulfuro ácido y los sulfuros metálicos solubles (21).

Parámetros Fisicoquímicos del agua residual

Potencial de Hidrógeno (pH): El pH es un factor importante en las propiedades químicas y biológicas de las aguas naturales. El grado de disociación de ácidos y bases débiles es afectado por cambios en el pH. Este efecto es muy importante

debido a que la toxicidad de muchos compuestos es afectada por el grado de disociación (rompimiento de una molécula por absorción de calor). La solubilidad de ciertos metales tóxicos, presentes en el material suspendido y en sedimentos, es afectada por el pH (21).

Potencial Redox: Es una medida de la actividad de los electrones. Está relacionado con el pH y con el contenido de oxígeno. Es análogo al pH ya que el pH mide la actividad de protones y el potencial redox mide la de los electrones.

El potencial redox se calcula como: $Eh = 1,234 - 0,058 \text{ pH} + 0,0145 \log (10) P_o$, siendo P_o la presión parcial de oxígeno expresada en atmósferas (22) (23).

Sólidos sedimentables (SS): Son partículas de diámetro grueso generalmente superior o igual a 10 micras que se sedimentarán, en condiciones tranquilas, por acción de la gravedad. La determinación se hace llenando un cono Imhoff de un litro de volumen y registrando el volumen de material sedimentado en el cono, al cabo de una hora.

La determinación de sólidos sedimentables es básica para establecer la necesidad del diseño de tanques de sedimentación como unidades de tratamiento y para controlar su eficiencia (21).

Sólidos Suspendidos Totales (SST): Los sólidos suspendidos totales es un parámetro asociado con pequeñas cantidades de materia orgánica y material suspendido. El principal interés de este parámetro, asociado con la turbidez del agua natural, se relaciona con la destinación del recurso para el consumo público y con las condiciones de vida de la fauna acuática. Una alta concentración de sólidos producirá disturbios en el crecimiento de los huevos de los peces, modifica su movimiento natural, su migración y reduce la abundancia de alimentos (21).

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5): Se definen como el oxígeno en masa que se requiere para degradar materia orgánica, tanto por la vía biológica como por la química, en cierto tiempo determinado, ya sean en minutos, horas, días o años (20). La prueba mide la cantidad de oxígeno disuelto antes de colocar una alícuota de muestra en una solución de nutrientes durante 5 días en una incubadora, para determinar el oxígeno disuelto después de los cinco días, la diferencia entre los dos valores determinan la cantidad de oxígeno no consumido y se relaciona con la DBO (21).

Demanda Química de Oxígeno (DQO): Es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida. La DQO permite medir la materia orgánica oxidable por el dicromato de potasio en una solución fuertemente ácida por reflujo durante 2 horas. La cantidad de dicromato remanente se determina por titulación con FAS con ferroína como indicador, para eliminar las interferencias de los cloruros se le agrega sulfato mercurico (21).

Pasivación: Es la formación de una película relativamente inerte sobre la superficie de un material (frecuentemente un metal), que lo enmascara en contra de la acción de agentes externos. Aunque la reacción entre el metal y el agente externo sea termodinámicamente factible a nivel macroscópico, la capa o película pasivante no permite que estos puedan interactuar, de tal manera que la reacción química o electroquímica se ve reducida o completamente impedida (14).

Producción más limpia: Es la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva e integrada, aplicada a procesos, productos y servicios, con el fin de reducir los riesgos a la población y al medio ambiente, tomando como principio reducir al mínimo o eliminar los residuos y emisiones en la fuente y no tratarlos después de que se hayan generado (24).

Resiliencia: Capacidad del ecosistema para soportar perturbaciones.

Sólidos suspendidos: Es la cantidad de material sólido que es retenido después de realizar la filtración de un volumen de agua, es importante como indicador, puesto que su presencia disminuye el paso de la luz a través del agua, evitando su actividad fotosintética en las corrientes, importante para la producción de oxígeno.

TECUR: Técnicas para el curtido del cuero, se refiere a la empresa que facilitó las instalaciones durante la caracterización del agua residual para realizar los análisis de las mismas.

Tratamiento biológico: Es el tratamiento de aguas residuales, que elimina por medio de principios biológicos y microbiológicos contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua residual.

Tratamiento químico: Es el tratamiento de aguas residuales que elimina por medio de principios químicos contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua residual.

Vertimientos: Cualquier descarga líquida hecha a un cuerpo de agua o alcantarillado.

Volátil: Sustancia que se transforma fácilmente en vapor o en gas cuando está expuesta al aire.

5.2 MARCO LEGAL

Tabla 1. Marco legal aplicable a las curtiembres de San Benito en el componente agua.

Norma	Principio	Entidad	Jurisdicción
Constitución política de 1991	<p>Art. 79: consagra que todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano y que es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica.</p> <p>Art. 80: determina que el Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además deberá prevenir, y controlar los factores de deterioro ambiental e imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.</p>	Congreso de la República	Colombia
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.	Congreso de la República	Colombia
Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.	Congreso de la República	Colombia

Tabla 1. (Continuación)

Norma	Principio	Entidad	Jurisdicción
Decreto 1594 de 1984	<p>Derogado por el art. 79, Decreto Nacional 3930 de 2010, salvo los arts. 20 y 21.</p> <p>Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.</p>	Ministerio de Agricultura	Colombia
Decreto 3930 de 2010	<p>Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.</p>	Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT)	Colombia
Decreto 3100 de 2003	<p>Mediante el cual el Ministerio del Medio Ambiente establece la regulación de tasas retributivas por la utilización directa o indirecta del agua como cuerpo receptor de residuos contaminante.</p> <p>Derogado algunos artículos por el Decreto Nacional 3440 de 2004.</p>	Congreso de la República	Colombia
Decreto 2570 de 2006	<p>Por el cual se adiciona el Decreto 1600 de 1994 y se dictan otras disposiciones.</p> <p>(Recurso agua) Para laboratorios ambientales que se encuentren inscritos en el proceso de acreditación ante el IDEAM y tengan aprobados y vigentes los resultados de la Prueba de Evaluación de Desempeño realizada por este Instituto.</p>	Congreso de la República	Colombia

Tabla 1. (Continuación)

Norma	Principio	Entidad	Jurisdicción
Resolución 3957 de 2009	Por la cual se establece la norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos realizados a la red de alcantarillado público en el Distrito Capital	Secretaría Distrital de Ambiente (SDA)	Bogotá
Resolución 3956 de 2009	Por la cual se establece la norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos realizados al recurso hídrico en el Distrito Capital	Secretaría Distrital de Ambiente (SDA)	Bogotá
Resolución 3180 de 2008	Por el cual se adopta el formulario de registro de vertimientos en el Distrito Capital	Secretaría Distrital de Ambiente (SDA)	Bogotá
Resolución 1433 de 2004	Por la cual se reglamenta el artículo 12 del Decreto 3100 de 2003, sobre Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV, y se adoptan otras determinaciones.	Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT)	Colombia
Acuerdo 08 de 2004	Por el cual se define la norma de vertimientos de la industria de curtido de pieles, y se adoptan otras determinaciones	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR)	Cundinamarca
Acuerdo 332 de 2008	Por medio del cual se establece la obligación de efectuar autodeclaraciones de vertimientos líquidos de interés ambiental o de interés sanitario, a los usuarios del recurso hídrico servicio público domiciliario de alcantarillado dentro del territorio de Bogotá D. C.	Secretaría Distrital de Ambiente (SDA)	Bogotá
Acuerdo 003 de 2012	Por medio del cual se aprueba el monto de la tarifa de la tasa por utilización de aguas en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR, para la vigencia 2011.	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR)	Cundinamarca

Tabla 1. (Continuación)

Norma	Principio	Entidad	Jurisdicción
Resolución 2650 de 2006	Por la cual se implementa la tarifa mínima de la tasa retributiva por vertimientos puntuales en la jurisdicción del DAMA	Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA)	Bogotá
Política Nacional de Producción Más Limpia 1997	Hace referencia al conjunto de estrategias ambientales integradas y preventivas a los procesos y productos con el objeto de prevenir riesgos para la salud humana y el ambiente.	Ministerio del Medio Ambiente	Colombia
Fuente: Autora			

5.3 MARCO HISTÓRICO

Partiendo de la concepción, de que la cuenca es una unidad de planeación básica de cualquier territorio, decimos que antes de la colonización ya nuestros indígenas tomaban como referente la cuenca para planificar su territorio, y no es ajeno el caso al poblamiento de la localidad de Tunjuelito, y la estrecha relación con la cuenca del río Tunjuelo. Debido a la necesidad de las personas de solucionar problemas sociales, propios de la época como la vivienda –desde los múltiples desplazamientos territoriales que causaron los colonizadores-, situación que los ubica en los límites de la ciudad –de occidente a oriente, en la zona periférica, pues las zonas central y norte se transformaban, hacia la constitución de una ciudad desarrollada y eran habitadas por aquellos, que pertenecían a un estrato social alto, acorde con los procesos de industrialización que en ese momento enfrentaba el país, poco a poco el sur de Bogotá se fue poblando, de una manera poco organizada y careciendo de una planificación acertada al uso del suelo, generando así explotación masiva de los recursos naturales de dichos territorios, y así mismo crecimiento del perímetro urbano.

Los españoles no colonizaron Tunjuelito, debido a la poca población que encontraron y que probablemente estaba relacionado, con la imposibilidad de

explotar agrícolamente el suelo arcilloso. El proceso inicial de poblamiento de la cuenca, se da a partir de la parcelación de las haciendas heredadas de la colonia, y su posterior loteado para la venta, que fue configurando los barrios de Tunjuelito, San Carlos, y San Benito; el sector conocido como San Benito comenzó a ser habitado, por agricultores que cultivaban legumbres y algunas frutas, y el cual formo parte de la hacienda que comenzó a parcelarse a finales de la década del cuarenta (6), en un comienzo dichas hortalizas se comercializaban en la plaza España, y es en los años cincuenta cuando empiezan a llegar los primeros curtidores, siendo este un oficio netamente artesanal y empírico, donde la cercanía al río Tunjuelo fue un factor determinante, que atrajo a los primeros curtidores; uno de los principales problemas era la carencia de agua, por lo que está debía extraerse directamente del río, sobre los años sesenta inician las primeras zonas con redes de agua potable y servicio de alcantarillado; los anteriores limitantes han impedido desde el inicio del poblamiento de la cuenca, hasta la fecha que los habitantes reconozcan el papel fundamental de la misma, y no haya la apropiación necesaria de la comunidad para que se recupere. La intensificación de la actividad industrial de las curtiembres, ha ocasionado que esta zona se vea desprovista de protección ambiental, y por el contrario haya contribuido notablemente a la pérdida de calidad hídrica del río, se da en la realidad una continuidad de las prácticas artesanales, que no avanzan ni tecnológica, ni ambientalmente al ritmo de la industrialización en Bogotá.

Teniendo en cuenta que el río Tunjuelo, es a gran escala una de las más importantes cuencas de desarrollo de la ciudad, y debido a los otros usos del mismo (abastecimiento, almacenamiento, receptor), a comienzos del siglo XX (como respuesta a los problemas de contaminación), se inicia la construcción del interceptor Tunjuelo medio, buscando amortiguar los vertimientos en la parte media del río (4). De acuerdo a lo anterior desde la época mencionada, los diferentes gobiernos distritales han enfatizado en la solución adecuada, por la problemática generada en el río Tunjuelo, es así como en el actual plan de desarrollo distrital (2012 – 2016), se incluye como proyecto la recuperación ecológica y paisajística de 57 Km de ronda de la cuenca del Río Tunjuelo (25); esto se materializa en el Plan de Desarrollo Local de la Alcaldía de Tunjuelito, en el que se menciona la resignificación de la cuenca como unidad de planeación y se mencionan campos de acción como: conservación, control y recuperación de la cuenca y procesos educativos entre otros (26). En este mismo contexto, actualmente se están realizando mesas de trabajo con los industriales del sector de San Benito, en el marco del proyecto: Proyecto Sistema Centralizado de Tratamiento de Aguas y Residuos en San Benito (SCTAR-SB), dando como

propuesta la implementación de una planta de tratamiento, para todo el sector de curtiembres en San Benito con la creación de una empresa de servicios públicos (ESP). Actualmente la SDA, la alcaldía de Tunjuelito y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), tiene como compromiso de la última mesa de trabajo evaluar la alternativa jurídica para la creación de dicha ESP, que cobre una tasa retributiva a los industriales y por otro lado, definir los parámetros de salida del vertimiento. Por su parte los industriales deben presentar una propuesta tecnológica para la implementación de la PTAR y así mismo conformar un grupo experto en el tema para que los asesore (27).

5.4 MARCO TEÓRICO

Las aguas residuales, son aquellas aguas provenientes de actividades humanas, que al cumplir un uso específico se convierten en desechos líquidos y son vertidas a la red de alcantarillado o directamente a cuerpos de agua, estas aguas están contaminadas con sólidos, materia orgánica e inorgánica, nutrientes y microorganismos (contaminantes físicos, químicos y biológicos).

La Tabla 2 muestra los diferentes tipos de agua residual, su definición y posibles características.

Tabla 2. Tipos de agua residual

Tipo de agua	Definición	Características
Agua residual doméstica	Producida en las diferentes actividades al interior de las viviendas, colegios, etc.	Los contaminantes están presentes en moderadas concentraciones
Agua residual municipal	Son las transportadas por el alcantarillado de una ciudad o población	Contiene materia orgánica, nutrientes, patógenos, etc.
Agua residual industrial	Las resultantes de las descargas de industrias	Su contenido depende del tipo de industria y/o procesos industriales
Agua negra	Contiene orina y heces	Alto contenido de nutrientes, patógenos, hormonas y residuos farmacéuticos
Agua amarilla	Es la orina transportada con o sin agua	Alto contenido de nutrientes, productos farmacéuticos, hormonas y alta concentración de sales
Agua café	Agua con pequeña cantidad de heces y orina	Alto contenido de nutrientes, patógenos, hormonas y residuos farmacéuticos
Agua gris	Provenientes de lavamanos, duchas	Tiene pocos nutrientes y agentes patógenos y por el contrario presentan máxima carga de productos para el cuidado personal y detergentes.
Fuente: Metcalf & Eddy		

La composición de las aguas residuales industriales dependerá del proceso y/o servicio ofrecido, ya que el uso de materias primas e insumos va de acuerdo a la actividad productiva. Por ejemplo la industria del curtido de pieles utiliza sales básicas, ácidos, metales pesados y materia orgánica.

De acuerdo a lo anterior, la elección de los sistemas de tratamiento dependerá de la concentración de los contaminantes, las necesidades de eficiencia de tratamiento (según los parámetros máximos permisibles de la normatividad ambiental) y el caudal.

5.4.1 Características aguas residuales de curtiembres

Aproximadamente 30 a 35 m³ de agua residual se produce por tonelada de cuero crudo, sin embargo, la producción de aguas residuales varía en una amplia gama (10-100 m³ por tonelada de piel) en función de la materia prima, el producto acabado y los procesos de producción, así mismo se calcula que la piel cruda tiene una pérdida del 30% de la materia orgánica durante el proceso productivo (28).

La tabla 3 resume la composición media de los procesos de efluentes de curtiembres.

Tabla 3. Composición media de los efluentes de curtiembres².

pH	DQO	DBO	SST	ST	SS	SDT	Sulfuros	NH ₄ -N	Cromo
8.4	4947	–	2239	–	–	–	–	95	–
10.5	3114	1126	–	18.884	1147	17.737	55	33	83
7.79	2155		–		915		35.8	168	50.9
7.5-9	5000–	1500–	–	–	–	–	–	–	100
	10	2000							
8	1803	106	526			9435		70	
-	8000	930			2004	15.152	228		11.2
7.4	2227	1800	578					137	
8.2-8.5	5650	–	–	19.775	5025	14.75	–	–	–
10.72	11.153	2906	–	–	–	6810	507	162	32.87
7.7	2200				5003	36.8	–	–	–
7.7	2426	–	–	–	–	–	286	335	29.3
6.6	6855	2700	2865					70.5	140
7.08	–	–	–	10.265	2820	–	–	128	90-100
7.2	2810	910	1520	–	–	–	89	130	62
8.3	3100		1195	–	–	–	–	54	–
7.08-8.7	4100–	630–			600–	13,300–	–	–	11.5-
	6700	975			955	19.7			
7.2	2102		576	–	–	–	–	118	–
7.9-9.2	2533	977	1244	–	–	21.62	860	118	258
Fuente: Modificado Giusy Lofrano									

El numeral 6.4.8 presenta las características del agua residual por etapa de proceso, identificando los procesos que aportan mayor carga contaminante a las aguas residuales.

La tabla 4 muestra los efectos sobre el medio ambiente, según el parámetro contaminante de la tabla 3, los cuales son contenidos en la mayoría de aguas residuales de curtiembre.

²La conductividad se expresa como $\mu\text{mho/cm}$ todos los demás parámetros como mg/L.

Tabla 4. Efectos sobre el medio ambiente de las aguas residuales de curtiembre

Parámetro	Efectos en las aguas residuales
pH	<p>Las aguas con valores de pH menores de 7 son aguas ácidas y favorecen la corrosión de las piezas metálicas y concreto, en contacto con ellas, y las que poseen valores mayores de 7 se denominan básicas y pueden producir precipitación de sales insolubles (incrustaciones).</p> <p>La solubilidad de muchos micronutrientes importantes para la producción primaria (fitoplancton) depende del grado de acidez o alcalinidad del agua. Así, el pH alto influye en la disponibilidad de fósforo ya que en medio alcalino, este nutriente es absorbido por el calcio presente en el cuerpo de agua, mientras que al bajar el pH (medio ácido), el fósforo se junta con el hierro y aluminio. Por otro lado, en un pH de 6,5 el fósforo se encuentra en solución, libre y disponible para ser fijado por las microalgas y otras plantas acuáticas. A este pH, también son solubles otros minerales como el hierro, cobre, manganeso y zinc.</p> <p>El pH posee una estrecha interdependencia entre las comunidades vegetales, animales y el medio acuático. Este fenómeno ocurre a medida en que las comunidades acuáticas interfieren en el pH, así como el pH interfiere de diferentes maneras en el metabolismo de estas comunidades.</p> <p>Con respecto a las comunidades, actúa directamente en los procesos de permeabilidad de la membrana celular de los organismos integrantes, interfiriendo en el transporte iónico intra y extracelular, así como también entre organismos en el medio. (Ambiente, 1996).</p> <p>Cuando el pH se encuentra por debajo de 4.5, se ocasiona muerte de microorganismos y cuando se encuentra por encima de 9 inhibe el crecimiento de los mismos.</p>

Tabla 4. (Continuación)

Parámetro	Efectos en las aguas residuales
DQO	<p>La demanda química de oxígeno (DQO) es la medida de oxígeno equivalente a la materia orgánica que es susceptible a ser biodegradada, en condiciones específicas de temperatura y tiempo (Ambiente, 1996).</p> <p>El incremento de la DQO incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua con la consecuente afectación a los ecosistemas acuáticos, por otro lado la DQO indica presencia de sustancias provenientes de descargas no domésticas.</p>
DBO	<p>La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) corresponde a la cantidad de oxígeno consumido para la degradación bioquímica de la materia orgánica contenida en la muestra, durante un intervalo de tiempo específico y a una temperatura determinada, representa la cantidad total de materia orgánica.</p> <p>Cuando esta es baja, se generaría una alta concentración de materia orgánica en el cuerpo de agua, agotando así el oxígeno disuelto del mismo.</p> <p>El aumento de la DBO favorece el desarrollo de condiciones sépticas.</p>
Sólidos (SST, ST, SS, SDT).	<p>Los sólidos suspendidos totales (SST) tienen su origen en las aguas residuales y la erosión del suelo. El incremento de los niveles de SST hace que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática.</p> <p>Dentro de los efectos de los sólidos suspendidos (SS), se encuentran el impedimento del brote de semillas en suelos de cultivo, actividad fotosintética, reducción en la tasa de infiltración y/o brotes de plantas jóvenes debido a una corteza superficial del suelo depositada por los sólidos suspendidos.</p> <p>Los efectos, sin embargo, no están restringidos sólo a efectos biológicos, el exceso de sólidos suspendidos pueda también producir obstrucción de componentes mecánicos de sistemas de riego, obstrucción de redes de alcantarillado, entre otros.</p> <p>En general el aumento de sólidos en el agua favorece, depósito de lodos, adsorción de contaminantes y protección de patógenos dentro del cuerpo de agua.</p>
Cloruros	<p>Los cloruros en las aguas residuales producen efectos nocivos en microorganismos en concentraciones > 2 000 mg/l.</p> <p>Por otro lado los cloruros afectan cultivos.</p>

Tabla 4. (Continuación)

Parámetro	Efectos en las aguas residuales
Grasas y aceites	<p>La presencia de grasas y aceites dificulta el intercambio de oxígeno entre el agua y la atmósfera.</p> <p>Favorece el taponamiento de tuberías, producen malos olores y facilita ambientes sépticos.</p>
Cromo	<p>Los metales pesados, incluido el cromo generan en los cuerpos de agua toxicidad para seres vivos, inhibición al tratamiento biológico de las aguas, contaminación del agua subterránea y se les atribuyen importantes consecuencias sobre la salud humana por sus propiedades bioacumulativas y persistente.</p>
Sulfuros	<p>Los sulfuros en agua pueden generar gas sulfhídrico, siendo este altamente corrosivo para las vías respiratorias y aumenta el pH del agua.</p> <p>Por otro lado los sulfuros son responsables en gran parte de los casos de los olores ofensivos de las aguas residuales.</p>
Tensoactivos (SAAM)	<p>Para el caso de las curtiembres de San Benito estas sustancias provienen de detergentes usados en actividades domésticas e industriales.</p> <p>Los tensoactivos son tóxicos para los peces y reducen la transferencia de oxígeno entre el agua y la atmósfera.</p>
Nitrógeno	<p>La presencia de nitrógeno en aguas residuales crea o acelera procesos de eutroficación, así mismo favorece el agotamiento de oxígeno.</p> <p>Por otro lado altas concentraciones de oxígeno producen contaminación aguas subterráneas y es tóxico para los peces.</p>
Fuente: Manual de procedimientos analíticos para aguas y efluentes	

5.4.2 Sistemas De Tratamiento De Las Aguas Residuales

Los sistemas de tratamiento de las aguas residuales se clasifican en diferentes métodos: operaciones físicas, procesos químicos y procesos biológicos.

En las operaciones físicas predomina la acción de fuerzas físicas. Ejemplo gravedad y atracción de las partículas sólidas, aquí se encuentran: desbaste, mezclado, floculación, sedimentación, flotación, transferencia de gases y filtración. (29).

En los procesos químicos se eliminan o convierten los contaminantes por la adición de productos químicos o por reacciones químicas. Ejemplo de estos procesos son: precipitación, adsorción y la desinfección (29).

Finalmente, los procesos biológicos eliminan sustancias orgánicas biodegradables en forma coloidal o en disolución gracias a la actividad biológica, la degradación produce gases y tejido celular biológico (29).

En la Tabla 5 se presentan ejemplos de operaciones y procesos por tipo de contaminante.

Tabla 5. Operaciones y procesos unitarios y sistemas de tratamiento utilizados para eliminar la mayoría de los contaminantes presentes en el agua residual

Parámetro o contaminante	Operación unitaria, proceso unitario o sistema de tratamiento
Sólidos en suspensión	<ul style="list-style-type: none"> - Filtración - Flotación - Adición de polímeros y/o ácidos - Coagulación/sedimentación - Sistemas naturales (tratamiento por evacuación al terreno)
pH	<ul style="list-style-type: none"> - Neutralización
Sólidos sedimentables	<ul style="list-style-type: none"> - Desbaste y dilaceración - Desarenado - Sedimentación
Sulfuros y sulfatos	<ul style="list-style-type: none"> - Precipitación - Oxidación química - Degradación biológica
Materia orgánica biodegradable DBO	<ul style="list-style-type: none"> - Variantes de fangos activados - Película fija: filtros percoladores - Película fija: biodiscos (RBC) - Variantes del lagunaje - Filtración intermitente en arena - Sistema físico-químicos - Sistemas naturales

Tabla 5. (Continuación)

Parámetro o contaminante	Operación unitaria, proceso unitario o sistema de tratamiento
Nutrientes: Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> - Variantes de sistemas de cultivo en suspensión con nitrificación y desnitrificación - Variantes de sistemas de película fija con nitrificación y desnitrificación - Arrastre de amoníaco - Intercambio iónico - Cloración al breakpoint - Sistemas naturales
Fosforo	<ul style="list-style-type: none"> - Adición de sales metálicas - Coagulación y sedimentación con cal - Eliminación biológica del fósforo - Eliminación biológica-química del fósforo - Sistemas naturales
Nitrógeno y fósforo	<ul style="list-style-type: none"> - Eliminación biológica de nutrientes
Metales pesados (cromo)	<ul style="list-style-type: none"> - Coagulación/sedimentación - Tratamientos avanzados - Neutralización
Fuente: Metcalf & Eddy	

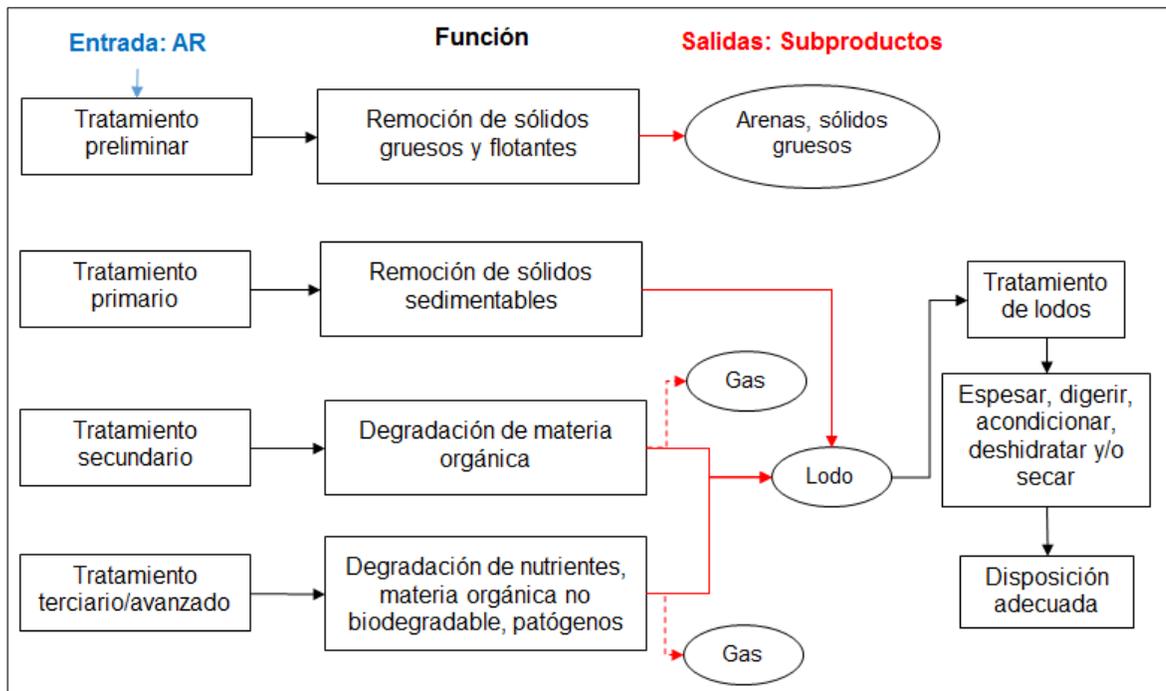
En los niveles de tratamiento de las aguas residuales ocurren procesos físicos, químicos y biológicos. A continuación se describen los niveles de tratamiento:

Tratamiento preliminar. Su propósito es retirar los sólidos gruesos y flotantes que posteriormente pueden provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y demás sistemas auxiliares (29).

Tratamiento primario. Su función es remover material sólido sedimentable y parte de la materia orgánica del agua residual. “El material sólido de cierto tamaño, como hojas o palos, puede ser retirados por medio de rejillas. Los sólidos inorgánicos son removidos en desarenadores y muchos sólidos orgánicos suspendidos se eliminan por medio de sedimentación” (29).

En este nivel se remueve la mitad o más de los sólidos suspendidos, resulta sencillo y se basa en los principios de separación mecánica (rejillas) y separación hidráulica (sedimentación), representa una operación fácil y de bajo costo (29).

Ilustración 4. Principio del tratamiento de agua residual



Fuente: Diseño de una planta para el tratamiento de aguas residuales generadas por el sector de curtiembres en San Benito, Bogotá D.C

Tratamiento secundario. Consiste en la degradación de la materia orgánica a partir de la conversión biológica de los sólidos disueltos y los orgánicos coloidales en forma de biomasa (29), por la acción de microorganismos que metabolizan estos constituyentes para producir energía o tejido celular.

Tratamiento terciario. Cuando el tratamiento primario y secundario no resulta eficiente, se emplea tratamiento terciario para la degradación de nutrientes, materia orgánica no biodegradable (sólidos) y patógenos. La eliminación de sólidos se lleva a cabo mediante filtros; mientras que la remoción de nutrientes, como fósforo o nitrógeno, se puede realizar mediante la combinación de procesos físicos, químicos y biológicos. (30).

Tratamientos avanzados. Las altas concentraciones de contaminantes de baja biodegradabilidad en las aguas residuales de curtiembres representan un reto tecnológico y ambiental grave y real. La contaminación del agua por la industria de curtiembres, es un problema realmente serio, generando como principales agentes perjudiciales (tanto para el medio ambiente como para los humanos), el sulfuro, el cromo (trivalente y hexavalente), y por último el alto contenido de materia orgánica.

Los procesos biológicos han demostrado ser los tratamientos más amigables con el medio ambiente, pero ineficaz para la eliminación de compuestos orgánicos persistentes y micro-contaminantes en aguas residuales de curtiembres; por esta razón las tecnologías emergentes, tales como procesos de oxidación avanzada y procesos de membrana, se han intentado como integrador para el tratamiento biológico de este sentido (28).

A continuación se hace una descripción breve de los principales tratamientos para aguas residuales, incluyendo tecnologías emergentes o tratamientos avanzados para el tratamiento de aguas residuales de curtiembres:

Tabla 6. Principales tratamientos para aguas residuales de curtiembres.

Proceso	Principio
Químicos	
Coagulación	La coagulación consiste en desestabilizar los coloides por neutralización de sus

y floculación	cargas, dando lugar a la formación de un flóculo o precipitado. La coagulación de las partículas coloidales se consigue añadiéndole al agua un producto químico (electrolito) llamado coagulante. La mezcla se agita lentamente para inducir la agrupación de partículas entre sí para formar “flóculos”. El agua se traslada entonces a un depósito tranquilo de sedimentación para sedimentar los sólidos.
Biológicos	
Aérobicos	<p>La oxidación biológica aeróbica es el mecanismo mediante el cual los microorganismos degradan la materia orgánica contaminante del agua residual. De esta forma, estos microorganismos se alimentan de dicha materia orgánica en presencia de oxígeno y nutrientes.</p> <p>Los procesos biológicos generalmente se usan para el tratamiento de efluentes industriales para reducir el contenido orgánico, ya que tienen ventajas económicas sobre la oxidación química, sin embargo alta concentración de</p>

Tabla 6. (Continuación)

Proceso	Principio
Biológicos	
taninos y otros compuestos poco biodegradables, así como metales pueden inhibir tratamiento biológico	
Anaeróbicos	La Digestión Anaerobia es el proceso fermentativo que ocurre en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales. El proceso se caracteriza por la conversión de la materia orgánica a metano y de CO ₂ , en ausencia de oxígeno y con la interacción de diferentes poblaciones bacterianas.
Tecnologías de tratamientos emergentes	
Procesos de membrana	<p>Las membranas para el tratamiento del agua son láminas delgadas de material que permiten separar los contaminantes según sus características como el tamaño o la carga eléctrica. El agua pasa a través de una membrana; pero dependiendo de su tamaño, las partículas de mayor tamaño, los microorganismos y otros contaminantes quedan separados.</p> <p>El uso de tecnologías de membrana aplicados a la industria del cuero representa una ventaja económica, especialmente en la recuperación de cromo de las aguas residuales de curtido del cuero. Varios estudios han demostrado que la microfiltración de flujo cruzado (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF), la ósmosis inversa (RO) y las membranas líquidas soportadas (SLM) se puede aplicar en la industria del cuero para la recuperación de cromo, la reutilización de las aguas residuales y los productos químico, la reducción de la carga contaminante de pelambre y desengrasado.</p>
Bioreactores de membrana	<p>La tecnología de Biorreactor de Membrana (MBR) se puede definir como la combinación de dos procesos; degradación biológica y separación por membrana, en uno único en el que los sólidos en suspensión y microorganismos responsables de la biodegradación son separados del agua tratada mediante una unidad de filtración por membrana. Por lo tanto, se distinguen dos partes principales:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Unidad biológica responsable de la degradación de los compuestos orgánicos - Módulo de filtración encargado de llevar a cabo la separación física del licor mezcla
Procesos de oxidación avanzada	Este tratamiento utiliza agentes oxidantes fuertes (O ₃ , H ₂ O ₂) y / o catalizadores (Fe, Mn, TiO ₂) a veces con el apoyo de la actividad por la radiación de alta energía, por ejemplo, la luz UV. Estos procesos se basan en la producción y la utilización de los radicales hidroxilo, que son oxidantes muy potentes que de forma rápida y no selectiva, oxidar una amplia gama de compuestos orgánicos.

Tabla 6. (Continuación)

Proceso	Principio
Tecnologías de tratamientos emergentes	
Fotólisis UV	La fotólisis es la ruptura de enlaces químicos por causa de energía radiante. Se llama fotólisis o fotolisis, fotodisociación, o fotodescomposición a la disociación de moléculas orgánicas complejas por efecto de la luz, y se define como la interacción de uno o más fotones con una molécula objetivo. Es el proceso en el que se basa la fotosíntesis.
Procesos de ozono	El tratamiento de agua con ozono, destruye los microorganismos rompiendo por oxidación su capa protectora (lípidos). El ozono es 12 veces más soluble en el agua que el oxígeno. Los productos químicos actúan por envenenamiento enzimático de los centros vitales, por lo que el ozono resulta ser miles de veces más rápido que los mencionados agentes químicos.
Fotocatálisis	La fotocatalisis es una reacción catalítica que involucra la absorción de luz por parte de un catalizador o sustrato, acelerando así una fotorreacción. En la catálisis fotogenerada, la actividad fotocatalítica depende de la capacidad del catalizador para crear pares electrón-hueco, que generan radicales libres (por ejemplo, radicales hidroxilo: OH) capaces de sufrir reacciones secundarias y acelerar la oxidación de diferentes compuestos contaminantes en aguas residuales.
Tratamiento electroquímico	<p>Los procesos electroquímicos utilizados en el tratamiento de aguas utilizan electricidad para producir una reacción química destinada a la eliminación o destrucción del contaminante presente en el agua.</p> <p>Básicamente el sistema electroquímico está formado por un ánodo, donde ocurre la oxidación, un cátodo, donde tiene lugar la reducción y una fuente de corriente continua encargada de suministrar la electricidad (31).</p>
Fuente: Giusy Lofrano	

A continuación se presenta una revisión de los tratamientos en la industria de curtiembres, identificando sus principales ventajas y desventajas, porcentajes de remoción promedio, entre otras.

Tabla 7. Comparación técnica y económica de tratamientos de aguas residuales.

Proceso	Materiales o principales métodos	Remoción	Eficiencias	Variables de control	Limitantes	Costos	Innovación	Observaciones para el proyecto
Químicos								
Coagulación y floculación	Uso de coagulantes químicos como sulfato de aluminio (AlSO ₄), cloruro férrico (FeCl ₃), sulfato ferroso (FeSO ₄), polisilicato de aluminio, policloruro de aluminio, cloruro de aluminio	La carga inorgánica (DQO) y los sólidos suspendidos (SS) como así como para eliminar las sustancias tóxicas, por ejemplo, cromo antes del tratamiento biológico, SST>90% reducción de inmovilización Daphnia magna (50%).	DQO 30-70% Cromo 74-99% SS 34-36%	pH	pH (generalmente altos), Depende de la dosis del coagulante	0.07 [€/m ³] y 0.08 [€/m ³]	Tratamiento convencional	Pocas posibilidades de reusó, tratamiento convencional poco eficiente
Biológicos								
Aérobicos	Reactor discontinuo secuencial (SBR) Hongos Lodos activados	Carga orgánica DQO Nitrógeno	DQO 80% (disminuye la eficiencia en presencia de sales) Nitrógeno 80%	Condiciones controladas: pH, temperatura	Inhibición del tratamiento por taninos, cromo y otros compuestos biodegradables	2.4 [€/m ³]	Tratamiento convencional	Puede usarse aireación, lo cual mejora al eficiencia

Tabla 7. (Continuación)

Proceso	Materiales o principales métodos	Remoción	Eficiencias	Variables de control	Limitantes	Costos	Innovación	Observaciones para el proyecto
Anaeróbicos	Filtros anaerobios (AF) compuestos por dos filtros de flujo ascendente anaeróbicos (UAF) y filtros anaerobios de flujo descendente (DAF) y manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente, Reactores (UASB)	Carga orgánica DQO Nitrógeno	DQO 80% (disminuye la eficiencia en presencia de sales) Nitrógeno 80%	Condiciones controladas: pH, temperatura, tiempo de retención, condiciones para mantener microorganismos	Tiempos de tratamiento amplios Las variables deben mantenerse muy controladas	-	Tratamiento convencional	
	Fitoremediación: Humedales artificiales Laguna avanzada facultativa (AFP), laguna facultativa secundaria (SFP) y la laguna de maduración (MP)	DQO DBO5	Alta eficiencia en la eliminación de DQO (51 y 80%) y DBO5 (53 y 90%)	Influencia del pH, la temperatura y el oxígeno disuelto	Selección de plantas que resistan las condiciones y no sean inhibidas fácilmente por la presencia de tóxicos	-	En la mayoría de países en desarrollo se ha tomado como un tratamiento alternativo con buenas eficiencias	Requiere amplias extensiones, lo que contrasta con los principios de movilidad de la planta

Tabla 7. (Continuación)

Proceso	Materiales o principales métodos	Remoción	Eficiencias	Variables de control	Limitantes	Costos	Innovación	Observaciones para el proyecto
Tecnologías de tratamientos emergentes								
Procesos de membrana	Microfiltración de flujo cruzado (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF), la ósmosis inversa (RO) y las membranas líquidas soportadas (SLM)	Cromo Cloruros Sulfato	Altas eficiencias por encima del 80%	Caudal, características del agua, pretratamiento Inhibición por algunos compuestos	Tecnologías costosas Requiere personal entrenado	3.6 [€/m ³]	Se encuentra dentro de los tratamientos avanzados más usados	Permite la recuperación del cromo la reutilización de las aguas residuales y los productos químicos Reducción consumo de agua
Procesos de oxidación avanzada	Utiliza agentes oxidantes fuertes (O ₃ , H ₂ O ₂) y / o catalizadores (Fe, Mn, TiO ₂) a veces con el apoyo de la actividad por la radiación de alta energía, por ejemplo, la luz UV	DQO Carbono orgánico total	Altas eficiencias por encima del 80%	Contenido de sustancias inhibitorias o reactantes	El bajo pH (2.8 y 3), temperatura relativamente alta (43-45 ° C) y la alta presencia de compuestos aromáticos Altos costos	64.13 [\$/m ³] 2.09 [\$/m ³]	Tratamiento innovador	En las corrientes de los baños de recurtido es atractivo el uso de estos procesos, debido a su posibilidad de reuso

Tabla 7. (Continuación)

Proceso	Materiales o principales métodos	Remoción	Eficiencias	Variables de control	Limitantes	Costos	Innovación	Observaciones para el proyecto
Fotólisis UV	Para ser eficaz, la fotólisis requiere una fuerte luz UV con una longitud de onda corta (B400 nm) y oxidantes químicos, tales como peróxido de hidrógeno y el ozono	La eficiencia de la fotólisis de algunos compuestos orgánicos se demostró en función de su reactividad y fotosensibilidad, por lo que se observó poca remoción de DQO, Carbono total y ecotoxicidad. No se observó acción sobre los taninos. Algunos estudios reportaron aumento en el color luego del tratamiento	10 al 60% de DQO	Contenido de sustancias inhibitorias o reactantes	Oxígeno disuelto características del agua Altos costos Oxígeno disuelto Intensidad y longitud de onda de la luz UV	35 [€/m ³]	Tratamiento innovador	Se puede suponer que la estructura orgánica de cuero de las aguas residuales de bronceado, así como de algunos agentes de curtido no son adecuado para ser destruido por UV solo

Tabla 7. (Continuación)

Proceso	Materiales o principales métodos	Remoción	Eficiencias	Variables de control	Limitantes	Costos	Innovación	Observaciones para el proyecto
Procesos de ozono	Usa el ozono para realizar una oxidación de los contaminantes del agua	Convertir orgánicos refractarios en orgánicos biodegradables Color El índice de biodegradabilidad de la curtiduría efluente ha aumentado desde 0,18 hasta 0,49 durante la ozonización 11. La aplicación de O ₃ /UV logra la más alta degradación y las tasas de oxidación a pH alcalino	30 al 90% de DQO removida	pH del sistema, presión parcial de ozono, el tiempo de contacto y área interfacial, la temperatura de funcionamiento, la presencia de catalizador	Los radicales hidroxilo se forman a partir de la descomposición de ozono a pH más altos, mientras que el ozono molecular permanece como el principal oxidante a valores de pH bajos Altos costos	205 [€/m ³]	Tratamiento innovador	Mientras disminuye la toxicidad, aumentan compuestos disruptores endocrinos (CDE), por efecto de la ozonificación del agua.

Tabla 7. (Continuación)

Proceso	Materiales o principales métodos	Remoción	Eficiencias	VARIABLES de control	Limitantes	Costos	Innovación	Observaciones para el proyecto
Fotocatálisis	Usa las longitudes de onda de la radiación UV para acelerar la degradación de contaminantes en aguas residuales	Los autores observaron un aumento de la toxicidad a D. magna después de UV/TiO ₂ tratamiento, a pesar de la eliminación de DQO alta	6 al 60 % DQO 16% DBO ₅	Cantidad y el tipo del catalizador, longitud de onda de la irradiación, el diseño del reactor, contenido de materia orgánica de los efluentes, temperatura, pH, flujo radiante, la aireación, el efecto de especies iónicas.	Bajas eficiencias Sustancias inhibidoras Altos costos	110 [€/m ³]	Tratamiento innovador	Posibilidad de utilizar con eficacia la luz solar o la luz UV cercana para la irradiación, lo que debería dar lugar a un considerable ahorro económico especialmente para operaciones a gran escala

Tabla 7. (Continuación)

Proceso	Materiales o principales métodos	Remoción	Eficiencias	Variables de control	Limitantes	Costos	Innovación	Observaciones para el proyecto
Tratamiento electroquímico	Usa los principios de la electroquímica, generando coagulante a partir de la energía eléctrica	Cromo Sulfuros DBO5 DQO ST	Sulfuros 99,5% DBO paso de 44% a 99% Eficiencias mayores al 70% para DQO	Tipo de aguas residuales, el consumo de energía eléctrica, el tiempo de reacción,	La eficacia de este proceso depende en gran medida de las condiciones de tratamiento y de la naturaleza de los materiales electródicas	1.13 [€/m ³] a 1,64 [€/m ³]	Tratamiento ampliamente experimentado, poco implementado o en países en desarrollo	La cinética del proceso electroquímico se ha encontrado hasta 100 veces más rápido que el proceso de oxidación biológica. A pesar de sus altos costos de capital, hoy en día, las tecnologías electroquímicas han llegado a un estado tal que no sólo son comparables con otras tecnologías en términos de costo, sino que también son más eficientes y más compactas. La presencia de sales, hace que el agua residual facilite su tratamiento por electroquímica.
Fuente: Modificado Chemical and biological treatment technologies for leather tannery chemicals and wastewaters: A review								

De acuerdo a la tabla anterior, se observa que los tratamientos convencionales, tanto químicos como biológicos, tienen eficiencias relativamente bajas, en comparación con las eficiencias obtenidas con los tratamientos de tecnologías emergentes.

Las eficiencias en la mayoría de tratamientos avanzados presentan porcentajes de remoción mayores a 90%, mientras que los tratamientos convencionales presentan eficiencias menores a 80%, requiriendo tratamientos complementarios (28). Dentro de la revisión de los tratamientos avanzados, se encontró que la mayoría representan un costo promedio de 5 veces mayor que los tratamientos convencionales, a diferencia de los tratamientos electroquímicos que reportaron costos similares a los tratamientos convencionales, e inclusive menores en algunos casos (28). Respecto a los antecedentes de tratamiento, se encontró uso de tratamientos biológicos eficientes, sin embargo teniendo en cuenta la limitante de espacio (por el concepto de movilidad), este tipo de tratamientos se concluyeron poco viables. La mayoría de investigaciones a nivel internacional reportaron altas eficiencias de remoción, mediante tratamiento electroquímico y ozonización, sin embargo el tratamiento con ozono, puede ser hasta 200 veces más costoso que los tratamientos electroquímicos (28).

La siguiente tabla muestra los parámetros de interés a remover y las eficiencias obtenidas de acuerdo a algunos autores, donde se evidencia una eficiencia promedio por encima del 90%:

Tabla 8. Eficiencia de remoción por electrocoagulación de los parámetros de interés.

Contaminante	Remoción %	Ánodo - Cátodo	pH	Intensidad o densidad de corriente
Turbiedad	87	Fe/Al	10	80 a 100 A/m ²
DQO	88.7	Al/Fe	7.3	93 A/m ²
Cromo	97	Fe/Fe	5 a 4	30 A/m ²
SS	90	Al/Al	6.94	-
Color	96	Al/Fe	7.3	93 A/m ²
Sulfuros	96.7	Al/Fe	8 a 10	0 a 1 A

Fuente: Chemical and biological treatment technologies for leather tannery chemicals and wastewaters: A review

De acuerdo a lo anterior y teniendo en cuenta las variables de la tabla 7, la alternativa tecnológica, ambiental y económica viable para tratamiento de aguas residuales de curtiembres es la electrocoagulación.

5.4.3 Historia de la electrocoagulación

La electroquímica es una ciencia que nace a finales del siglo XVIII con los trabajos de Galvani y Volta, y ha tenido desarrollos y aplicaciones en múltiples áreas. Podemos mencionar su uso en el arranque de los motores de los automóviles, en procesos de síntesis química y métodos para la eliminación de la contaminación.

La electrocoagulación ha sido una tecnología emergente desde 1906, con la primera patente concedida en Estados Unidos. Problemas de tipo financiero o de regulación de incentivos generaron tropiezos para que la industria adoptara esta técnica, pero se conocen desarrollos anteriores (1888).

La corporación universitaria Lasallista publicó un artículo en la revista P+L, haciendo un breve resumen histórico sobre la evolución de la electrocoagulación, mencionando primeramente a Wolff en 1893, el cual electrolizó una solución concentrada de sal para producir cloro y soda cáustica, que utilizaba para esterilizar aguas negras en Brewster, NY, este fue el primer experimento conocido de electrocoagulación de aguas residuales.

En 1896 se usó en Louisville, Kentucky, una modificación del proceso de Webster, (fue el primer proceso de electrocoagulación) para coagular agua cenagosa del río Ohio, proceso en el que se utilizaron ánodos de hierro y aluminio. En 1908 el proceso Webster se utilizó en Santa Mónica, con reducciones de 40% de materia orgánica. En 1914 se utilizó en New York una modificación del proceso Webster llamado Landreth. En éste se añade cal para mejorar la conductividad del electrolito. En 1932 fue utilizada la electrocoagulación en Alemania, con eficiencias del 50% en reducción de la DBO de aguas residuales. La falla de estos procesos se dio por el alto costo de la energía y la necesidad de recambiar los electrodos. En 1947, en URSS, se utilizó el proceso con electrodos de hierro para formar hidróxido ferroso, obteniendo remociones de 70% al 80% para la DBO. Unos años

más tarde, en 1958, el profesor Mendía, de la Universidad de Nápoles, utilizó esta técnica para desinfectar las aguas negras de ciudades costeras. En este proceso se mezcló 25% al 30% en volumen de agua de mar antes de la electrólisis. En Noruega, Föyn combinó 20% de agua de mar con las aguas residuales en la electrólisis para la remoción de fosfato, utilizando electrodos de carbón. Aunque la eficiencia del proceso fue buena, hubo problemas de corrosión (11).

Ha sido a finales del siglo XX y comienzos del XXI donde se han reportado la mayor cantidad de trabajo de investigación para el tratamiento de aguas residuales de diferentes industrias, obteniendo remociones importantes para parámetros de difícil biodegradabilidad y persistencia.

5.4.4 La Electrocoagulación

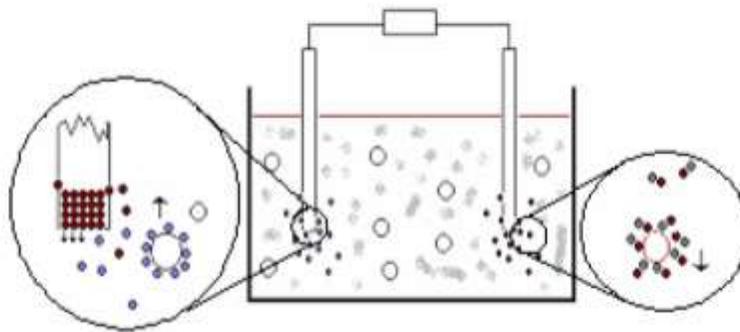
Durante muchos años se ha usado el principio de la coagulación para remover los contaminantes de las aguas residuales; la electrocoagulación implementa estos mismos principios usando las leyes de la electroquímica, sustituyendo el coagulante químico por la corriente eléctrica aplicada al agua residual.

La electrocoagulación, es entonces un proceso de desestabilización de las partículas contaminantes 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 (11).

El proceso de tratamiento de aguas por electrocoagulación, sucede en un reactor electroquímico, es un elemento más en un circuito eléctrico por donde circula corriente eléctrica en calidad de reactivo. Básicamente, el reactor electroquímico se puede considerar como un par de elementos conductores (llamados electrodos), sumergidos en un medio o disolución electrolítica, donde los electrones llegarán a uno de los electrodos donde se produce su tránsito a la disolución, para ello una de las especies presentes en el sistema tendrá que actuar como captador de electrones, como consecuencia se da una reacción de reducción que caracteriza el electrodo como cátodo; la corriente eléctrica es transportada a través de la disolución mediante la migración de los iones presentes en ella y los electrones serán cedidos al otro electrodo por una especie

susceptible de ello, produciendo la oxidación y caracterizando dicho electrodo como ánodo. (32).

Ilustración 5. Procesos electroquímicos presentes durante el paso de corriente en un efluente. A la izquierda del dibujo se muestra el proceso de flotación de las partículas suspendidas en el efluente y a la derecha se muestra el proceso de electrocoagulación.



Fuente: Electrocoagulación: Una alternativa para depuración del lactosuero residual

La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Por lo general este estado estable produce partículas sólidas menos coloidales y menos emulsionadas o solubles. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundario. Los iones metálicos se liberan y dispersan en el medio líquido y tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados (33).

Estas reacciones electroquímicas están localizadas en la superficie de los electrodos y esta naturaleza heterogénea del proceso va a determinar en gran medida el diseño y comportamiento de los reactores; ya que para un determinado efluente es necesario un material específico para el electrodo, así todos los procesos electroquímicos globales combinan una oxidación en el ánodo, una

reducción en el cátodo y un transporte de especies desde el seno de la disolución hacia la superficie de los electrodos. (32).

La electrocoagulación ha sido estudiada desde hace casi 100 años como alternativa de tratamiento de aguas residuales, sin embargo hasta hace algunos 20 años muy pocas plantas de tratamiento contaban con esta técnica a escala para depurar las aguas residuales. Aunque normalmente los costos asociados al consumo de energía eléctrica han sido la limitante de esta técnica, las altas eficiencias en la remoción de contaminantes permiten que los efluentes tratados sean reusados y minimizan el impacto ambiental y económico de los mismos (34).

Las remociones de metales pesados, se han reportado en diferentes investigaciones con altas eficiencias, cuando se usa la electrocoagulación como tratamiento. La industria metalúrgica, la de producción de cromo, las curtiembres y la industria de fertilizantes, utilizan en sus procesos cromo (+6), elemento de una alta toxicidad. Las descargas de cromo son muy reguladas a nivel mundial y para su remoción se utilizan métodos convencionales que incluyen adsorción, precipitación química y degradación biológica, entre otros. La electrocoagulación combinada con electroflotación ha sido probada como alternativa para la remoción del cromo en esta agua residual. Este tratamiento ha permitido obtener aguas tratadas con concentraciones de cromo por debajo de 0.5 ppm (35).

Otras investigaciones por su parte han dado cuenta de remociones importantes de DQO, DBO inclusive aceites y grasas (34). De acuerdo a lo anterior, en la tabla 8 se evidenció los porcentajes de remoción por electrocoagulación, en diferentes investigaciones, realizando la comparación para los parámetros de interés, según la caracterización promedio de las aguas residuales de curtiembres.

A continuación se resumen las ventajas y desventajas de un proceso de electrocoagulación.

Tabla 9. Ventajas y desventajas del tratamiento por electrocoagulación

Ventajas	Desventajas
Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos de coagulación química	Es necesario reponer los electrodos de sacrificio.
Requiere de equipos simples y de fácil operación	Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado.
Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos.	Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica sea alto.
Los flóculos producidos por coagulación química, tienden a ser mucho más largos, contienen menos agua superficial, son ácido-resistentes, por el contrario mediante la electrocoagulación, la acción eléctrica aplicada incrementa su movimiento facilitando la coagulación	El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso (pasivación).
Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes.	Necesita una conductividad específica para garantizar la eficiencia del tratamiento.
Purifica el agua y permite su reciclaje.	En el caso de la eliminación de compuestos orgánicos, algunos compuestos orgánicos clorados tóxicos pueden formarse in situ si también están presentes cloruros.
El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación.	Las aguas residuales con alto contenido en ácido húmico pueden ser susceptibles a la formación de trialometanos.
El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos que aquellas tratadas con productos químicos, situación que disminuye los costos de tratamiento de estos efluentes en el caso de ser reusados.	Si hay fenoles, metabolismo de algas y productos de descomposición están presentes pueden conducir mal sabor y olor.
Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras.	
Genera lodos más compactos y en menor cantidad	
Los procesos electrolíticos en la celda de electrocoagulación son controlados eléctricamente sin dispositivos mecánicos lo que requiere menos mantenimiento.	
Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada, donde pueden ser removidos con mayor facilidad.	
Fuente: Chemical and biological treatment technologies for leather tannery chemicals and wastewaters: A review Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater	

5.4.5 Principios de la electrocoagulación

La electrólisis es el proceso mediante el cual pueden ser separados los elementos de un compuesto, por medio de la electricidad. En la electrocoagulación, durante la electrólisis ocurren una serie de procesos físicos y químicos que permiten la remoción de los contaminantes.

Estos procesos se pueden describir de la siguiente manera:

En los electrodos ocurren una serie de reacciones que proporcionan iones tanto positivos como negativos. El ánodo provee iones metálicos. A este electrodo se le conoce como electrodo de sacrificio, ya que la placa metálica que lo conforma se disuelve, mientras la placa que forma el cátodo permanece sin disolverse. Los iones producidos cumplen la función de desestabilizar las cargas que poseen las partículas contaminantes presentes en el agua. Cuando estas cargas se han neutralizado los sistemas que mantienen las partículas en suspensión desaparecen, permitiendo la formación de agregados de los contaminantes e iniciando así el proceso de coagulación (34)

Los iones que proveen los electrodos desencadenan un proceso de eliminación de contaminantes que se puede dar por dos vías: la primera por reacciones químicas y precipitación y la segunda procesos físicos de agregación de coloides, que dependiendo de su densidad pueden flotar o precipitar (34).

La electrocoagulación se rige por la ley de Faraday de la electrólisis, la cual establece que la masa de una sustancia alterada en un electrodo durante la electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad (carga eléctrica y el número total de moles de sustancia formada en un electrodo está relacionado estequiométricamente con la cantidad de electricidad puesta en el sistema (36) (37).

En la coagulación química, el coagulante es una sustancia química que se agrega al proceso, en la electrocoagulación el coagulante es formado en las reacciones dadas por la electrólisis, en la cual mediante disolución de los iones del electrodo de sacrificio (ánodo), se forma el coagulante.

Ilustración 6. Esquema para el proceso de electrocoagulación



Fuente: Adaptado de Electrocoagulación: Una alternativa para depuración del lactosuero residual

En su forma más sencilla un reactor de electrocoagulación o celda electrolítica, está constituida por un ánodo y un cátodo. Cuando los electrodos se conectan a una fuente de poder externa, el material del ánodo será electroquímicamente corroído por oxidación y el cátodo estará sujeto a reducción. Sin embargo, se han probado arreglos más eficientes como por ejemplo un par de ánodos y un par de cátodos conectados en serie o en paralelo lo que disminuye la pasivación de los electrodos. (38).

Los óxidos sólidos, hidróxidos y oxihidróxidos proporcionan superficies activas para la adsorción de las especies contaminantes (39). Estas cadenas de polihidróxidos, son diferentes a los formados en la coagulación convencional cuando se añaden sales químicas, debido a que tienen diferente estructura hidratada. Esta situación permite retirar, retener y desecar con mayor facilidad los lodos residuales. Los flóculos formados de esta forma son menos hidratados, conteniendo menos agua ligada y por lo tanto se compactan más fácilmente (38).

Durante la formación de los hidróxidos metálicos, la generación de los iones está acompañada de la concentración electroforética de partículas alrededor del electrodo, las cuales neutralizan su carga coagulando. La corriente aplicada obliga a los iones OH^- a migrar hacia el ánodo, por lo que el pH en la capa límite es más alto que en el resto de la solución, lo que favorece la formación de hidróxidos del metal del electrodo, el hidróxido formado remueve los contaminantes presentes en el agua por complejación o atracción electrostática. (38).

Adicionalmente, en la proximidad de los electrodos el aumento de la concentración de los hidróxidos con carga positiva atrae aniones como los bicarbonatos y los

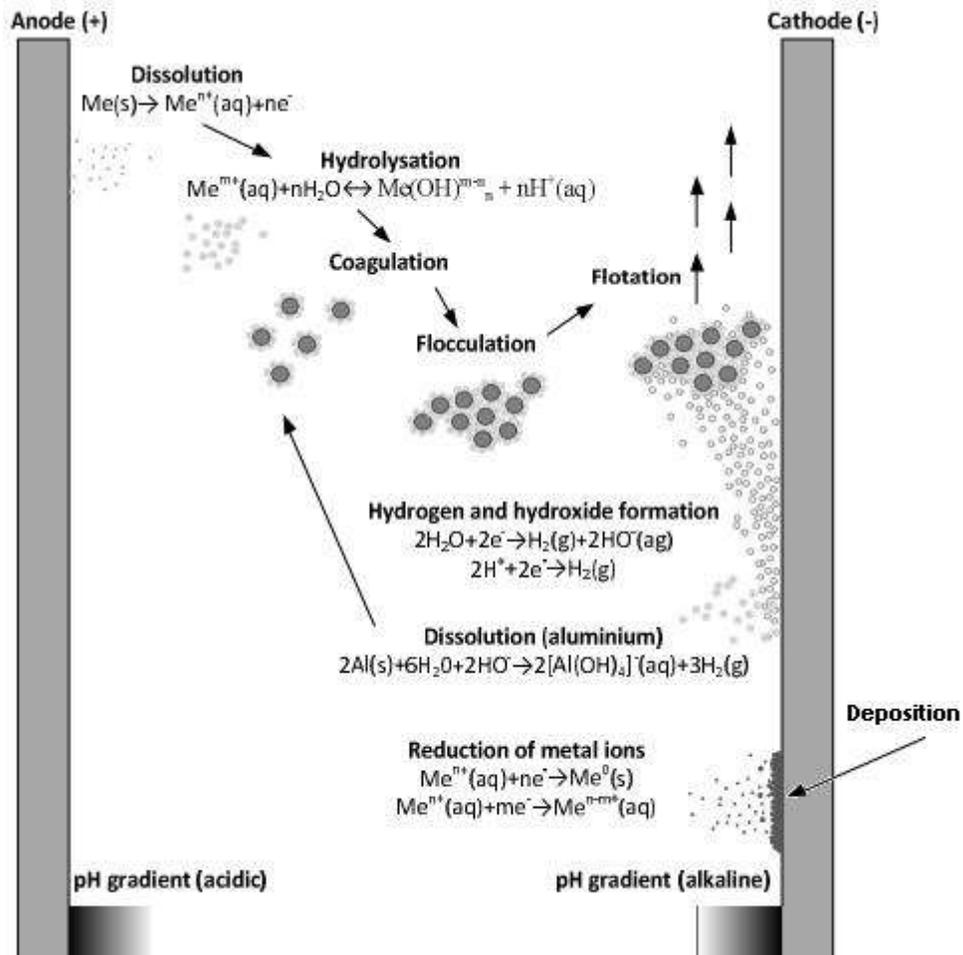
sulfatos que propician la precipitación del calcio y el magnesio, originando así un ablandamiento parcial del agua. Los mecanismos de remoción en electrocoagulación incluyen oxidación, reducción, coagulación, absorción, adsorción, precipitación y flotación (38).

Los materiales más comúnmente utilizados como electrodos en la electrocoagulación son hierro y aluminio, Los iones de aluminio hidrolizado pueden formar largas cadenas de Al-O-Al-OH las cuales pueden adsorber químicamente una gran cantidad de contaminantes. Por esta razón se tratarán de manera especial las reacciones que se desarrollan manteniendo electrodos de estos dos metales en la celda. La bibliografía referenciada trata ampliamente estas reacciones, no sólo para hierro y aluminio, sino también aquellas reacciones que ocurren cuando los electrodos son de otros metales o materiales.

El proceso de electrocoagulación es afectado por diferentes factores. Entre los más importantes se encuentran la naturaleza y concentración de los contaminantes, el pH del agua residual, los materiales de los electrodos, corriente y tensión. Estos factores determinan y controlan las reacciones ocurridas en el sistema y la formación del coagulante.

Teniendo en cuenta que los electrodos mayormente usados son el hierro y aluminio, como cátodo y ánodo respectivamente, a continuación se describen las reacciones químicas que se manejan:

Ilustración 7. Representación de las reacciones en un sistema de electrocoagulación con electrodos de aluminio y hierro.



Fuente: Modern Electrochemical Methods in Nano, Surface and Corrosion Science

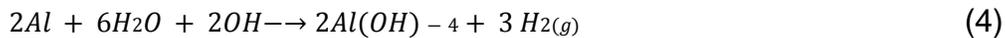
En el proceso de electrocoagulación con electrodos de hierro y aluminio, se aplica un potencial a los ánodos de metal, lo que provoca dos reacciones separadas: (1) Fe / Al se disuelve a partir de los correspondientes iones metálicos de generación de ánodo, que se hidrolizan casi inmediatamente al hierro polimérico o hidróxido de aluminio. Estos hidróxidos poliméricos son excelentes agentes coagulantes. Los ánodos de metal (de sacrificio) consumibles se utilizan para producir

continuamente hidróxidos poliméricos en la proximidad del ánodo. La coagulación se produce cuando estos cationes metálicos se combinan con las partículas negativas llevadas hacia el ánodo por el movimiento electroforético. Los contaminantes presentes en la corriente de aguas residuales se tratan ya sea por reacciones químicas y la precipitación o la unión física y química a los materiales coloidales que se generan por la erosión del electrodo. Ellos se eliminan luego por electro-flotación, o de sedimentación y filtración. Por lo tanto, en lugar de añadir productos químicos de coagulación como en proceso de coagulación convencional, estos agentes coagulantes se generan in situ. (2) El agua también se electroliza en una reacción paralela, la producción de pequeñas burbujas de oxígeno en el ánodo y de hidrógeno en el cátodo. Estas burbujas atraen las partículas floculadas y, a través de la flotabilidad natural, flotan los contaminantes floculados a la superficie (39).

Para ánodo de aluminio:



En el cátodo:



Otra posible reacción:



5.4.6 Diseño y operación del reactor de electrocoagulación

Los reactores para la electrocoagulación pueden clasificarse en primera instancia como reactores tipo batch o reactores de sistema continuo. La selección de uno de estos tipos de reactor depende de las características del contaminante y de su concentración, así como de las cantidades de agua residual a tratar. El reactor

tipo batch, debe operar con un volumen determinado de agua residual para tratar en un ciclo. Tiene como desventaja que sus condiciones cambian con el tiempo, pero tiene también la ventaja de ser simple y de bajo costo para el tratamiento localizado de aguas (11).

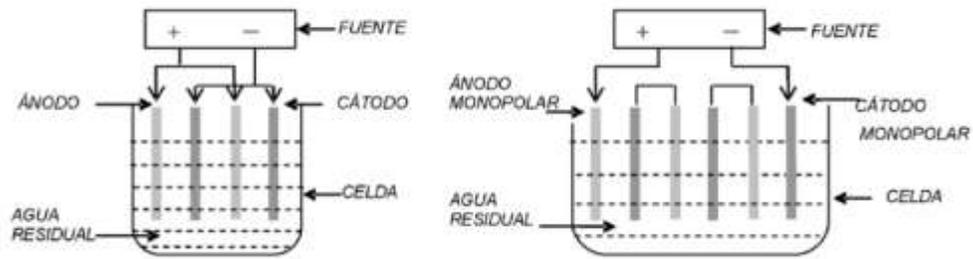
Una segunda clasificación de los reactores está dada en función de la flotación. Una vez que el contaminante ha sufrido el proceso de coagulación existen dos formas de separarlo del medio acuoso: flotación y sedimentación. Así pues, los reactores pueden diseñarse como reactores con sólo coagulación, o con coagulación y flotación. Son llamados reactores de sólo coagulación aquellos que no aprovechan la electrocoagulación para generar burbujas que separen los agregados floculos del contaminante por flotación, mientras que los reactores en los que se aprovechan las burbujas generadas para realizar la flotación de los agregados del contaminante, reciben el nombre de reactores de coagulación y flotación (40), la separación por sedimentación es la más común.

La densidad de corriente empleada en el reactor determina la cantidad de burbujas generadas. Se ha podido observar de la experimentación que, a bajas corrientes se producen bajas densidades de burbujas, obteniéndose un bajo flujo de momentum hacia arriba que hace que predomine la sedimentación sobre la flotación. Situación contraria se presenta cuando se aumenta la corriente, pues la densidad de burbujas aumenta resultando en un aumento del flujo de momentum hacia arriba, favoreciendo la flotación de las partículas contaminantes (36)

Los procesos que utilizan sólo coagulación pueden combinarse con otras tecnologías para lograr la separación del contaminante, estas tecnologías pueden ser: flotación por aire disuelto, electroflotación, filtración y clarificación. Estas combinaciones de técnicas de separación con el proceso de electrocoagulación se pueden llevar a cabo integrando ambas tecnologías en el diseño del reactor (11).

Se ha observado que cuando en el reactor se usan dos placas, una como ánodo y otra como cátodo, no se presenta una buena disolución de iones metálicos. Para mejorar esta disolución se debe aumentar el área superficial de los electrodos, lo cual se logra aumentando el número de placas, disponiéndolas en serie en forma paralela monopolar o bipolar (41) como se muestra en la ilustración 8.

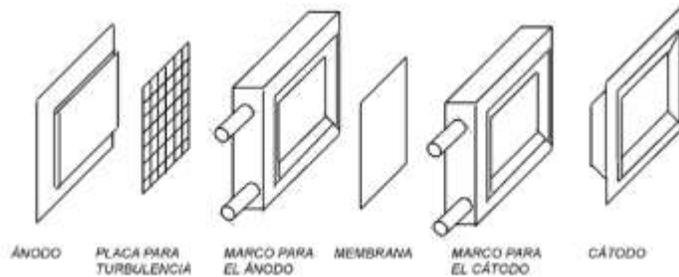
Ilustración 8. Reactores para electrocoagulación tipo bach.



(a) Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo,
(b) Reactor con electrodos monopolares conectados en serie.

Fuente: Laboratory study of electro-coagulation-flotation for water treatment.

Ilustración 9. Reactor tipo filtro prensa



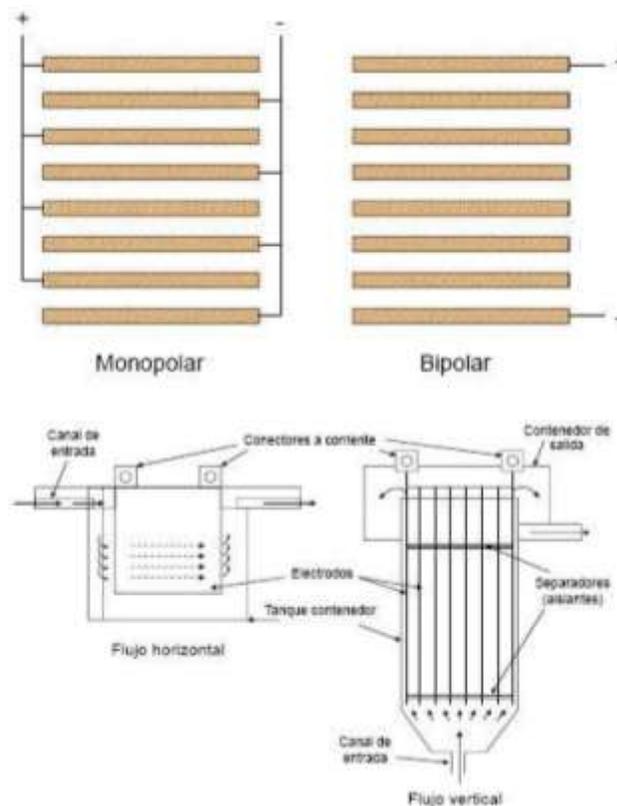
Fuente: New bipolar electrocoagulation - electroflotation process for the treatment of laundry wastewater

Existen otros tipos de reactores para la electrocoagulación. Uno de ellos es el tipo filtro prensa, constituido por un par de marcos. Uno de ellos soporta el ánodo y el otro el cátodo en forma de placas, de manera que su acople forma una cámara. El agua a ser tratada entra por la parte lateral a la cámara y es inducida a flujo

turbulento, para incrementar la eficiencia del proceso. Este sistema hace que su operación y mantenimiento sean relativamente simples (11).

Dependiendo de la orientación de los electrodos (placas), el flujo dentro de la celda de electrocoagulación puede ser vertical u horizontal. El agua fluye a través de los espacios entre las placas, que pueden ser canales múltiples o un solo canal; los canales múltiples es un arreglo simple, pero normalmente la velocidad de flujo en cada canal es baja. Cuando no es posible reducir la pasivación en la superficie de los electrodos, se recomienda incrementar la velocidad del flujo utilizando un sistema con un solo canal (33).

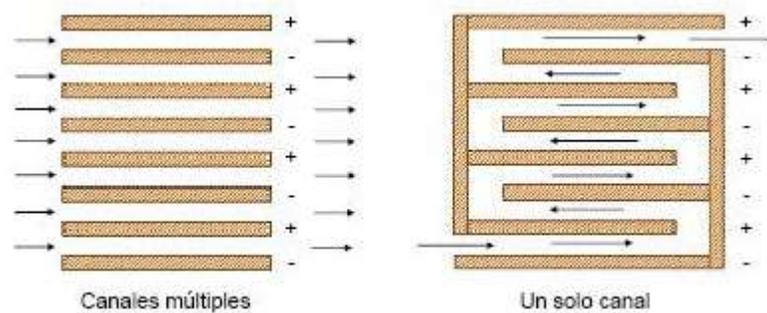
Ilustración 10. Arreglo de electrodos y unidades de electrocoagulación.



Fuente: Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación

También se han utilizado electrodos bipolares con celdas en paralelo. En este caso el electrodo "sacrificable" se localiza entre dos electrodos paralelos sin ninguna conexión eléctrica. Sólo los electrodos monopolares se conectan a la fuente externa de poder. Este tipo de arreglos resuelve en parte la disminución de la eficiencia de la electrocoagulación por formación de una capa de óxido sobre los electrodos. Otra forma de aumentar la eficiencia de esta técnica es utilizar corriente alterna que retarda los mecanismos normales de ataque de los electrodos, sin embargo, los campos de corriente alterna pueden desestabilizar el sistema. También se ha aplicado esta tecnología en unidades de lecho fluidizado equipados con metales no consumibles y con partículas de aluminio sometidas a flujo turbulento. La agitación es mantenida con aire comprimido (38).

Ilustración 11. Posibles configuraciones de flujo dentro de un reactor



Fuente: Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación.

5.4.7 Factores que afectan la electrocoagulación

5.4.7.1 pH

El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar. El pH, durante el proceso, puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. En contraposición, en aguas residuales alcalinas, el pH puede decrecer y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso. Se ha determinado en algunos casos que la mayor eficiencia en la remoción de un contaminante se da dentro de un rango específico de pH, e incluso este rango puede ser amplio. En términos generales las mejores remociones se han obtenido para valores de pH cercanos a 7 (11).

Las reacciones que se dan durante el proceso de electrocoagulación le dan al medio acuoso capacidad buffer. Especialmente en aguas residuales alcalinas, esta propiedad previene grandes cambios de pH, con lo cual son menores las dosificaciones de sustancias químicas para regular el pH (11).

5.4.7.2 Densidad de corriente

La eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento en la densidad de corriente. Para algunas conductividades del medio acuoso, el consumo de energía se incrementa proporcionalmente con los aumentos de conductividad, lo que conlleva a un consumo mayor de energía. Para altos consumos de energía se presentan pérdidas por la transformación de energía eléctrica en calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio acuoso.

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al^{+3} o hierros Fe^{+2} , liberados por los respectivos electrodos.

En general, un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante. Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficacia (debido a la producción de oxígeno), y mayor probabilidad de que se presente la pasivación del material, pero densidades de corriente bajas implican un mayor volumen de reactor y por lo tanto mayores tiempos de residencia. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación, como pH y temperatura (11).

La energía eléctrica que se suministra a la celda electroquímica puede ser mediante corriente alterna (CA) o bien como corriente directa (CD). Las características propias del paso de cada una de las corrientes a través del medio acuoso generan diferentes respuestas electroquímicas entre las placas y el agua residual tratada. Cuando se suministra corriente directa se produce en el cátodo una impermeabilización, lo que causa una menor eficiencia en la remoción.

5.4.7.3 Tensión

En el caso de la tensión o diferencia de potencial, que es definida como la resistencia en ohmios (Ω) al paso de una corriente eléctrica en amperios (A) aplicada en un circuito eléctrico (Ley de Ohm), se requiere considerar principalmente la conductividad eléctrica del electrolito y la separación de los electrodos. Esto finalmente determina el consumo de energía del proceso y por consiguiente el costo del tratamiento (38).

5.4.7.4 Conductividad

Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. Cuando se mantiene constante la tensión suministrada a la celda de electrocoagulación, se produce un incremento de la conductividad, manteniendo la densidad de corriente constante, se obtiene una disminución de la

tensión suministrada. La adición de algunos electrolitos tales como NaCl o CaCl₂ generan un aumento en la conductividad del agua residual. Además se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones como HCO₃⁻ y SO₄⁻, pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de Ca⁺² y Mg⁺² produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos que aumentaría el potencial entre éstos, decreciendo así la eficiencia de la corriente. Se recomienda, sin embargo, que para un proceso de electrocoagulación normal se mantengan cantidades de Cl⁻ alrededor del 20% (33).

5.4.7.5 Temperatura

Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente se incrementa inicialmente hasta llegar a 60° C, punto donde se hace máxima para luego decrecer. El incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuida al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo (11).

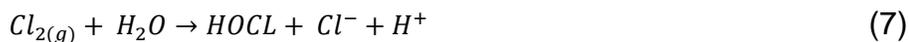
5.4.7.6 Material de los electrodos

En el caso de la electrocoagulación con ánodos de sacrificio, la selección del material del electrodo va a depender de la naturaleza y afinidad que tenga el contaminante que se pretende remover con el coagulante producido, es decir, si se quiere remover material suspendido, el coagulante debe propiciar una desestabilización de los coloides para que éstos se aglutinen y posteriormente sean separados por precipitación. En el caso de elementos disueltos se busca que el coagulante los adsorba o los retenga mediante algún mecanismo fisicoquímico. Cuando se trata de electrodos inertes como el acero inoxidable, el titanio, platino, níquel, grafito, etc., el mecanismo de remoción es debido a que se presenta una reducción electroquímica del agua en el cátodo incrementándose el pH y propiciando la formación de sales básicas poco solubles e hidróxidos de metales polivalentes que precipitan. La utilización de electrodos de aluminio tiende a ser minimizada con respecto a los de hierro, debido a los problemas de disposición de

los lodos conteniendo ese metal y a la alta pasivación de los electrodos. Electrodo inertes como el titanio y el paso de una corriente alterna, también remueve iones metálicos y promueve la coagulación de sólidos suspendidos (38).

5.4.7.7 Condiciones fisicoquímicas del agua

Las condiciones de operación de la electrocoagulación dependen de la química del medio acuoso, especialmente de la conductividad y el pH, pero también influyen el tamaño de partículas, el tipo de electrodos, el tiempo de retención, el espaciamiento entre electrodos y la concentración de los contaminantes. También hay que tomar en cuenta que las características fisicoquímicas del agua pueden modificar las propiedades de los contaminantes, afectando así su remoción, tal es el caso del pH y la temperatura del agua, los cuales deben ser controladas para minimizar los efectos adversos a los mecanismos de remoción; cuando hay cloruros en el agua se pueden presentar las reacciones siguientes en presencia de una corriente eléctrica, lo que favorece la desinfección (38):



5.4.7.8 Tiempo de tratamiento

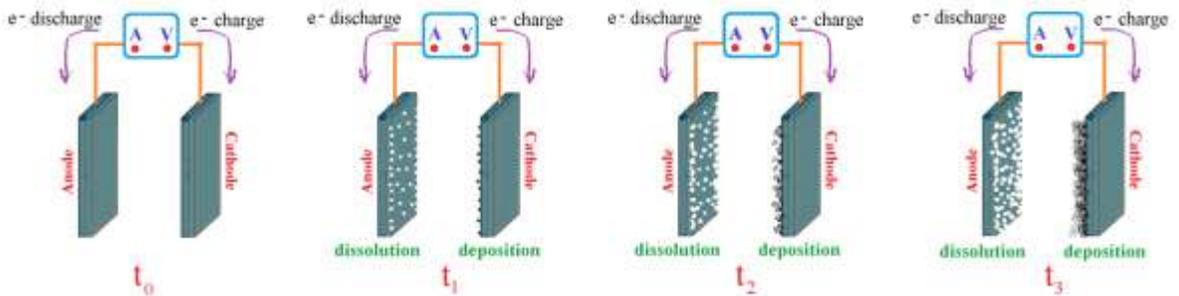
Dentro de la revisión bibliográfica (32) se encontró que los diferentes autores manejan tiempos entre los 5 y 120 minutos, sin embargo los tiempos que referencian la mayoría del material bibliográfico son entre 5 y 25 minutos, esto teniendo en cuenta que a mayor tiempo de tratamiento, mayor consumo de energía y así mismo se incrementan los costos.

5.4.7.9 Configuración electrodo

Una de las principales desventajas del tratamiento por electrocoagulación cuando se usa corriente continua, es que puede formarse una película de óxido impermeable en el cátodo, este proceso se conoce como pasivación del cátodo, el cual disminuye la transferencia iónica entre el ánodo y el cátodo directamente, dificultando la disolución del metal y la prevención de la formación de hidróxido de metal indirectamente (ver ilustración 12).

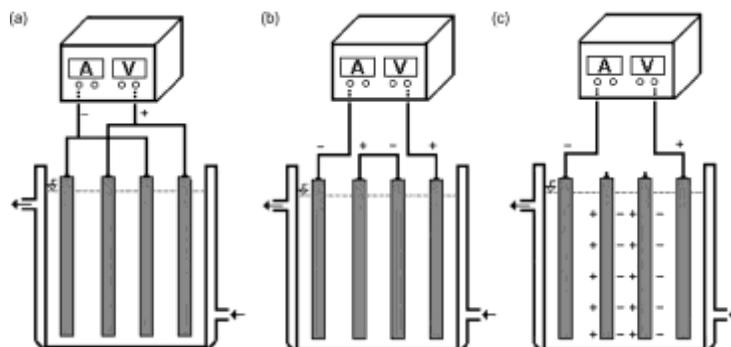
Estas limitaciones pueden minimizarse modificando la configuración de los electrodos (ver ilustración 13) y usando corriente alterna. Sin embargo estas opciones presentan problemas en su implementación en la práctica y costos asociados a la operación.

Ilustración 12. Representación de la pasivación del cátodo



Fuente: Modern Electrochemical Methods in Nano, Surface and Corrosion Science

Ilustración 13. Posibles configuraciones electrodos



(a) MP-P: Monopolar en paralelo, (b) MP-S: Monopolar en serie, (c) BP-S: Bipolar en serie.

Fuente: Techno-economical evaluation of electrocoagulation for the textile wastewater using different electrode connections

5.4.7.10 Costos

El proceso de electrocoagulación permite la remoción de una alta cantidad de contaminante en una sola operación, situación que convierte a esta tecnología en una opción económica y ambiental para el tratamiento de las aguas residuales de muchas industrias. El capital y los costos de operación son mucho menores comparativamente con un tratamiento por coagulación química, incluso se puede llegar a recuperar los costos de capital en menos de un año (42).

Estos costos dependen del caudal a tratar, de la naturaleza del agua residual, de los contaminantes a ser removidos y de la región o localidad en la que se desea realizar el tratamiento. Se ha estimado que los costos de operación para tratar por electrocoagulación 18,925 L/min de agua residual con contenidos de sólidos suspendidos, grasas y aceites, y algunos metales como níquel y zinc, es de US\$ 1.500, mientras que los costos para tratar la misma agua residual por medio de coagulación química es del orden de US\$ 45.000, para un ahorro anual del orden de US\$ 43.500 cuando se aplica electrocoagulación en lugar de coagulación química. Estos costos no incluyen transporte y disposición de lodos ni mano de obra (11).

Cuando se compara la coagulación con alumbre y la electrocoagulación, este último tratamiento produce 83% menos volumen de lodos que el primero, lo cual representa diferencias significativas en los costos del transporte y disposición final de los lodos. Los costos de operación dependen en buena medida del material de los electrodos. Por ejemplo, cuando se trata el agua residual de la industria textil por electrocoagulación con electrodo de hierro como electrodo de sacrificio, los costos de operación son del orden de US\$ 0.1 por kg de DQO removido y cuando el electrodo de sacrificio es de aluminio, su costo de operación es del orden de US \$ 0.3 por kg de DQO removido (43).

Los costos del electrodo de sacrificio son alrededor del 50% de los costos totales para el hierro, y del 80% para el aluminio con los costos de la coagulación química (que tiene un porcentaje de remoción de DQO del 50%) son los obtenidos a pH de 5 y una remoción de DQO de 52,6 %. En ambos casos se consideró un caudal de aguas residuales a tratar de 1m³/h. En este caso los costos operativos para la electrocoagulación son 3183,57 \$/m³, mientras que para la coagulación química son de 3942,30 \$/m³. Los costos operativos de la electrocoagulación son equivalentes al 80,75% de los costos de la coagulación química (44):

De acuerdo, con la investigación realizada por la Corporación Universitaria Lasallista, respecto a la aplicación de electrocoagulación en aguas residuales de la industria láctea, los costos operativos para la mayor remoción de DQO por electrocoagulación (94,1% a pH de 5) son de 7475,15 \$/m³, que son prácticamente 1,9 veces los costos para la coagulación química (con remoción de DQO del 50%). Los costos de montaje de una planta para el proceso de coagulación química son de \$ 297'588.060 mientras que para el montaje de la planta de electrocoagulación son de \$ 207'238.800. Los últimos son el 69,64% de los primeros. Los resultados de esta investigación permiten concluir que la electrocoagulación es técnicamente viable como tratamiento de las aguas residuales en la industria láctea y sugieren que es económicamente viable (44).

5.4.7.11 Electrocoagulación en curtiembres

Para finalizar la referencia del tratamiento electroquímico, es importante enfatizar en la aplicabilidad de este tratamiento en la industria de curtiembres, en la tabla 7 se mostró el resumen que compara los parámetros de interés ambiental y su eficiencia en remoción con este tratamiento, de acuerdo a la recopilación bibliográfica, así mismo en la sección 5.5 del presente documento se muestra las investigaciones realizadas en la industria curtiembres para aplicación de electrocoagulación.

5.4.8 Sistema productivo de las curtiembres

La industria de curtiembres representa el 17% de la producción mundial, por lo que es uno de los principales sectores económicos de muchos países, sin embargo su impacto ambiental ha sido considerado en diferentes partes del mundo, estableciendo diferentes mecanismos para mitigar la contaminación ambiental, especialmente respecto a los vertimientos de dichas industrias.

A continuación se muestra el esquema general del proceso del curtido del cuero, haciendo una recopilación de lo que implica esta actividad no sólo a nivel nacional, sino a nivel mundial:

Tabla 10. Descripción general de los procesos de las curtiembres

OPERACIÓN DE RIBERA	
REMOJO	Se ingresan las pieles crudas y se mojan con pequeñas cantidades de agua con el fin de hidratar las proteínas de la piel, solubilizar las proteínas desnaturalizadas, eliminar la sal utilizada en el paso de preservación, para hidratar y para abrir las fibras de contrato de las pieles secas, y eliminar los residuos de la sangre, excrementos, tierra adjunta para la piel.
PELAMBRE CALADO	Y La finalidad de este tratamiento es la eliminación de los componentes que no se transforman en cuero, tales como epidermis superficial, incluyendo el cabello y piel subcutánea, así como capa adiposa.
DESENCALADO	Las pieles en tripa, pulpa y alcalinas se neutralizan (desencalado) con sales de amonio y ácido, tratada con enzimas, similares a los encontrados en el sistema digestivo, para eliminar restos de vello, restos y para degradar las proteínas.
DESENGRASADO	Aquí se eliminan el exceso de sustancias grasas naturales a partir de pieles. Esta operación se lleva a cabo en particular para las pieles de oveja, donde la cantidad de sustancias grasas en el peso en bruto es un 30-40%.
DECAPADO	Decapado aumenta la acidez de la piel hasta un pH de 3, lo que permite entrar a los taninos de cromo para penetrar la piel.

OPERACIÓN DE CURTIDO
En la operación de curtido la piel se trata con sustancias cromo, sales de sustancias vegetales, aldehídos, aceites, etc.)
RECURTIDO
Es un proceso de acabado en húmedo para dar el cuero curtido características especiales.
ACABADO
Acabado incluye todas las operaciones realizadas en la piel después de engrase e incluye la mejora de la resistencia del color a manchas y abrasiones, alisar y estirar la piel, secado, acondicionado, el replanteo, la molienda en seco, pulido y chapado.
Fuente: Chemical and biological treatment technologies for leather tannery chemicals and wastewaters: A review

5.4.8.1 Análisis de entradas y salidas

El proceso de curtido tiene como objetivo transformar pieles de animales en productos estables e impudrescibles. Hay cuatro grandes grupos de sub-procesos requeridos para hacer cuero acabado: operación de ribera, los procesos de curtiduría, recurtido y acabado. Sin embargo, para cada producto final, el proceso de curtido es diferente y el tipo y la cantidad de residuos producidos puede variar en una amplia gama (28).

Durante los procedimientos de recurtido, se añaden taninos sintéticos (sintano), aceites y resinas para formar cuero más suave en dosis variables. Uno de los grupos contaminantes de los efluentes en curtiembres deriva principalmente de taninos. Los sintanes se caracterizan por estructuras químicas complejas, porque se componen de un conjunto extendido de productos químicos tales como fenol-, naftaleno-, -formaldehído y melamina-basado en taninos sintéticos, y resinas acrílicas (28). La mayoría de insumos usados en la industria del curtido de pieles muestran una relación DBO5/DQO mayor que 0,4, lo que indica una muy baja biodegradabilidad de cada uno de ellos (28).

Con el fin de evaluar las proporciones y toxicidad de las actividades unitarias del proceso del curtido del cuero, se realizó un diagrama de flujo del proceso identificando las entradas y salidas.

Ilustración 14. Diagrama de entradas y salidas de las curtiembres

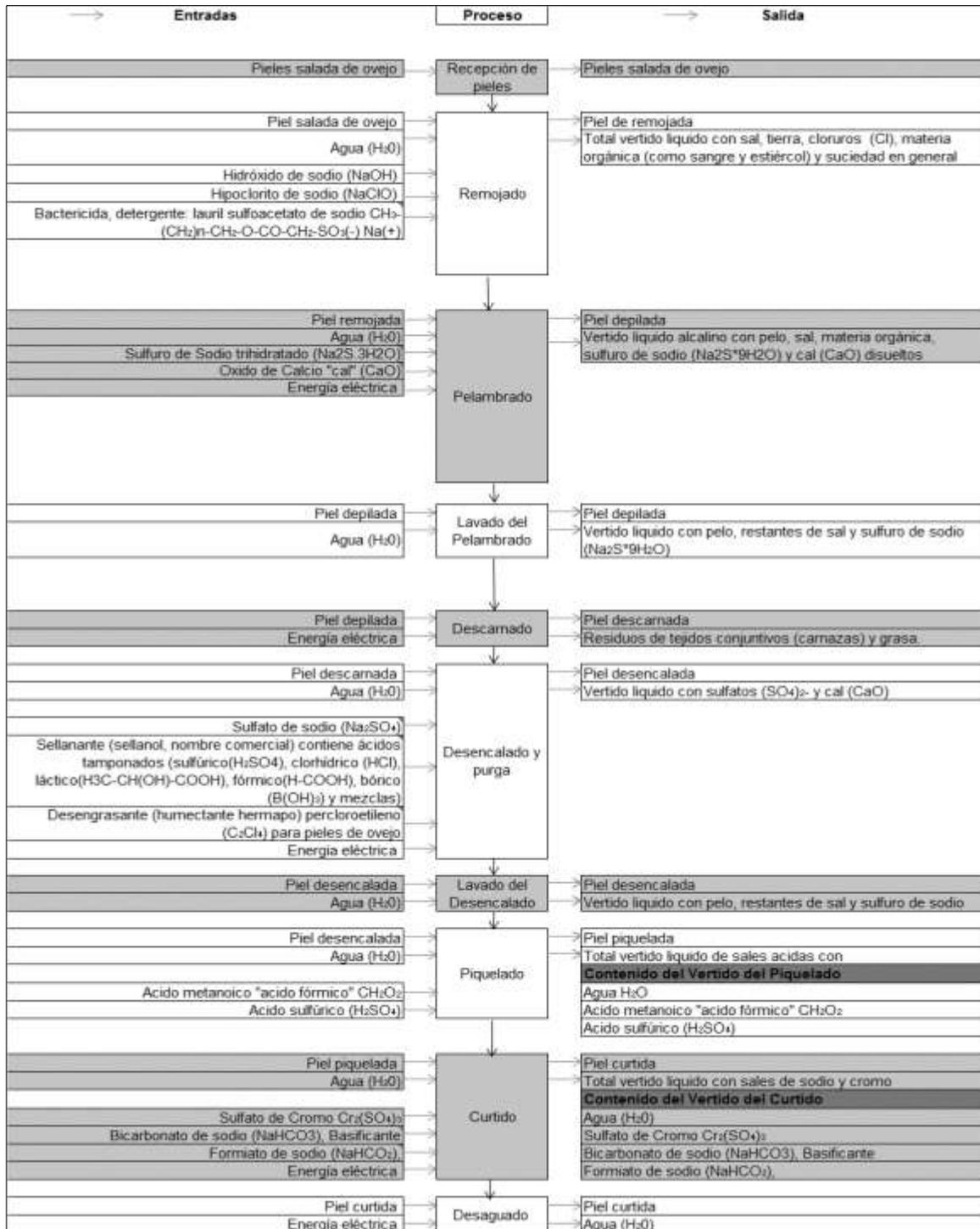
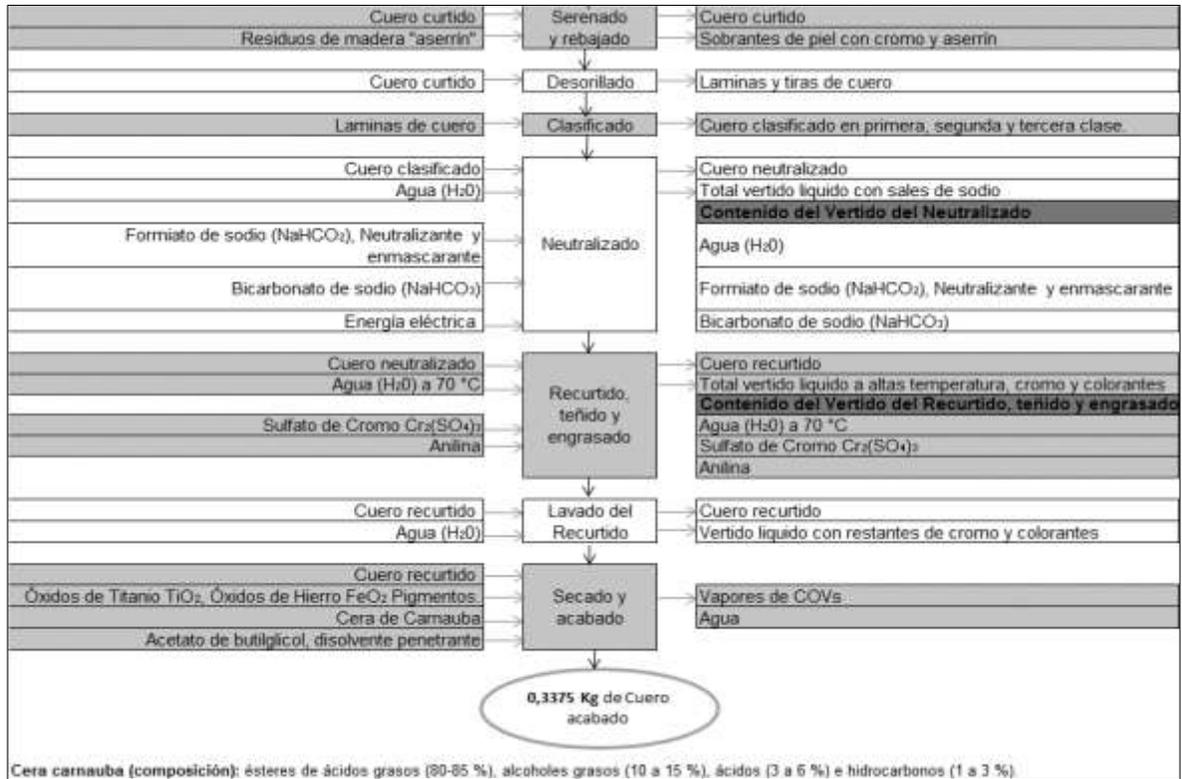


Ilustración 14. (Continuación).



Fuente: Diseño de una planta para el tratamiento de aguas residuales generadas por el sector de curtiembres en San Benito, Bogotá D.C.

De acuerdo a este diagrama, es posible vislumbrar la contaminación de los efluentes generados en las actividades, lo anterior se relaciona con la carga contaminante del efluente y se observa en el siguiente numeral.

5.4.8.2 Carga contaminante del agua residual de curtiembres

La cantidad más alta de la carga de sal se produce en la zona de ribera, alrededor del 15% a 40% (p/p) de sal común se utiliza para la conservación de pieles de animales y que se elimina durante el remojo, esto aumenta la carga por

DQO, haciéndola una de las más altas en todo el proceso. Los sulfuros, cal y sodio se utilizan normalmente durante la operación de pelambre-encalado. Los disolventes orgánicos son productos químicos más ampliamente utilizados en el paso de desengrasado que producen un aumento considerable de la contaminación ambiental por la emisión de compuestos volátiles. La parte húmeda de recurtido, teñido y procesos engrasado tienen sólo un impacto menor en la carga total de sal dominante, que se originó a partir de las pieles en las primeras fases: pre-remojo y remojo principal. El agua residual de secado, contiene la mayor concentración de cromo total (hasta 4950 mg L⁻¹). Tinturar generalmente implica la combinación de tintes con las fibras de la piel curtida para formar un compuesto insoluble. Los efluentes de acabado y son relativamente bajos en DBO y SST, altos en DQO y contienen cromo trivalente, taninos, aceites sulfonados y los tintes usados. La concentración media influente de cromo (III) varía en un amplio rango (30-260 mg/L). Existe una alta salinidad, reflejada por una concentración de sólidos disueltos de 37,000 mg/L (28).

Algunos productos como ácidos, álcalis, sales de cromo, taninos, disolventes, sulfuros, colorantes, auxiliares y otros muchos compuestos que se utilizan en la transformación de pieles en bruto o semi-curtido, no se fijan totalmente en las pieles y son vertidos directamente a los efluentes; generalmente los efluentes de curtido son ricos en nitrógeno, nitrógeno orgánico, pero sobre todo son muy pobres en fósforo.

La tabla 11 muestra la carga contaminante por etapa del proceso de curtido del cuero.

Tabla 11. Caracterización del agua por etapa de proceso

Parámetros	Remojo		Encalado - Pelambre		Desencalado - Rendido		Decapado - curtido al cromo		Recurtido	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
pH	6	10	12.5	13	6	11	4	3.2	4	10
	7.7		11.9		8.6		3.6		5	
T [°C]	10	30	10	25	20	35	–	–	20	60
DBO	2000	5000	5000	20	1000	4000	100	250	6000	15
DQO	3000	6000	–	–	–	–	1000	3000	–	–
	5000	11,8	20	40	2500	7000	800	400	15	75
	31		58		5325		2900		4365	
SST	25	40	–	–	–	–	30	70	–	–
	2300	6700	6700	25	2500	10	–	–	–	–
SDT	22000	33000	–	–	–	–	29000	67000	–	–
Cloruros [mg/L]	15000	30000	–	–	–	–	20000	30000	–	–
	17	5	3300	25	2500	15	8950	2000	5000	10
Sufuros	0	700	2000	3300	25	250	–	–	–	–
	–		2670		134		–		–	
Cromo (III) [mg/L]	–	–	–	–	–	–	–	4100	0	3000
Nitrógeno amoniacal [mg/L]	850		380		3800		670			530

Fuente: Chemical and biological treatment technologies for leather tannery chemicals and wastewaters: A review

5.5 MARCO CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICO

Dentro de la revisión bibliográfica realizada, no se encontró ninguna investigación en el país, con productos de investigación publicados, para electrocoagulación con aguas residuales de curtiembres. Sin embargo varias universidades, han investigado sobre este tema en diferentes industrias, dentro de las que se encuentra, la industria textil, láctea, orfebre e inclusive rellenos sanitarios entre otros. Dentro del estado del arte revisado, es importante destacar el trabajo del profesor Álvaro Arango y su semillero de investigación, en el cual desarrolló varios artículos científicos sobre la electrocoagulación de aguas residuales en la industria láctea, este trabajo se desarrolló con la Corporación Universitaria Lasallista y la Eafit en Medellín y nos ha permitido estandarizar de acuerdo a sus hallazgos, los ensayos de electrocoagulación e inclusive el mismo montaje de la celda prototipo.

Teniendo en cuenta lo anterior se realizó un levantamiento de información sobre electrocoagulación de aguas residuales, en la industria de curtiembre en otras universidades del mundo, usando bases de datos científicas. Como resultado se generó la siguiente tabla resumen, indicando los principales parámetros de diseño para implementar esta técnica:

Tabla 12. Revisión bibliográfica de prototipos de electrocoagulación.

Paper	Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation - Tratamiento de aguas residuales de curtidería por electrocoagulación	Electrochemical oxidation and reuse of tannery saline wastewater - Oxidación electroquímica y la reutilización de aguas residuales curtidería salinas	Influence of anode material on electrochemical oxidation for the treatment of tannery wastewater - Influencia del material del ánodo en la oxidación electroquímica para el tratamiento de aguas residuales de curtidería	Electrochemical treatment of tannery wastewater using DSA electrodes - Tratamiento electroquímico de aguas residuales de curtiembre con electrodos DSA	Tratamiento de aguas de la industria láctea por electrocoagulación
Etapas o procesos del agua	Primer tanque de sedimentación	Se preparó agua residual sintética, simulando curtido de pieles de bovino	Se tomaron aguas residuales de diferentes etapas: -Aguas residuales curtidería prima después de la homogenización y la sedimentación -Aguas residuales después del tratamiento anaeróbico, -Aguas residuales después del tratamiento aeróbico, muestreado de clarificador secundario -Aguas residuales después de la coagulación/floculación, con posterioridad a las etapas biológicas anteriores.	Tanque de homogenización de una curtidería	Tanque de homogenización
Pretratamientos	Centrifugación a 4000 r/min Agitación magnética	Se ha añadido cloruro de sodio a la cantidad requerida para cada experimento. El pH del agua residual sintética se alteró usando HCl o NaOH.	Agitación metálica de paleta	Agitación magnética durante 3 horas	Agitación electromagnética
Parámetros que elimina y % de remoción	Color 84,30% Cromo 84,30% Carbono total orgánico 55,10% NH3-N 43,10% Sulfuros 96,7% DBO 61,8%	Nitrógeno total: 87% DQO: 79% Cloruros: 98%	Amonio: NR DQO: NR Sulfuros: NR	Carbono orgánico total: 20% Compuestos fenólicos totales: 80% Cromo total Cromo hexavalente(VI) Cloruro Ecotoxicidad	DQO: 95,1% Grasas y aceites: 95%

Tabla 12. (Continuación)

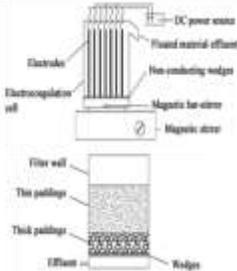
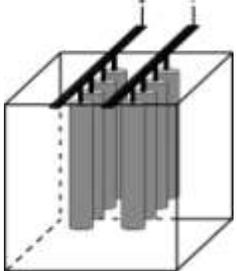
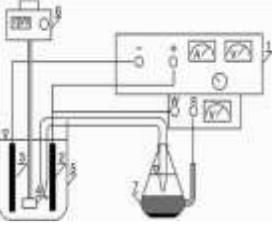
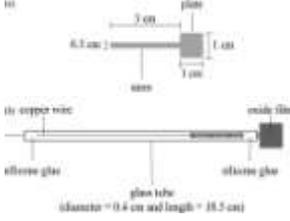
<p>Paper</p>	<p>Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation - Tratamiento de aguas residuales de curtidería por electrocoagulación</p>	<p>Electrochemical oxidation and reuse of tannery saline wastewater - Oxidación electroquímica y la reutilización de aguas residuales curtidería salinas</p>	<p>Influence of anode material on electrochemical oxidation for the treatment of tannery wastewater - Influencia del material del ánodo en la oxidación electroquímica para el tratamiento de aguas residuales de curtidería</p>	<p>Electrochemical treatment of tannery wastewater using DSA electrodes - Tratamiento electroquímico de aguas residuales de curtiembre con electrodos DSA</p>	<p>Tratamiento de aguas de la industria láctea por electrocoagulación</p>
<p>Material que obtuvo mayor remoción</p>	<p>Aluminio Aluminio y Acero Aluminio Acero y aluminio Acero</p>	<p>Sólo se experimentó con grafito</p>	<p>Ti/RhOx-TiO2 Ti/Pt.Ir Ti/Pt.Ir</p>	<p>NR</p>	<p>Hierro</p>
<p>Dibujo montaje</p>					
<p>Elementos del montaje</p>	<p>Fuente de poder Barrera Barra magnética Agitador Electrodos Celda, Filtro</p>	<p>Celda Electrodos Fuente de poder</p>	<p>Fuente de poder Electrodos Paleta Agitador Celda Electrolito</p>	<p>NR</p>	<p>Fuente de energía Celda Agitador electromagnético Electrodos Cronómetro Termómetro</p>
<p>Disposición de ánodo y cátodo</p>	<p>Celda no dividida, en paralelo</p>	<p>Paralelo</p>	<p>Celda no dividida, en paralelo</p>	<p>NR</p>	<p>Paralelo y distribuidos alternamente</p>
<p>No Ánodos y cátodos</p>	<p>Ánodos: 4 Cátodos: 3</p>	<p>Ánodos: 4 Cátodos: 4</p>	<p>Ánodos: 1 Cátodos: 1</p>	<p>NR</p>	<p>Ánodos: 3 Cátodos: 3</p>

Tabla 12. (Continuación)

Paper	Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation - Tratamiento de aguas residuales de curtiduría por electrocoagulación	Electrochemical oxidation and reuse of tannery saline wastewater - Oxidación electroquímica y la reutilización de aguas residuales curtiduría salinas	Influence of anode material on electrochemical oxidation for the treatment of tannery wastewater - Influencia del material del ánodo en la oxidación electroquímica para el tratamiento de aguas residuales de curtiduría	Electrochemical treatment of tannery wastewater using DSA electrodes - Tratamiento electroquímico de aguas residuales de curtiembre con electrodos DSA	Tratamiento de aguas de la industria láctea por electrocoagulación
Material del ánodo y cátodo	Ánodo: Lámina de aluminio o acero dulce Cátodo: Aluminio Se realizaron ensayos invirtiendo el material de ánodos y cátodos	Grafito cilíndrico	Se realizaron 4 montajes diferentes: Ti/RhOx-TiO ₂ , Ti/PdO-Co ₃ O ₄ , Ti/PbO ₂ Ti / Pt-Ir	IrO ₂ y RuO ₂ SnO ₂ y TiO ₂	Ánodo: Aluminio Cátodo: Hierro
Dimensiones	Aluminio: 0,09 m x 0,14 m, 2 mm de espesor Acero: 0,09 m x 0,14 m, 2 mm de espesor	Diámetro 2,54 cm y una longitud de 13 cm Superficie total de los electrodos fue 427.84cm ²	0,1*0,1 m 22 mm área de superficie	1 cm X 1 cm	9 mm X 9mm X 3mm
Distancia entre electrodos	10 mm	1 cm	4,5 cm	NR	1 cm
Intensidad o densidad de corriente (Amp)	0 a 1 A	Densidad de Corriente: 0.012A/cm ²	200-400 A/m ²	20 - 50- 100 A/cm ²	0 - 25 A
Tipo de corriente	Continua	Continua	Continua	NR	Continua
Consumo de energía	Consumo promedio 0,89 kWh/m ³	NR	NR	NR	
Volumen de Agua residual	2 L	2 L	NR	250 ml	2 L
Material, Capacidad y dimensiones de la celda	Vidrio orgánico - metacrilato 0,1 m x 0,15 m x 0,2 m	NR	Vidrio	NR	Acrílico 18 X 10,5 X 14,1 cm
Tiempo de retención	40 min	NR	1 a 15 minutos	1-3-5 horas	5, 10, 15 min
pH	8 a 10	Neutro y alcalino	NR	Ácido: 4	5,7,8
Conductividad	8 a 10 mS/cm	NR	NR	NR	2000 mS

Tabla 12. (Continuación)

Paper	Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation - Tratamiento de aguas residuales de curtidería por electrocoagulación	Electrochemical oxidation and reuse of tannery saline wastewater - Oxidación electroquímica y la reutilización de aguas residuales curtidería salinas	Influence of anode material on electrochemical oxidation for the treatment of tannery wastewater - Influencia del material del ánodo en la oxidación electroquímica para el tratamiento de aguas residuales de curtidería	Electrochemical treatment of tannery wastewater using DSA electrodes - Tratamiento electroquímico de aguas residuales de curtiembre con electrodos DSA	Tratamiento de aguas de la industria láctea por electrocoagulación
Conclusiones	<p>Los resultados experimentales revelaron que la eficiencia de remoción del cromo, NH₃-N, carbono orgánico total y sulfuro, mejoran proporcionalmente con el aumento de la corriente o el tiempo de electrocoagulación; respecto al tiempo las mejores remociones se obtuvieron a 15 minutos. Este tratamiento puede ser utilizado como el tratamiento previo de los procesos biológicos.</p>	<p>La concentración de sal en el agua era igual o más de 30 g/L, en condiciones de pH neutro y alcalino se encontraron los mejores porcentajes de remoción y menores requerimientos de energía. Los resultados de la calidad de agua post-tratamiento dan cuenta de una agua óptima para reutilización.</p>	<p>Con los electrodos de Ti / Pt-Ir y Ti/PdO-Co₃O₄ se obtuvo las mayores remociones, siendo lo contrario con los electrodos de Ti/RhOx-TiO₂, ya que promovió la descarga directa de las proteínas que conducen a su pasivación parcial, finalmente el electrodo de Ti/PbO₂ se sometió a la suciedad. El aumento de dos veces de la densidad de corriente resultó en el doble de la eficiencia del tratamiento, lo que indica la participación de otros mediadores, aparte de cloro activo, tales como peróxido de hidrógeno o radicales hidroxilo. El agotamiento de los contaminantes fue bien descrito por un pseudo-cinética de primer orden con la mayor tasa de remoción alcanzados para el amoníaco presente biológicamente en aguas residuales pretratadas. En el caso en que la carga</p>	<p>el carbono orgánico total (TOC) disminuyó en función del tiempo de electrólisis, pero la eliminación máxima alcanzada fue de sólo el 40,5 % después de 5h de la electrólisis en 100mA/cm². Aunque la eliminación de TOC no era tan eficiente, todos los electrodos utilizados en este trabajo fueron capaces de disminuir en gran medida el contenido de compuestos fenólicos totales y la toxicidad de las aguas residuales. Para los ensayos realizados en 20m A/cm², se obtuvieron los mejores resultados con el electrodo de Ti/Ru Ti/O₂ y Ti/Ir RuSn/O₂. Ensayos realizados con el electrodo Ti/Ru Ti/O₂ a 50 y 100 A/cm² resultó en una mejor eliminación de TOC, sin embargo, en esas condiciones, el Cr (III) se oxidó a Cr (VI) y se obtuvieron rendimientos de corriente más bajos. Estos resultados muestran que los electrodos DSA ® pueden ser</p>	<p>El sistema de electrocoagulación que permitirá el estudio del comportamiento de las aguas residuales de la industria láctea está conformado por una fuente de tensión que entrega una corriente eléctrica de 25 A al medio acuoso, una celda con capacidad para contener dos litros de agua residual que contempla tres zonas: reacciones electroquímicas, sedimentación y flotación y seis electrodos: tres de hierro y tres de aluminio dispuestos en forma alternada y conexión en paralelo y separados por 10 mm.</p>

Tabla 12. (Continuación)

Paper	Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation - Tratamiento de aguas residuales de curtiduría por electrocoagulación	Electrochemical oxidation and reuse of tannery saline wastewater - Oxidación electroquímica y la reutilización de aguas residuales curtiduría salinas	Influence of anode material on electrochemical oxidation for the treatment of tannery wastewater - Influencia del material del ánodo en la oxidación electroquímica para el tratamiento de aguas residuales de curtiduría	Electrochemical treatment of tannery wastewater using DSA electrodes - Tratamiento electroquímico de aguas residuales de curtiembre con electrodos DSA	Tratamiento de aguas de la industria láctea por electrocoagulación
Conclusiones			orgánica se elimina de manera eficiente por un proceso biológico convencional, oxidación electroquímica se puede aplicar como un post-tratamiento para eliminar amoníaco residual.	utilizados en curtiduría de tratamiento de aguas residuales electroquímica siempre que la composición del electrodo y la densidad de corriente se eligen convenientemente para evitar la oxidación de Cr (III) a Cr (VI) y la formación de tóxicos .	
Observaciones para el proyecto en curso	Experimento estado estático Medición de color y pH al final El acero produce muchísimo color superado en la mayoría de casos los 2000 unidades de color	Aunque hubo buena remoción para algunos parámetros de interés, la caracterización de estas aguas de curtiembres, no son parecidas a las del proyecto en cuestión. Tiene información relevante sobre parámetros de trabajo: intensidad de corriente, pH	Fue usado en la estandarización del montaje inicial, sin embargo no cuenta con la mayoría de parámetros de interés y principalmente a que los electrodos usados representan un costo alto, no se tomará el modelo experimental para los ensayos.	Debido a que este paper no aporta información experimental detallada sobre el montaje, no fue posible evaluar su aplicación para el proyecto en cuestión, además también debe tenerse en cuenta que los electrodos usados son de alto valor comercial.	Aunque los ensayos realizados no corresponden a la industria del proyecto en cuestión, contiene información valiosa para el montaje, además es un trabajo investigativo realizado en Colombia, en el cual se obtuvieron buenas remociones.
Referencia	FENG Jing-wei, SUN Ya-bing*, ZHENG Zheng, ZHANG Ji-biao, LI Shu, TIAN Yuan-chun State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing, China, 2007.	Sundarapandiyar, R. Chandrasekar, B. Ramanaiah, S. Krishnan, P. Saravanan* Central Leather Research Institute (Council of Scientific Industrial Research, New Delhi), Adyar, Chennai 600 020, India, 2010.	Lidia Szpyrkowicz, Santosh N. Kaulb, Rao N. Netib, Shanta Satyanarayanb aEnvironmental Sciences Department, University of Venice, Dorsoduro 2137, 30123 Venice, Italy, 2005.	Carla Regina Costaa, Clarice M.R. Bottab, Evaldo L.G. Espindolab, Paulo Olivia,* a Departamento de Química, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, CEP 14049-901 Ribeirão Preto, SP, Brazil, 2007.	REVISTA Universidad EAFIT Vol. 43. No. 147. 2007. pp. 56-67 Álvaro Arango Ruiz Luis Fernando Garcés Giraldo Medellín, 2007
Fuente: Autora					

En la sección 7.2 se relaciona la descripción del montaje definitivo, teniendo en cuenta la tabla anterior.

5.6 ESTADO ACTUAL

En esta sección se describe el diagnóstico ambiental realizado para identificar las condiciones ambientales iniciales de la industria curtiembre en San Benito.

Con el fin de enmarcar la problemática ambiental dentro del contexto urbano de la ciudad de Bogotá, es importante mencionar que la problemática ambiental relacionada con el río Tunjuelo, además de ser grave, enmarca una pérdida avanzada de su caudal ambiental, hasta dejarlo prácticamente seco (ver ilustración 13). El río Tunjuelo es una cuenca estratégica para la recuperación del Río Bogotá, es por esto el Consejo de Estado menciona en uno de sus comunicados de prensa que las acciones encaminadas al saneamiento del Río Bogotá, deben adoptarse desde un enfoque interdisciplinario, sistémico e interinstitucional para abordar la recuperación y conservación del hidrosistema fluvial de la Cuenca del Río Bogotá de una manera integral (25).

Y establece como principales causas de esta problemática:

1. “La inexistencia de una política única en relación con la recuperación del Río Bogotá
2. La existencia de una dispersión de recursos y esfuerzos en materia de información, planeación, gestión, coordinación interinstitucional de proyectos y recursos tecnológicos financieros y humanos, cuya armonización es necesaria en virtud de a) la superposición de actores contaminadores, autoridades y competencias; b) la poca integración interinstitucional y la fragilidad de la policía ambiental
3. El incumplimiento de la normativa ambiental en las diferentes problemáticas que se presentan en las cuencas altas, media y baja, así como en el conjunto de la Cuenca por la alteración grave del sistema y la pérdida de biodiversidad (25)”.

Dentro de las soluciones que menciona el anterior comunicado se encuentran:

1. “La articulación interinstitucional e integración de instrumentos de gestión, planeación y observación
2. La integración de instrumentos financieros, así como técnicos y de monitoreo comunes para la operación regular y circunstancias extraordinarias del río
3. La implementación de proyectos comunes y específicos según las competencias constitucionales y legales de los diferentes actores involucrados” (25).

Finalmente, se especifica la forma de implementar la solución, que incluye una autoridad de Cuenca conformada en principio por un Consejo Estratégico de Cuenca el cual se convertirá en una Gerencia Estratégica de Cuenca mediante proyecto de Ley, que deberá presentar el Ministerio de Medio Ambiente. Dicha autoridad es la llamada a coordinar los diferentes aspectos relacionados con la complejidad ambiental de la Cuenca del Río Bogotá (2). La solución abordada por el Consejo de Estado incluye específicamente al sector de San Benito, como una de las causales para el incumplimiento ambiental en la cuenca media, así mismo, propone como solución la construcción cofinanciada en tres años del Parque Ecoeficiente Industrial para las curtimbres de San Benito con el propósito de tratar las aguas residuales, y asistencia técnica para cumplir con normas de vertimientos. (2).

Ilustración 15. Río Tunjuelo



Fuente: Google Maps

Teniendo en cuenta lo anterior, dentro de la estrategia de recuperación del Río Bogotá, se encuentra la implementación y construcción de una planta de tratamiento, que recogerá entre otros los vertimientos generados de las curtiembres de San Benito, sin embargo se debe tener en cuenta que, actualmente estos vertimientos se mezclan con aguas domésticas, debido al diseño estructural actual del alcantarillado de San Benito, estos llegan a la planta elevadora de Canoas de la Empresa de Acueducto y alcantarillado de Bogotá (EAAB); en la medida que los efluentes generados por las curtiembres de esta zona, disminuyan su carga contaminante, además de apoyar el proceso de descontaminación del río Bogotá, podría usarse para recuperar el caudal ambiental del río Tunjuelo, e inclusive con la Asociación de Curtidores Amigos del Río Bogotá (ACUARIO- es la agremiación de los curtidores de San Benito), con la cual la ECCI tiene vigente un convenio interinstitucional de beneficio mutuo, ha propuesto en sus mesas de trabajo la posibilidad de reusar el agua tratada en sus procesos industriales, de ésta forma se disminuye el consumo de agua potable y está solución se enmarca dentro de los lineamientos de la política de producción más limpia.

Por otro lado, con el fin de evaluar la actualidad ambiental de las curtiembres de San Benito, se evaluaron algunos expedientes de las mismas en la SDA, encontrando que en promedio cada empresa tiene una producción de 100 pieles al mes, y al mes consumen aproximadamente 75 m^3 de agua, algunas de las empresas reúsan el agua lluvia e inclusive recirculan agua del proceso (lavado de pisos), la mayoría cuenta con un pretratamiento y tratamiento primario, compuesto por equipos básicos, por lo que la mayoría son plantas manuales; el proceso consiste básicamente en separar las corrientes de agua de pelambre y curtición, y estas son sometidas separadamente a un pretratamiento (remoción de sólidos gruesos y grasas) , posteriormente estas dos corrientes se mezclan para igualar un pH entre 8,5 y 9 y así conseguir la precipitación del cromo. El tratamiento de agua se realiza por baches en la mayoría de empresas y la frecuencia depende de la cantidad de producción, sin embargo el promedio de descargas se encuentra en 20 m^3 al mes, algunas empresas usan coagulantes como el sulfato de aluminio y sulfato ferroso, también se usan en el tratamiento de aguas residuales cal, hidróxido de sodio y ácido fórmico, entre otros.

Dentro de la revisión de cumplimiento legal, todos los expedientes revisados presentan solicitud de permiso de vertimientos, las caracterizaciones reportan un cumplimiento de todos los parámetros de acuerdo a la resolución 3957 de 2009 de la SDA, los parámetros con mayor concentración son: DQO, DBO5 y cromo total.

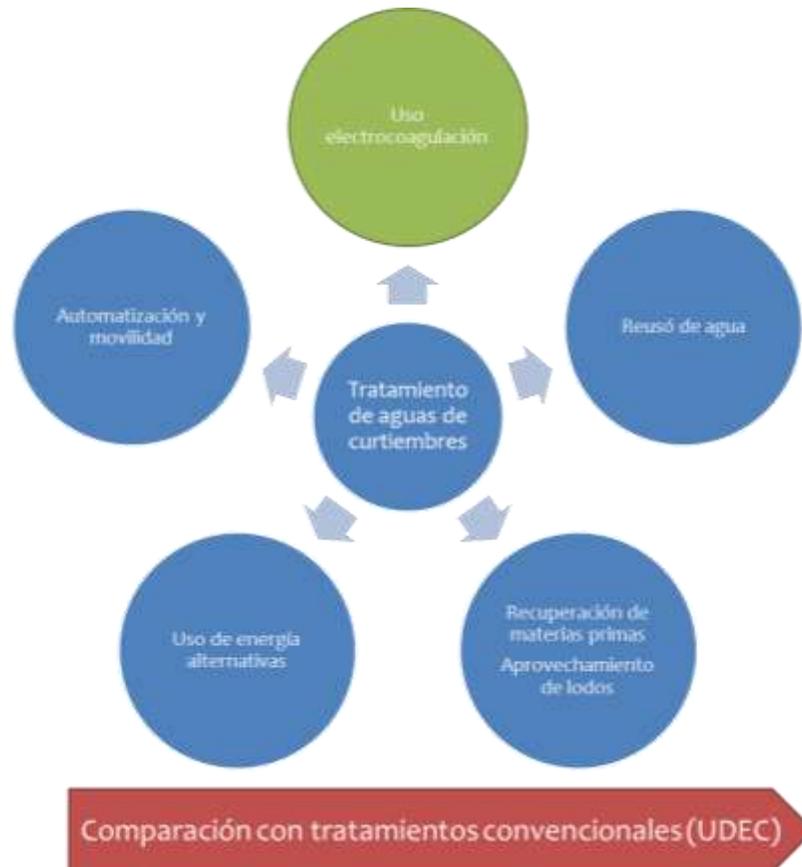
De acuerdo a esto, el único impedimento para que se otorgue el permiso de vertimientos, es el concepto de uso de suelo, ya que San Benito está clasificado como suelo residencial; sin embargo en las mesas de trabajo sostenidas con el presidente de ACUARIO, el ingeniero Gustavo Camelo, se ha establecido que la construcción de los parques Ecoindustriales que planteó el Consejo de Estado, habilitarán estos conceptos.

El presente proyecto de investigación se inició con la Universidad de Cundinamarca (UDEC) en el segundo semestre del año 2012, posteriormente, las líneas de investigación se dividieron y la UDEC trabajó en el diseño de la planta de tratamiento convencional para aguas residuales de curtiembres, mientras que la ECCI trabajó en la electrocoagulación de aguas residuales del mismo proceso.

La UDEC, implementó un tratamiento por neutralización, usando los mismos principios de las plantas de tratamientos actuales de las curtiembres, pero a gran escala incluyendo la fase de pretratamiento y llegada a la planta elevadora del Río Tunjuelo. Finalizada la etapa de investigación se realizó la comparación de los tratamientos en cuanto el componente ambiental, económico y social (ver sección 10).

Actualmente la ECCI consolidó un semillero de investigación en electrocoagulación de aguas residuales de curtiembres, que contempla diferentes ejes como se muestra a continuación:

Ilustración 16. Estructura del semillero.



Fuente: Semillero de investigación en electrocoagulación

Este semillero se presentó en el encuentro regional de semilleros del año 2014, siendo clasificado para el encuentro nacional y obteniendo el segundo puntaje más alto de todos los proyectos de la ECCI clasificados.

Teniendo en cuenta los avances en la investigación del tratamiento, el presidente de ACUARIO, consideró pertinente incluir dentro de los temas del semillero la recuperación del cromo residual de los lodos generados del proceso de tratamiento, y por esta razón, de acuerdo a la intención de la vicerrectoría de investigación, de certificar el laboratorio de Espectrofotometría de Absorción de

Atómica, se usarán los lodos aguas residuales de curtiembres para realizar este proceso.

Teniendo en cuenta los demás ejes del semillero como lo son el reúso de agua, el planteamiento de la planta a gran escala, su movilidad (como idea original), automatización, uso de energías alternativas para generar el funcionamiento de la planta y estandarización de parámetros eléctricos, se incorporó desde el año 2013, el ingeniero electricista Sebastian Solís, quien apoya toda la estructuración eléctrica del montaje; por otro lado desde el año 2014, se ha contado con el apoyo del departamento de Ciencias básicas y especialistas en estadística que permiten modelar las condiciones de la planta a gran escala, lo anterior para darle continuidad al semillero de investigación.

Finalmente durante el año 2014, en la participación del encuentro regional de semilleros, se clasificó al encuentro nacional, obteniendo el segundo mejor puntaje de la ECCI, este evento tendrá lugar en la ciudad de Tunja en octubre de 2014. Así mismo se destaca, la aprobación para la participación en el congreso de ingeniería 2014 en Argentina, este se desarrollará en noviembre de este año.

6. DISEÑO METODOLÓGICO

6.1 MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN

Para la caracterización físico-química del agua residual de las curtiembres, se realizó un muestreo compuesto proveniente de la planta elevadora del interceptor medio del río Tunjuelo, durante 3 días y 8 horas, los días 22, 23 y 24 de octubre de 2013. Con el fin de evaluar el comportamiento y cumplimiento con respecto a los límites establecidos en la Resolución 3957 de 2009 de la Secretaría Distrital de Ambiente SDA, por la cual se establecen los estándares ambientales en materia de vertimientos para Bogotá D.C y a su vez, establecer un análisis del comportamiento de los parámetros grasas y aceites, DQO, DBO5, Cromo total, sulfuros, Sólidos Sedimentables, Sólidos Suspendidos y Tensoactivos, a través del tiempo.

En la recolección de las muestras y análisis del laboratorio fueron tenidas en cuenta las metodologías definidas en el “Manual de métodos analíticos para el control de calidad del agua – GTC 2 – Icontec” (45), estos análisis fueron realizados con en las instalaciones de Tecur con el apoyo del ingeniero Gustavo Camelo y el ingeniero Mauricio Trujillo.

Evaluar la calidad fisicoquímica del agua residual muestreada en la planta elevadora del interceptor medio del río Tunjuelo, con base en los requerimientos establecidos para cada parámetro en la Resolución 3957 de 2009 de la SDA.

Los criterios de la calidad del agua se refieren a las concentraciones de los constituyentes que, si no son excedidos, permitirán concluir que el ecosistema acuático es apropiado para los múltiples usos del agua o definir la calidad del recurso para mantener los equilibrios ecológicos.

Se establecieron los parámetros a medir de acuerdo a la matriz agua de la SDA, que relaciona los parámetros de interés de acuerdo al sector productivo:

Ilustración 17. Matriz de parámetros por proceso productivo.

No.	Tema Principal	Subtema	Al	As	Ba	B	Cd	CN	Zn	Cu	Fenol	Cr+6	Cr	HC	Fe	Li	Mn	Hg	Mo	Ni	Ag	Pb	Se	Sulfuro	Color	DBO ₅	DQO	G y A	pH	SS	SST	Temp	SAAM	
88	Curtiembres	Curtido y preparado de cueros									1		1											1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
89		Acondicionamiento de pieles									1		1											1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
90		Acabado de pieles										1		1										1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
91		Fabricación de juguetes caninos de camaza										1													1		1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: Matriz de parámetros físico-químicos- SDA

Los equipos, materiales y reactivos utilizados en la caracterización se relacionan a continuación:

Tabla 13. Equipos, materiales y reactivos utilizados en la caracterización

Equipos de laboratorio	Reactivos	Materiales
Balanza analítica	Dicromato de potasio	Material vidrio
Bomba de vacío	Reactivo sulfúrico	Equipo para calentar a reflujo
Medidor de pH	Ferroína	Botellas DBO
Conductímetro	Sulfato ferroso amónico	Nevera
Medidor oxígeno disuelto	Mercurio sulfato	Papel filtro
Equipo de extracción	Ácido sulfámico	Embudo
Equipo destilación	Soluciones Buffer	
Equipo condensación	Agua destilada o para diluir	
	Éter de petróleo	
	Ácido sulfúrico	
	Solución estándar de calcio	
Fuente: Autora		

Ilustración 18. Materiales de laboratorio Tecur



Fuente: Autora

6.1.1 Preservación, almacenamiento y envío de muestras

En la tabla 14 se correlacionan los parámetros con el tipo de recipiente, capacidad, preservantes y tiempo máximo que puede transcurrir entre la toma de la muestra y su análisis, de acuerdo con él (46).

Tabla 14. Parámetros a medir con generalidades de preservación de muestra

Parámetro	Recipiente	Capacidad	Preservación	Duración de la muestra
pH	In situ	NA	No requiere	NA
Conductividad	In situ	NA	No requiere	NA
Grasas y aceites	Vidrio claro – boca ancha	1 litro	H2SO4 1:1 N 5 ml	3 meses
DQO	Vidrio ámbar	100 ml	H2SO4 99% 1 ml	3 meses
DBO5	Ámbar – al rebose sin aire (tapar dentro del agua)	500 ml	Sin preservar	3 días
Metales (CrT)	Vidrio o plástico	1 L	HNO3 99% 1 ml	4 meses
Sulfuros	Plástico	500 ml	Sin preservar	1 mes
SS	Cono Imhoff	1 L	-	-
SST	Plástico	1 L	Sin preservar	3 meses
SAAM				2 días
Fuente: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater				

6.1.2 Selección de Puntos de Muestreo

Mediante visitas al barrio San Benito y posterior indagación con las mesas de concertación y gremios involucrados, dentro de los cuales la Asociación de Curtiembres Amigos del Río Bogotá - ACUARIO- , se seleccionó el punto de muestreo bajo criterios técnicos, en donde se tuvieron en cuenta variables como la representatividad de la muestra y la conducción de los flujos cuando se realiza el vertimiento final.

Por otro lado, se realizaron reconocimientos de los sistemas de tratamiento de algunas de las industrias que permitieron su ingreso, verificando el nivel de tratamiento utilizado antes de realizar las descargas a la red de alcantarillado

El muestreo se realizó en la planta elevadora del interceptor medio del Río Tunjuelo, teniendo en cuenta que allí se unen las aguas residuales de la mayoría de las curtiembres de San Benito, y así mismo es en la parte posterior de esta planta donde se construiría la planta de tratamiento colectiva de las curtiembres. Es importante anotar, que a este punto de muestreo no sólo llegan las aguas residuales provenientes de las curtiembres, sino a su vez, ingresan aguas residuales domésticas del sector residencial de San Benito; aunque el Acueducto tiene conocimiento de está limitante, a la planta que tienen proyectada ingresarán todas las aguas residuales de la planta elevadora, pero sólo las unidades de tratamientos estarán determinadas por la caracterización de las aguas residuales de curtiembres. Lo anterior se justifica, teniendo en cuenta que la separación de redes y estructuración del alcantarillado podría ser mucho más costosa que la construcción de la planta. La ilustración 17 especifica la localización del punto de muestreo y la ilustración 18 las características generales del mismo, teniendo en cuenta las recomendaciones realizadas por ACUARIO.

Ilustración 19. Localización del punto de muestreo



Fuente: Autora

Ilustración 20. Punto de muestreo



Fuente: Autora

Se realizaron tres muestreos compuestos a la entrada de la planta elevadora del interceptor medio del río Tunjuelo, durante 8 horas. Se realizaron medidas de in situ de pH, temperatura y aforo de caudal, adicional se tomó medición de sólidos sedimentables y muestras para análisis en laboratorio.

La muestra tiene un fuerte olor, generado por el contenido de materia orgánica y su procedente descomposición, presenta color gris, que le confiere alta turbidez a la muestra.

La composición de las muestras se realizó teniendo en cuenta el volumen a componer por cada alícuota, el cual se obtuvo de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V_i = (Q_i * V) / (Q_p * n) \quad (9)$$

Donde:

V_i = Volumen de cada alícuota

V = Volumen total a componer

Q_p = Caudal promedio durante la jornada de aforo

Q_i = Caudal instantáneo de cada muestra original

N = Número de muestras tomadas

Ilustración 21. Muestreo de agua residual en la Estación de Bombeo San Benito.

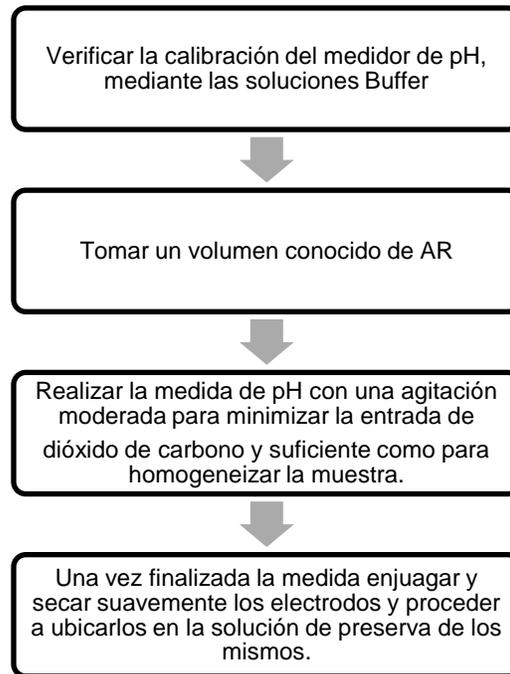


Fuente: Autora

6.1.3 Metodologías de análisis del agua residual

A continuación se describe la metodología para determinar cada parámetro y a su vez los resultados obtenidos:

Ilustración 22. Procedimiento para determinar pH



Fuente: GTC 2 - Manual de métodos analíticos para el control de la calidad del agua

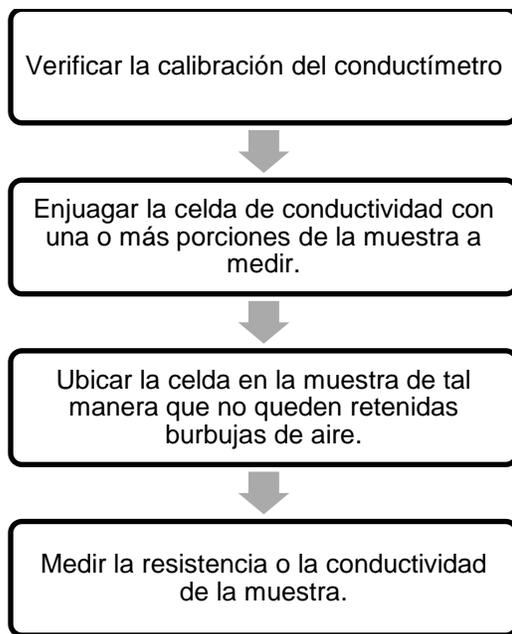
Tabla 15. Resultados de pH

No.	pH muestra								pH promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	
DIA 1	11,56	9,33	11,69	10,07	9,54	10,16	12,16	10,41	10,62
DIA 2	9,97	11,15	12,19	9,59	11,53	9,63	11,95	9,63	10,71
DIA 3	9,83	10,21	11,99	NR	NR	NR	NR	NR	10,68

Fuente: Autora

NR: No registra

Ilustración 23. Procedimiento para determinar Conductividad y Sólidos Disueltos



Fuente: GTC 2 - Manual de métodos analíticos para el control de la calidad del agua

Ilustración 24. Medición de conductividad



Fuente: Autora

Tabla 16. Resultados Sólidos Disueltos

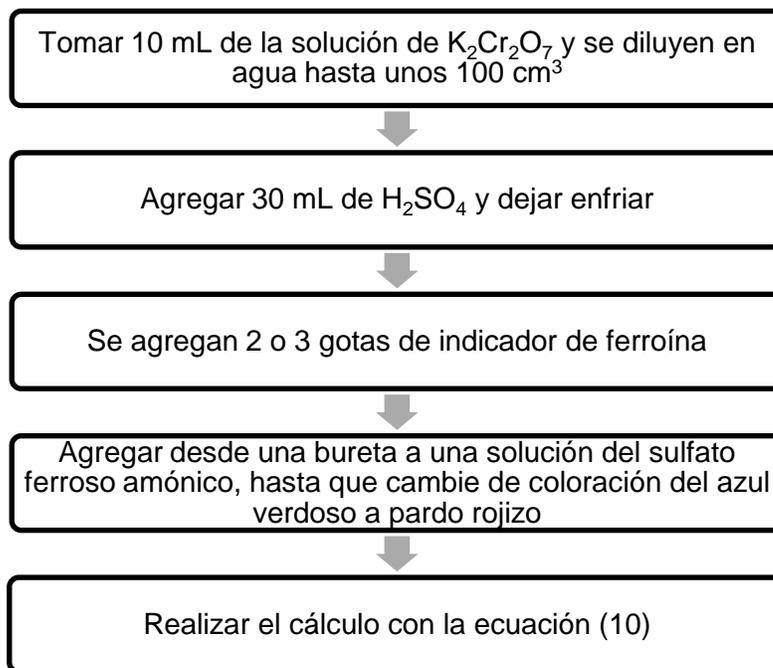
Muestra	Sólidos disueltos, dilución de 5ml	
Día 1	1666*5	8330
Día 2	1652*5	8260
Día 3	1687*5	8435
Fuente: Autora		

Ilustración 25. Medición de sólidos sedimentables



Fuente: Autora

Ilustración 26. Metodología para determinar DQO (valoración de la solución de sulfato ferroso amónico)



Fuente: GTC 2 - Manual de métodos analíticos para el control de la calidad del agua

$$M_s = \frac{A * 0,25}{B} \quad (10)$$

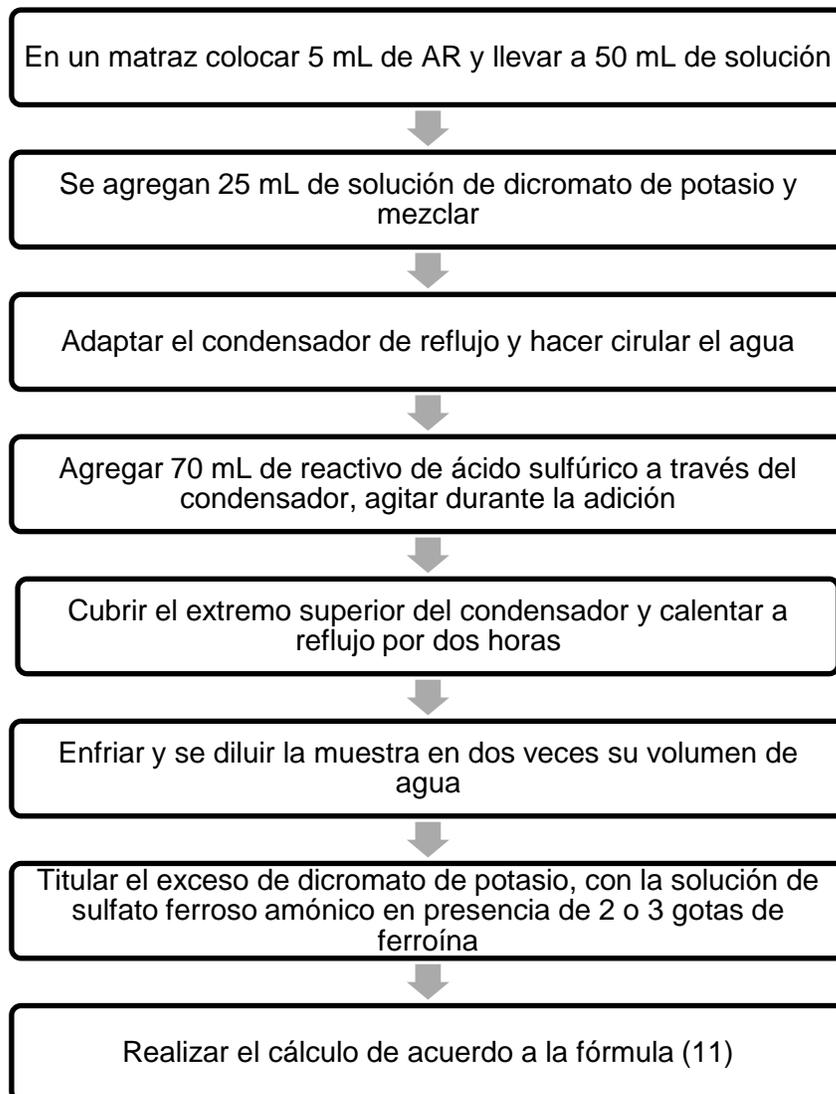
Donde:

M_s = Molaridad de la solución de sulfato ferroso amónico

A = mL de la solución 0,0417 de $K_2Cr_2O_7$ utilizados para la titulación

B = Volumen de la solución de sulfato ferroso amónico gastado

Ilustración 27. Procedimiento para determinar DQO



Fuente: GTC 2 - Manual de métodos analíticos para el control de la calidad del agua

$$DQO \left(mg \frac{O_2}{L} \right) = \frac{(A-B)*M*8000}{V} \quad (11)$$

Donde:

A = mL de solución de sulfato ferroso-amónico gastados en el ensayo en blanco

B = mL de solución de sulfato ferroso-amónico gastados para la muestra

M = Molaridad de la solución de sulfato ferroso-amónico

V = mL de muestra utilizada

Tabla 17 Resultados DQO

DQO	Muestra compuesta		
	Día 1	Día 2	Día 3
	3749,78	3333,12	3958,08

Fuente: Autora

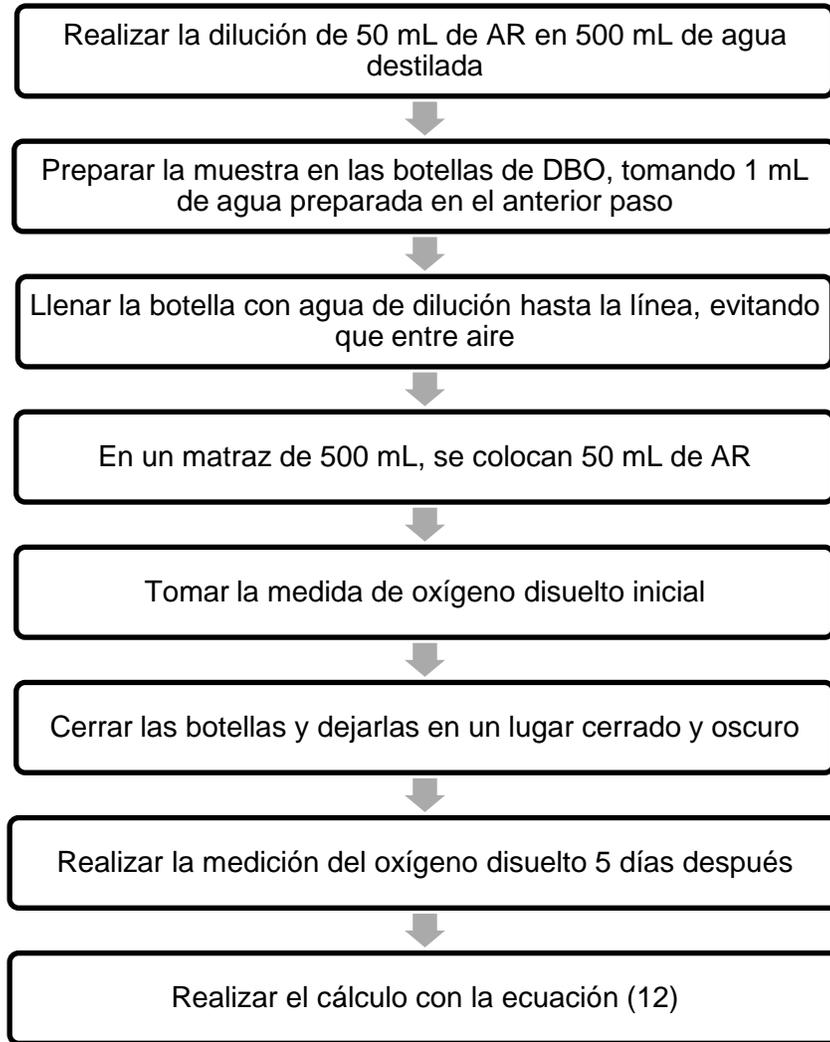
Se realizó una prueba para el día 2, neutralizando la muestra compuesto con ácido sulfúrico y se obtuvo una reducción de la DQO:

Tabla 18. Prueba neutralización H₂SO₄

DQO	Muestra compuesta Día 2	
	ANTES	Después
	3333,12	624,96

Fuente: Autora

Ilustración 28. Procedimiento para determinar DBO5



Fuente: GTC 2 - Manual de métodos analíticos para el control de la calidad del agua

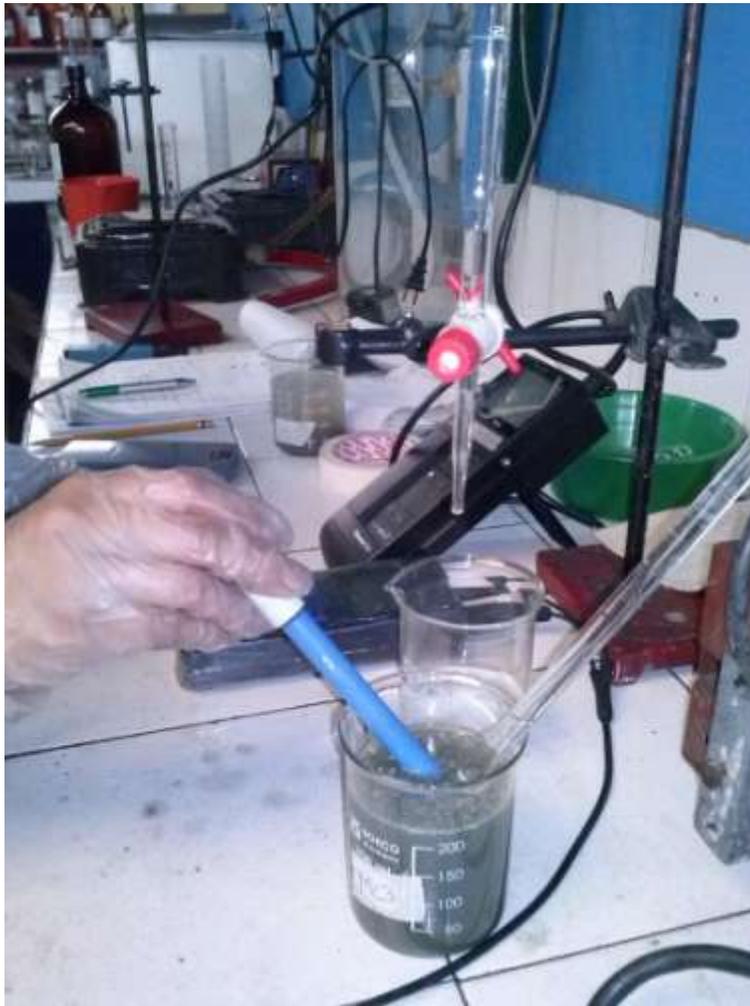
$$DBO_5 \left(\frac{mg}{L} \right) = OD_i - OD_5 \quad (12)$$

Donde:

OD_i = mg/L del oxígeno disuelto inicial

OD_5 = mg/L del oxígeno disuelto al quinto día

Ilustración 29. Medición DBO₅ y oxígeno disuelto



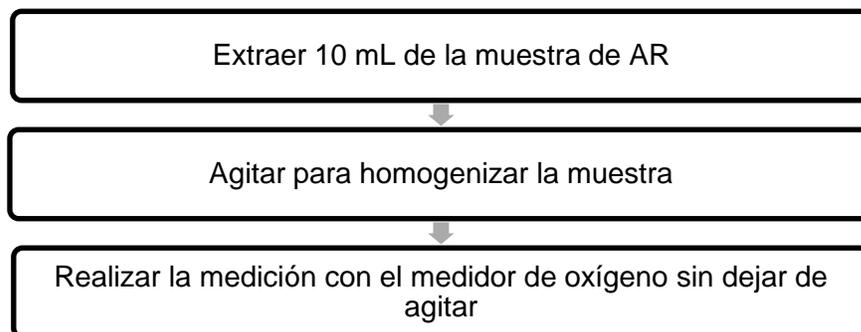
Fuente: Autora

Tabla 19 Resultados DBO₅

Muestra compuesta	pH inicial	pH final	OD-7	DBO 7	DBO 5
Día 1	10,62	6,63	0,74	589	420,71
Día 2	10,71	6,95	0,68	627	447,85
Día 3	10,68	6,56	0,77	579	413,57

Fuente: Autora

Ilustración 30. Procedimiento para determinar Oxígeno disuelto

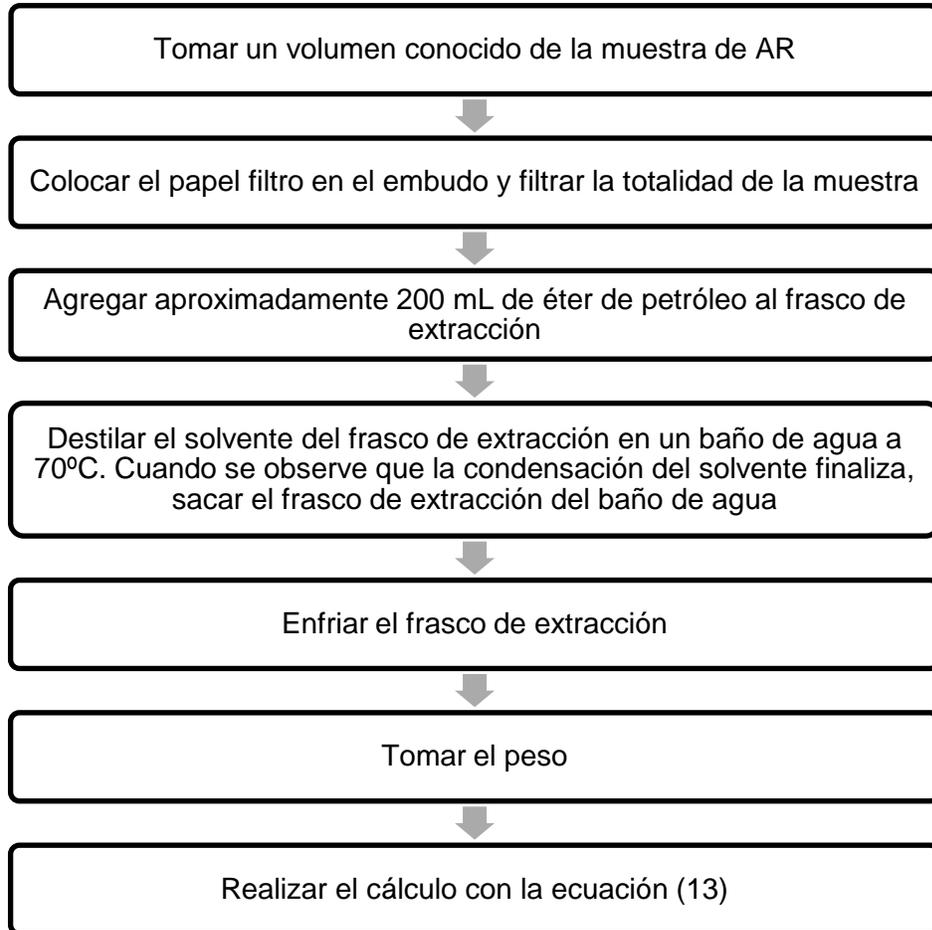


Fuente: GTC 2 - Manual de métodos analíticos para el control de la calidad del agua

Tabla 20. Resultados Oxígeno Disuelto

Muestra compuesta	OD
Día 1	6,16
Día 2	5,80
Día 3	6,34
Fuente: Autora	

Ilustración 31. Metodología para determinar Grasas y Aceites



Fuente: GTC 2 - Manual de métodos analíticos para el control de la calidad del agua

$$G \text{ y } A \left(\frac{mg}{L} \right) = \left((P_2 - P_1) * \frac{10^6}{V} \right) \quad (13)$$

Donde:

P_1 = Peso del matraz (libre de humedad) antes de la extracción

P_2 = Peso el matraz después de la extracción y el secado

V_1 = Volumen de la muestra filtrada

10^6 = Factor de conversión

Ilustración 32. Medición Grasas y aceites



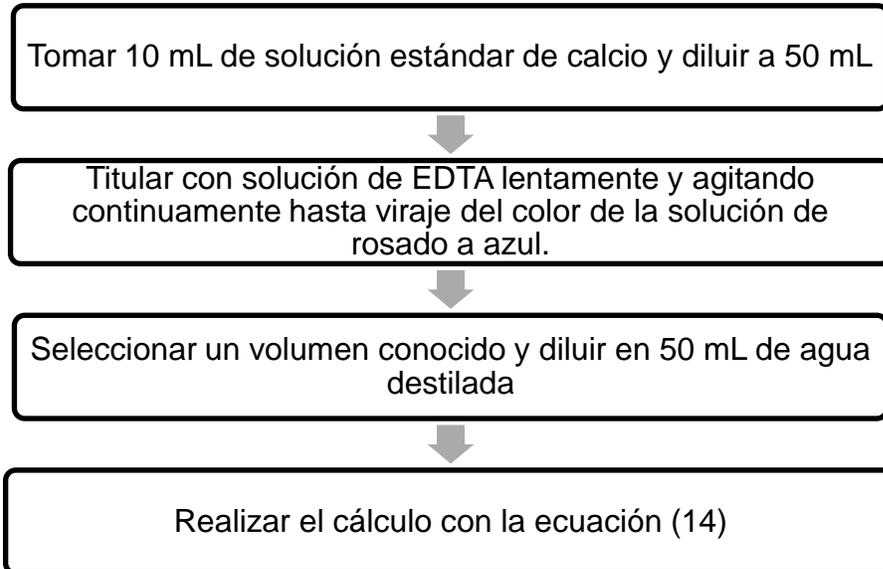
Fuente: Autora

Tabla 21. Resultados Grasas y Aceites

Muestra compuesta	Volumen agua de muestra	Disolvente cloroformo	Aceites y grasa (g/L)
Día 1	25 ml	100 ml	13,02
Día 2	60 ml	100 ml	11,16
Día 3	25 ml	100 ml	10,07

Fuente: Autora

Ilustración 33. Procedimiento para determinar cromo total



Fuente: GTC 2 - Manual de métodos analíticos para el control de la calidad del agua

$$CrT \left(\frac{mg}{L} \right) = \left(T * \frac{G_2}{V_2} \right) \quad (14)$$

Donde:

T = mg de calcio equivalentes a 1000 mL

V2 = Volumen muestra tomados para la determinación, mL

G2 = Volumen de solución de EDTA consumidos en la titulación de la muestra, mL

La tabla 22, muestra los resultados obtenidos, para este parámetro en especial se realizó la adición de policloruro de aluminio como coagulante, para verificar el efecto en la disminución de la carga contaminante por cromo:

Tabla 22. Resultados Cromo Total

Muestra	Cromo Sin tratamiento (mg/L)	Ajuste pH más policloruro de aluminio (con tratamiento) (mg/L)
1	0,2	0,08
2	0,16	0,09
3	0,14	0,08
Fuente: Autora		

6.1.3.1 Determinación de sulfuros y tensoactivos

Al laboratorio Consultoría y Servicios Ambientales -CIAN LTDA- (acreditado por el IDEAM) se remitió una muestra de agua residual para la determinación de sulfuros y tensoactivos SAAM, debido a que no se disponía de los equipos para su análisis. La obtención de la muestra se llevó a cabo de manera puntual en la Planta Elevadora Interceptor Medio Río Tunjuelo. Los métodos utilizados por el laboratorio se citan a continuación:

Tabla 23. Métodos utilizados para el análisis de sulfuros y SAAM del AR.

Parámetro	Método
Sulfuros	S.M 4500 – S2 D Y E
Tensoactivos	S.M 5540 C
Fuente: Consultoría y Servicios Ambientales, CIAN LTDA	

6.1.4 Resultados de los laboratorios

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los análisis a las muestras, comparando respecto a la resolución 3957 de 2009 de la Secretaría Distrital de Ambiente para los parámetros objeto de estudio.

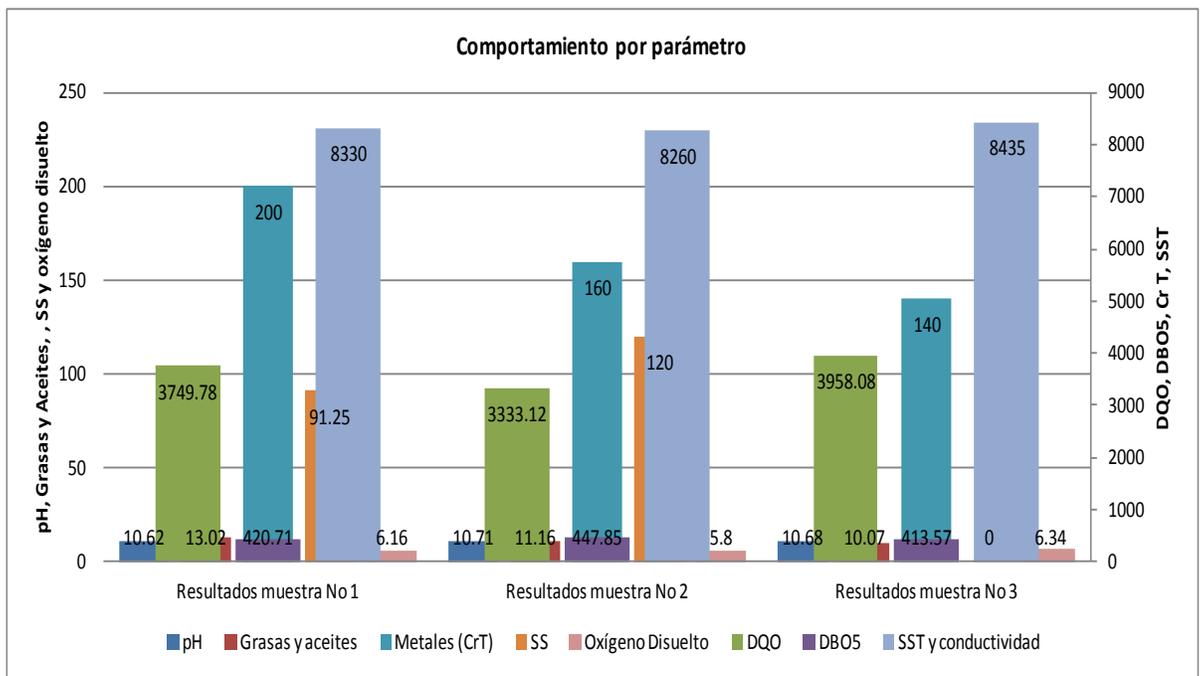
Tabla 24. Resultados de laboratorio

Identificación de la muestra					
Número de muestras		3			
Lugar de muestreo		Planta elevadora interceptor medio Río Tunjuelo			
Tipo de muestreo		Compuesto			
Fecha de muestreo		22, 23 y 24 de octubre de 2013			
Parámetro	Unidades	Resultados muestra No 1	Resultados muestra No 2	Resultados muestra No 3	Límites Resolución 3957 de 2009 de SDA
pH	Unidades	10,62	10,71	10,68	5 a 9
Grasas y aceites	mg/L	13,02	11,16	10,07	100
DQO	mg/L O ₂	3749,78	3333,12	3958,08	1500
DBO ₅	mg/L O ₂	420,71	447,85	413,57	800
Metales (CrT)	mg/L	0,2	0,16	0,14	1
SS	ml/L – h	91,25	120		2
SST y conductividad	mg/L	8330	8260	8435	600
Oxígeno Disuelto	mg/L	6,16	5,8	6,34	NA
Monitoreo puntual					
Parámetro	Unidades	Resultados		Límites Resolución 3957 de 2009 de SDA	
Sulfuros	mg/L	238		5	
Tensoactivos (SAAM)	mg/L	6,743		10	
Fuente: Autora					

6.1.5 Análisis De Resultados

De acuerdo a los resultados obtenidos se realizó relación de los parámetros respecto al día de toma de la muestra, esto se hizo con el fin de verificar la homogeneidad de los resultados por día, de lo cual se puede concluir que parámetros como sólidos suspendidos totales, pH, grasas y aceites, cromo total, oxígeno disuelto, DQO y DBO5 son homogéneos a través del tiempo, es decir no presentan cambios bruscos en su concentración.

Ilustración 34. Comportamiento por parámetro



Fuente: Autora

Una vez obtenidas las concentraciones de los contaminantes, se calculan las UCH, según la resolución 339 de 1999, es una medida que permite evaluar de

manera general el grado de contaminación de un efluente respecto a los límites establecidos por la autoridad ambiental, se evaluaron las UCH's de acuerdo a la ecuación (15) por parámetro y día de muestreo.

$$UCH = \frac{CAG - C_nAG}{C_nAG} + \frac{CDBO_5 - C_nDBO_5}{C_nDBO_5} + \frac{CSST - C_nSST}{C_nSST} + \dots + \quad (15)$$

Donde:

CAG = Concentración de aceites y grasas

CDBO₅ = Concentración de DBO₅

CSST = Concentración de CSST

C_n = Corresponde a la concentración máxima permitida para cada parámetro medido

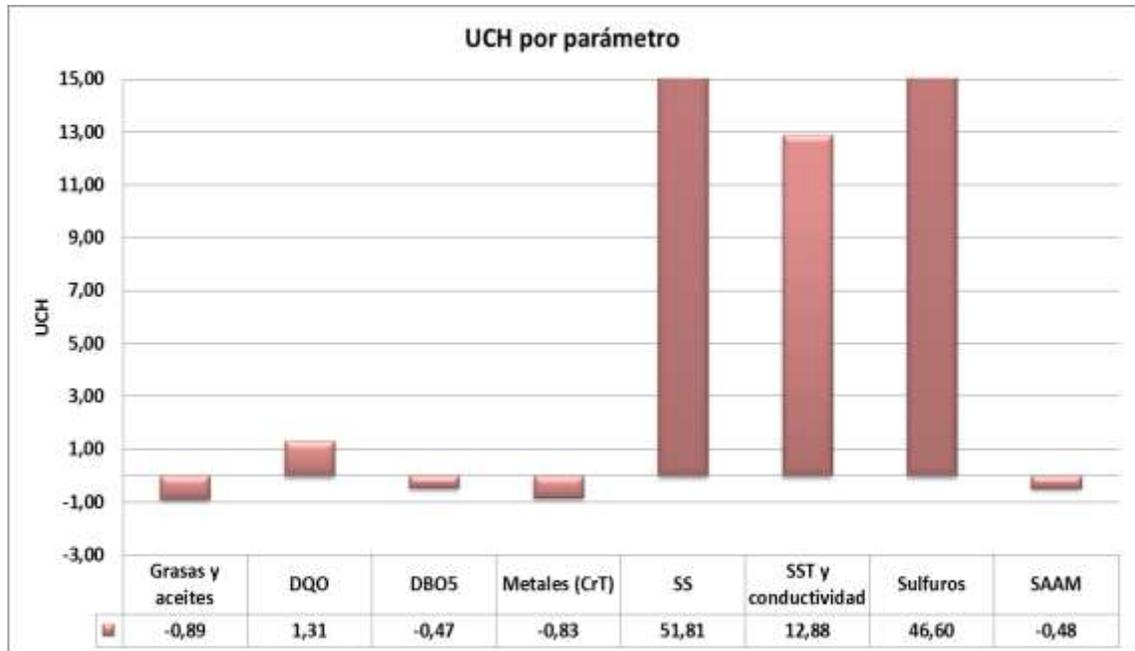
Calculada la ecuación (7), se realiza la clasificación por UCH, teniendo en cuenta los rangos de la Tabla 25 correspondiente al grupo 2 de los sectores de la producción, ya que en este se incluyen las curtiembres.

Tabla 25. Clasificación por UCH por rangos de valores

Valor de la UCH	Grado de significancia del aporte contaminante
0	Bajo
0 - 2,5	Medio
2,5 - 5	Alto
> 5	Muy alto
Fuente: Resolución 339 de 1999	

Se realizó el análisis de las UCH por parámetro determinando que los SS, SST y sulfuros son los contaminantes que mayor significancia de contaminación tienen en el vertimiento.

Ilustración 35. UCH por parámetro

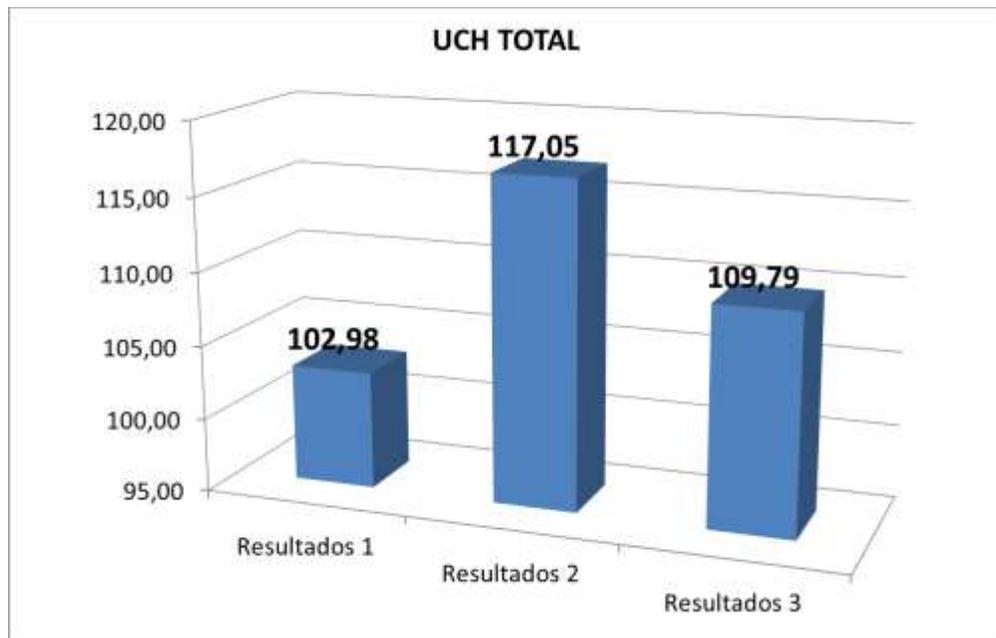


Fuente: Autora

Se establece que el vertimiento en relación caracterizado, presenta alta carga contaminante respecto a los límites definidos por la autoridad ambiental (UCH >5, muy alto).

El día 2 se presentó la mayor carga contaminante, está se generó debido al alto contenido de sólidos sedimentables. Para los parámetros de SAAM y sulfuros se realizó una extrapolación para todos los días, con el fin de incluir estos parámetros en la UCH total.

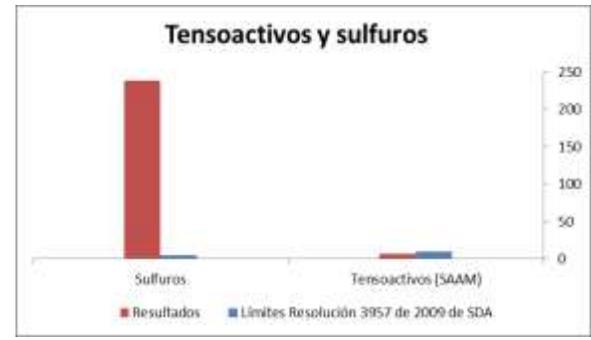
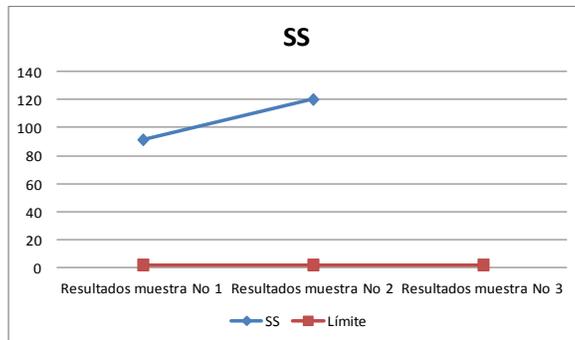
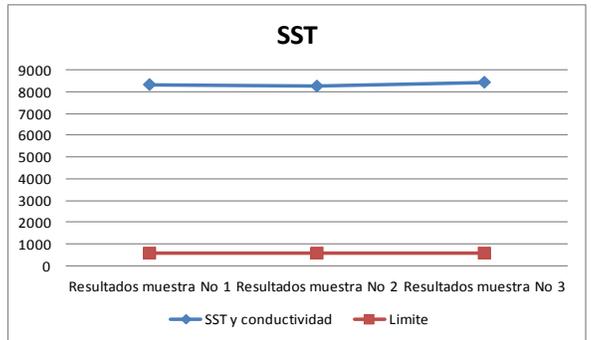
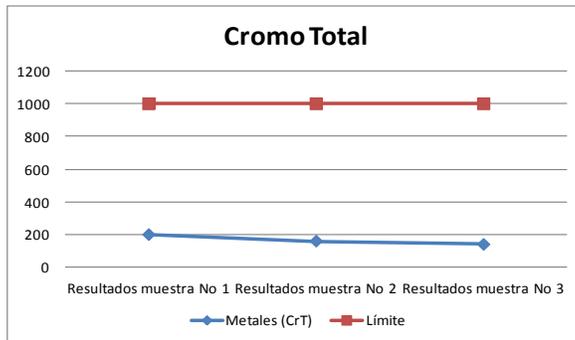
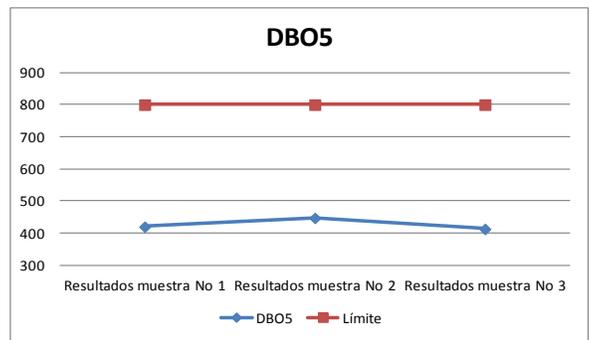
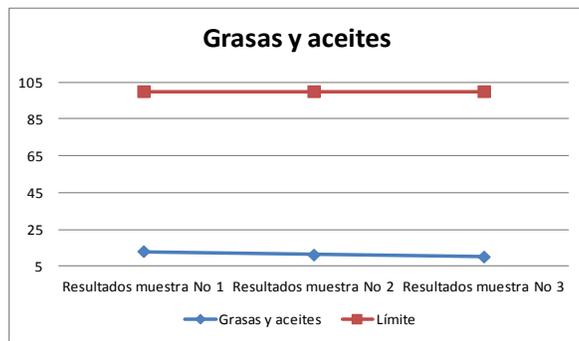
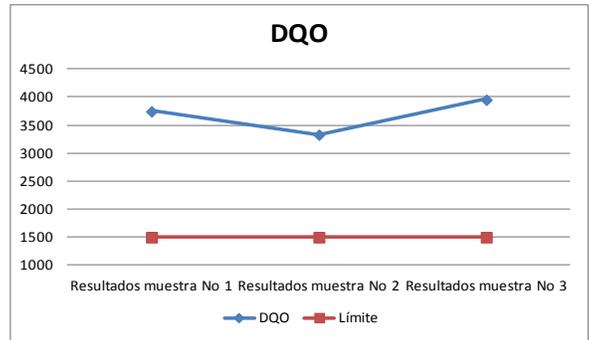
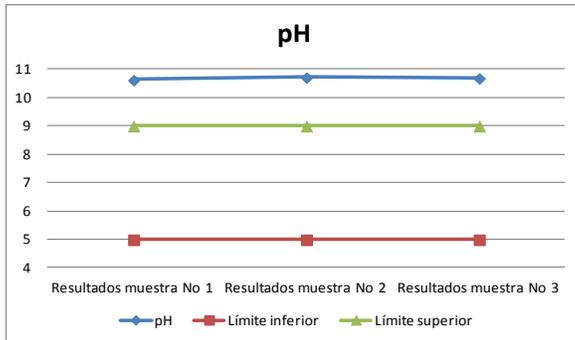
Ilustración 36. UCH Total por día



Fuente: Autora

Teniendo en cuenta lo anterior sólo los parámetros de grasas y aceites, como total y DBO5, se encuentran por debajo de lo requerido por la norma. Los parámetros de Sulfuros, DQO, SS y SST se encuentran muy por encima de la norma llegando incluso a ser 12 veces mayor que la norma, para el caso de SST; en general los sólidos totales de agua representan gran parte de la carga orgánica del efluente y deben constituirse medidas eficientes de remoción de este parámetro.

Ilustración 37. Comparación de resultados vs norma



Fuente: Autora

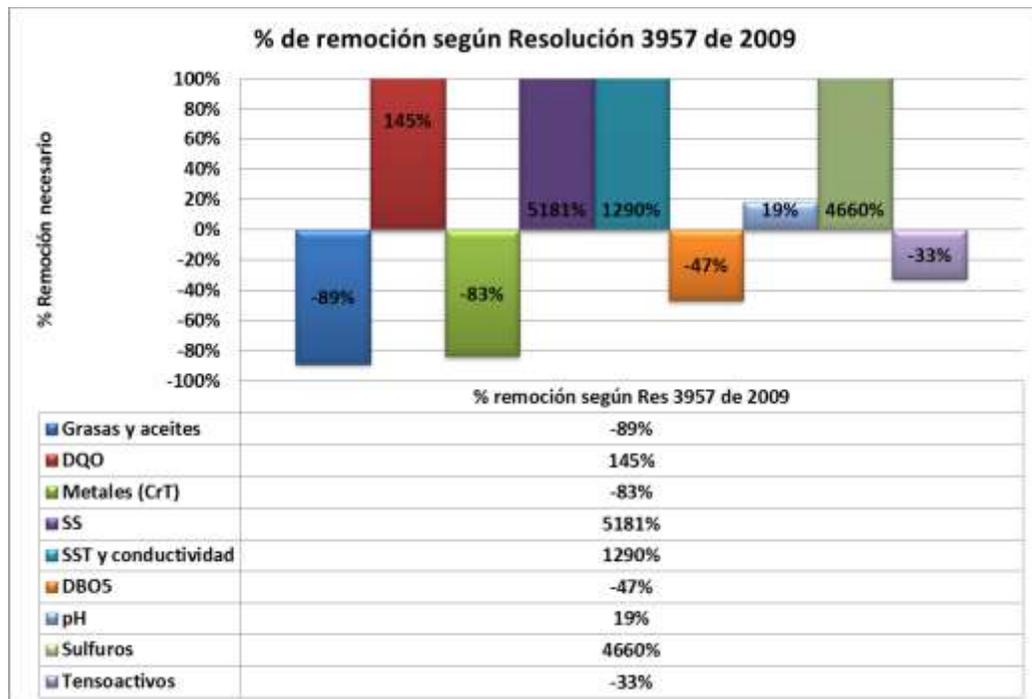
Posteriormente se evaluó el porcentaje de remoción necesario, teniendo en cuenta el cumplimiento de la Resolución 3957 de 2009 y por otro lado se realizó esta comparación enfocada en el proyecto de norma de vertimientos que se está trabajando en el congreso de la república.

Tabla 26. Comparación de cumplimiento con normatividad actual y proyecto de ley

Parámetro	Unidades	Resultados muestra No 1	Resultados muestra No 2	Resultados muestra No 3	Promedio	Límites Resolución 3957 de 2009 de SDA	Límites proyecto de ley vertimientos	% remoción según Res 3957 de 2009	% remoción según proyecto de ley
pH	Unidades	10,62	10,71	10,68	10,7	5 a 9	6 a 9	19%	19%
Grasas y aceites	mg/L	13,02	11,16	10,07	11,4	100	80	-89%	-86%
DQO	mg/L O2	3749,78	3333,12	3958,08	3680,3	1500	1200	145%	207%
DBO5	mg/L O2	420,71	447,85	413,57	427,4	800	600	-47%	-29%
Metales (CrT)	mg/L	0,2	0,16	0,14	0,2	1	1,5	-83%	-89%
SS	ml/L - h	91,25	120		105,6	2	2	5181%	5181%
SST y conductividad	mg/L	8330	8260	8435	8341,7	600	600	1290%	1290%
Oxígeno Disuelto	mg/L	6,16	5,8	6,34	6,1	NA		NA	NA
Cloruros	mg/L					0	1200	NA	NA
Sulfuros	mg/L			238	238	5	3	4660%	7833%
Tensoactivos	mg/L			6,743	6,743	10	5	-33%	35%

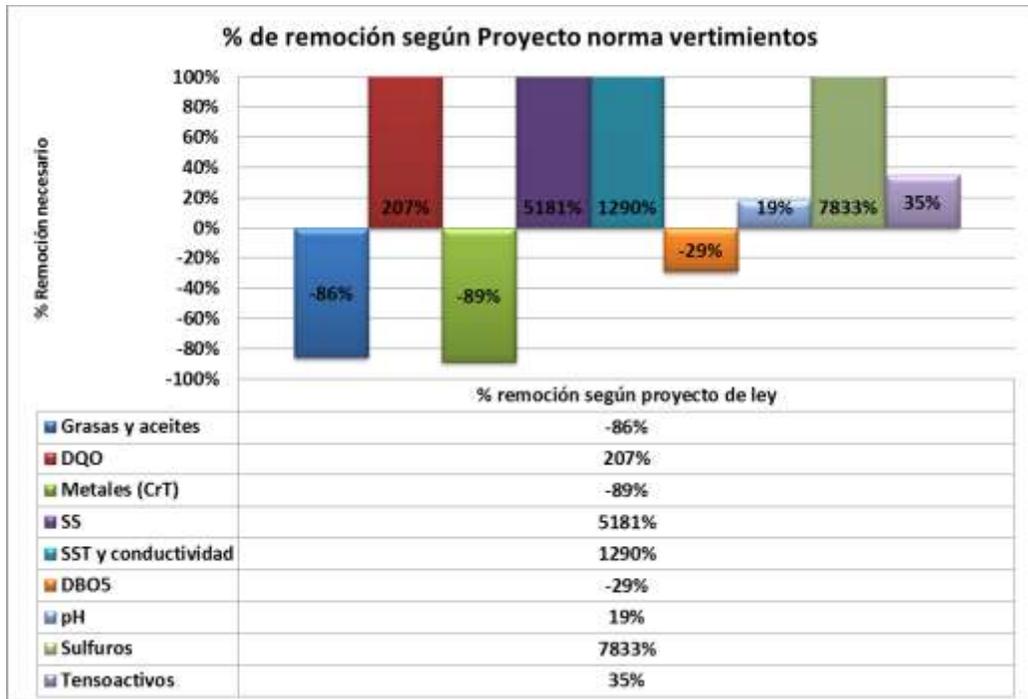
Fuente: Autora

Ilustración 38. % remoción según Resolución 3957 de 2009



Fuente: Autora

Ilustración 39. % remoción según proyecto norma vertimientos



Fuente: Autora

De acuerdo a las gráficas anteriores, los parámetros establecidos como críticos para el diseño de las unidades de tratamiento son: DQO, SS, SST, pH y sulfuros.

6.2 MONTAJE DE LA CELDA

Con el fin de realizar las pruebas de tratabilidad del agua residual proveniente de las curtiembres de San Benito, se realizó un prototipo de celda de electrocoagulación, teniendo en cuenta la recopilación bibliográfica hecha.

A continuación se describen los dos montajes realizados, el primer prototipo se realizó de una capacidad alta, sin embargo tuvo que ser modificado por practicidad del tratamiento y eficiencia, así mismo se mejoró el ajuste de los electrodos a la celda y se estandarizaron las distancias en los mismos.

Tabla 27. Primer montaje de electrocoagulación.

Descripción de la celda	
	
Parámetro	Características
Características del agua	
Etapa o proceso del agua	Planta elevadora Interceptor del Río Tunjuelo
pH	10,67
Conductividad	1668
DQO	3680,32
Sólidos suspendidos totales (SST)	8341,6
Sólidos sedimentables (SS)	105.625
Sulfuros	238
Características de la Fuente de energía	
	

Referencia y marca	6264B DC POWER SUPPLY HEWLETT PACKARD
Intensidad de corriente mín-máx	0-24 Amperios
Tensiones mín-máx	0-24 Voltios
Tipo de corriente	Continua
	
Resistencia	<p>3 resistencias de 30,66 Ω Ohmios cada una</p> <p>Nota: La capacidad total del banco de resistencias es en promedio de 90 Ω, sin embargo sé está usando solamente una de las resistencias.</p> <p>Las resistencias son necesarias, porque evitan posibles cortocircuitos, al no tener certeza de la densidad de corriente superficial que soporta cada electrodo.</p>
Características de la Celda	
	
Material	Polietileno
Volumen máximo	9 litros

Características de los Electroodos



Tipo electrodos	Ánodo	Cátodo
Material	Aluminio	Hierro
Número	1-2-3	1-2-3
Dimensiones	13,5 cm X 4,5 cm	
Área Total	60,75 cm ²	
Área efectiva	33,75 cm ²	
Densidad de corriente	1.534 A/cm ²	
Disposición	En paralelo	
Distancia entre electrodos	4 cm	

Características de los Equipos de medición



Referencia y marca multímetro (voltímetro)	EC-890F TMC-150
Referencia y marca multímetro (amperímetro)	Gold Star DM-9183
Se usaron dos multímetros para facilitar la medición de corriente (amperímetro) y tensión (voltímetro).	
El voltímetro fue configurado como voltímetro de corriente continua, por su parte el amperímetro también fue configurado como corriente continua. Existe una limitante en los equipos de medición y es que para la medición de intensidad de corriente llega sólo hasta 2 A, debido al fusible de protección contra sobrecorriente, interno del equipo.	
Fuente: Autora	

Las especificaciones para la celda de electrocoagulación, se establecieron de acuerdo a la revisión bibliográfica de tesis nacionales e internacionales en pruebas experimentales para tratamiento de aguas por electrocoagulación.

La celda es un modelo cubeta tipo bach, en la cual, los electrodos se disponen en forma de placas paralelas conectados en serie a una fuente de tensión continua, CC, el volumen de la celda ocupada por los electrodos se define como zona de reacción y determina el área efectiva de los mismos, en esta se dan los procesos de desestabilización de partículas, coagulación y sedimentación. Los lodos formados pueden depositarse en la parte superior de la celda cuando su densidad es baja o precipitar cuando su densidad es alta, para luego ser removidos (32).

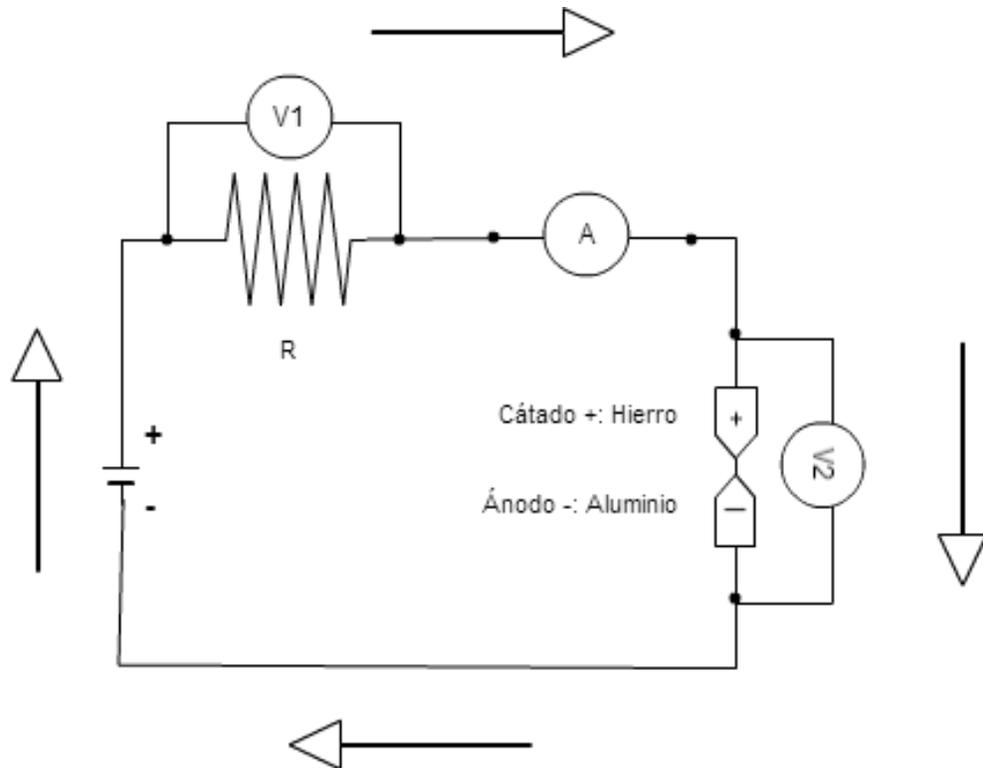
Las características iniciales del agua, determinaron en gran medida el diseño de la celda de electrocoagulación en cuanto a las dimensiones, debido a la cantidad de sólido contenido, así mismo estas características permitieron seleccionar el electrodo de sacrificio, teniendo en cuenta que la mayoría de los papers consultados mencionan este tipo de electrodos para curtiembres y así mismo sus costos son bajos respecto a los demás materiales usados (platino, iridio, cobalto, entre otros. Respecto a la disposición de los electrodos dentro de la celda y el número de los mismos se estableció, con pruebas preliminares, el tamaño de la celda y las pérdidas de energía dentro de la celda por distribución de la energía. Finalmente para la distancia entre electrodos el ingeniero Álvaro Arango, menciona en su trabajo experimental que para separaciones entre electrodos

inferiores a 10 mm los tratamientos se hacen prolongados, adicionalmente se presentaron atascamientos por deposición de lodo sobre la superficie de los electrodos, impidiendo la circulación del medio acuoso y la generación de turbulencias que favorecen la coagulación dando como resultado bajas remociones de DQO (32). El área efectiva depende del diseño estructural de la celda, ya que este debe garantizar la estabilidad de los electrodos y así mismo la versatilidad para implementar diferentes pruebas en cuanto a configuración y disposición.

Relacionado con la fuente, se seleccionó una fuente que tuviera amplios rangos de tensión y tensión, esto debido a los diferentes rangos de trabajo que se encontraron en la revisión bibliográfica.

A continuación se presenta el esquema de distribución electrónica del montaje de electrocoagulación:

Ilustración 40. Esquema de distribución electrónica del montaje de electrocoagulación



Fuente: Autora

V1= Voltímetro, medición tensión fuente CC; A= Amperímetro, medición corriente;
V2= Voltímetro, medición tensión en los electrodos; R= Banco de resistencias auxiliar

De acuerdo a los resultados obtenidos en las primeras pruebas, se realizó el prototipo definitivo para realizar las pruebas de tratabilidad.

Tabla 28. Montaje de electrocoagulación definitivo.

Descripción de la celda	
	
Parámetro	Características
Características del agua	
Etapa o proceso del agua	Planta elevadora Interceptor del Río Tunjuelo
pH	10,67
Conductividad	1668
DQO	3680,32
Sólidos suspendidos totales (SST)	8341,6
Sólidos sedimentables (SS)	105.625
Sulfuros	238
Características de la Fuente de energía	
	

Referencia y marca	6264B DC POWER SUPPLY HEWLETT PACKARD
Intensidad de corriente mín-máx	0-24 Amperios
Tensiones mín-máx	0-24 Voltios
Tipo de corriente	Continua
	
Resistencia	3 resistencias de 30,66 Ω Ohmios cada una Nota: La capacidad total del banco de resistencias es en promedio de 90 Ω , sin embargo sé está usando solamente una de las resistencias.
Características de la Celda	
	
Material	Acrílico

Volumen máximo	1.7 litros	
Características de los Electrodos		
		
Tipo electrodos	Ánodo	Cátodo
Material	Aluminio	Hierro
Número	1-2-3	1-2-3
Dimensiones	8,3 cm X 4,8 cm	
Área Total	49,59 cm ²	
Área efectiva	39,84 cm ²	
Disposición	En paralelo	
Distancia entre electrodos	1 cm	
Características de los equipos de pretratamiento		
		

Marca agitador electromagnético	SOLOGEX
Características de los Equipos de medición	
	
Referencia y marca multímetro (voltímetro)	EC-890F TMC-150
Referencia y marca multímetro (amperímetro)	Gold Star DM-9183
	
Referencia y marca multiparámetro (termómetro, conductímetro y pH-metro)	JENWAY 3220 pH meter



Referencia y marca balanza analítica

Satorius



Referencia y marca cronómetro

Samsung S4 mini

Se usaron dos multímetros para facilitar la medición de tensión (voltímetro) y corriente (amperímetro).

El voltímetro fue configurado como voltímetro de corriente continua, por su parte el amperímetro también fue configurado como corriente continua. Existe una limitante en los equipos de medición y es que para la medición de intensidad de corriente sólo se puede llegar a 2 A, debido al fusible contra sobrecorriente, interno del equipo.

Fuente: Autora

6.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo del modelo experimental, se realizó un listado de las variables dependientes e independientes:

Tabla 29. Listado de variables para los ensayos

VARIABLES	
Independientes	Dependientes
Ánodo	Consumo energía
Cátodo	Corriente (A)
No electrodos – configuración	DQO
Tensión (Vcc)	Sulfuros
Tiempo (min)	Conductividad
Pretratamiento	SST
pH	SS
Distancia electrodos (cm)	pH
Dimensiones de los electrodos	Resistencia del banco
Dimensiones de la celda	Potencia de pérdidas
Modo de conexión de los electrodos	Costos
	Temperatura
	Peso de los electrodos
	Interferencia de los electrodos
Fuente: Autora	

De acuerdo a la tabla anterior y la revisión bibliográfica y las primeras pruebas de tratabilidad, se establecieron los rangos en los cuales debían realizarse las pruebas de acuerdo a cada variable dependiente:

Tabla 30. Rangos de las variables independientes

Variable independiente	Rangos
Ánodo	Hierro-Aluminio
Cátodo	Hierro-Aluminio
No electrodos – configuración	2-2, 2-3, 3-2, 3-3
Tensión (Vcc)	8-16-24
Tiempo (min)	10-20
Pretratamiento	Agitación - Precipitación
pH	Ácido (5); Básico (10)
Dimensiones de los electrodos	13,5 cm X 4,5 cm ó 8,3 cm X 4,8 cm
Dimensiones de la celda	9 – 1.7 L
Distancia electrodos (cm)	1-5 cm
Modo conexión de los electrodos	MP-P, MP-S, BP-S
Fuente: Autora	

Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica realizada, se determinó que aunque el pH, el pretratamiento, las características, la configuración y distancia de los electrodos son variables independientes, el análisis y correlación de éstas pueden definirse en las primeras pruebas, identificando los rangos de trabajo definitivos para el modelo experimental. Por esta razón el diseño experimental se basó en la definición de variables específicas, controlando las demás en las que se mediría la eficiencia del tratamiento (variables dependientes), tensión y tiempo. Para esto, se establecieron algunas variables fijas de acuerdo a la revisión bibliográfica y se dejaron las experimentales debido a su incidencia en el proceso:

Tabla 31. Rangos de las variables independientes establecidos

Variable independiente	Rangos establecidos	Rangos a experimentar
Ánodo	Aluminio	-
Cátodo	Hierro	-
No electrodos – configuración	2-2	
Tensión (Vcc)	-	1 – 3 – 5
Tiempo (min)	-	10-20
Pretratamiento	-	Agitación (250 rpm) – Sin agitación
pH	-	Ácido (4 ó 6); Básico (10)
Dimensiones de los electrodos (cm ²)	8,3 X 4,8	-
Volumen de la celda (L)	1.7	-
Distancia electrodos (cm)	1	-
Modo de conexión de los electrodos	-	MP-P, MP-S, BP-S
Fuente: Autora		

Posteriormente se establecieron los métodos de medición para cada variable:

Tabla 32. Métodos de medición para las variables

Variable de respuesta o de interés			
Variable	Unidades	Método	Equipo de medición
Consumo energía	kW-h	Matemático	Cálculo
Corriente	Amperios	Medición directa	Multímetro
DQO	mg/L	Titulométrico	Cálculo
Sulfuros	mg/L	Titulométrico – colorimétrico	Cálculo
SST	mg/L	Gravimétrico	Cálculo
SS	mg/L	Comparación visual	Cono Imhoff
Conductividad	S/m	Medición directa	Multiparámetro
Resistencia del banco	Ohmio Ω	Medición directa	Multímetro
Interferencia de electrodos: Aluminio y hierro	mg/L	Absorción atómica	Espectrofotómetro
Potencia de pérdidas	W	Cálculo matemático	Multímetro
Temperatura	°C	Medición directa	Termómetro digital
Peso electrodos	Mg	Medición directa	Balanza analítica
pH	Unidades de pH	Potenciométrico	Multiparámetro
Fuente: Autora			

Es importante aclarar que algunas variables que influyen en el proceso de electrocoagulación, referenciadas en la bibliografía no fueron tomadas en cuenta teniendo en cuenta el alcance del presente trabajo de grado: tipo de corriente, polaridad de los electrodos y mejoramiento de la conductividad.

Finalmente se estableció el número de ensayos a realizar, el número de análisis eléctricos y físico-químicos, así como las condiciones de cada uno:

Tabla 33. No de ensayos de electrocoagulación a realizar

No ensayos	No variables salida	No variables entrada	No total variables	Tiempo ensayos (h)
30	510	510	1010	20
Fuente: Autora				

Tabla 34. No de análisis físico-químicos

No ensayos	Entrada (análisis químicos)	Salida (análisis químicos)
30	2	32
Fuente: Autora		

Tabla 35. Condiciones para cada ensayo

No ensayo	Pretratamiento	pH	Tensión (Vcc)	Tiempo (min)	Modo conexión de los electrodos
Ensayo 1	Sin agitación	4	1	5	MP-P
Ensayo 2	Sin agitación	4	1	12	MP-P
Ensayo 3	Sin agitación	4	1	20	MP-P
Ensayo 4	Agitación	4	3	5	MP-P
Ensayo 5	Agitación	4	3	12	MP-P
Ensayo 6	Agitación	4	3	20	MP-P
Ensayo 7	Agitación	4	3	5	MP-P
Ensayo 8	Agitación	4	3	12	MP-P
Ensayo 9	Agitación	4	5	5	MP-P

Tabla 35 (Continuación)

No ensayo	Pretratamiento	pH	Tensión (Vcc)	Tiempo (min)	Modo conexión de los electrodos
Ensayo 10	Agitación	4	3	20	MP-P
Ensayo 11	Agitación	4	5	12	MP-P
Ensayo 12	Agitación	4	5	20	MP-P
Ensayo 13	Agitación	6	3	5	MP-P
Ensayo 14	Agitación	6	3	12	MP-P
Ensayo 15	Agitación	6	3	20	MP-P
Ensayo 16	Agitación	6	5	5	MP-P
Ensayo 17	Agitación	6	5	12	MP-P
Ensayo 18	Agitación	6	5	20	MP-P
Ensayo 19	Sin Agitación	6	3	20	MP-P
Ensayo 20	Sin Agitación	6	3	12	MP-P
Ensayo 21	Sin Agitación	6	3	20	MP-P
Ensayo 22	Agitación	6	1	5	MP-P
Ensayo 23	Agitación	6	1	12	MP-P
Ensayo 24	Agitación	6	1	20	MP-P
Ensayo 25	Agitación	11	3	20	MP-P
Ensayo 26	Agitación	11	3	5	MP-P
Ensayo 27	Agitación	11	3	12	MP-P

Tabla 35 (Continuación)

No ensayo	Pretratamiento	pH	Tensión (Vcc)	Tiempo (min)	Modo conexión de los electrodos
Ensayo 28	Agitación	4	3	15	MP-P
Ensayo 29	Agitación	4	3	15	MP-S
Ensayo 30	Agitación	4	3	15	BP-S
Fuente: Autora					

Para realizar los ensayos de electrocoagulación, se estableció un formato para cada ensayo, con el fin de asegurar la trazabilidad de las pruebas. Este formato se muestra en el anexo A.

A continuación se describen los pasos seguros para realizar los ensayos de electrocoagulación:

1. Verificar las condiciones escritas en el formato de ensayos
2. Rotular los envases de toma de muestras iniciales y finales
3. Tomar la muestra inicial de agua residual para parámetros físico químicos (DQO, SST, Metales y sulfuros)
4. Medir parámetros in situ (conductividad, pH, temperatura y SS)
5. Pesar los electrodos (lijados y limpios)
6. Introducir el agua en la celda y ajustar pH de ser el caso
7. De acuerdo a los formatos de ensayos introducir los imanes para agitación electromagnética
8. Encajar las rejillas de los electrodos y los mismos
9. Realizar el esquema de distribución eléctrica de la prueba
10. Verificar que se esté trabajando en frío (fuente apagada: interruptor en OFF y controles analógicos en cero de tensión y corriente).
11. Realizar el montaje de acuerdo al esquema realizado
12. Cablear de acuerdo al esquema
13. Verificar que los medidores analógicos de V e I estén en "0"
14. Encendido de la fuente
15. Ajuste de las condiciones del ensayo (tensión, tiempo, agitación)

16. Inicio de la prueba (cronómetro)
17. Verificación y registro de las variables iniciales (corriente, tensión en fuente, electrodos y resistencias, resistencia)
18. Al finalizar el ensayo registrar las variables finales (corriente, tensión en fuente, electrodos y resistencias, resistencia).
19. Volver los controles analógicos de V e I a cero "0"
20. Apagado de la fuente
21. Introducir el agua en el cono Imhoff para medición de SS, el agua sobrante depositarla en un envase identificado
22. Lavado y secado de la celda, rejillas y electrodos
23. Toma de peso de electrodos
24. Lijado de electrodos
25. Posterior de una hora tomar el agua del cono Imhoff y medir variables in situ (pH, conductividad y temperatura)
26. Depositar el agua anterior en los envases de preservación de muestras (SST, metales, DQO y sulfuros)
27. Depositar el lodo sedimentado en las cajas de papel aluminio identificando la muestra y las condiciones del ensayo (No ensayo, pH, tensión, tiempo y pretratamiento)
28. Preservar las muestras de agua residual según lo establecido en el formato de ensayos, llevar a la nevera.
29. Repetir los ensayos de acuerdo al número de los mismos
30. Desmonte del montaje
31. Apagado de multímetros y equipos
32. Finalización de la prueba

7. CÁLCULO VARIABLES

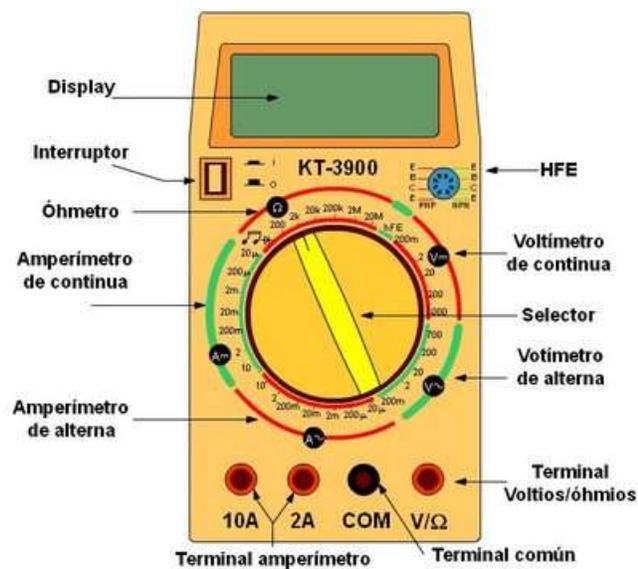
A continuación se describe la metodología de cálculo para las variables de entrada y salida de cada ensayo:

7.1 PARÁMETROS ELÉCTRICOS

7.1.1 Corriente en la fuente (A)

La corriente (A) es medida directamente a través del multímetro, la perilla debe ubicarse en el cuadrante amperímetro de continua en el valor de 2 A.

Ilustración 41. Partes de un multímetro



Fuente: <http://impiantieletriciresidenziali.blogspot.com/2011/10/como-se-usa-el-tester.html>

7.1.2 Tensión en la fuente (V_f)

El tensión en la fuente (Volts), es medido directamente en el medidor análogo de la fuente de energía.

7.1.3 Tensión en los electrodos (V_e)

El tensión en los electrodos (Volts), es medido directamente a través del multímetro, la perilla debe ubicarse en el cuadrante voltímetro de continua en el valor de 20 V. El multímetro debe ubicarse en el cableado de los electrodos.

7.1.4 Tensión en las resistencias (V_r)

El tensión en las resistencias (Volts), es medido directamente a través del multímetro, la perilla debe ubicarse en el cuadrante voltímetro de continua en el valor de 20 V. El multímetro debe ubicarse en el cableado de las resistencias.

7.1.5 Resistencia (R)

La resistencia (Ω) se mide directamente en el banco de resistencias, se hace usando el multímetro que mide tensión en las resistencias, girando la perilla hasta el óhmetro en el valor de 200 Ω .

7.1.6 Potencia suministrada por la fuente (P_s)

La potencia de suministro (W) se calcula como el producto de la tensión en terminales de la fuente, multiplicada por la corriente que se entrega a la carga:

$$P_s = V * I \quad (17)$$

Donde: V : Es la tensión de la fuente
 I : Es la corriente de la fuente

7.1.7 Consumo de energía (E)

El consumo de energía ($W-h$) se halla multiplicando la potencia suministrada por la fuente (P_s), por el tiempo de duración del ensayo en horas.

$$E = P_s \left(\frac{t}{60} \right) \quad (18)$$

Donde: P_s : Es la potencia suministrada por la fuente
 t : Tiempo de duración del ensayo en minutos

7.1.8 Conductividad (C)

La conductividad ($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$), es el inverso multiplicativo de la resistividad (r). Para transformar unidades de tensión (V_e) en unidades de resistencia (R) se aplica la ley de Ohm:

$$V_e = IR \rightarrow R = \frac{V_e}{I} \rightarrow I = \frac{V_e}{R} \quad (19)$$

Resistividad (r), es igual a la Resistencia de los electrodos (R) multiplicada por la Superficie (S , superficie a través de la cual se produce el flujo eléctrico: suma de superficie electrodos) y dividida por la Longitud (l).

$$r = R * \frac{S}{l} \quad (20)$$

$$C = \frac{1}{r} \rightarrow r = \frac{1}{C} \rightarrow \frac{1}{C} = R \frac{S}{l} \rightarrow C = \frac{l}{R * S} \quad (21)$$

La conductividad (C), es igual a la longitud dividida entre la resistencia (R) por la superficie (S).

Reemplazando la resistencia de la ecuación (18) se obtiene:

$$I = \frac{Ve}{R} \rightarrow I = \frac{Ve}{\left(\frac{l^2}{C}\right)} \rightarrow I = \frac{Ve * C * S}{l} \rightarrow C = \frac{I * l}{Ve * S} \quad (22)$$

7.1.9 Potencia de pérdidas (P_p)

La potencia de pérdidas (W), es igual a la multiplicación de la corriente (registro del multímetro para la medida de la corriente eléctrica) elevado al cuadrado, por la resistencia del banco de resistencia (medida tomada antes de cada ensayo, con el multímetro utilizado para registrar la tensión en el banco de resistencias).

$$P_p = I^2 R \quad (23)$$

Dónde: R : Es la resistencia (Ω)
 I : Es la corriente eléctrica (A)

7.1.10 Potencia de los electrodos (P_e)

La potencia de los electrodos (P_e), es igual a la suma algebraica que resulta de restar a la potencia suministrada por la fuente, la porción de potencia consumida por el banco de resistencias auxiliares.

$$P_e = P_s - P_p \quad (24)$$

7.2 PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

La preservación de los parámetros físico-químicos, se realizó de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 36. Preservación de muestras en ensayos de electrocoagulación

Parámetro	Recipiente	Capacidad	Preservación	Duración de la muestra
pH	In situ	NA	No requiere	NA
Temperatura	In situ	NA	No requiere	NA
SS	In situ	NA	No requiere	NA
Potencial redox	In situ	NA	No requiere	NA
Sulfuros	Plástico	300 ml	pH 9 (ajustar con NaOH), 3 gotas de Acetato de Zinc por cada 100 ml) preservar	3 meses
DQO	Plástico	250 ml	pH 2 (ajustar con ácido sulfúrico)	3 meses
SST	Plástico	300 ml	No requiere	3 meses
Fuente: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater				

Ilustración 42. Refrigeración de las muestras.



Fuente: Autora

7.2.1 Peso de electrodos (Pe)

El peso de los electrodos (g) se determina mediante balanza al inicio y final de cada ensayo.

7.2.2 Cambio peso electrodos (Cp)

El cambio de peso de los electrodos (g), se calcula restando el peso final de los electrodos, menos el peso inicial de los mismos.

$$Cp = Pe \text{ inicial} - Pe \text{ final} \quad (25)$$

7.2.3 Sulfuros

El análisis y determinación de sulfuros (mg/L) en las muestras, se realizó por el método yodométrico de acuerdo al *Standard Methods for examination of water and wastewater*; estos análisis fueron subcontratados con el laboratorio Antek S.A.

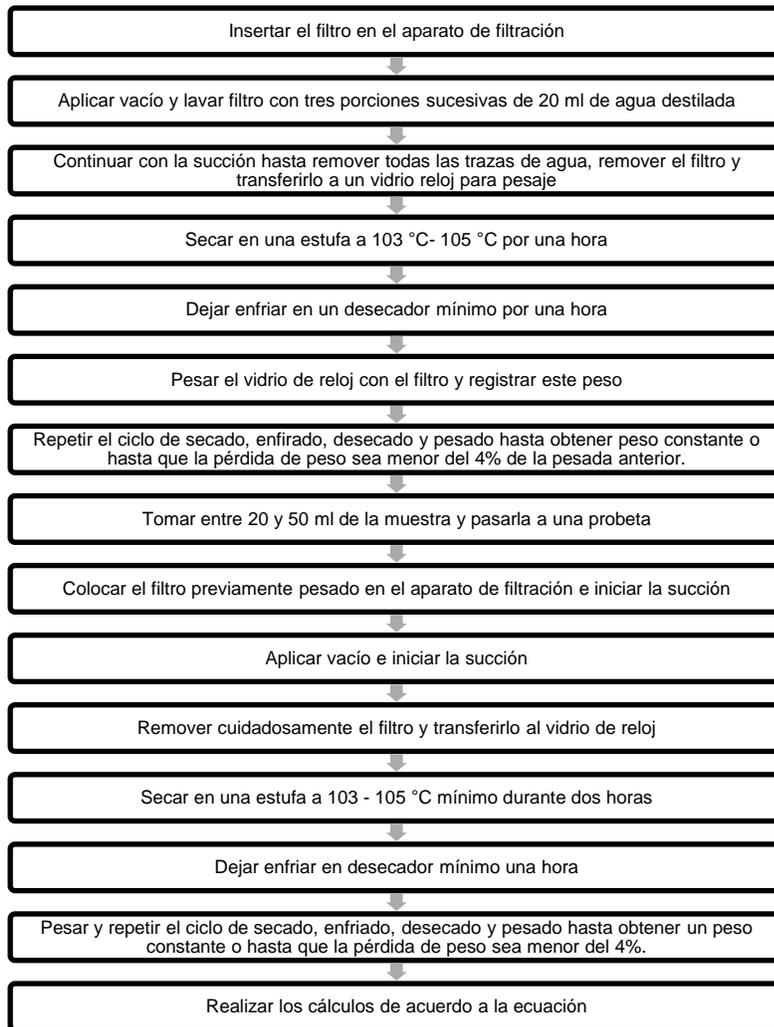
7.2.4 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

El análisis y determinación de DQO (mg/L) en las muestras, se realizó por el método yodométrico de acuerdo al *Standard Methods for examination of water and wastewater*; estos análisis fueron subcontratados con el laboratorio Antek S.A.

7.2.5 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

El análisis y determinación de SST (mg/L) en las muestras, se realizó en laboratorio de química de la ECCL, de acuerdo al siguiente algoritmo.

Ilustración 43. Procedimiento para determinar SST.



Fuente: GTC 2 - Manual de métodos analíticos para el control de la calidad del agua

Ilustración 44. Determinación de SST.

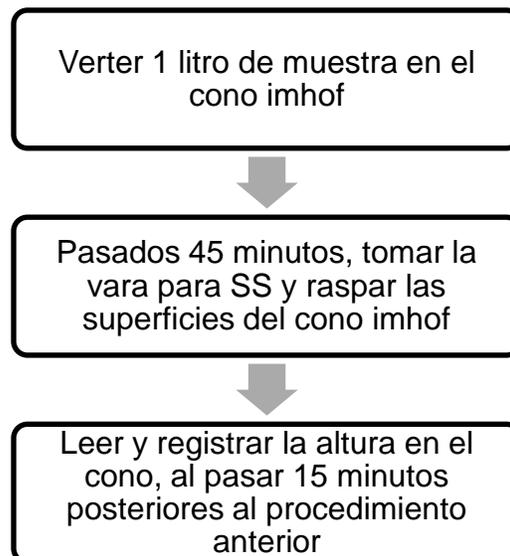


Fuente: Autora

7.2.6 Sólidos Sedimentables (SS)

La determinación de SS (mm), se realizó in situ por medio de un cono Imhoff, siguiendo el siguiente algoritmo.

Ilustración 45. Procedimiento para determinar SS.



Fuente: GTC 2 - Manual de métodos analíticos para el control de la calidad del agua

Ilustración 46 Determinación de SS



Fuente: Autora

7.2.7 Potencial Redox

El potencial redox (mV), se determina directamente mediante el multiparámetro.

7.2.8 Temperatura

La temperatura ($^{\circ}\text{C}$), se determina directamente mediante el multiparámetro.

7.2.9 pH

El pH (unidades de pH), se determina directamente mediante el multiparámetro.

7.2.10 Eficiencias de remoción

La eficiencia de remoción de cada parámetro se realizó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Eficiencia de remoción} = \frac{\text{Concentración final} - \text{Concentración inicial}}{\text{Concentración inicial}} \quad (25)$$

Para el caso de la eficiencia de remoción de SST y SS, es importante aclarar que cuando un ensayo generó posterior al tratamiento mayor cantidad de SS y SST, esto significa que el tratamiento remueve más contaminantes y estos a su vez se sedimentan o flotan de acuerdo a su densidad; para que estas eficiencias mostrarán la anterior relación la ecuación 25 se invierte así:

$$\% \text{ Eficiencia de producción SS, SST} = \frac{\text{Concentración inicial} - \text{Concentración final}}{\text{Concentración final}} \quad (26)$$

Dado lo anterior cuando las eficiencias son positivas en SS y SST significa que el ensayo tuvo resultados efectivos y así mismo estas eficiencias no se asocian a remoción, sino a producción de sólidos.

Para calcular las eficiencias totales de remoción se realiza el promedio de las eficiencias de cada parámetro (DQO, Sulfuros, SST, SS).

$$\begin{aligned} \% \text{ Eficiencia de remoción total} = \\ (\% \text{ Eficiencia remoción DQO} + \% \text{ Eficiencia remoción sulfuros} + \\ \% \text{ Eficiencia remoción SST} + \% \text{ Eficiencia remoción SS}) / 4 \quad (27) \end{aligned}$$

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS DE ELECTROCOAGULACIÓN

8.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ELECTROCOAGULACIÓN

Los ensayos de electrocoagulación se realizaron en la semana del 28 de julio al 06 de agosto, el tiempo promedio para la realización de un ensayo completo de electrocoagulación, incluyendo la toma de muestras, ajuste de pH, medición de variables in situ y preservación de las muestras fue de 1 hora.

Tabla 37. Características de la muestra inicial

Muestra inicial	
Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)	623.8645056
DQO (mg/L)	6655
Sulfuros (mg/L)	4.8
SST (mg/L)	2340
SS (mm)	38
pH	10.407
Potencial redox (mV)	-186
Temperatura (°C)	16.8
Fuente: Autora	

A continuación se presenta la tabla resumen de resultados para cada ensayo, de acuerdo al diseño experimental, mostrado en el ítem anterior. Las tablas de resultados completas, se encuentran en el anexo G.

Tabla 38. Resumen de ensayos de electrocoagulación

Ensayo 1				
Pretratamiento	Sin agitación		Tiempo	5
pH	4	Tensión	1	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		0,033		
Cambio peso Fe (g)		-0,009		
Consumo energía (W-h)	0,455	0,455		
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	623,86	623,8645056		0,00
Corriente en la fuente (A)	1,3	1,3		
Tensión en electrodos (V)	1,05	1,03		
Potencia de pérdidas (W)	5,408	5,408		
DQO (mg/L)	6655	2559		4096
Sulfuros (mg/L)	4,8	8,2		-3,4
SST (mg/L)	2340	3315		-975
SS (mm)	38	255		-217
pH	3,95	4,068		-0,118
Potencial redox (mV)	-186	-183,6		-2,4
Temperatura (°C)	16,8	16,6		0,2
Ensayo 2				
Pretratamiento	Sin agitación		Tiempo	12
pH	4	Tensión	1	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		0,007		
Cambio peso Fe (g)		0,003		
Consumo energía (W-h)	0,00208	0,0021		
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	19,38	19,19583094		0,18
Corriente en la fuente (A)	0,01	0,01		
Tensión en electrodos (V)	1,01	0,7		
Potencia de pérdidas (W)	0,00032	0,00032		
DQO (mg/L)	6655	2892		3763
Sulfuros (mg/L)	4,8	6,9		-2,1
SST (mg/L)	2340	1458		882
SS (mm)	23	90		-67
pH	4,128	3,95		0,178
Potencial redox (mV)	-192,6	-203,9		11,3
Temperatura (°C)	20	19,8		0,2

Tabla 38 (Continuación)

Ensayo 3				
Pretratamiento	Sin agitación		Tiempo	20
pH	4	Tensión	1	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		0,001		
Cambio peso Fe (g)		-0,07		
Consumo energía (W-h)	0,0073333333	0,013666667		
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	36,65	78,65608777		-42,01
Corriente en la fuente (A)	0,02	0,04		
Tensión en electrodos (V)	1,02	1,01		
Potencia de pérdidas (W)	0,0014	0,0056		
DQO (mg/L)	6655	2233		4422
Sulfuros (mg/L)	4,8	9,5		-4,7
SST (mg/L)	2340	3705		-1365
SS (mm)	25	140		-115
pH	4,296	4,28		0,016
Potencial redox (mV)	-192,6	-168,1		-24,5
Temperatura (°C)	20	16,4		3,6
Ensayo 4				
Pretratamiento	Agitación		Tiempo	5
pH	4	Tensión	3	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		-0,001		
Cambio peso Fe (g)		0,2		
Consumo energía (W-h)	1,284666667	1,286666667		
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	462,10	486,2543926		-24,15
Corriente en la fuente (A)	1,88	1,93		
Tensión en electrodos (V)	3,07	3,05		
Potencia de pérdidas (W)	12,3704	9,31225		
DQO (mg/L)	6655	2944		3711
Sulfuros (mg/L)	4,8	8,7		-3,9
SST (mg/L)	2340	1160		1180
SS (mm)	25	140		-115
pH	4,075	4,852		-0,777
Potencial redox (mV)	-189,9	-136		-53,9
Temperatura (°C)	20,4	17,6		2,8

Tabla 38 (Continuación)

Ensayo 5			
Pretratamiento	Agitación		Tiempo
pH	4	Tensión	3
Variable	Entrada	Salida	12 MP-P
Cambio peso Al (g)		0,002	
Cambio peso Fe (g)		0,669	
Consumo energía (W-h)	6,18	6,4	
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	622,81	644,9799197	-22,17
Corriente en la fuente (A)	3,09	3,2	
Tensión en electrodos (V)	2,97	2,97	
Potencia de pérdidas (W)	29,59911	31,744	
DQO (mg/L)	6655	3110	3545
Sulfuros (mg/L)	4,8	2	2,8
SST (mg/L)	2340	9650	-7310
SS (mm)	25	150	-125
pH	4,062	6,068	-2,006
Potencial redox (mV)	-182,6	-67,2	-115,4
Temperatura (°C)	16,8	16,7	0,1
Ensayo 6			
Pretratamiento	Agitación		Tiempo
pH	4	Tensión	3
Variable	Entrada	Salida	20 MP-P
Cambio peso Al (g)		-0,086	
Cambio peso Fe (g)		0,648	
Consumo energía (W-h)	5,97	5,79	
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	445,66	432,2261267	13,44
Corriente en la fuente (A)	1,99	1,93	
Tensión en electrodos (V)	3	3,04	
Potencia de pérdidas (W)	12,27631	11,54719	
DQO (mg/L)	6655	6788	-133
Sulfuros (mg/L)	4,8	6,5	-1,7
SST (mg/L)	2340	5055	-2715
SS (mm)	25	100	-75
pH	3,958	7,253	-3,295
Potencial redox (mV)	-181,7	-4,8	-176,9
Temperatura (°C)	16,8	17,5	-0,7

Tabla 38 (Continuación)

Ensayo 7				
Pretratamiento	Agitación		Tiempo	5
pH	4	Tensión	3	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		0,008		
Cambio peso Fe (g)		0,179		
Consumo energía (W-h)	1,153333333	1,153333333		
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	435,87	435,8653363		0,00
Corriente en la fuente (A)	1,73	1,73		
Tensión en electrodos (V)	3,03	3,03		
Potencia de pérdidas (W)	8,38012	8,38012		
DQO (mg/L)	6655	2383		4272
Sulfuros (mg/L)	4,8	7,4		-2,6
SST (mg/L)	2340	1170		1170
SS (mm)	25	160		-135
pH	4,052	4,972		-0,92
Potencial redox (mV)	-181,7	-130,2		-51,5
Temperatura (°C)	12,2	19,5		-7,3
Ensayo 8				
Pretratamiento	Agitación		Tiempo	12
pH	4	Tensión	3	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		0,074		
Cambio peso Fe (g)		-0,283		
Consumo energía (W-h)	3,402	3,438		
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	423,27	427,7470995		-4,48
Corriente en la fuente (A)	1,89	1,91		
Tensión en electrodos (V)	3	2,71		
Potencia de pérdidas (W)	10,00188	10,21468		
DQO (mg/L)	6655	2487		4168
Sulfuros (mg/L)	4,8	3,5		1,3
SST (mg/L)	2340	150		2190
SS (mm)	25	200		-175
pH	4,032	5,85		-1,818
Potencial redox (mV)	-181,7	-93,1		-88,6
Temperatura (°C)	21	20,3		0,7

Tabla 38 (Continuación)

Ensayo 9				
Pretratamiento	Agitación		Tiempo	5
pH	4	Tensión	5	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		0,012		
Cambio peso Fe (g)		0,512		
Consumo energía (W-h)	5,36	4,436666667		
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	721,99	886,8473896		-164,85
Corriente en la fuente (A)	4,8	4,84		
Tensión en electrodos (V)	5,06	4,96		
Potencia de pérdidas (W)	57,6	53,87888		
DQO (mg/L)	6655	4247		2408
Sulfuros (mg/L)	4,8	1,5		3,3
SST (mg/L)	2340	6645		-4305
SS (mm)	25	150		-125
pH	3,993	5,642		-1,649
Potencial redox (mV)	-185,8	-91,1		-94,7
Temperatura (°C)	19,2	18,1		1,1
Ensayo 10				
Pretratamiento	Agitación		Tiempo	20
pH	4	Tensión	3	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		-0,004		
Cambio peso Fe (g)		0,491		
Consumo energía (W-h)	3,312	2,7		
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	386,32	453,501506		-67,19
Corriente en la fuente (A)	1,38	1,35		
Tensión en electrodos (V)	3	3,02		
Potencia de pérdidas (W)	5,90364	5,64975		
DQO (mg/L)	6655	2311		4344
Sulfuros (mg/L)	4,8	2,3		2,5
SST (mg/L)	2340	3715		-1375
SS (mm)	25	200		-175
pH	3,993	5,51		-1,517
Potencial redox (mV)	-181,2	-99,8		-81,4
Temperatura (°C)	19,1	20,9		-1,8

Tabla 38 (Continuación)

Ensayo 11				
Pretratamiento	Agitación		Tiempo	12
pH	4	Tensión	5	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		-0,197		
Cambio peso Fe (g)		1,017		
Consumo energía (W-h)	14,97	15,904		
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	670,51	626,0840236		44,43
Corriente en la fuente (A)	4,99	4,97		
Tensión en electrodos (V)	5,06	4,87		
Potencia de pérdidas (W)	74,7003	79,04288		
DQO (mg/L)	6655	4013		2642
Sulfuros (mg/L)	4,8	2,9		1,9
SST (mg/L)	2340	6095		-3755
SS (mm)	25	100		-75
pH	4,056	6,799		-2,743
Potencial redox (mV)	-181,2	-23,8		-157,4
Temperatura (°C)	19,1	20,1		-1
Ensayo 12				
Pretratamiento	Agitación		Tiempo	20
pH	4	Tensión	5	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		0,025		
Cambio peso Fe (g)		0,928		
Consumo energía (W-h)	9,68	9,68		
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	483,73	483,7349398		0,00
Corriente en la fuente (A)	2,64	2,64		
Tensión en electrodos (V)	5,02	5,1		
Potencia de pérdidas (W)	17,424	19,51488		
DQO (mg/L)	6655	1723		4932
Sulfuros (mg/L)	4,8	3		1,8
SST (mg/L)	2340	13650		-11310
SS (mm)	25	300		-275
pH	4,056	7,42		-3,364
Potencial redox (mV)	-181,2	-2,4		-178,8
Temperatura (°C)	19,1	19,4		-0,3

Tabla 38 (Continuación)

Ensayo 13				
Pretratamiento	Agitación		Tiempo	5
pH	6	Tensión	3	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		-0,051		
Cambio peso Fe (g)		0,146		
Consumo energía (W-h)	1,173333333	1,186666667		
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	443,42	448,4626004		-5,04
Corriente en la fuente (A)	1,76	1,78		
Tensión en electrodos (V)	3	3,09		
Potencia de pérdidas (W)	6,1952	6,3368		
DQO (mg/L)	6655	1802		4853
Sulfuros (mg/L)	4,8	6,2		-1,4
SST (mg/L)	2340	41250		-38910
SS (mm)	25	350		-325
pH	5,921	6,89		-0,969
Potencial redox (mV)	-46,5	-17,4		-29,1
Temperatura (°C)	19,3	19,9		-0,6
Ensayo 14				
Pretratamiento	Agitación		Tiempo	12
pH	6	Tensión	3	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		-0,028		
Cambio peso Fe (g)		0,423		
Consumo energía (W-h)	4,788	4,921		
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	534,65	549,5059184		-14,85
Corriente en la fuente (A)	2,52	2,59		
Tensión en electrodos (V)	3,01	2,99		
Potencia de pérdidas (W)	12,7008	13,4162		
DQO (mg/L)	6655	2709		3946
Sulfuros (mg/L)	4,8	3		1,8
SST (mg/L)	2340	9350		-7010
SS (mm)	25	0		25
pH	5,982	8,235		-2,253
Potencial redox (mV)	-204,8	-59,4		-145,4
Temperatura (°C)	6,4	18,2		-11,8

Tabla 38 (Continuación)

Ensayo 15			
Pretratamiento	Agitación		Tiempo
pH	6	Tensión	3
Variable	Entrada	Salida	20 MP-P
			Eficiencias
Cambio peso Al (g)		-0,18	
Cambio peso Fe (g)		0,823	
Consumo energía (W-h)	7,38	7,47	
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	550,92	557,6388889	-6,72
Corriente en la fuente (A)	2,46	2,49	
Tensión en electrodos (V)	3,01	2,96	
Potencia de pérdidas (W)	12,1032	12,4002	
DQO (mg/L)	6655	2154	4501
Sulfuros (mg/L)	4,8	6,7	-1,9
SST (mg/L)	2340	5300	-2960
SS (mm)	25	150	-125
pH	5,934	6,905	-0,971
Potencial redox (mV)	-73,6	-16,5	-57,1
Temperatura (°C)	14	18	-4
Ensayo 16			
Pretratamiento	Agitación		Tiempo
pH	6	Tensión	5
Variable	Entrada	Salida	5 MP-P
			Eficiencias
Cambio peso Al (g)		0,57	
Cambio peso Fe (g)		0,307	
Consumo energía (W-h)	2,9325	3,028666667	
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	536,31	526,0959091	10,22
Corriente en la fuente (A)	3,06	3,08	
Tensión en electrodos (V)	5,01	5,08	
Potencia de pérdidas (W)	16,85448	17,07552	
DQO (mg/L)	6655	5116	1539
Sulfuros (mg/L)	4,8	5	-0,2
SST (mg/L)	2340	3540	-1200
SS (mm)	25	100	-75
pH	6,051	6,743	-0,692
Potencial redox (mV)	-73,6	-29,1	-44,5
Temperatura (°C)	18	18,1	-0,1

Tabla 38 (Continuación)

Ensayo 17				
Pretratamiento	Agitación		Tiempo	12
pH	6	Tensión	5	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		-0,004		
Cambio peso Fe (g)		0,299		
Consumo energía (W-h)	11,64	12		
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	521,36	537,4832664		-16,12
Corriente en la fuente (A)	3,88	4		
Tensión en electrodos (V)	4,98	4,72		
Potencia de pérdidas (W)	37,636	28,8		
DQO (mg/L)	6655	4439		2216
Sulfuros (mg/L)	4,8	8		-3,2
SST (mg/L)	2340	9700		-7360
SS (mm)	25	11		14
pH	6,051	7,6		-1,549
Potencial redox (mV)	-73,6	-28,4		-45,2
Temperatura (°C)	18	18		0
Ensayo 18				
Pretratamiento	Agitación		Tiempo	20
pH	6	Tensión	5	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		-0,181		
Cambio peso Fe (g)		1,082		
Consumo energía (W-h)	11,232	11,196		
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	582,27	580,4072773		1,87
Corriente en la fuente (A)	3,12	3,11		
Tensión en electrodos (V)	5,02	4,9		
Potencia de pérdidas (W)	22,38912	21,27862		
DQO (mg/L)	6655	4635		2020
Sulfuros (mg/L)	4,8	10,6		-5,8
SST (mg/L)	2340	8250		-5910
SS (mm)	25	250		-225
pH	6,08	8,194		-2,114
Potencial redox (mV)	-44	-52,2		8,2
Temperatura (°C)	18,6	19,2		-0,6

Tabla 38 (Continuación)

Ensayo 19				
Pretratamiento	Sin Agitación		Tiempo	5
pH	6	Tensión	3	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		-0,08		
Cambio peso Fe (g)		0,296		
Consumo energía (W-h)	2,907	2,925		
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	602,80	606,534936		-3,73
Corriente en la fuente (A)	3,23	3,25		
Tensión en electrodos (V)	3,01	3		
Potencia de pérdidas (W)	20,8658	21,125		
DQO (mg/L)	6655	9661		-3006
Sulfuros (mg/L)	4,8	4		0,8
SST (mg/L)	2340	12195		-9855
SS (mm)	25	250		-225
pH	6,08	6,875		-0,795
Potencial redox (mV)	-44	-22		-22
Temperatura (°C)	18,6	19		-0,4
Ensayo 20				
Pretratamiento	Sin Agitación		Tiempo	12
pH	6	Tensión	3	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		-0,043		
Cambio peso Fe (g)		0,594		
Consumo energía (W-h)	5,46	5,62		
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	550,25	566,372992		-16,12
Corriente en la fuente (A)	2,73	2,81		
Tensión en electrodos (V)	3,01	2,89		
Potencia de pérdidas (W)	14,9058	15,00259		
DQO (mg/L)	6655	2135		4520
Sulfuros (mg/L)	4,8	2		2,8
SST (mg/L)	2340	18905		-16565
SS (mm)	25	200		-175
pH	6,08	7,6		-1,52
Potencial redox (mV)	-44	-17,9		-26,1
Temperatura (°C)	18,6	17,7		0,9

Tabla 38 (Continuación)

Ensayo 21				
Pretratamiento	Sin Agitación		Tiempo	20
pH	6	Tensión	3	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		-0,164		
Cambio peso Fe (g)		0,785		
Consumo energía (W-h)	8,264666667	8,33		
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	520,34	524,457524		-4,11
Corriente en la fuente (A)	2,53	2,55		
Tensión en electrodos (V)	3,01	2,91		
Potencia de pérdidas (W)	12,8018	13,005		
DQO (mg/L)	6655	5288		1367
Sulfuros (mg/L)	4,8	7,1		-2,3
SST (mg/L)	2340	2355		-15
SS (mm)	25	190		-165
pH	6,003	7,6		-1,597
Potencial redox (mV)	-67,9	-21,7		-46,2
Temperatura (°C)	13	17,6		-4,6
Ensayo 22				
Pretratamiento	Agitación		Tiempo	5
pH	6	Tensión	1	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		0,262		
Cambio peso Fe (g)		0,082		
Consumo energía (W-h)	0,006416667	0,006416667		
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	128,26	128,2630522		0,00
Corriente en la fuente (A)	0,07	0,07		
Tensión en electrodos (V)	1,02	1		
Potencia de pérdidas (W)	0,01029	0,01029		
DQO (mg/L)	6655	3444		3211
Sulfuros (mg/L)	4,8	7,9		-3,1
SST (mg/L)	2340	7250		-4910
SS (mm)	25	100		-75
pH	5,992	6,835		-0,843
Potencial redox (mV)	-70,1	-22,6		-47,5
Temperatura (°C)	15,7	17,2		-1,5

Tabla 38 (Continuación)

Ensayo 23			
Pretratamiento	Agitación		Tiempo
pH	6	Tensión	1
Variable	Entrada	Salida	12 MP-P
			Eficiencias
Cambio peso Al (g)		-0,008	
Cambio peso Fe (g)		0,007	
Consumo energía (W-h)	0,0176	0,0132	
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	146,59	109,939759	36,65
Corriente en la fuente (A)	0,08	0,06	
Tensión en electrodos (V)	1,01	1,07	
Potencia de pérdidas (W)	0,01792	0,01008	
DQO (mg/L)	6655	2330	4325
Sulfuros (mg/L)	4,8	3,2	1,6
SST (mg/L)	2340	3240	-900
SS (mm)	25	250	-225
pH	6,02	6	-0,434
Potencial redox (mV)	-154,3	-43,2	-111,1
Temperatura (°C)	20,2	17,7	2,5
Ensayo 24			
Pretratamiento	Agitación		Tiempo
pH	6	Tensión	1
Variable	Entrada	Salida	20 MP-P
			Eficiencias
Cambio peso Al (g)		-0,325	
Cambio peso Fe (g)		0,007	
Consumo energía (W-h)	0,032	0,028	
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	134,37	115,1749857	19,20
Corriente en la fuente (A)	0,08	0,07	
Tensión en electrodos (V)	1,02	1,07	
Potencia de pérdidas (W)	0,01792	0,01127	
DQO (mg/L)	6655	2938	3717
Sulfuros (mg/L)	4,8	3,3	1,5
SST (mg/L)	2340	1800	540
SS (mm)	25	140	-115
pH	5,996	6	-0,183
Potencial redox (mV)	5,996	-60,5	66,496
Temperatura (°C)	20,2	19	1,2

Tabla 38 (Continuación)

Ensayo 25				
Pretratamiento	Agitación		Tiempo	20
pH	11	Tensión	3	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		-0,221		
Cambio peso Fe (g)		0,758		
Consumo energía (W-h)	5,653333333	5,44		
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	534,12	513,9683735		20,16
Corriente en la fuente (A)	2,12	2,04		
Tensión en electrodos (V)	2,86	2,65		
Potencia de pérdidas (W)	6,29216	7,90704		
DQO (mg/L)	6655	3979		2676
Sulfuros (mg/L)	4,8	2,8		2
SST (mg/L)	2340	1600		740
SS (mm)	25	150		-125
pH	9,84	10		-0,583
Potencial redox (mV)	-154,3	-182,9		28,6
Temperatura (°C)	20,2	17,2		3
Ensayo 26				
Pretratamiento	Agitación		Tiempo	5
pH	11	Tensión	3	MP-P
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias	
Cambio peso Al (g)		-0,022		
Cambio peso Fe (g)		0,152		
Consumo energía (W-h)	1,561	1,596		
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	535,08	547,0811819		-12,00
Corriente en la fuente (A)	2,23	2,28		
Tensión en electrodos (V)	3	3,11		
Potencia de pérdidas (W)	8,95122	9,35712		
DQO (mg/L)	6655	3492		3163
Sulfuros (mg/L)	4,8	1,5		3,3
SST (mg/L)	2340	2110		230
SS (mm)	25	70		-45
pH	9,84	10		-0,205
Potencial redox (mV)	-154,3	-163,3		9
Temperatura (°C)	20,2	17,2		3

Tabla 38 (Continuación)

Ensayo 27			
Pretratamiento	Agitación		Tiempo
pH	11	Tensión	3
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias
Cambio peso Al (g)		-0,07	
Cambio peso Fe (g)		0,484	
Consumo energía (W-h)	5,04	5,12	
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	507,92	515,9839357	-8,06
Corriente en la fuente (A)	2,52	2,56	
Tensión en electrodos (V)	3,01	3	
Potencia de pérdidas (W)	11,43072	11,79648	
DQO (mg/L)	6655	2840	3815
Sulfuros (mg/L)	4,8	5,3	-0,5
SST (mg/L)	2340	2150	190
SS (mm)	25	300	-275
pH	9,541	10	-0,347
Potencial redox (mV)	-134,8	-154,8	20
Temperatura (°C)	18,6	17	1,6
Ensayo 28			
Pretratamiento	Agitación		Tiempo
pH	4	Tensión	3
Variable	Entrada	Salida	Eficiencias
Cambio peso Al (g)		-0,009	
Cambio peso Fe (g)		0,682	
Consumo energía (W-h)	5,635	5,658	
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	536,75	538,9438188	-2,19
Corriente en la fuente (A)	2,45	2,46	
Tensión en electrodos (V)	3,02	3,19	
Potencia de pérdidas (W)	10,8045	10,89288	
DQO (mg/L)	5022	1991	3031
Sulfuros (mg/L)	8,7	5,3	3,4
SST (mg/L)	3150	1315	1835
SS (mm)	25	60	-35
pH	3,998	5	-1,196
Potencial redox (mV)	-186,3	-117,1	-69,2
Temperatura (°C)	18,8	17,9	0,9

Tabla 38 (Continuación)

Ensayo 29			
Pretratamiento	Agitación		Tiempo
pH	4	Tensión	3
Variable	Entrada	Salida	15 MP-S
Cambio peso Al (g)		-0,003	
Cambio peso Fe (g)		0,085	
Consumo energía (W-h)	0,192	0,2275	
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	151,17	149,7274814	1,44
Corriente en la fuente (A)	0,24	0,26	
Tensión en electrodos (V)	3,02	3,05	
Potencia de pérdidas (W)	0,10368	0,12168	
DQO (mg/L)	5022	2807	2215
Sulfuros (mg/L)	8,7	1,7	7
SST (mg/L)	3150	618	2532
SS (mm)	25	40	-15
pH	4,024	4	-0,022
Potencial redox (mV)	-186,3	-178,1	-8,2
Temperatura (°C)	18,8	18	0,8
Ensayo 30			
Pretratamiento	Agitación		Tiempo
pH	4	Tensión	3
Variable	Entrada	Salida	15 BP-S
Cambio peso Al (g)		-0,014	
Cambio peso Fe (g)		0,066	
Consumo energía (W-h)	0,1785	0,175	
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	124,49	115,1749857	9,32
Corriente en la fuente (A)	0,21	0,2	
Tensión en electrodos (V)	3,07	3,03	
Potencia de pérdidas (W)	0,07938	0,068	
DQO (mg/L)	5022	2842	2180
Sulfuros (mg/L)	8,7	1,7	7
SST (mg/L)	3150	2085	1065
SS (mm)	25	20	5
pH	3,963	4	-0,069
Potencial redox (mV)	-186,3	-184,3	-2
Temperatura (°C)	18,8	17,9	0,9

Fuente Autora

A manera general se puede decir, que todas las muestras usadas en los ensayos de electrocoagulación, presentaban un fuerte olor y se caracterizaban por su color gris oscuro, con presencia de sólidos gruesos. El agua residual fue suministrada por ACUARIO en las instalaciones de la ECCI y en total se necesitaron 60 litros de agua residual, está fue refrigerada a 0 °C para conservar sus características físico químicas, de acuerdo a la programación de los ensayos.

Para todos los ensayos de electrocoagulación, el agua post-tratamiento fue de color negra, esto puede estar asociado al desgaste de los electrodos, y también a la formación de flóculos en el agua residual que no sedimentaban y quedaban suspendidos. El desgaste de los electrodos también está asociado a la formación de lodos en el fondo de la celda y en la placa de sostenimiento de los electrodos, adicionalmente se formaron natas sobrenadantes, que en algunos casos sobrepasaba la placa de sostenimiento de los electrodos.

Ilustración 47. Agua durante electrocoagulación



Fuente: Autora

Debido a que los SS del agua residual inicial a cada ensayo, no fueron removidos se observó que con el ajuste de pH (ácido), los sólidos sedimentaban rápidamente en los primeros minutos del ensayo, e inclusive antes de comenzar el mismo.

Ilustración 48. Sedimentación de sólidos



Fuente: Autora

Otra observación importante, fue la presencia de grasas del agua residual inicial y aún después del tratamiento, estas grasas eran evidenciables fácilmente por su color café rojizo. Por otro lado se observó que, en algunos casos posteriores al tratamiento y durante la determinación de SS, un remanente de flóculos formados, flotaba y aún después de varios días no sedimentaba.

Ilustración 49. Clarificación agua residual post-tratamiento



Fuente: Autora

Para evaluar este fenómeno en la muestra No 18 se golpeo suavemente el cono Imhoff logrando que algunos de los sólidos flotantes sedimentaran (ver Anexo I).

Ilustración 50. Flotación de sólidos, grasas y aceites



Fuente: Autora

El lodo resultante de la sedimentación, era de color negro con un olor fuerte concentrado, este lodo se dejó secar a temperatura ambiente, con el fin de programar posteriormente para las siguientes investigaciones, el análisis de algunos parámetros como metales (Fe, Al, Cr) en el mismo. Mientras se realizaban los análisis de SST y las muestras de lodo secas, se observó que algunas contenían pequeñas trazas brillantes, éstas posiblemente se relacionan con el desgaste del electrodo de aluminio.

Ilustración 51. Trazas brillantes en muestras de SST.



Fuente: Autora

Durante los seguimientos fotográficos realizados al desgaste de los electrodos, fue visible la degradación de los electrodos de aluminio, en los cuales no sólo cambio su peso, sino que a su vez se observó desgaste en la parte inferior y pérdida del brillo de los mismos.

Ilustración 52. Electrodo de aluminio antes (izquierda) y después (derecha)



Fuente: Autora

Respecto a los electrodos de hierro, posterior a cada ensayo, estos resultaban con adherencia de lodo y luego de su lavado se observaba una capa sobre los electrodos color negra, asociada a la deposición de los contaminantes sobre el cátodo.

Ilustración 53. Electrodo de hierro antes (izquierda) y después (derecha)



Fuente: Autora

Cualitativamente uno de los ensayos que presentó mejor comportamiento por sedimentación y color, fue el ensayo número 18, el análisis del comportamiento de las variables medidas se observa en la siguiente sección.

Ilustración 54. Resultados cualitativos muestra No 18



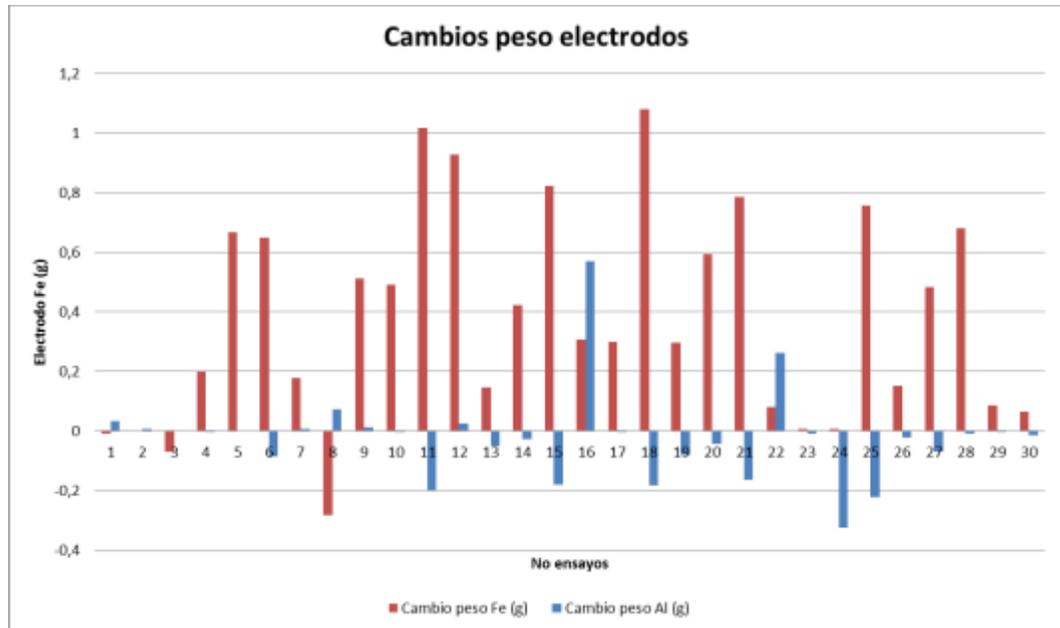
Fuente: Autora

8.2 ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS DE ELECTROCOAGULACIÓN

8.2.1 Desgaste de los electrodos

En la mayoría de ocasiones el aluminio pierde masa, es decir se desgasta, aunque en algunos ensayos presentó deposición de lodo, la cual fue mayor al desgaste del electrodo y por tanto se evidenció, como aumento en la masa del electrodo de aluminio; dado lo anterior es importante asegurar para futuras oportunidades, la remoción completa de la materia depositada antes de determinar el peso final del electrodo.

Ilustración 55. Cambio de peso en los electrodos

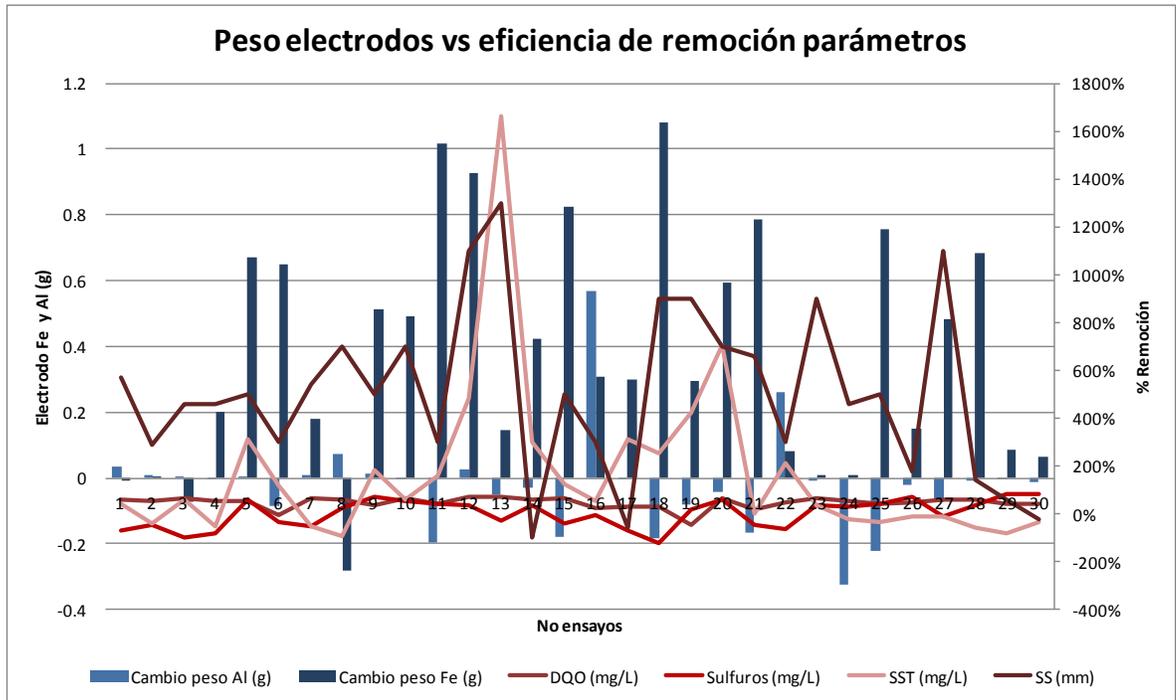


Fuente: Autora

Por su lado el hierro, por lo general aumentó su masa, atribuido a la deposición de contaminantes y lodo en el mismo. Para los casos en los que el electrodo de hierro disminuyó su masa, se pudo establecer que estos cambios fueron menores a 0.05 gramos, por lo que al realizar la correlación con el tensión del ensayo, se determinó que esto ocurrió cuando los ensayos eran de un (1) Voltio, así que este fenómeno está asociado a la baja actividad eléctrica ocurrida en la celda con estos ensayos.

Cuando el electrodo de aluminio presento mayor desgaste y por ende disminución de masa, el electrodo de hierro coincidió con los mayores aumentos de masa o lodo depositado. A continuación se muestra la correlación entre el desgaste de los electrodos y las eficiencias de remoción de los parámetros:

Ilustración 56. Peso electrodos vs eficiencia de remoción



Fuente: Autora

Los ensayos que presentaron mayor deposición de lodo en los electrodos de hierro fueron: 11, 12, 15, 18 y 25, como se observa en la gráfica anterior estos ensayos presentaron remociones importantes para todos los parámetros, a excepción del ensayo 18 y 25 que para sulfuros no tienen remoción y en el caso del ensayo 25 tampoco se obtuvo remoción de SST.

En relación a los electrodos de aluminio para los siguientes ensayos se obtuvo mayor desgaste: 11, 15, 18, 24 y 25, los cuales corresponden con los ensayos que también generaron mayor deposición de lodo, a excepción del ensayo 24.

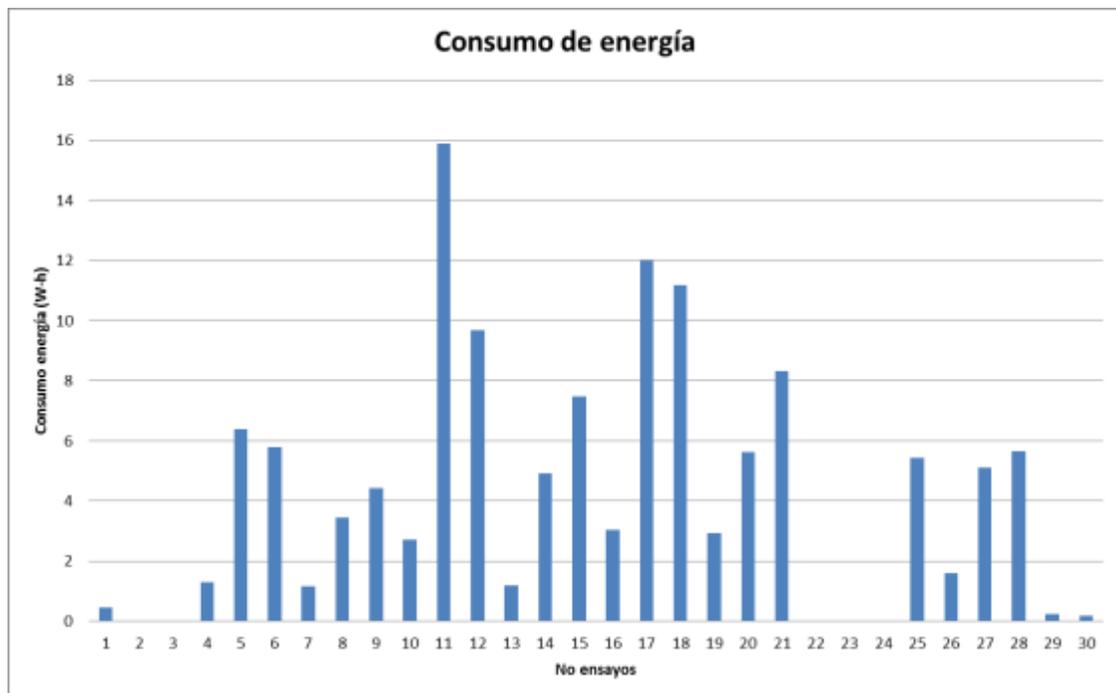
El mayor desgaste de los electrodos de aluminio y la mayor deposición de lodo en el electrodo de hierro, coinciden con las mejores eficiencias de producción de SS (ensayos 12, 15, 18, 21 y 25), inclusive dos de estos ensayos coinciden con las mejores eficiencias de DQO (ensayos 12 y 15). Por otro lado estos ensayos con mayor deposición de lodo en el electrodo de hierro, coinciden con algunos de los

ensayos que obtuvieron mejores resultados en cuanto al potencial redox (ensayos 11, 12, 15, 21).

De acuerdo a lo anterior, se puede concluir que el desgaste de los electrodos es directamente proporcional a la remoción obtenida para DQO, SST y SS, de hecho al comparar los ensayos que mayor actividad en los electrodos (desgaste y deposición en el aluminio y hierro respectivamente), contra la eficiencia total se encontró que dos de ellos corresponden a los mejores ensayos de todo el diseño experimental (ensayos 12, 18). En el caso de los sulfuros, su aumento probablemente está asociado a la homogenización de la muestra, sin embargo dentro de la bibliografía se encontró que, los sulfuros tienden a reaccionar con el cátodo de hierro formando sulfuros de hierro y que en la mayoría de los casos flotan, por lo que puede que no se hayan removido (47).

8.2.2 Consumo de energía

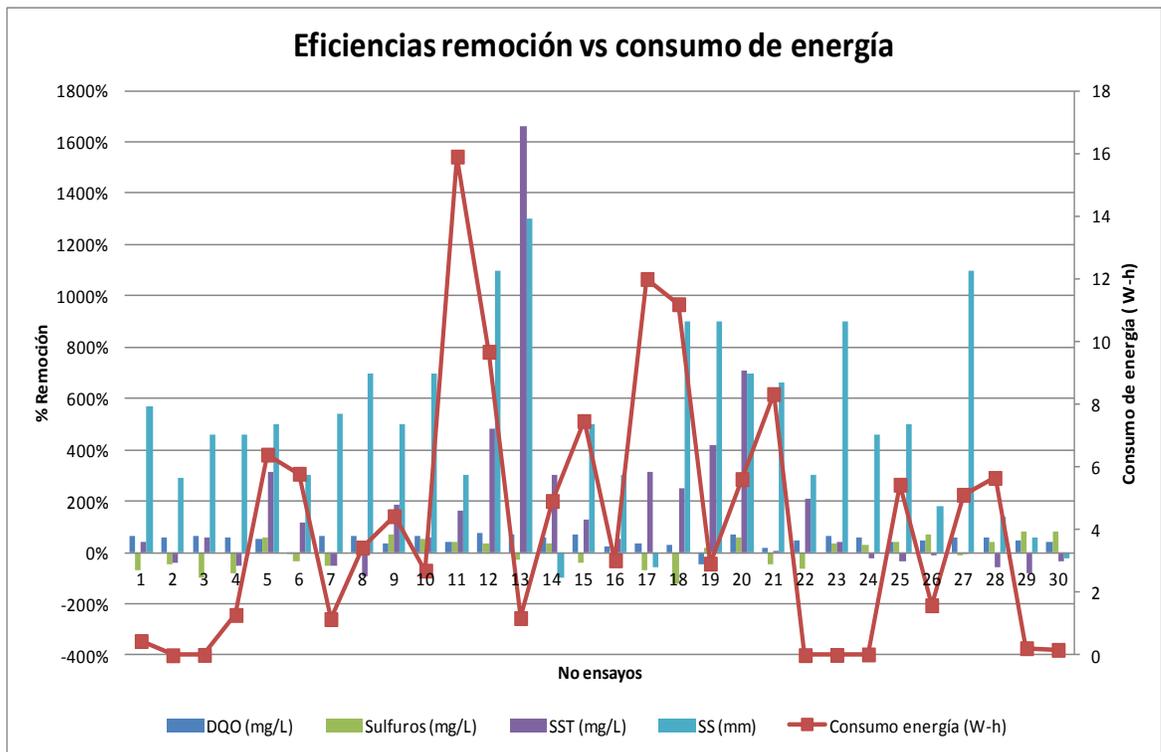
Ilustración 57. Consumo de energía



Fuente: Autora

Los mayores consumos de energía se encontraron en los ensayos 11, 12, 14, 17, 18 y 21, por su parte los menores consumos corresponden a los ensayos 4, 7, 13y 26. El siguiente gráfico correlaciona el consumo de energía con las eficiencias de remoción de los parámetros.

Ilustración 58. Consumo de energía vs eficiencias de remoción

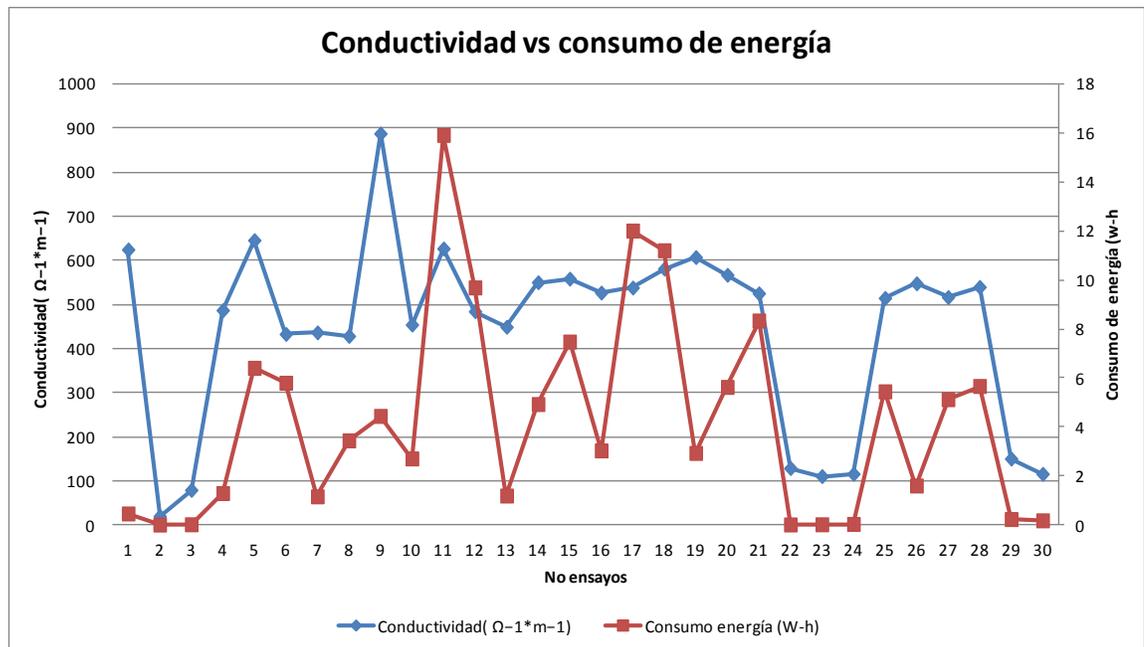


Fuente: Autora

Todos los ensayos que generaron mayor consumo de energía, tienen remoción de DQO en promedio de 45%, inclusive el ensayo 12 llego a una remoción del 74%, siendo la mejor remoción de todos los ensayos realizados, para este ensayo también se obtuvo una de las mejores eficiencias para SST y SS: 483% y 1100% respectivamente. Los ensayos 14 y 17 no presentaron remoción de SS; por su parte los sulfuros no fueron removidos en los ensayos 17, 18 y 21, que como se menciono anteriormente, puede estar asociado a la homogenización de la muestra ó a la formación de sulfuros de hierro.

La siguiente gráfica muestra la relación de la conductividad con el consumo de energía; para la mayoría de ensayos de electrocoagulación la conductividad es directamente proporcional al consumo de energía, esto está relacionado con la capacidad del agua para conducir electricidad.

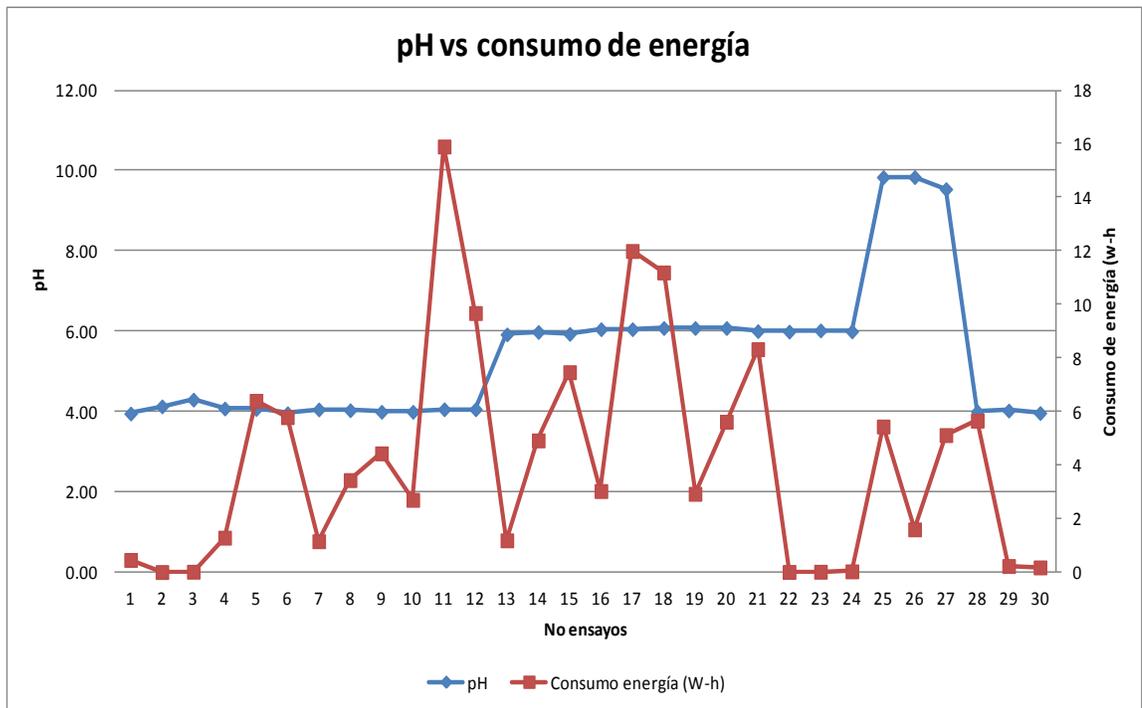
Ilustración 59. Consumo de energía vs conductividad



Fuente: Autora

Se gráfico también la relación del consumo de energía y el pH, sin embargo no se observa una relación concreta entre estos dos parámetros.

Ilustración 60. Consumo de energía vs pH

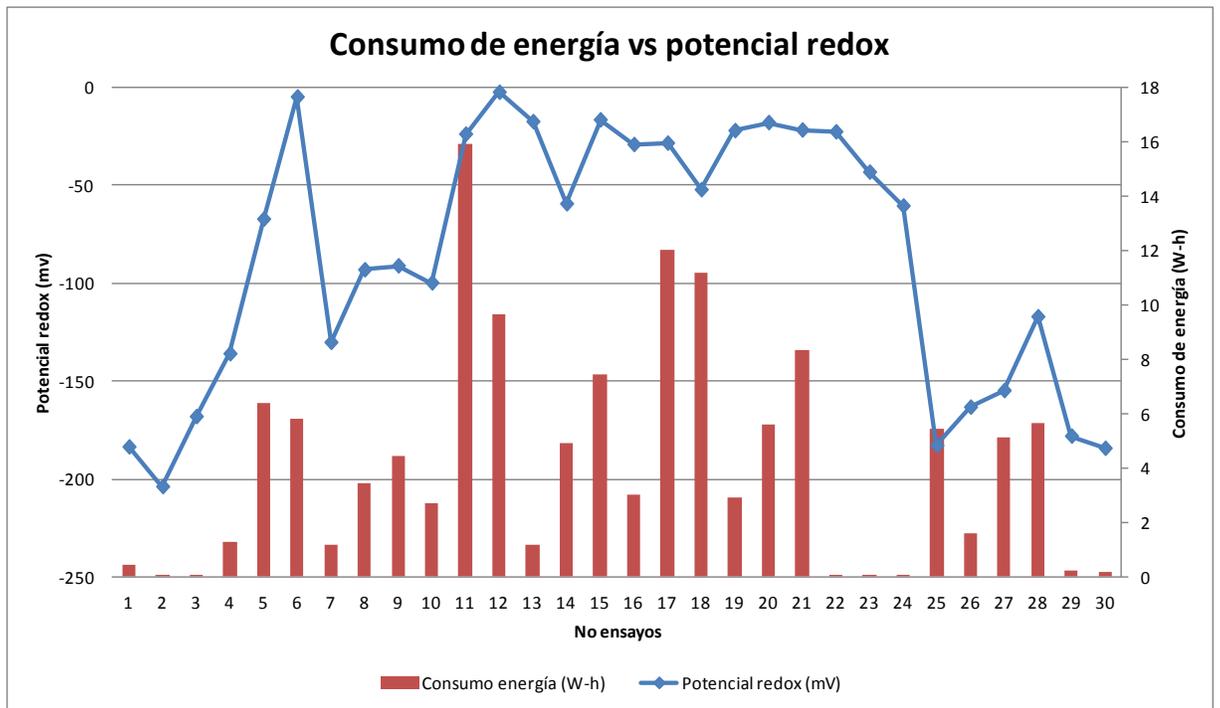


Fuente: Autora

Tres de los 4 ensayos que mayor consumo de energía (ensayos 11, 12, 18), coinciden con los cambios de pH más altos respecto a la muestra inicial antes de tratamiento.

También se realizó la comparación entre el consumo de energía y el potencial redox, encontrando que tres de los cuatro ensayos con mayor consumo de energía, generaron los potenciales redox más bajos de todos los ensayos.

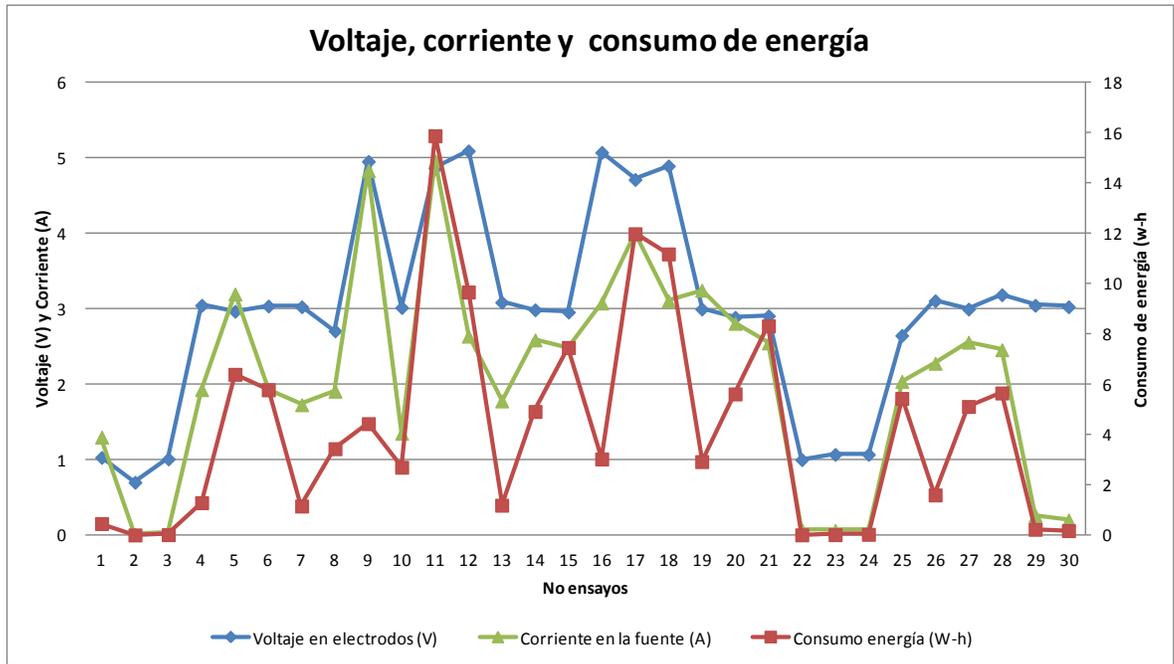
Ilustración 61. Consumo de energía vs potencial redox



Fuente: Autora

Los ensayos que más consumieron energía están relacionados con aquellos que más requerían tensión y a su vez que marcaron mayores valores de corriente. Los ensayos 2, 3, 22, 23 y 24 presentaron un consumo bajo de energía ya que trabajaron sólo con 1 V y por lo tanto disminuyó la actividad en la celda electrolítica, esto se comprueba mediante los valores de remoción y potencial redox entre otros, ya que son relativamente bajos en comparación con los demás.

Ilustración 62. Consumo de energía y voltaje y corriente



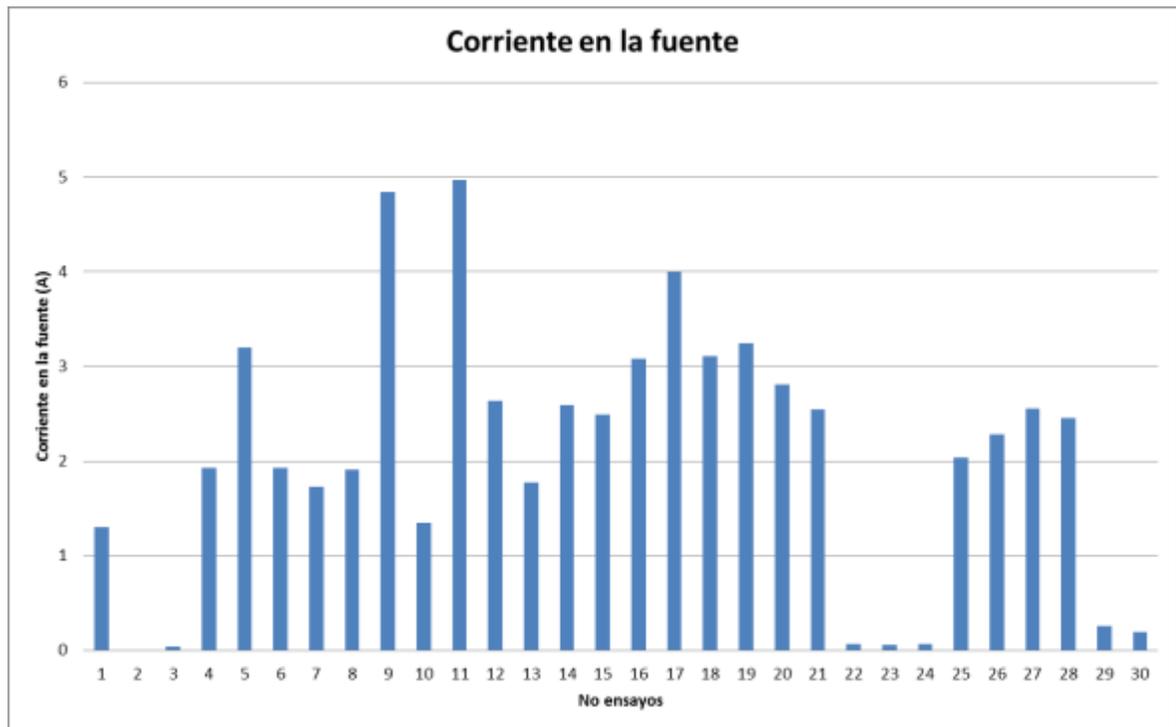
Fuente: Autora

Dos de los ensayos que mayor consumo de energía generaron, corresponden a los ensayos con mejores eficiencias totales (ensayos 12, 18).

Finalmente es importante aclarar la relación de potencia y tiempo ya que los ensayos 16, 19 y 20 tienen consumos bajos de energía, pero trabajaron con una potencia alta, esto se explica teniendo en cuenta que el tiempo de duración del ensayo fue corto, por lo que se deduce que el consumo de energía, no siempre está asociado a mayor tensión o corriente, sino que también depende de la duración del ensayo.

8.2.3 Corriente en la fuente

Ilustración 63. Corriente en la fuente



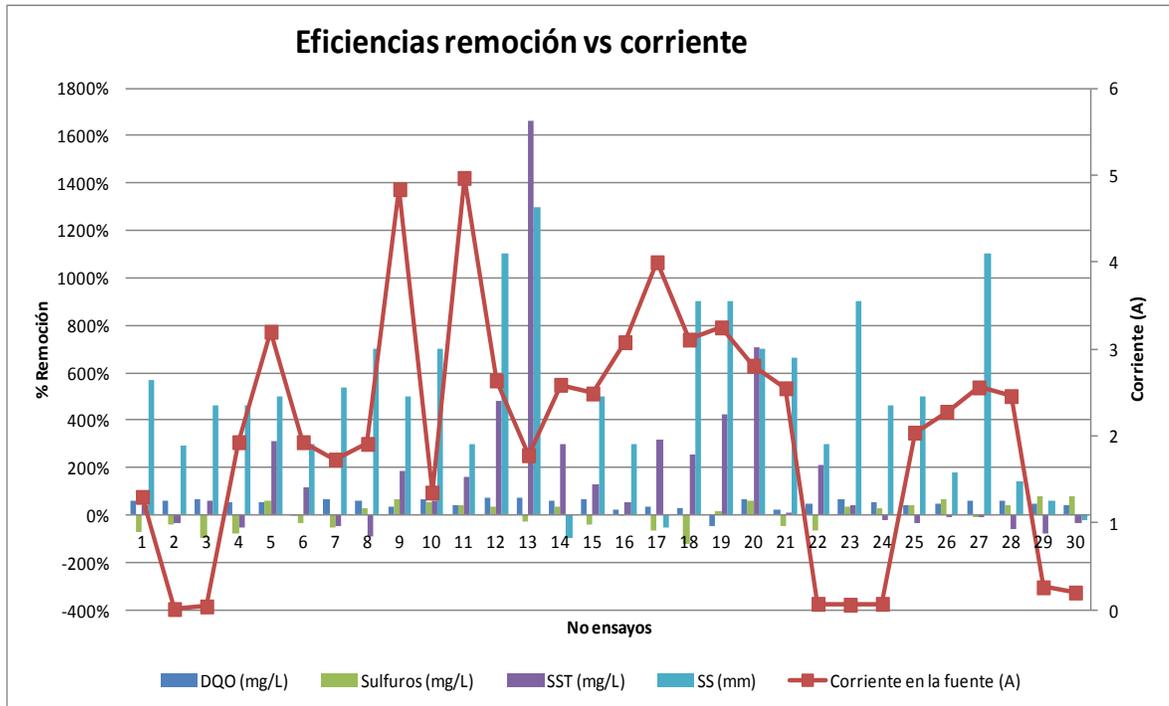
Fuente: Autora

Al igual que el consumo de energía, los valores más altos se obtuvieron para los ensayos de mayor tensión, ensayos 9 y 11, trabajaron a 5 Voltios y los tiempos de duración fueron 5 y 12 minutos respectivamente.

Para los ensayos que obtuvieron las corrientes más bajas (ensayos 2, 3, 22, 23, 24), se encontró que se relacionan con los consumos de energía más bajos y así mismo con los ensayos que obtuvieron menor deposición de lodo en el electrodo de hierro.

Por el contrario, los ensayos que mayor corriente presentaron, se relaciona con dos de los ensayos que mejor conductividad presentaron al final del ensayo (ensayos 9, 11), inclusive el ensayo 9 presentó una de las mejores remociones de sulfuros con 69%. Los ensayos 9, 11 y 17, evidenciaron algunos de los mejores resultados para potencial redox.

Ilustración 64. Corriente vs eficiencias remoción

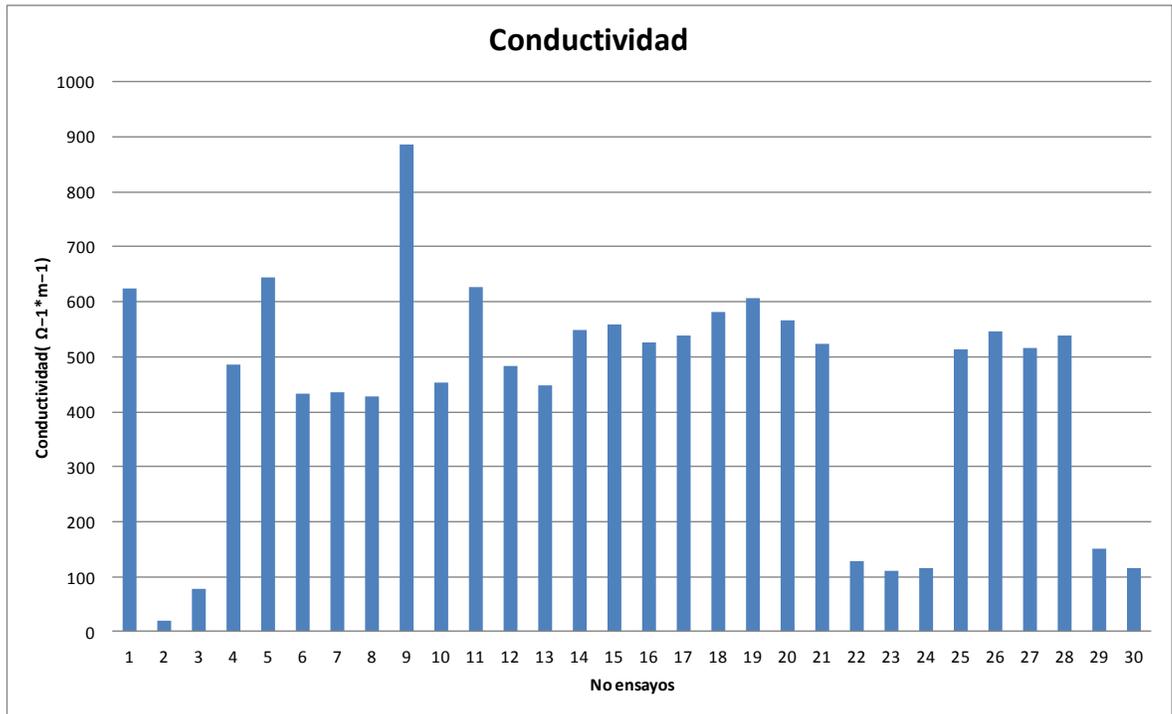


Fuente: Autora

Los ensayos 5, 9, 11 y 17 obtuvieron la mayor corriente, relacionando la remoción para todos los ensayos, se removieron parámetros, a excepción del ensayo 17, en el que no se removieron SS ni sulfuros.

8.2.4 Conductividad

Ilustración 65. Conductividad



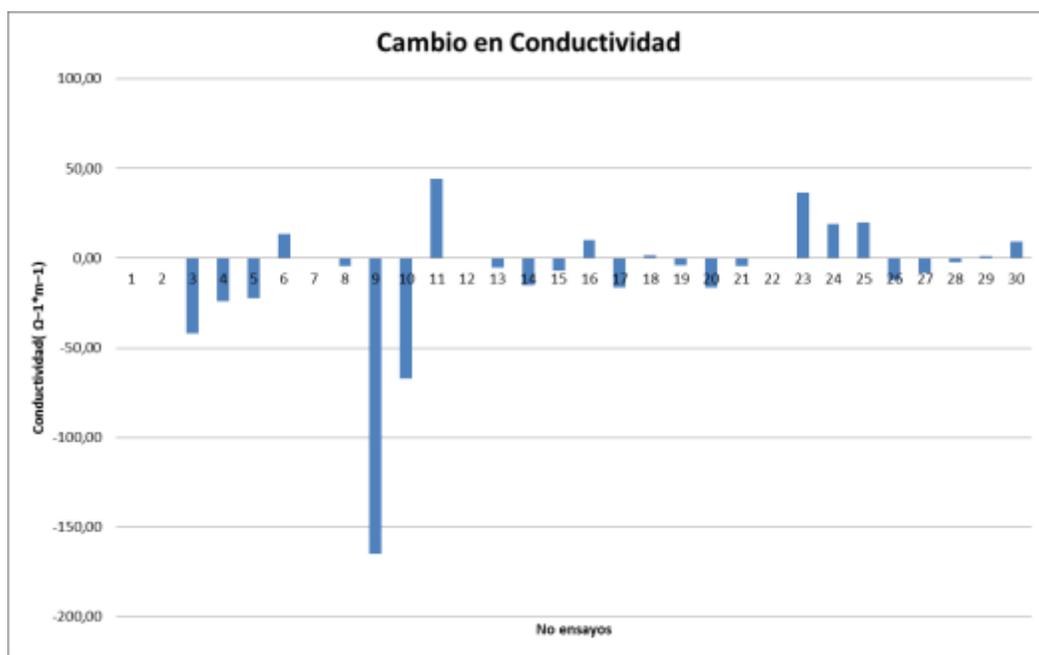
Fuente: Autora

La conductividad facilita el transporte de electricidad a través del agua residual y por tanto debe mejorar la remoción de contaminantes; aunque la mayoría de los ensayos presentó una conductividad promedio de $441 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$, los ensayos que obtuvieron menores conductividades, están asociadas a las menores tensiones manejadas. Los valores más bajos de conductividad, corresponden a los ensayos que presentaron menor consumo de energía, menor actividad en los electrodos, menores mejoras en el potencial redox de la muestra final.

Por su parte los ensayos que presentaron mayores conductividades fueron: 1, 5, 9, 12, 18, 19 y 20. Uno de los ensayos con mayor conductividad (ensayo 11), corresponde a uno de los ensayos que mayor energía eléctrica consumió.

Respecto a los cambios presentados en la conductividad, de la muestra inicial y la final, los ensayos que presentaron mayores cambios fueron: 3, 4, 5, 9, 10, 11, 23, 24, 25; de los anteriores ensayos tan sólo el número 9 tuvo remoción en todos los parámetros los demás no tuvieron remoción en SST. Por lo anterior puede concluirse que los cambios en la conductividad no están relacionados con las eficiencias de remoción del tratamiento, sino que son resultado del mismo.

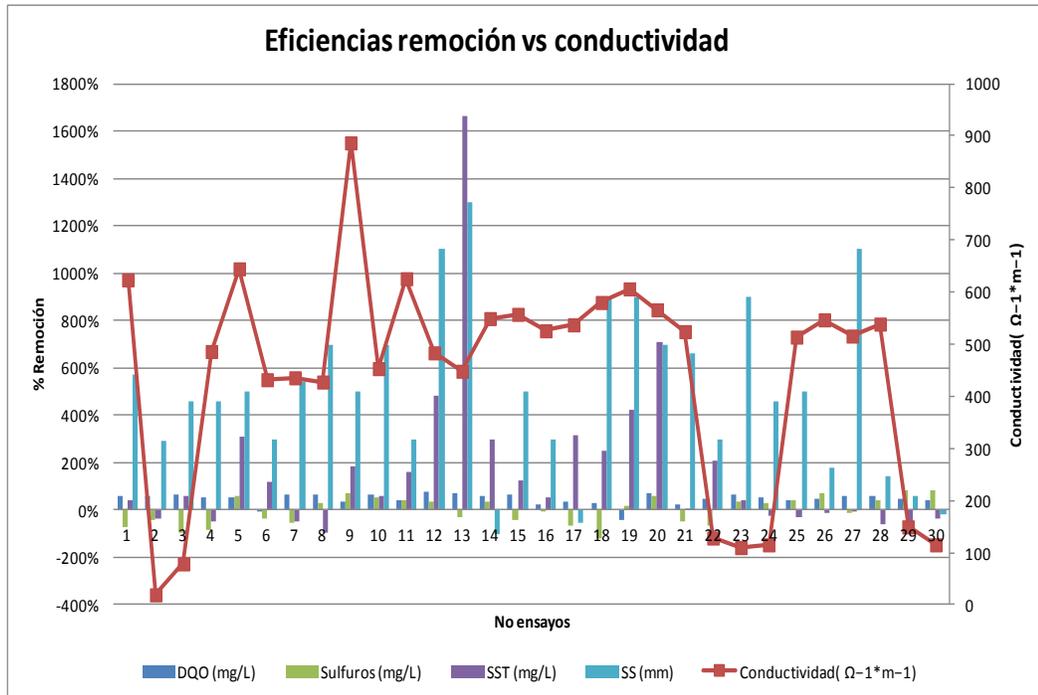
Ilustración 66. Cambio en conductividad



Fuente: Autora

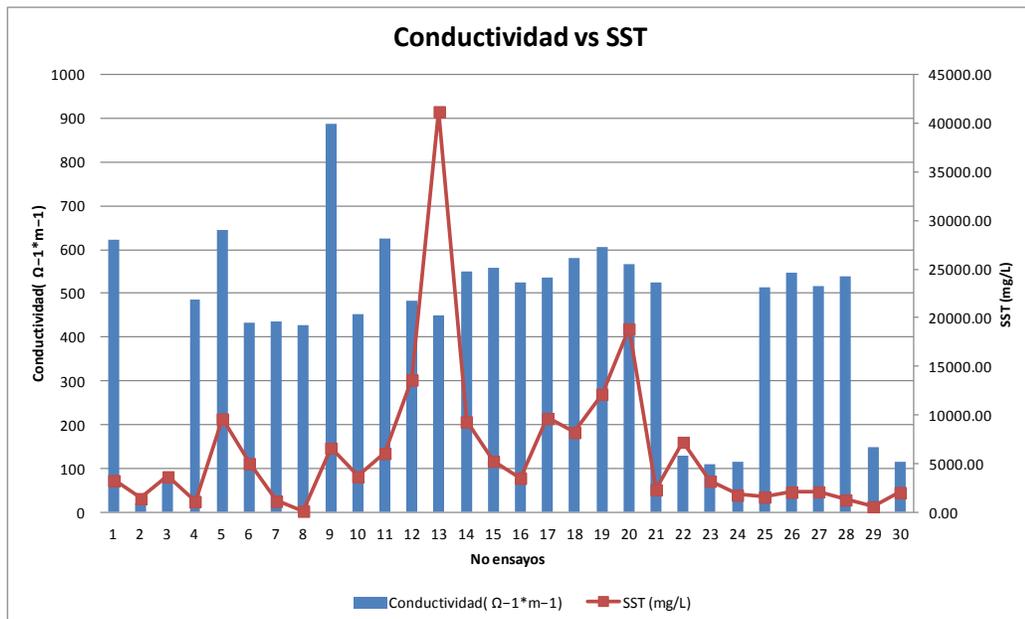
Se compararon los ensayos que obtuvieron mayores conductividades, de los 5 ensayos que presentaron las conductividades más altas, uno de ellos (ensayo 1) obtuvo una de las remociones más altas en DQO con 62%, otro de estos ensayos (ensayo 5), se destacó de los demás resultados, obteniendo remociones importantes de sulfuros, SST, SS, con 58%, 312% y 500% respectivamente. Por otro lado el ensayo 9 obtuvo una remoción del 69% para sulfuros, uno de los valores más altos de todos los ensayos. El ensayo 19 se destacó, por presentar buenas remociones en SST y SS, con 421% y 900% respectivamente. Finalmente los ensayos con más altas conductividades, se destacaron entre los ensayos con mejores resultados en potencial redox y eficiencias totales.

Ilustración 67. Conductividad vs eficiencias remoción



Fuente: Autora

Ilustración 68. Conductividad vs SST

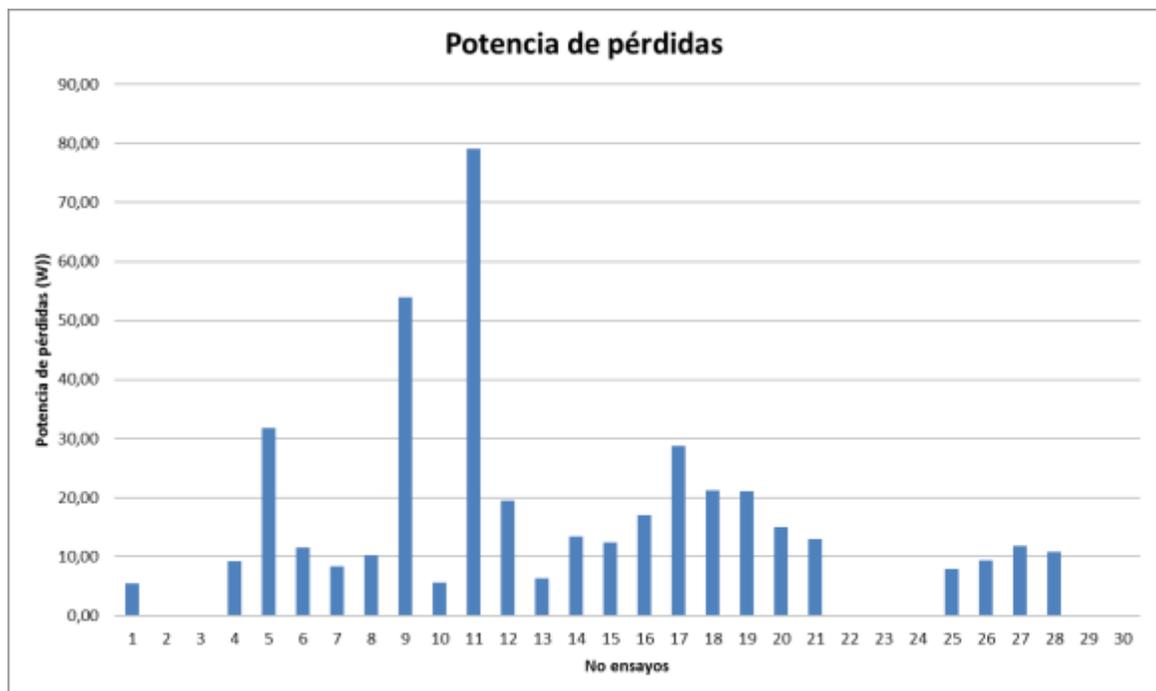


Fuente: Autora

No se presenta relación evidente entre la conductividad y la cantidad de SST de la muestra final.

8.2.5 Potencia de pérdidas

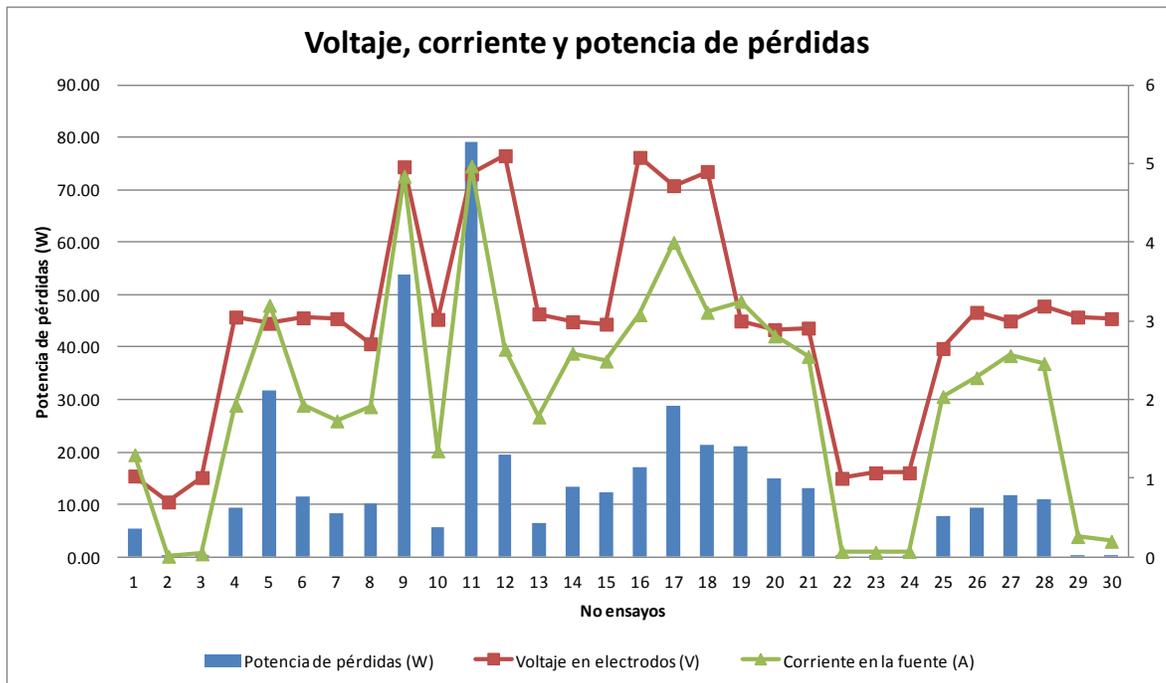
Ilustración 69. Potencia de pérdidas



Fuente: Autora

La potencia de pérdidas, depende de la tensión y la corriente, por ende es directamente proporcional a estas variables. La potencia de pérdidas aumenta directamente proporcional a la potencia de suministro de la fuente. Los valores más bajos de potencia de pérdidas corresponden a aquellos ensayos con menor conductividad, consumo de energía, baja actividad en los electrodos, inclusive se relacionan con dos ensayos en los que el pH no cambió significativamente en el tratamiento (ensayos 2, 3).

Ilustración 70. Potencia de pérdidas, voltaje y corriente



Fuente: Autora

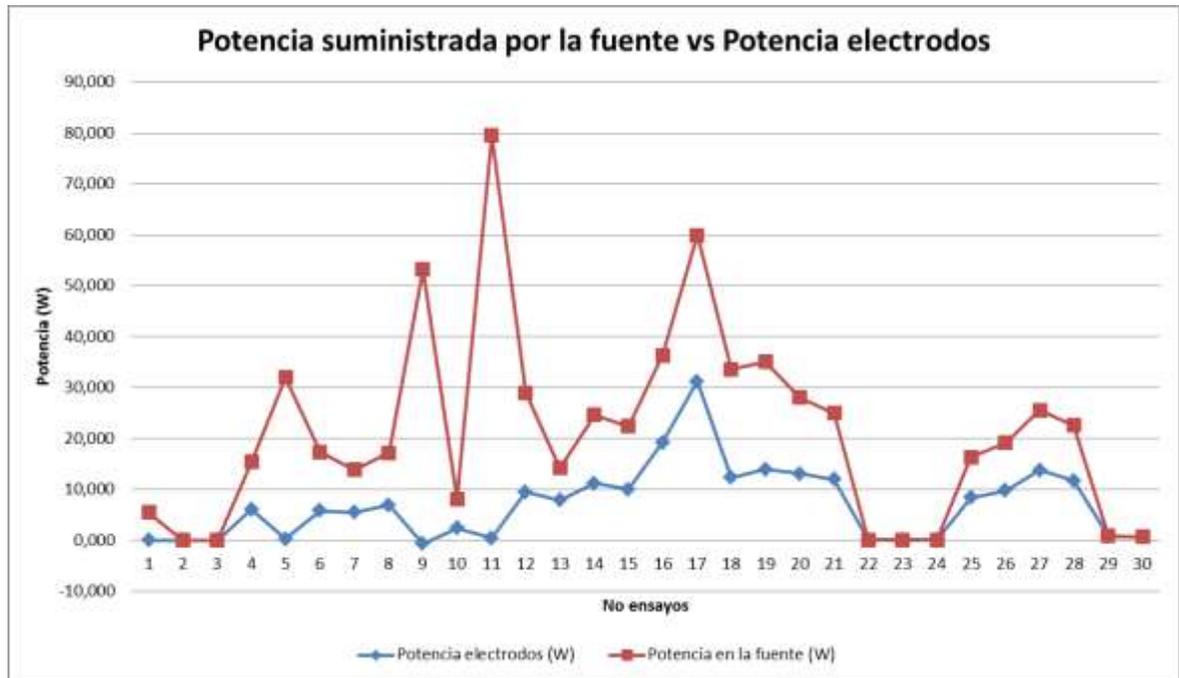
8.2.6 Potencia de los electrodos y potencia suministrada por la fuente

La diferencia entre las dos variables, es la potencia disipada en forma de calor por el banco de resistencias externo, entre menor sea esta diferencias más eficiente es el proceso de electrocoagulación pues, la potencia suministrada por la fuente, se utilizará en su mayor parte en el proceso electrolítico que se lleva a cabo en la celda. Prototipos mejorados, deben buscar el valor mínimo seguro de la resistencia externa que garantice la ausencia de cortos circuitos entre los electrodos.

Las menores potencias de la fuente y electrodos corresponden a los ensayos que se realizaron con tensión de 1 V, también a los que se trabajaron a menor consumo de energía, menor actividad en los electrodos, menores cambios en el potencial redox. Paradójicamente dos de estos ensayos (ensayos 3, 23) presentaron remociones importantes de DQO, una de las posibles justificaciones

para este comportamiento, es que aún baja actividad eléctrica puede generar cambios en la DQO.

Ilustración 71. Potencia suministrada por la fuente vs potencia electrodos

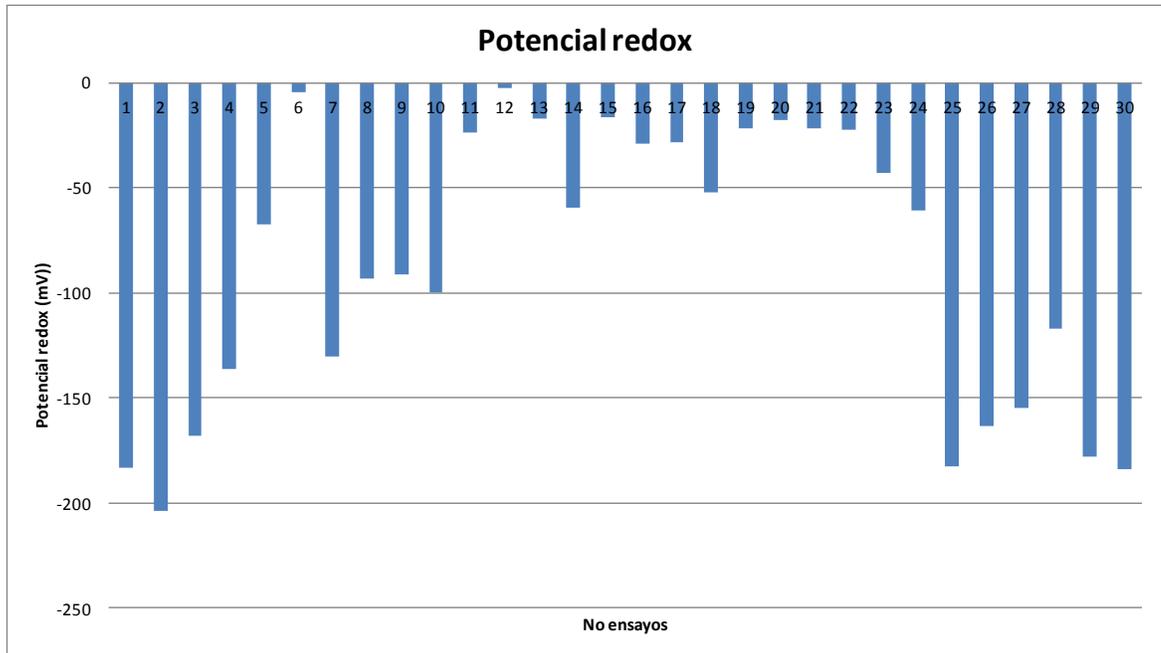


Fuente: Autora

8.2.7 Potencial redox

Para todas las muestras de agua el potencial redox fue negativo, esto significa que el agua residual contenida es altamente reductora y difícilmente favorece las reacciones de oxidación, en otras palabras, un agua con potencial redox negativo es indicador de un agua altamente contaminada. La siguiente gráfica muestra la eficiencia de remoción de parámetros, de acuerdo a los cambios en el potencial redox de la muestra inicial contra la final.

Ilustración 72. Potencial redox

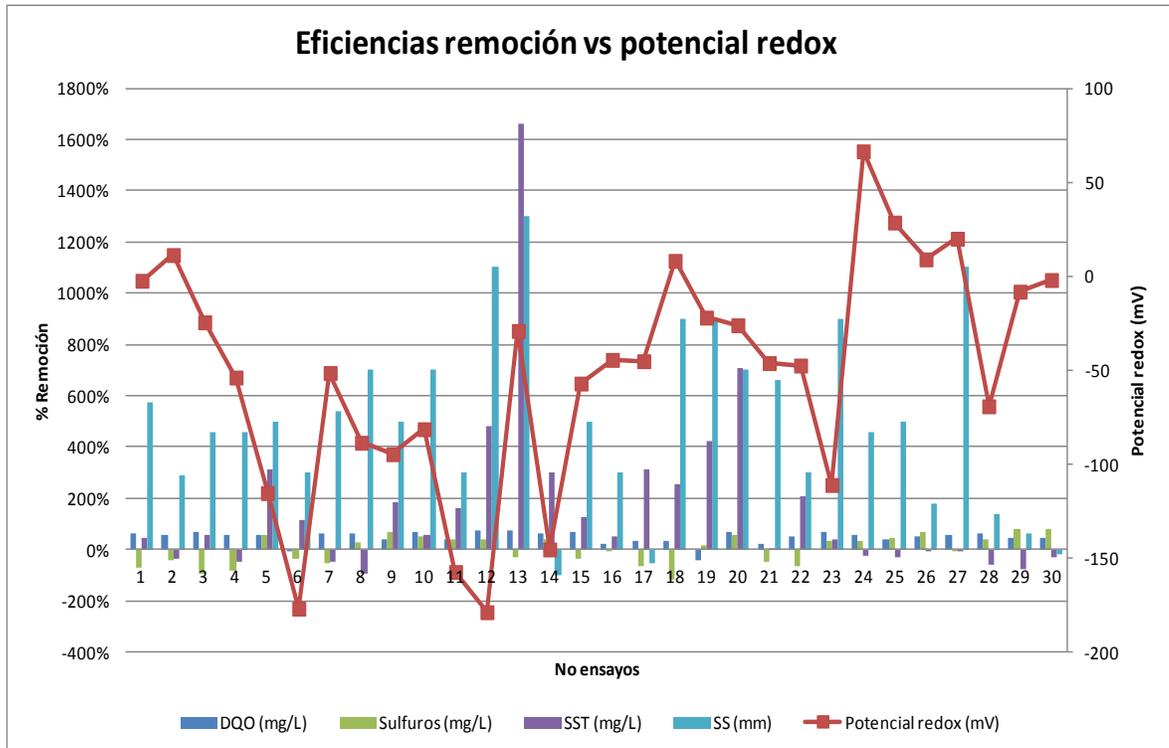


Fuente: Autora

Las muestras con menor potencial redox, se obtuvieron en los ensayos 6, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22 y 23.

Los ensayos 12, 13, 20 y 23 presentaron buenas remociones en los 4 parámetros, para DQO se obtuvo una remoción de 74%, 73%, 68% y 65% respectivamente, para sulfuros las remociones obtenidas fueron 38%, -29%, 58% y 33% respectivamente. En relación a los SST se obtuvieron las siguientes eficiencias de producción: 483%, 1663%, 708% y 38%; y finalmente para SS se obtuvo lo siguiente: 1100%, 1300%, 700% y 900% respectivamente.

Ilustración 73. Potencial redox vs eficiencias remoción



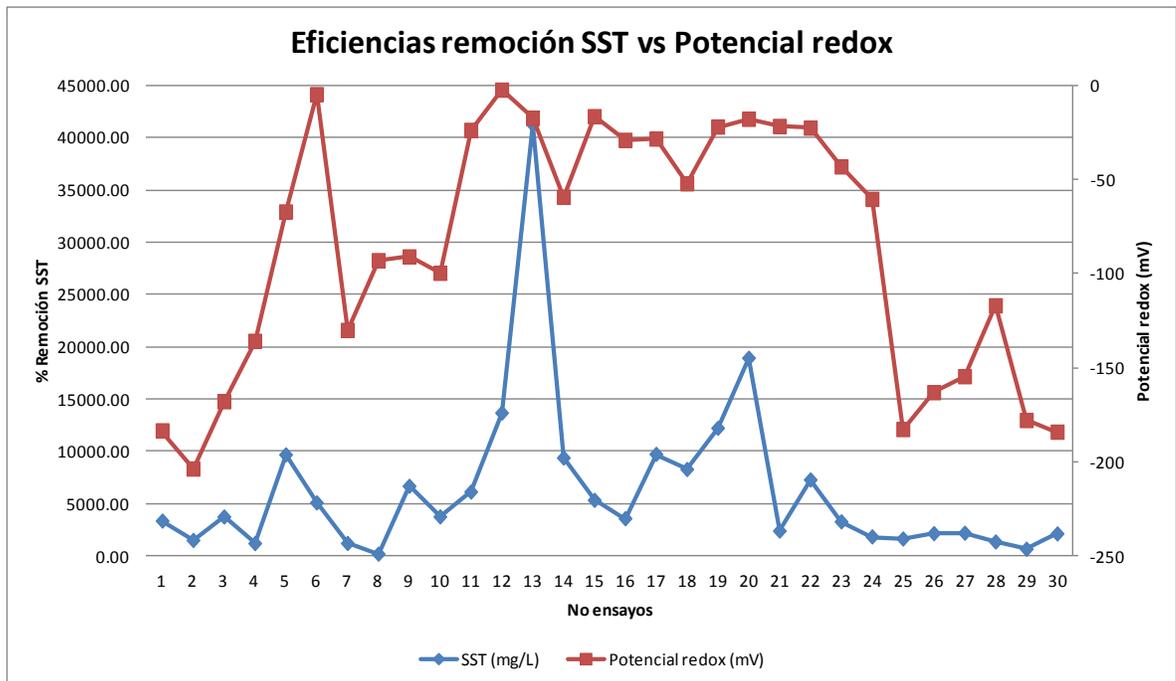
Fuente: Autora

En la mayoría de ensayos el potencial redox aumento (paso de un valor muy negativo a uno menos negativo), mejorando su capacidad para oxidarse, es decir que salieron menos contaminadas.

Las aguas tratadas presentan una fuerte carga orgánica, con un gran contenido de grasas y proteínas. Los cambios de pH afectan la carga eléctrica de los aminoácidos, alterando la carga superficial, lo cual provoca la precipitación de las proteínas y aglomeraciones; como puede verse en la siguiente expresión, existe una relación directa entre el potencial redox (Eh) y el pH: $Eh = 1,234 - 0,058 \cdot pH + 0,0145 \cdot \log_{10}(Ppo^3)$, de esta forma un aumento en el potencial redox, se ve reflejado en la formación de SST y SS. La siguiente gráfica permite evidenciar que el comportamiento del potencial redox es directamente proporcional a los SST presentes en la muestra final.

³ Presión parcial de oxígeno

Ilustración 74. Potencial redox vs eficiencia remoción SST



Fuente: Autora

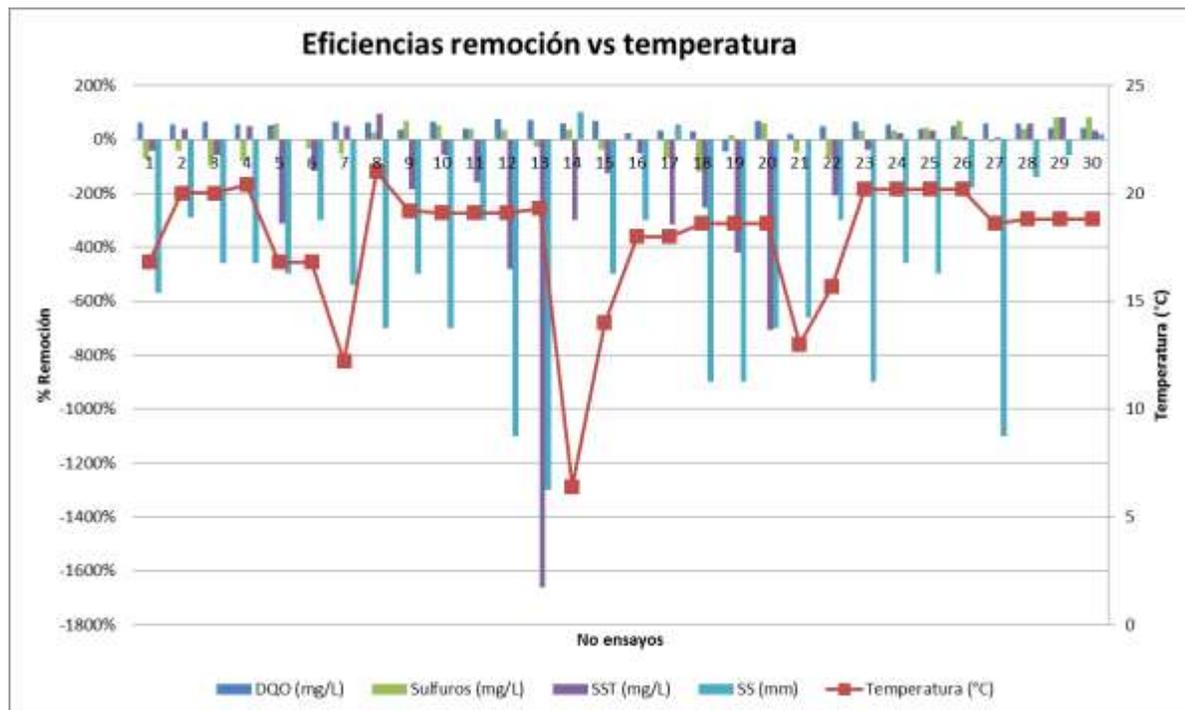
Los resultados más bajos para potencial redox, se obtuvieron en aquellos ensayos en que se consumió menor energía, hubo menos cambios de pH, menor actividad en los electrodos, de hecho dos de los 5 ensayos (ensayos 5, 29, 30) con valores más críticos de potencial redox corresponden a los ensayos más bajos en eficiencia. Sin embargo contradictoriamente, los ensayos 29 y 30 presentaron una de las mayores eficiencias en sulfuros (80%), este comportamiento puede estar relacionado con la separación de las muestras y la homogenización de las mismas al realizar los ensayos.

8.2.8 Temperatura

El promedio de temperatura fue de 17.88 °C, esta estuvo influenciada por la refrigeración de las muestras, aunque estas se dejaban acondicionar a temperatura ambiente.

Al realizar la comparación de las temperaturas más altas y más bajas y el comportamiento de los demás parámetros, no se encontró una relación evidente entre estos. Para las temperaturas mayores o iguales a 20°C, se relacionaban con los ensayos de baja actividad eléctrica y bajos cambios en el potencial redox, por el contrario temperaturas entre los 19 °C relacionan mayor actividad eléctrica y por ende remoción de contaminantes. Sin embargo, en la práctica se observó que la mayoría de temperaturas están condicionadas a las temperaturas ambiente, por lo que se puede concluir que no hay una tendencia marcada para relacionar las eficiencias de remoción por temperatura.

Ilustración 75. Temperatura vs eficiencias remoción

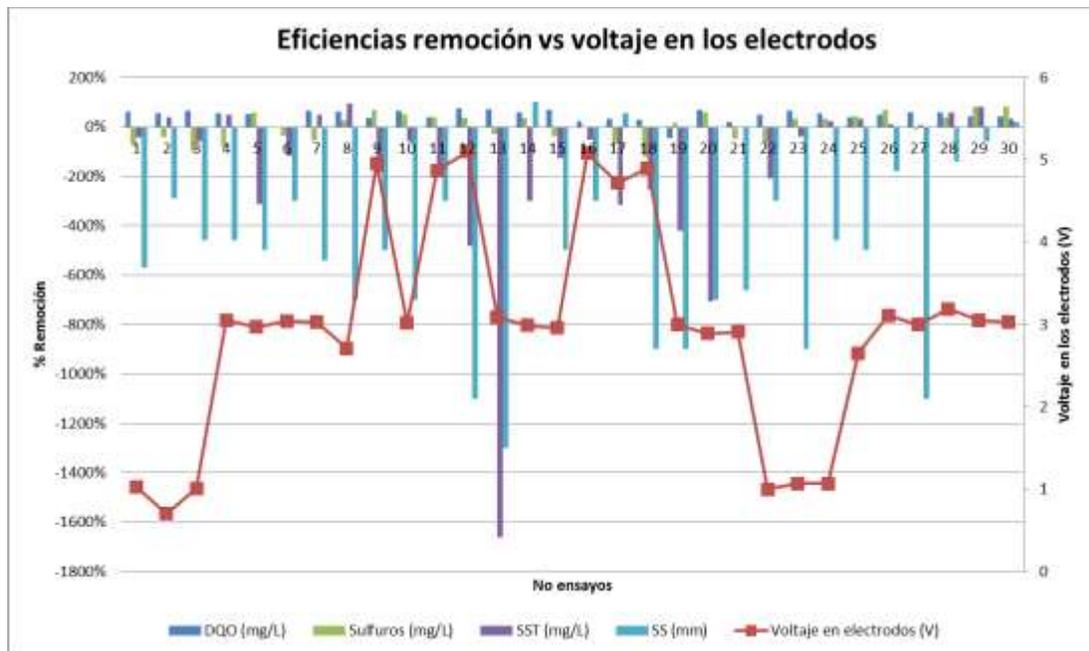


Fuente: Autora

8.2.9 Tensión

La tensión de los electrodos es una variable de control, sin embargo fue comparada con las eficiencias de remoción de cada parámetro.

Ilustración 76. Voltaje en los electrodos vs eficiencias de remoción



Fuente: Autora

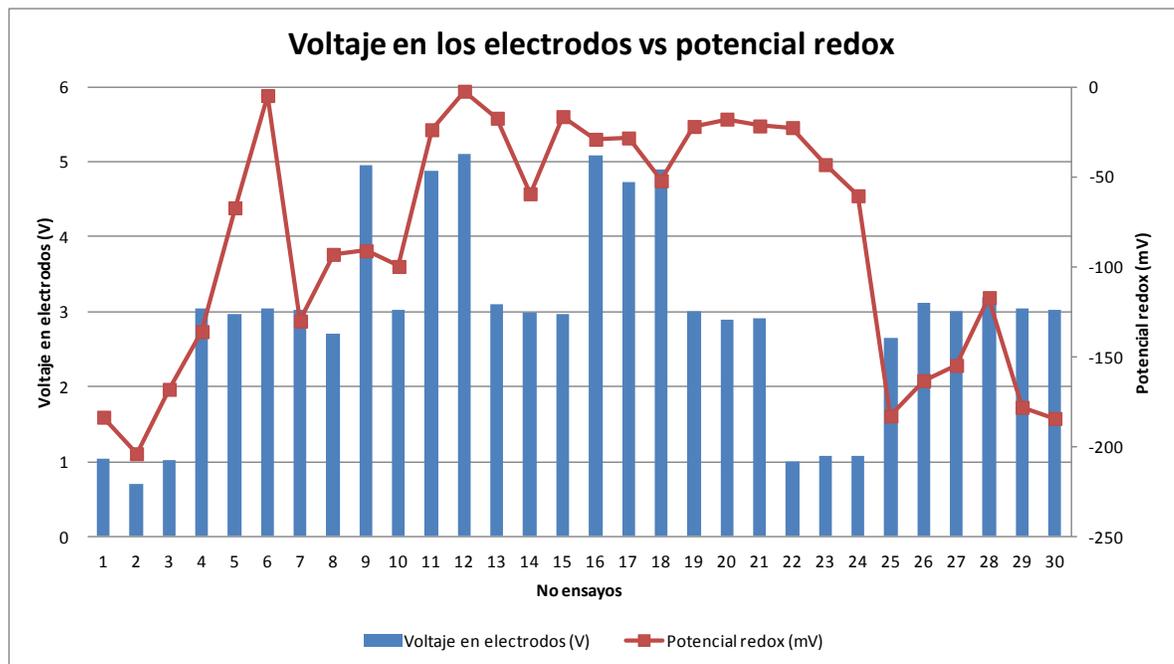
Los ensayos realizados a tensión 1 V, no presentaron buenas eficiencias de remoción en comparación con los demás resultados de ensayos, tampoco se asocio buena actividad de electrodos, presentaron bajas conductividades, pocos cambios de pH asociados, bajos resultados de potencial redox; de los seis ensayos realizados a 1 V, cuatro no presentaron remoción de sulfuros (ensayos 2, 22, 23, 24).

Respecto a los ensayos realizados a tensión 3 V, se realizaron en total 18, y presentan mayor variabilidad; para DQO, siete de estos ensayos (ensayos 7, 8, 10, 13, 15, 20, 28) presentaron buenas eficiencias de remoción (mayores a 60%), para sulfuros cinco de los ensayos (ensayos 5, 20, 26, 29, 30) presentaron eficiencias mayores al 58%, para SST cinco ensayos (ensayos 5, 13, 14, 19, 20) presentaron eficiencia de producción de sólidos mayores a 300%, sin embargo cinco de estos ensayos (ensayos 4, 7, 8, 28, 29) no presentaron producción de sólidos, para SS todos los ensayos presentaron producción de sólidos a excepción de los ensayos 14 y 30, inclusive once de los dieciocho ensayos realizados se destacaron por su producción de SS. Estos ensayos, resaltan por sus cambios de pH en la muestra inicial respecto a la final, incluso ensayos como el número 6

llego a cambiar 3.295 unidades. Respecto al potencial redox, seis de los dieciocho ensayos (ensayos 6, 13, 15, 19, 20, 21) realizados a 3 V, presentaron buenos resultados de este parámetro. Finalmente seis de los ensayos (5, 10, 13, 19, 20, 27), se destacaron dentro de las mejores eficiencias de remoción obtenidas.

Para los ensayos realizados a tensión 5 V, se encuentran los ensayos con mayor conductividad, mayor consumo de energía, mayor corriente, se encuentra a su vez el ensayo 12 que obtuvo mayor remoción de DQO con 74%; también se destaca una de las remociones más altas para sulfuros con 69%, obtenida en el ensayo 9, sin embargo, el ensayo 18 que no presentó remoción de sulfuros y al contrario aumentó el valor, para explicar este comportamiento se consideró una interferencia por homogenización de la muestra e inclusive formación de sulfuros de hierro. Para SST y SS se presentaron buenas eficiencias de remoción encontrando tres de los mejores ensayos (ensayos 9, 12, 18) para SS y para SST dos de los mejores ensayos (ensayos 12, 17). De los seis ensayos realizados con 5 Voltios, cuatro (ensayos 11, 12, 16, 17) evidenciaron buenos resultados para potencial redox, dos de estos (ensayos 12, 18) presentaron buenas eficiencias totales.

Ilustración 77. Voltaje en los electrodos vs potencial redox

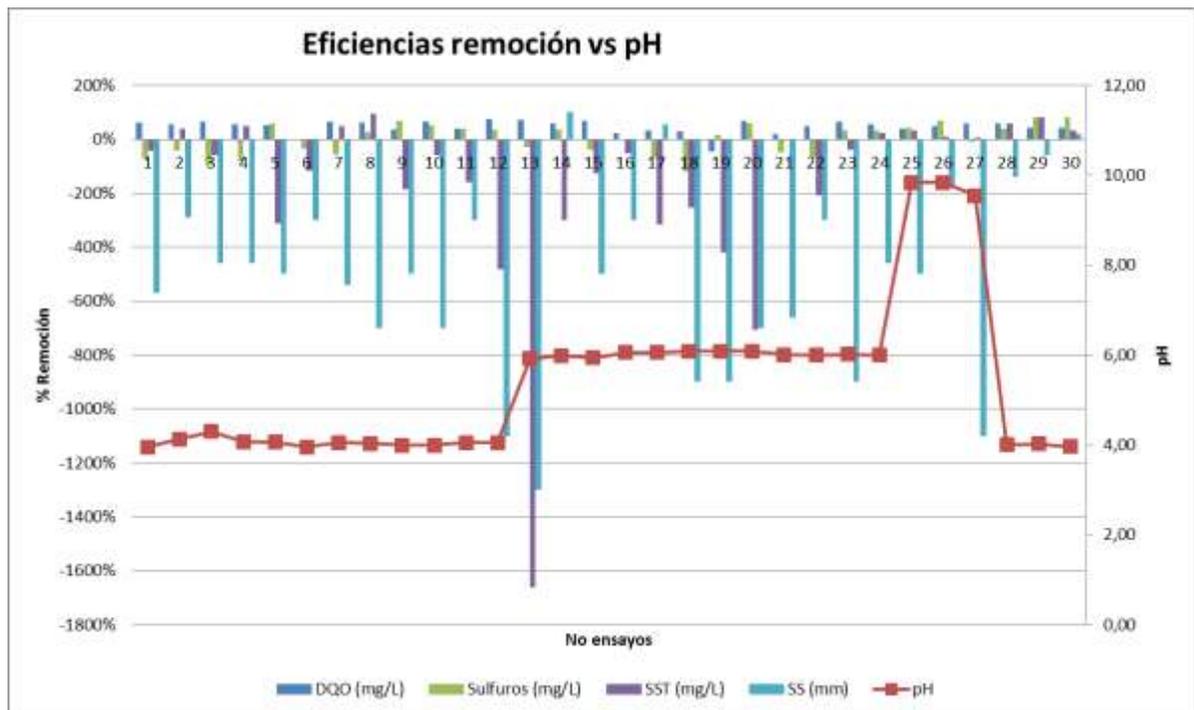


Fuente: Autora

8.2.10 pH

La evaluación de las eficiencias relacionadas con el pH, se realizó verificando los ensayos en los diferentes rangos de pH, determinados en el diseño experimental (pH 4, 6 y 11) y estableciendo los mejores ensayos para cada uno de los rangos.

Ilustración 78. pH vs eficiencias remoción



Fuente: Autora

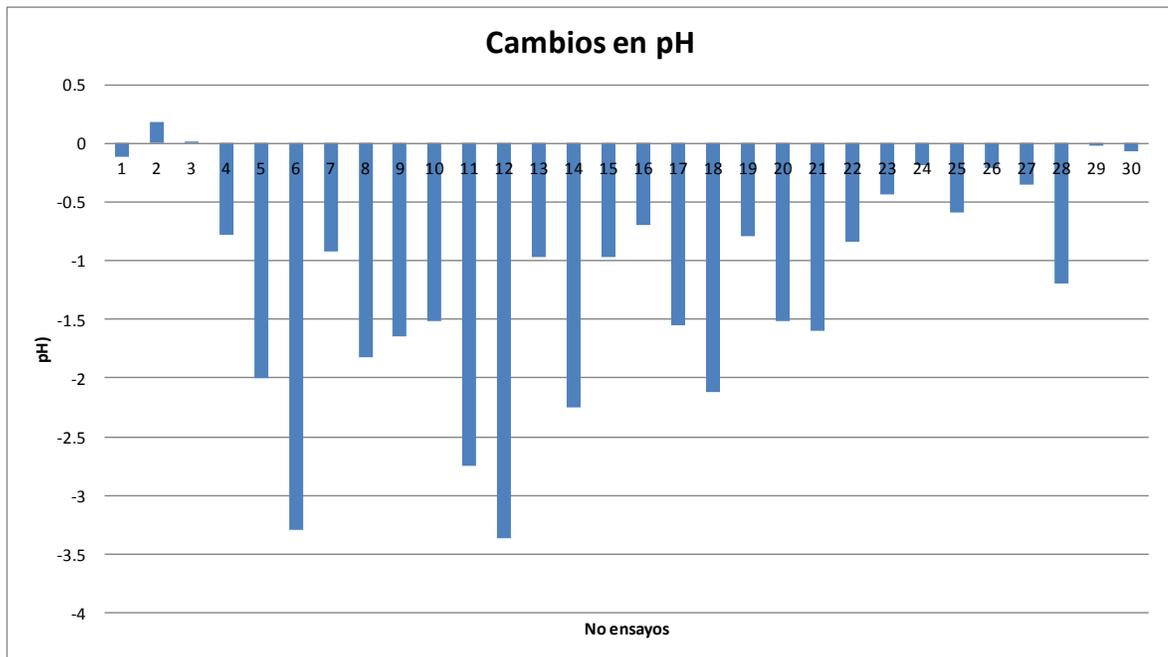
Se realizaron en total quince ensayos a pH 4, en estos se encontraron cuatro de los valores más altos de conductividad (ensayos 1, 5, 9, 11). De estos quince ensayos realizados en catorce de estos, se obtuvo remoción de DQO y en siete de ellos (ensayos 1, 3, 7, 8, 10, 12, 28), se destacó la remoción como una de las mejores de los ensayos. Para el caso de sulfuros, cuatro de los ensayos (ensayos 5, 9, 29, 30), presentaron eficiencias de remoción por encima de 58%, sin embargo en tres de los ensayos realizados (ensayos 1, 3, 4), no se removieron sulfuros, por el contrario se obtuvo un valor mayor que el inicial. Para el caso de los SST, sólo dos ensayos (ensayos 5, 12), produjeron un porcentaje importante

de SST. Con respecto a los SS, catorce ensayos demostraron producción de sólido y siete de estos ensayos produjeron sólidos por encima del 500%. En relación al cambio de pH, se evidenció variabilidad, en promedio por ensayo se cambió 1.3 unidades de pH. Se observaron cambios positivos en el potencial redox para los ensayos 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12. El mejor ensayo obtenido a pH 4, fue el número 12, removiendo 74% de DQO y 38% de sulfuros, para el caso de los SST y SS la eficiencia de producción fue de 483% y 1100%. El ensayo 5 también obtuvo buenos resultados, removiendo 53% de DQO y 58% de sulfuros, para el caso de los SST y SS la eficiencia de producción fue de 312% y 500%. Finalmente para la eficiencia total, los ensayos 28, 29 y 30 se destacaron como los más bajos a pH 4, las eficiencias más altas se obtuvieron en los ensayos 5, 10, 12.

Se realizaron seis ensayos a pH 6, de estos once presentaron remoción de DQO, cuatro de ellos (ensayos 13, 15, 20, 23) se destacaron con eficiencias mayores al 65%. En remoción de sulfuros sólo cuatro (ensayos 19, 20, 23, 24) presentaron remoción, el ensayo 18 no presentó remoción de sulfuros por el contrario estas concentraciones al final del tratamiento aumentaron. Para SST, once de los ensayos evidenciaron producción de sólidos, cinco de estos (ensayos 13, 14, 17, 19, 20), por encima del 300%. Con respecto a los SS, diez de los ensayos presentaron producción de SS, ocho de ellos por encima de 500%, nueve de estos ensayos se destacan por sus valores de potencial redox obtenidos; al revisar las eficiencias totales logradas, se evidencia cinco ensayos (ensayos 13, 18, 19, 20, 23), que obtuvieron buenos resultados respecto a los demás resultados del trabajo. El mejor ensayo obtenido a pH 6, fue el número 14, removiendo 59% de DQO y 38% de sulfuros, para el caso de los SST la eficiencia de producción fue de 300%, en este ensayo no se removieron SS respecto a la muestra inicial.

Para los ensayos de pH 11, se realizaron con el pH de la muestra (siempre alcalino), en promedio 9.74, se realizaron en total 3 ensayos a pH alcalino, encontrando que no se evidencia actividad eléctrica alta, adicionalmente aunque hubo eficiencias de remoción y producción en DQO, sulfuros y SS, no se destacan por encima de los demás resultados, a excepción del ensayo 26 en el que los sulfuros alcanzaron una remoción de 69%. Respecto al potencial redox, estos ensayos se encuentran catalogados como unos de los más bajos rendimientos para este parámetro.

Ilustración 79. Cambios pH

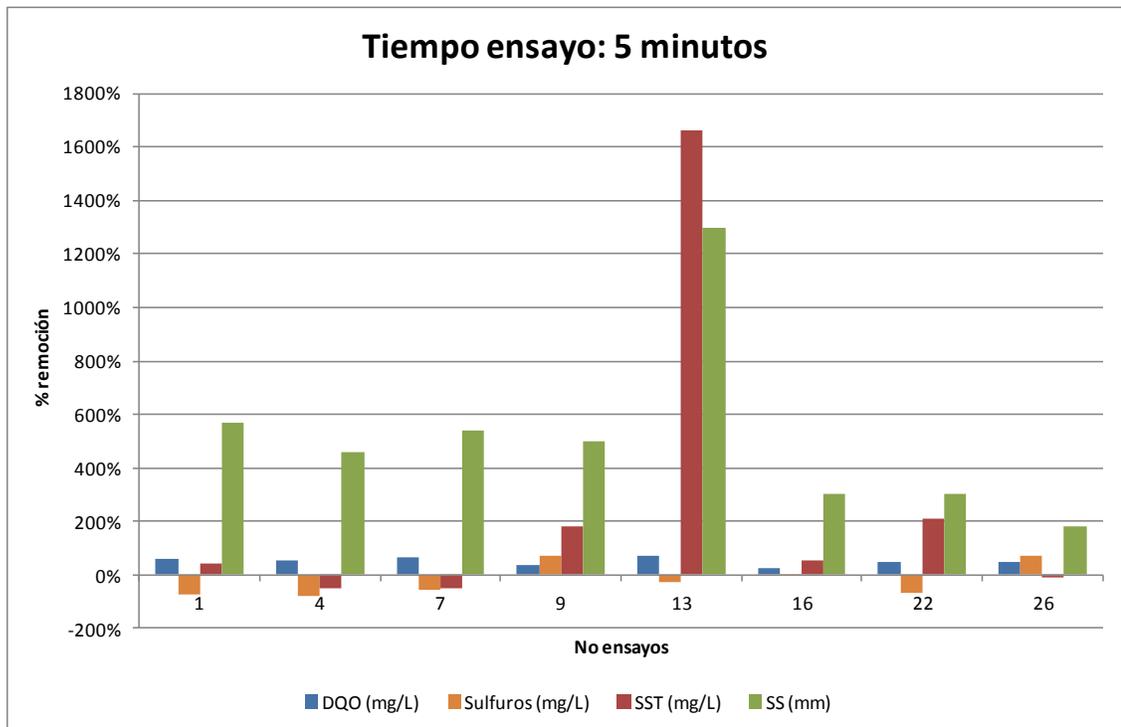


Fuente: Autora

8.2.11 Tiempo

Se realizaron en total ocho ensayos a tiempo de 5 minutos, en el caso de la DQO se obtuvo remoción en todos los ensayos, sin embargo tres de ellos (ensayos 1, 7, 13) se destacaron con remociones por encima de 62%. Para el parámetro de sulfuros sólo los ensayos 9 y 26 demostraron remociones con 69% cada uno. En el caso de los SST los ensayos 1, 9, 13, 16, 22 produjeron SST, sin embargo el ensayo 13 se destacó como uno de los mejores en todo el trabajo con una eficiencia positiva de 1663%. Respecto a SS, se observó producción en todos los ensayos, destacándose el ensayo 1, 7, 9 y 13 con eficiencias mayores a 500%. Se destacan los ensayos 13, 16 y 22 por los valores positivos en potencial redox, para el caso de la eficiencia sólo se destaca el ensayo 13 con una eficiencia total de 752%.

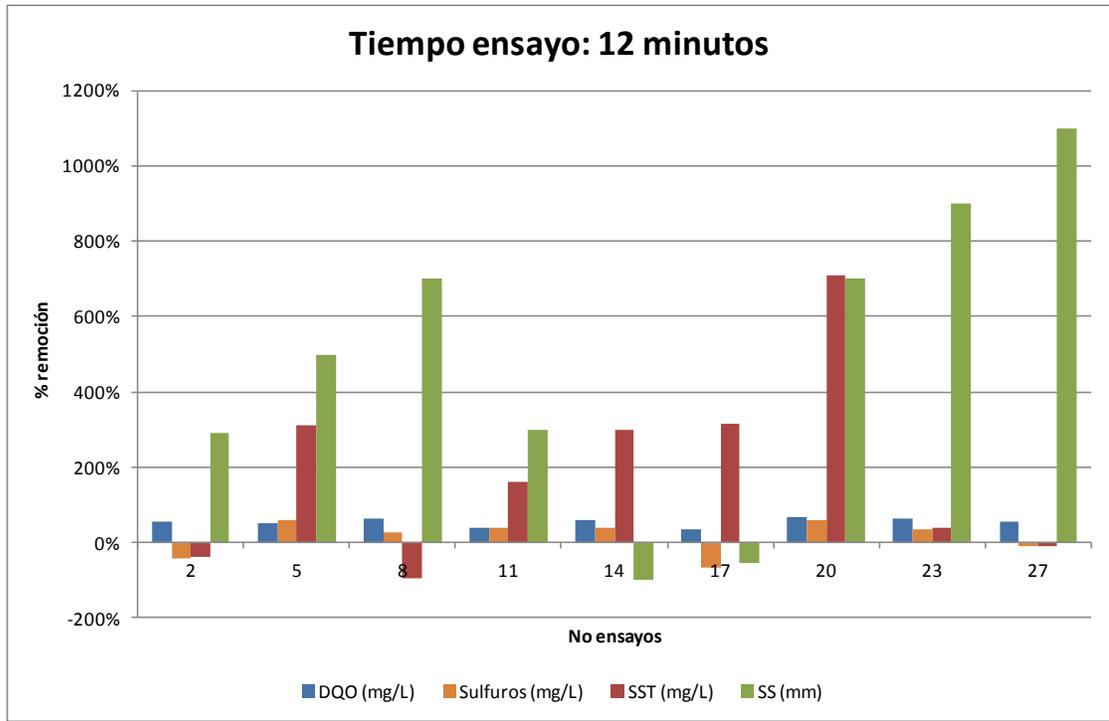
Ilustración 80. Tiempo ensayos (5 minutos) vs eficiencias remoción



Fuente: Autora

Los ensayos de 12 minutos corresponden a nueve del total de ensayos, para estos respecto a la DQO en todos se observó remoción, se destacan tres ensayos (ensayos 8, 20, 23) con eficiencias mayores a 63%. Con relación al parámetro de sulfuros se evidenció remoción en seis de los ensayos, en los que se destacan el número cinco y veinte con eficiencias de 58% cada uno. Los SST fueron removidos en siete de los 9 ensayos realizados, cuatro de estos (ensayos 5, 14, 17, 20), produjeron cantidades porcentuales de sólidos mayores al 300%. Para los SS, siete de los ensayos presentaron producción de SST, cinco de ellos (ensayos 5, 8, 20, 23, 27), con eficiencias por encima de 500%. Respecto al potencial redox, sólo dos de los ensayos (ensayos 2, 27) reportaron valores bajos para este parámetro, los demás se destacaron por encima de los demás ensayos del trabajo. En último lugar, para la eficiencia total los ensayos 5, 20, 23 y 27 presentaron eficiencias destacables en todo el trabajo.

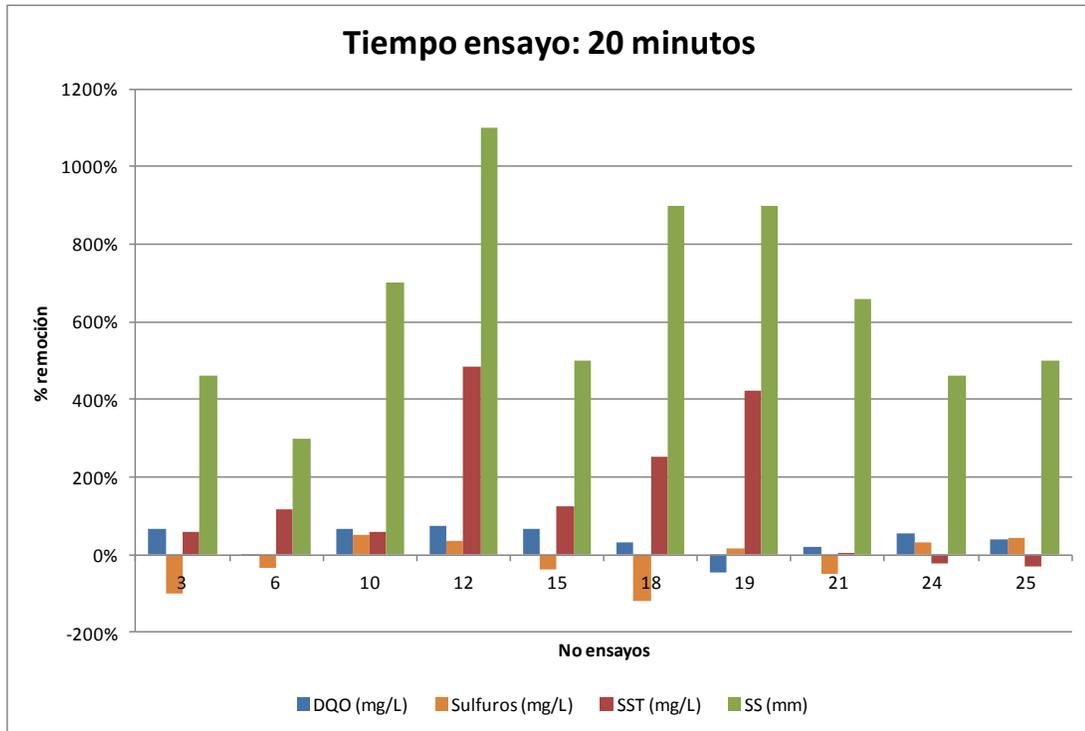
Ilustración 81. Tiempo ensayos (12 minutos) vs eficiencias remoción



Fuente: Autora

Para los ensayos de 20 minutos, se realizaron diez ensayos en total, evidenciando en la mayoría alta actividad de los electrodos (desgaste y deposición), respecto a las eficiencias, se tiene para la DQO remoción en ocho de las diez muestras, en las que se destacan los ensayos 3, 10, 12 15, con eficiencias mayores al 65%. Para el parámetro de sulfuros se evidenciaron cinco ensayos con remoción, de los cuales ninguno se destaca por encima de los demás resultados de los ensayos. Los SST se produjeron en ocho de los ensayos, y se destacan los ensayos 12 y 21 con 421% y 483% respectivamente. Los SS se produjeron en todos los ensayos y siete de estos se destacan con producción de SS porcentual mayor a 500%. Se observaron cambios importantes en la mayoría de las muestras al final del tratamiento, los cambios en potencial redox fueron positivos para cinco de los ensayos (ensayos 6, 12, 15, 19, 21) realizados. Finalmente cuatro de los ensayos (ensayos 10, 12, 18, 19) se destacaron por la eficiencia total obtenida.

Ilustración 82. Tiempo ensayos (12 minutos) vs eficiencias remoción



Fuente: Autora

8.2.12 Pretratamiento

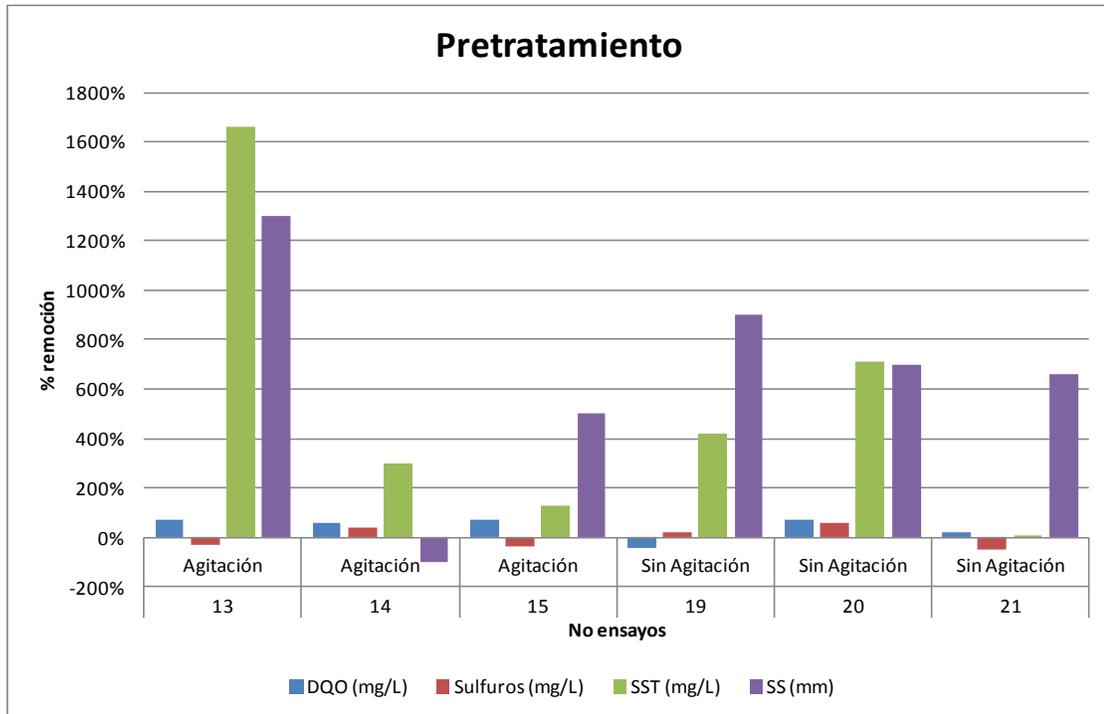
Para realizar la evaluación del pretratamiento, se tomó en comparación 3 ensayos con las mismas características pero la única variable fue la agitación:

Tabla 39. Ensayos comparación pretratamiento

No ensayo	Pretratamiento	Tiempo	pH	Tensión	Conexión electrodos
13	Agitación	5	6	3	MP-P
14	Agitación	12	6	3	MP-P
15	Agitación	20	6	3	MP-P
19	Sin Agitación	20	6	3	MP-P
20	Sin Agitación	12	6	3	MP-P
21	Sin Agitación	20	6	3	MP-P
Fuente: Autora					

De acuerdo a lo anterior, se observó una actividad alta de los electrodos para los 20 minutos con agitación y sin agitación, se requirió mayor consumo de energía en los ensayos sin agitación, aún cuando la tensión era estándar para todos los ensayos. Respecto a las eficiencias, la DQO fue removida más eficientemente en los ensayos que tenían agitación, en el caso de los sulfuros esta relación se invirtió, es decir fue más eficiente la remoción para los ensayos que no tenían agitación. Respecto a los SST y SS las eficiencias de producción fueron más altas en los ensayos que tenían agitación. Para los ensayos que no tenían agitación obtuvieron mejores resultados para el potencial redox. De acuerdo a lo anterior se concluye que la agitación es necesaria para realizar los ensayos de electrocoagulación esto facilita, la homogeneidad del tratamiento y la actividad eléctrica en la celda de electrocoagulación, redundando en las eficiencias de remoción.

Ilustración 83. Pretratamiento vs eficiencias de remoción



Fuente: Autora

8.2.13 Conexión electrodos

Para evaluar el modo de conexión de electrodos, se realizaron tres ensayos con condiciones estándar:

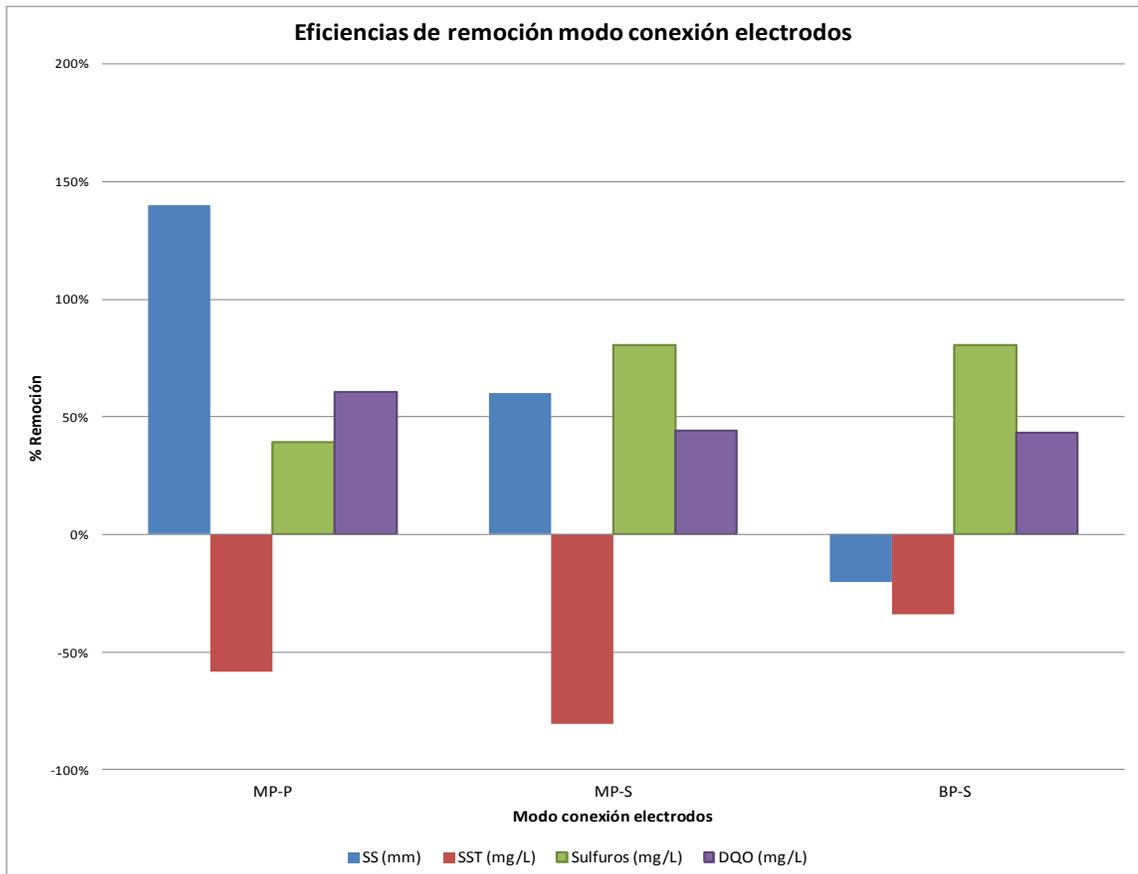
Tabla 40. Ensayos comparación conexión electrodos

No ensayo	Pretratamiento	Tiempo	pH	Tensión	Conexión electrodos
28	Agitación	15	4	3	MP-P
29	Agitación	15	4	3	MP-S
30	Agitación	15	4	3	BP-S

Fuente: Autora

Obteniendo los siguientes resultados para las eficiencias de remoción.

Ilustración 84. Modo conexión electrodos vs eficiencias de remoción



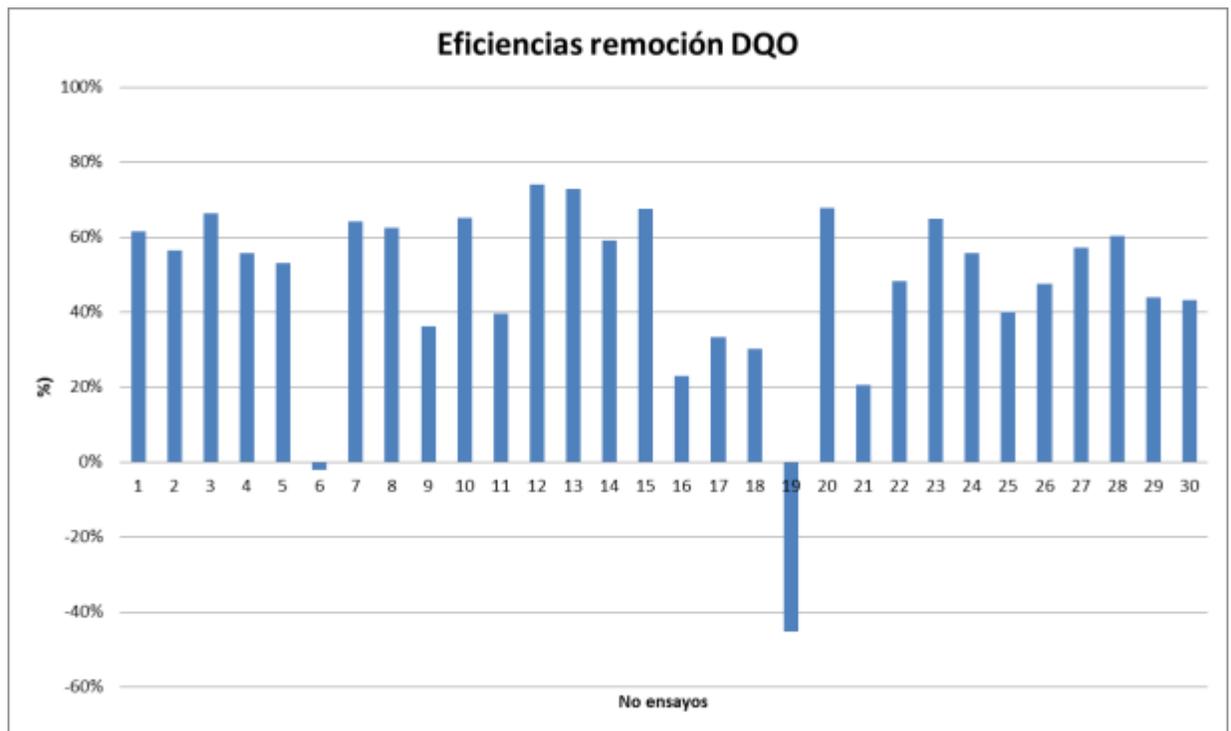
Fuente: Autora

Se observó actividad eléctrica y de los electrodos para la conexión MP-P, sin embargo para los otros dos tipos, no se observó actividad eléctrica contundente. El modo MP-P obtuvo la mayor remoción de DQO y SS. Las conexiones MP-S y BP-S obtuvieron una eficiencia alta en la remoción de sulfuros (80%), en relación al parámetro SST, no se generaron, por lo tanto los porcentajes de producción fueron nulos para todos los parámetros. De acuerdo a lo anterior, la conexión MP-P continúa siendo la más apropiada para el tratamiento debido a la actividad eléctrica que demostró, sin embargo es importante que en trabajos futuros se

realicen mayor cantidad de ensayos que puedan evaluar las conexiones más apropiadas con mayor representatividad.

8.2.14 DQO

Ilustración 85. Eficiencias de remoción DQO



Fuente: Autora

Respecto a la DQO, se obtuvo un promedio de remoción en todos los ensayos de 53%; de los 30 ensayos realizados en 28 se removi6 DQO.

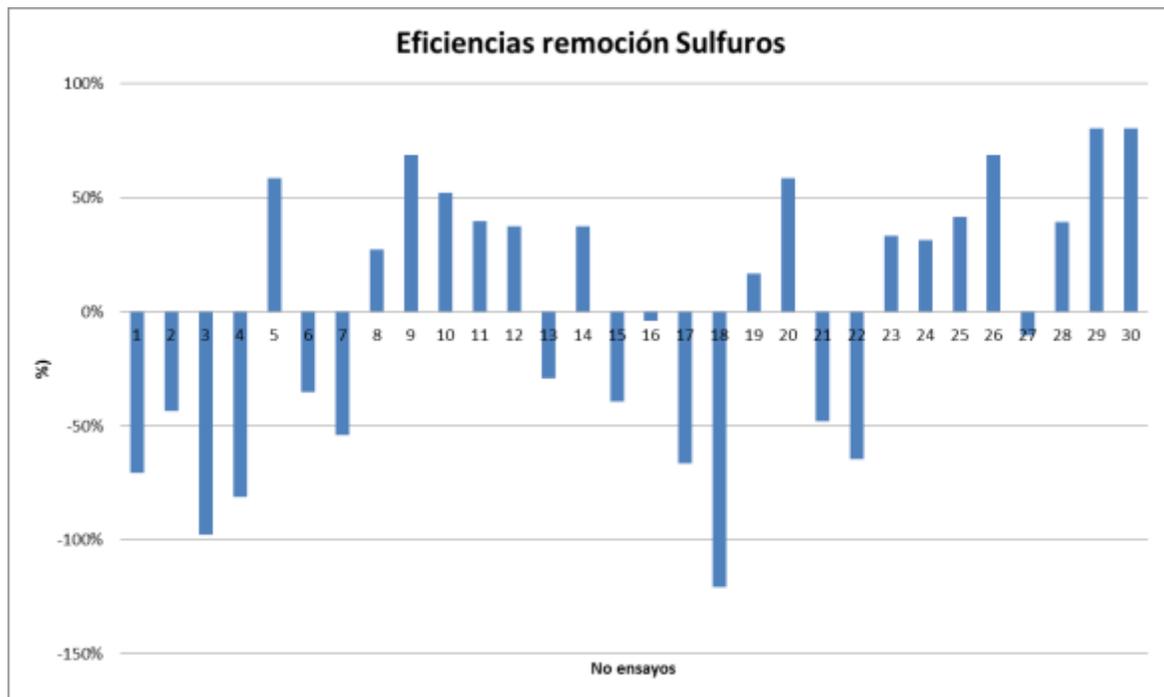
Los ensayos 12 y 13 obtuvieron las mejores remociones, estos ensayos trabajaban a un tensi6n 5 y 3, una duraci6n de 20 y 5 minutos y un pH de 4 y 6 respectivamente.

Los ensayos que obtuvieron menor remoción fueron los ensayos 6 y 19, estos trabajaron con tensión de 3 y una duración de 20 minutos, sólo diferían en el valor de pH, que fue 4 y 6 respectivamente.

De acuerdo al análisis de los ensayos realizados las condiciones ideales para lograr la mayor remoción de DQO son: agitación, tiempo 20 minutos, pH 4, tensión 5, conexión electrodos MP-P.

8.2.15 Sulfuros

Ilustración 86. Eficiencias de remoción sulfuros



Fuente: Autora

Para el parámetro de sulfuros, de los 30 ensayos realizados en 16 se removió sulfuros y de los ensayos en los cuales se logro remover un promedio de 48%.

Los ensayos 29 y 30 obtuvieron las mejores remociones, estos ensayos trabajaban a una tensión 3, pH 4, con conexiones de los electrodos MP-S y BP-S y una duración de 15 minutos cada uno.

Los ensayos que obtuvieron menor remoción fueron los ensayos 1, 3, 4 y 18, estos trabajaron con tensión de 1, 1, 3, 5, una duración de 5, 20, 5, 20 minutos, pH de 4, 4, 4, 6 y los dos primeros sin agitación los otros dos con agitación.

De acuerdo al análisis realizado de la información las condiciones ideales para lograr la mayor remoción de sulfuros son: agitación, tiempo 12-15 minutos, pH 4, tensión 3, conexión electrodos MP-S ó BP-S. Aunque se debe considerar que en estos ensayos se suministró poca potencia, por lo que la actividad eléctrica fue muy baja.

Es recomendable evaluar las particularidades del comportamiento de sulfuros, ya que se detectaron muestras en los que en algunos casos aumentan. Particularmente dentro de la bibliografía se encontró que en algunos casos los sulfuros tienden a flotar y no a precipitar, por otro lado que estos compuestos son capaces de reaccionar con el hierro formando sulfuro de hierro, lo que explica el color negro que toma el agua (47).

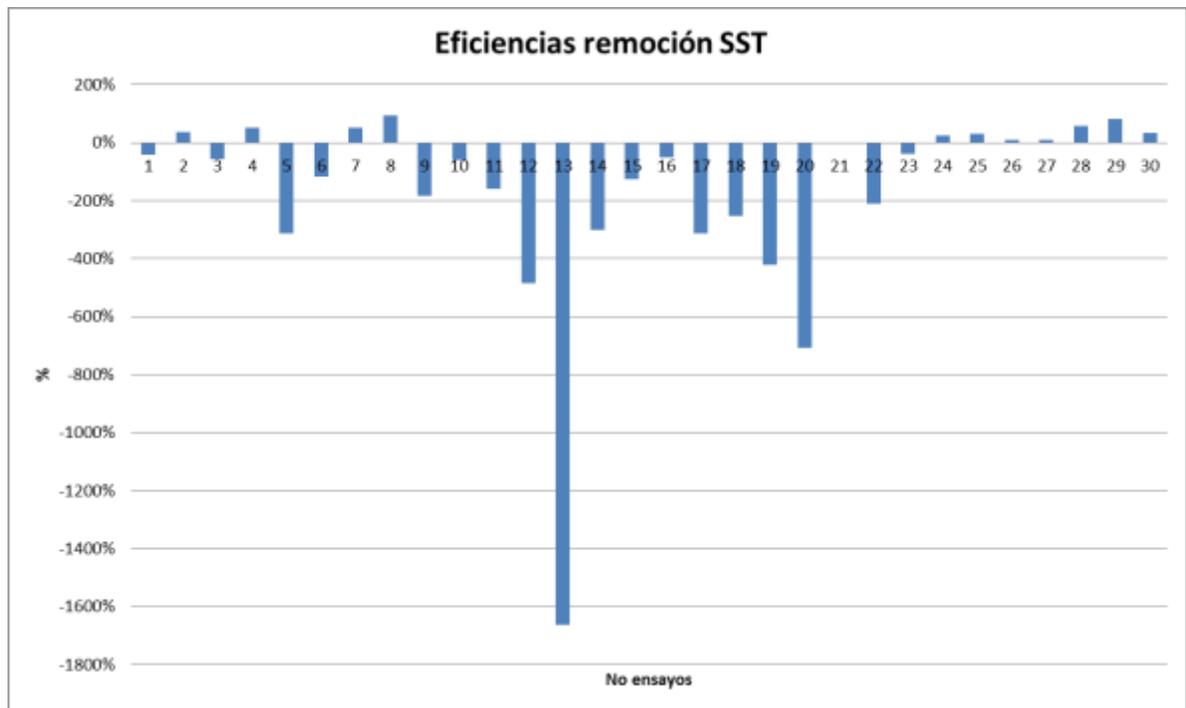
8.2.16 SST

Para el parámetro de SST, de los 30 ensayos realizados en 19 se produjo SST y de los ensayos en los cuales se logro producir un promedio de 289%.

El ensayo 13 obtuvo las mejores remociones, estos ensayos trabajaban a una tensión 3, pH 6, con agitación y una duración de 5 minutos.

El ensayo que obtuvo menor producción de SST fue el ensayo 8 este trabajo con un tensión de 3, una duración de 12 minutos, pH de 4 y con agitación los dos primeros sin agitación los otros dos con agitación.

Ilustración 87. Eficiencias de remoción SST



Fuente: Autora

De acuerdo al análisis realizado de la información las condiciones ideales para lograr la mayor producción de SST son: agitación, tiempo 12 minutos, pH 4 y tensión 3, conexión electrodos MP-P.

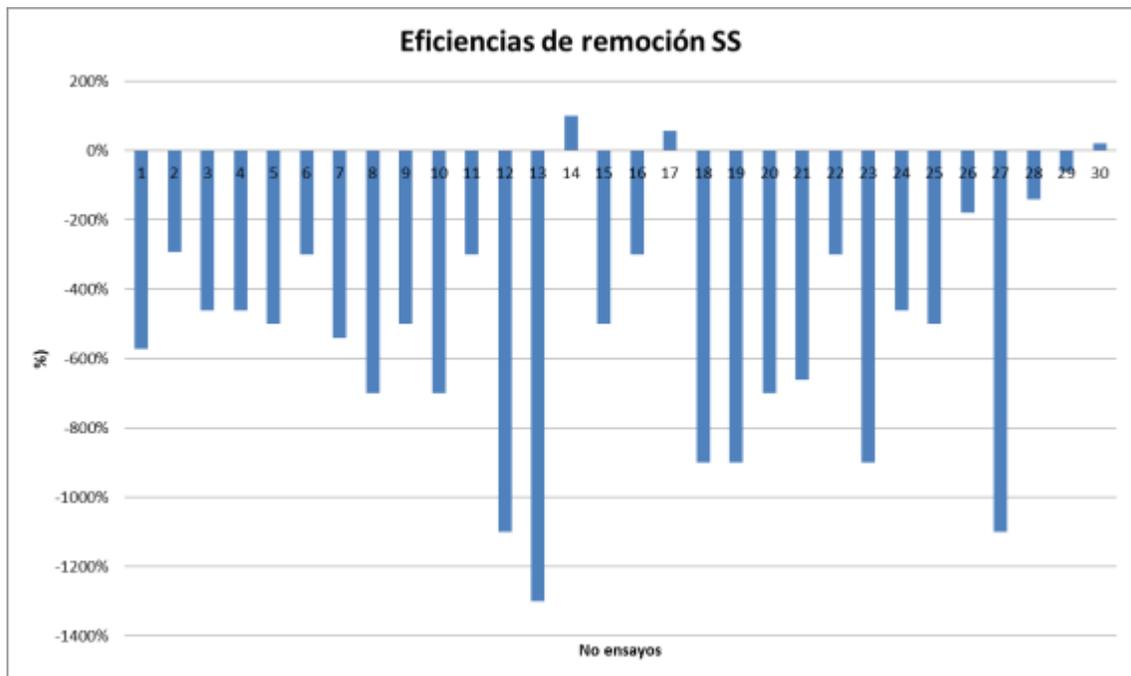
Para este parámetro es importante que en futuros trabajos, con el fin de garantizar la remoción de sólidos producidos, se evalúen tratamientos complementarios como sedimentadores, filtración e inclusive alternativas relacionadas con electroflotación.

8.2.17 SS

De los 30 ensayos realizados en 27 se produjeron SS, de estos ensayos que presentaron eficiencias positivas, se obtuvo un promedio de 567%.

El ensayo 13 obtuvo los mejores resultados en la producción de SST, este ensayo manejaba unas condiciones en tensión de 3, una duración 5 minutos, agitación y un pH de 6.

Ilustración 88. Eficiencias de remoción SS



Fuente: Autora

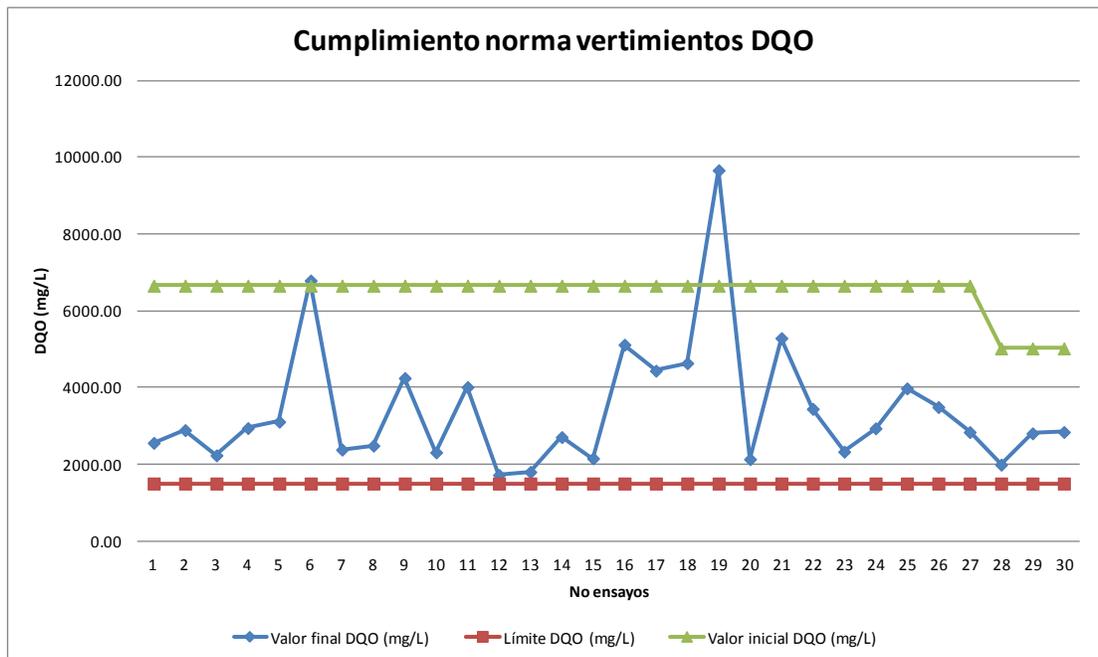
El ensayo que obtuvo menor remoción fue el número 14, trabajando a unas condiciones de: tensión 3, 12 minutos de duración, pH de 6 y agitación.

De acuerdo al análisis realizado de la información las condiciones ideales para lograr la mayor producción de SST son: agitación, tiempo 20 minutos, pH 6, tensión 3, conexión electrodos MP-P.

8.2.18 Cumplimiento de la normatividad ambiental

A continuación se muestran los valores finales obtenidos para cada parámetro en comparación con los valores límites de la resolución 3759 de 2009 de la Secretaría de Ambiente.

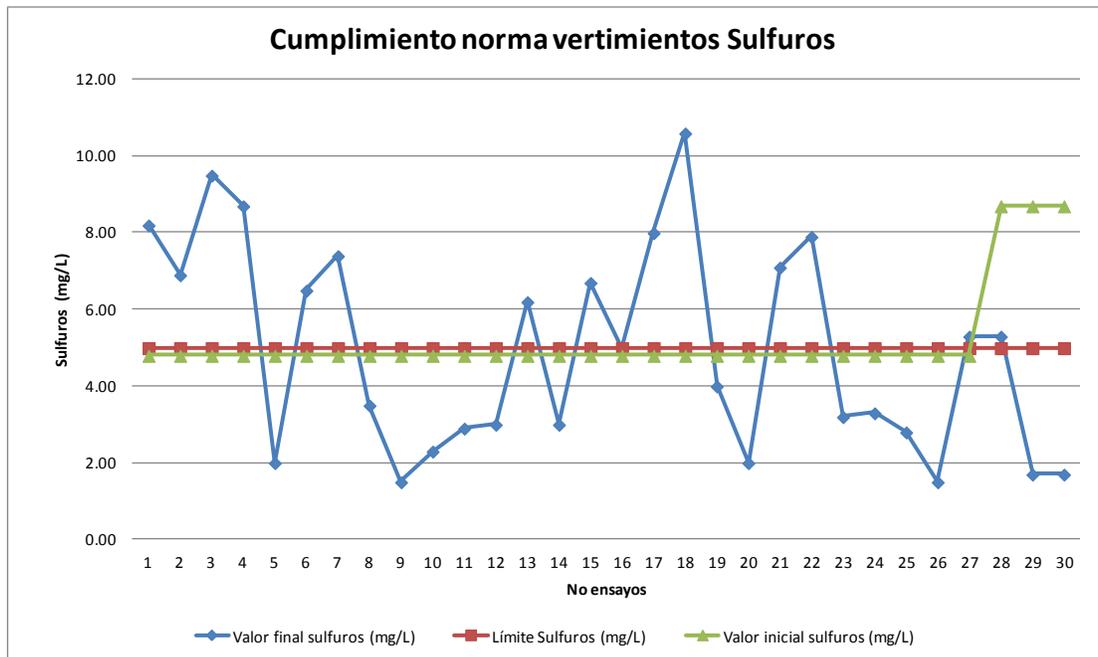
Ilustración 89. Cumplimiento de la norma para DQO



Fuente: Autora

Para el caso de la DQO, no se logra cumplir con la normatividad ambiental aplicable aunque algunos ensayos como el 12, 13, 15, 20, 28 se encuentran cerca al cumplimiento, esto quiere decir que para llegar a un cumplimiento legal en las condiciones actuales debería implementarse un tratamiento complementario antes y/o después de la electrocoagulación, ó en su defecto mejorar las eficiencias de la electrocoagulación con la estandarización de variables.

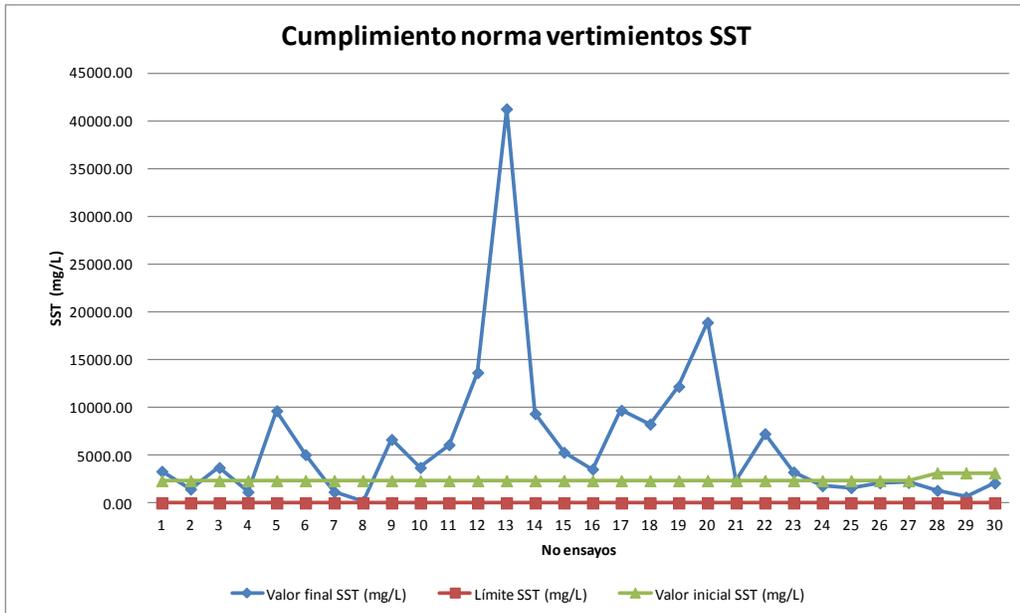
Ilustración 90. Cumplimiento de la norma para sulfuros



Fuente: Autora

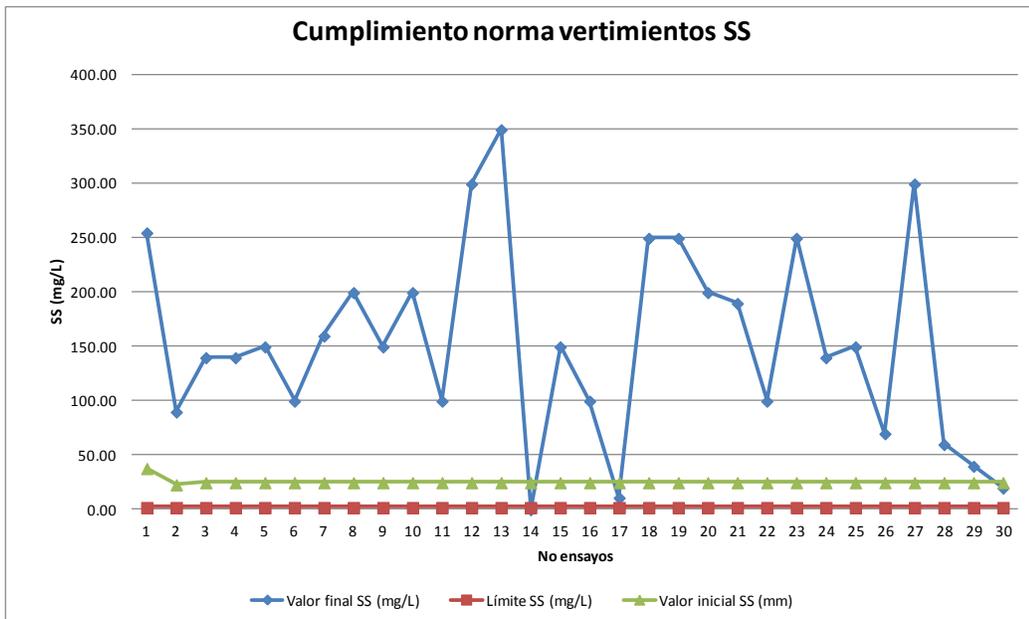
Respecto a los sulfuros se cumple en 16 de los ensayos realizados, los resultados más bajos se encuentran para el ensayo 5, 9, 20, 26, 29 y 30. Contradictoriamente uno de los valores que se encuentran por fuera de la norma, es el obtenido en el ensayo 13, este ensayo presento una de las mejores eficiencias para los demás parámetros. Trabajos futuros deben estudiar muy bien el comportamiento de los sulfuros para asegurar que el tratamiento seleccionado garantizará la remoción de todos los parámetros.

Ilustración 91. Cumplimiento de la norma para SST



Fuente: Autora

Ilustración 92. Cumplimiento de la norma para SS



Fuente: Autora

En relación a los SST y SS, es importante que se establezca un tratamiento que permita la remoción de estos sólidos y asegure el cumplimiento de la norma. Para remover los SS, debe realizarse una retención de sólidos gruesos al inicio del tratamiento e inclusive evaluar la implementación de un desarenador, posterior al tratamiento debe evaluarse la implementación de sedimentadores ó filtración para retención de los SST. También es importante que se establezca la causa por la que algunos SST no sedimentan fácilmente, ya que en los ensayos realizados se identificó que los flóculos se forman pero no sedimentan por si solos.

8.2.19 Eficiencias de remoción total

La siguiente tabla muestra los resultados de las eficiencias de remoción y producción, teniendo en cuenta la aclaración de la sección 7.2.10, en la cual se aclaró que para los parámetros de DQO y Sulfuros aplica remoción y para los parámetros de SST y SS aplica producción.

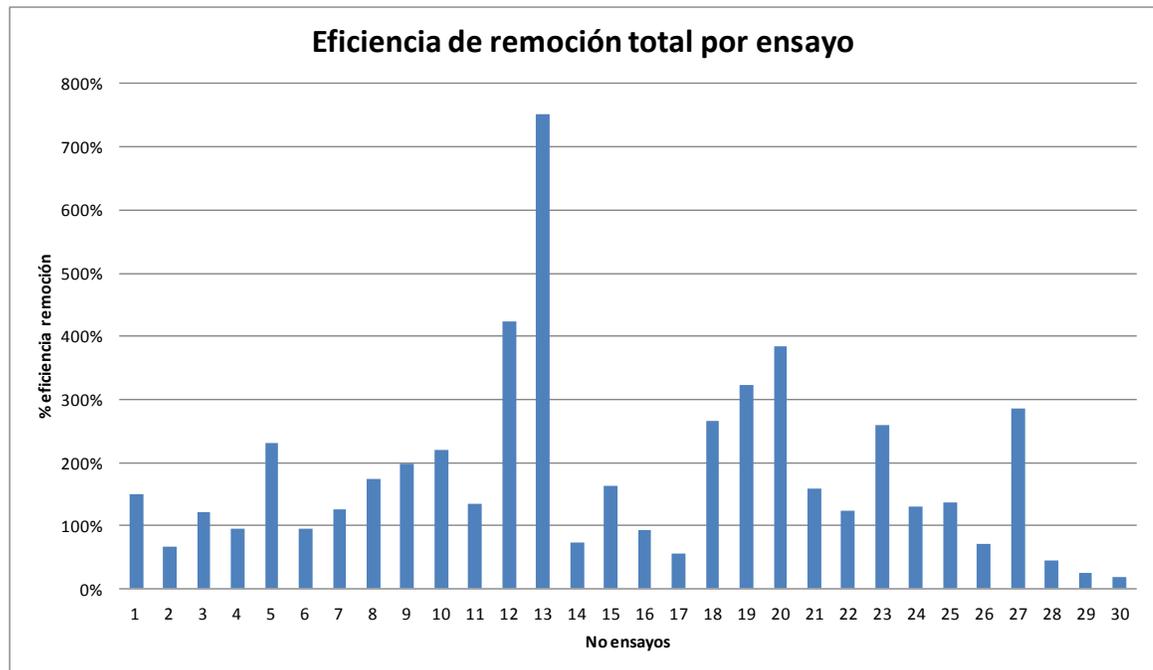
Tabla 41. Eficiencia de remoción por ensayo

No ensayo	Eficiencia de remoción DQO y Sulfuros	Eficiencia producción SST y SS	Eficiencia total definitiva
1	-5%	306%	151%
2	6%	127%	67%
3	-16%	259%	122%
4	-13%	205%	96%
5	56%	406%	231%
6	-19%	208%	95%
7	5%	245%	125%
8	45%	303%	174%
9	52%	342%	197%
10	59%	379%	219%
11	40%	230%	135%
12	56%	792%	424%
13	22%	1481%	752%
14	48%	100%	74%
15	14%	313%	164%
16	9%	176%	93%
17	-17%	129%	56%
18	-45%	576%	266%
19	-14%	661%	323%
20	63%	704%	384%
21	-14%	330%	158%
22	-8%	255%	123%
23	49%	469%	259%
24	44%	218%	131%
25	41%	234%	138%
26	58%	85%	72%
27	23%	546%	285%
28	50%	41%	45%
29	62%	-10%	26%
30	62%	-27%	18%

Fuente: Autora

El ensayo 13 que presentó mayores eficiencias de remoción, sin embargo como se menciona anteriormente este ensayo no presentó remoción para los sulfuros, otro de los ensayos que se destacan es el ensayo 12 y para este se removieron sulfuros y se cumple la norma para este parámetro. Otro ensayo que presentó buenas remociones para todos parámetros es el ensayo 20, garantizando también el cumplimiento de la norma para sulfuros.

Tabla 42. Eficiencias de remoción total por ensayo



Fuente: Autora

Uno de los mejores ensayos cualitativamente hablando, fue el número 18, sin embargo las eficiencias en sulfuros y SST no son altas en comparación con los demás ensayos, esto nos lleva a concluir que en futuros trabajos debe evaluarse la implementación de sistemas que remuevan color y este debe ser redundante cuando se implemente el mecanismo para remoción eficiente de sólido aglomerados.

8.2.20 Ensayo estándar

De acuerdo a lo anterior, se compararon los ensayos que presentaron mejores comportamientos, estos ensayos se analizaron teniendo en cuenta la eficiencia de remoción total, consumo de energía, cumplimiento de la normatividad y el desgaste de los electrodos:

Tabla 43. Selección de los 5 mejores ensayos

No ensayo	Pretratamiento	Tiempo	pH	Tensión	Conexión electrodos	Cambio peso Al (g)	Consumo energía (W-h)	DQO (mg/L)	Sulfuros (mg/L)	SST (mg/L)	SS (mm)	DQO (mg/L)	Sulfuros (mg/L)	SST (mg/L)	SS (mm)	Eficiencia total definitiva
5	Agitación	12	4	3	MP-P	0.002	6.40	3110	2	9650	150	53%	58%	312%	500%	231%
9	Agitación	5	4	5	MP-P	0.012	4.44	4247	2	6645	150	36%	69%	184%	500%	197%
12	Agitación	20	4	5	MP-P	0.025	9.68	1723	3	13650	300	74%	38%	483%	1100%	424%
13	Agitación	5	6	3	MP-P	-0.051	1.19	1802	6	41250	350	73%	-29%	1663%	1300%	752%
20	Sin Agitación	12	6	3	MP-P	-0.043	5.62	2135	2	18905	200	68%	58%	708%	700%	384%

Fuente: Autora

En este orden de ideas, teniendo en cuenta que el ensayo 13, presenta las mejores condiciones para todos los parámetros, pero no remueve sulfuros, se establece como mejor opción el ensayo 12, en el que se obtienen altas eficiencias incluyendo los sulfuros, este ensayo sería el estándar para realizar ensayos futuros.

Tabla 44. Consumo de energía de los 5 mejores ensayos

No ensayo	Consumo energía (W-h)	Consumo por m3	Costo Energía \$/kW ⁴
5	6.40	4571.43	\$ 2.56
9	4.44	3169.05	\$ 1.77
12	9.68	6914.29	\$ 3.87
13	1.19	847.62	\$ 0.47
20	5.62	4014.29	\$ 2.25

Fuente: Autora

⁴ Ministerio de Minas y energía, costo por kW-h para el sector industrial: \$ 400.

9. RECOMENDACIONES

- Futuros trabajos, deben considerar el aumento de la conductividad como estrategia de aumento en la eficiencia, este aumento puede generarse adicionando sales u otros electrolitos que faciliten la conducción de corriente.
- Es importante que en próximos ensayos de electrocoagulación, se establezca un mecanismo efectivo para la limpieza de los electrodos y evite la cavitación a largo plazo de los mismos.
- En próximos ensayos de electrocoagulación, puede contemplarse el uso de equipos para medición de oxígeno disuelto, sólidos disueltos, termómetro infrarrojo (medir temperatura durante todo el ensayo), entre otros.
- Próximos trabajos de investigación deben buscar reducir de forma segura, la potencia de pérdidas asociada al consumo de energía para el tratamiento del agua residual (intervención del banco de resistencias que se utilizó en los ensayos).
- Debe evaluarse la implementación de sistemas de pre tratamiento, como trampa de grasas, rejillas, desarenador y demás que permitan la remoción de grasas y aceites, SS y sólidos gruesos.
- Por otro lado debe evaluarse la implementación de sistemas post-tratamiento o el acondicionamiento del proceso de electrocoagulación, de manera que aumente la eficiencia de remoción de parámetros como el color, olor, turbidez, SST y SS, e inclusive DQO para lograr el cumplimiento de la normatividad ambiental.
- Deben tenerse en cuenta los tiempos, recursos técnicos y humanos, para la realización de cada ensayo, contemplando la toma de la muestra, ajuste y medición de variables, preservación de las muestras e inclusive limpieza de los equipos de trabajo, puesto que lo anterior influye directamente en los costos asociados al proyecto.

- Por otro lado, debe contemplarse la posibilidad de contar con los equipos y el espacio para los ensayos de electrocoagulación, con el fin de controlar todos los impactos ambientales asociados a estas prácticas de investigación (principalmente la generación de olores ofensivos).
- Incluir criterios estadísticos para manejo del error e inclusive muestras blanco, que permitan establecer posibles desviaciones en los procedimientos.
- Es importante que, se investigue y se realicen pruebas más representativas que permitan definir el modo de conexión de los electrodos, y así mismo el comportamiento de las diferentes variables en estos ensayos.
- Debe evaluarse el comportamiento y las características físico-químicas del parámetro sulfuros, con el fin de estandarizar los ensayos para que se optimice la eficiencia de remoción de este parámetro.
- Estudiar el comportamiento de los flóculos formados, con el fin de establecer las causas de la baja sedimentación en algunos ensayos.
- Analizar las muestras de lodos tomadas, para verificar la presencia de metales como aluminio, hierro o cromo, a futuro evaluar la recuperación de los mismos.
- Evaluar el material usado como electrodo, con el fin de garantizar su disponibilidad en caso de presentarse prototipos a escala más grandes.
- Es importante que se profundice en los costos por tratamiento, teniendo en cuenta no sólo el consumo de energía, sino también el desgaste de los electrodos, equipos requeridos, recurso humano e inclusive mantenimiento requerido, entre otros.
- Para garantizar la continuidad del proyecto, realizando futuros ensayos variando las condiciones, se considera que es muy importante contar con el apoyo logístico y económico para asegurar un análisis inmediato de las

muestras, ya sea en los laboratorios de la ECCI o en otros como fue el caso.

- Es importante que se garantice la homogenización del volumen total de la muestra, para garantizar que la muestra inicial es igual para todos los ensayos de electrocoagulación. Esto presenta dificultades en la práctica, ya que se requieren volúmenes altos de agua residual que deben trasladarse desde el sector de San Benito a las instalaciones de la ECCI.
- Incluir dentro del programa de formación de ingeniería ambiental, específicamente para las asignaturas de tratamiento de aguas, la investigación y estudio de nuevas alternativas de tratamiento de aguas residuales.
- Dar continuidad a la investigación desarrollada, con el fin de estandarizar el procedimiento logrando mejores eficiencias de remoción.

10. CONCLUSIONES

- Las aguas residuales, provenientes de las curtiembres de San Benito y captadas en la planta elevadora del río Tunjuelo, presentan una alta carga contaminante respecto a los límites definidos por la autoridad ambiental (UCH >5, muy alto), ya que los parámetros de DQO, SS, SST y sulfuros, presentan un incumplimiento de los límites establecidos en la resolución 3957 de 2009 de la SDA.
- La electrocoagulación en aguas residuales de curtiembres, a través de los ensayos de electrocoagulación desarrollados, demostró remover carga contaminante.
- La actividad de los electrodos (desgaste y deposición de lodo), es directamente proporcional a las eficiencias de remoción obtenidas en los parámetros de estudio (DQO, Sulfuros, SST y SS).
- El Consumo de energía, tensión, corriente, y potencia de pérdidas son directamente proporcionales entre sí y respecto a las eficiencias de remoción de los parámetros de estudio.
- Los cambios en la conductividad, mejoran las eficiencias de remoción de los contaminantes; sin embargo, la conductividad está sujeta a los cambios por la actividad eléctrica del agua residual.
- El potencial redox permite vislumbrar las mejoras ambientales del agua residual, este parámetro mejoró para todas las muestras de agua residual tratadas, y está directamente relacionado con las eficiencias de remoción.
- La potencia de pérdidas, puede ser reducida a valores más bajos que impliquen menores consumos de energía, sin embargo estas reducciones deben realizarse sin poner en riesgo la seguridad eléctrica del tratamiento.
- Se observaron remociones de DQO a baja actividad eléctrica, sin embargo dada la carga contaminante contenida en el agua residual por DQO, las eficiencias de remoción para este parámetro, deben ser altas.

- La temperatura del agua residual inicial, no afecta las eficiencias de tratamiento, los cambios de temperatura observados al final del tratamiento no son significativos, por lo que se concluye que las reacciones no son exotérmicas.
- El cambio de pH desde la muestra inicial a la muestra posterior al tratamiento, es significativo en los ensayos que obtuvieron mayor eficiencia de remoción.
- El tiempo está relacionado directamente con la actividad de los electrodos y el consumo energía eléctrica, pero no necesariamente con las eficiencias de remoción pues, éstas dependen de la relación entre la tensión y la corriente (expresadas como potencia eléctrica). Potencia que, a lo largo del tiempo de duración de cada ensayo, se convierte en energía consumida por la celda de electrocoagulación y que es usada en la remoción de los contaminantes del agua residual.
- La agitación es necesaria para realizar los ensayos de electrocoagulación y optimiza los resultados de los mismos, teniendo en cuenta que, homogeniza el tratamiento y facilita la actividad eléctrica en la celda de electrocoagulación, redundando en mejores eficiencias de remoción.
- Aunque con la conexión de electrodos MP-S y BP-S, se obtuvieron las mejores remociones para sulfuros, estos ensayos demostraron una actividad eléctrica y de los electrodos bajas.
- El parámetro sulfuros, en algunos ensayos se comportó de una manera inversa a los demás ensayos; es decir, al obtenerse la remoción de DQO, SST y SS, los sulfuros no se removían, y viceversa. Sin embargo, este parámetro no requiere mayor remoción respecto a la muestra inicial, por lo que puede controlarse con la estandarización del tratamiento.
- Aún con remoción de la DQO por el tratamiento de electrocoagulación, se observaron incumplimientos de la normatividad ambiental en DQO para la muestra final.

- Aunque la eficiencia para los parámetros de SST y SS, se tomó como producción, estos parámetros al final del tratamiento incumplen con la normatividad ambiental, por esta razón deben implementarse mecanismos que remuevan efectivamente los sólidos producidos en la electrocoagulación.
- El color del agua residual no es directamente proporcional a las eficiencias de remoción, futuros trabajos deben evaluar la implementación de sistemas que remuevan color y este debe ser redundante al implementarse el mecanismo para remoción eficiente de sólidos aglomerados.

11. BIBLIOGRAFÍA

1. **EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ, EAAB y SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE.** *Calidad del sistema hídrico de Bogotá.* Bogotá : Pontificia Universidad Javeriana, 2008.
2. **CONSEJO DE ESTADO, SALA DE LO CONTECIOSO ADMINISTRATIVO.** *Expendiente Num 25000-23-27-00-2001-90479-01.* Bogotá D.C : s.n., 2012.
3. **E.S.E. HOSPITAL TUNJUELITO II NIVEL.** *Diagnóstico local en salud con participación social 2011 - Localidad sexta de Tunjuelito.* Bogotá : Hospital Tunjuelito II nivel E.S.E., 2012.
4. **UNIVERSIDAD DE LOS ANDES.** *CALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO (2009-2010).* Bogotá : Uniandes, 2011.
5. **CENTRO NACIONAL DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA, CNPML.** *Proyecto gestión ambiental en la industria de curtiembre en Colombia.* Bogotá : Centro Nacional de Producción Más Limpia - CNPML, 2004.
6. **UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL.** *PROCEDA en la cuenca de la Chiguaza - Historia Interlocal.* Bogotá : Universidad Pedagógica Nacional, 2005.
7. **CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ, (CCB).** *La inversión pública y calidad de vida en las localidades de Bogotá - Localidad de Tunjuelito.* Bogotá : CCB, 2008.
8. —. *Perfil Económico y Empresarial de la Localidad de Tunjuelito.* Bogotá : CCB, 2003.
9. *Construcción de un reactor electroquímico para la electrocoagulación como tratamiento alternativo de descontaminación de aguas residuales.* **JARAMILLO, César, JARAMILLO, Alexander y TABORDA, Gonzalo.** Manizales : s.n., Julio de 2005, Revista Universidad de Caldas, págs. 146-156.
10. *Análisis de costos de la electrocoagulación de las aguas residuales de la industria láctea.* **ARANGO RUÍZ, Álvaro, y otros.** 2, Medellín : Producción + Limpia, 2008, Vol. 3.
11. *La Electrocoagulación retos y oportunidades en el tratamiento de aguas.* **MEJÍA RESTREPO, Ana Patricia, ARANGO RUÍZ, Álvaro y GARCÉS**

GIRALDO, Luis Fernando. 2, Medellín : s.n., 28 de Junio de 2006, P+L. Corporación Universitaria Lasallista, Vol. 1, págs. 58-77.

12. **SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE (SDA).** Resolución 3957 de 2009 (19 de Junio de 2009). *Por la cual se establece la norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos realizados a la red de alcantarillado público en el Distrito Capital.* Bogotá : Secretaría Distrital de Ambiente, 19 de Junio de 2009.

13. **BERNAL S, Moreno Grau y BAYO, J.** *Diseño de Biorreactores y enzimología.* España : Universidad de Murcia, 1996.

14. **WIKIPEDIA.** La enciclopedia libre Wikipedia. [En línea] [Citado el: 14 de Agosto de 2014.] <http://es.wikipedia.org/wiki>.

15. **MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Colombia.** Decreto 3930 de 2010 (25 de Octubre de 2010). *Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.* Bogotá D.C : s.n., 25 de Octubre de 2010.

16. **CHARRIA GARCÍA, Wilealdo.** *El sistema complejo de la cuenca hidrográfica.* Bogotá : Universidad Nacional, Sede Medellín, 2010.

17. **WORD PRESS. DEFINICIÓN.DE.** [En línea] 07 de Julio de 2014. [Citado el: 12 de Julio de 2014.] <http://definicion.de/ciclo-de-vida/>.

18. **RETTSYNDRIOME.** Electroforesis. www.rettsyndrome.org. [En línea] 12 de Julio de 2014. <http://www.rettsyndrome.org.es/informacion/diccionario/electroforesis.html>.

19. **CONGRESO DE COLOMBIA.** Ley 590 de 2000 (10 de Julio de 2010). *Por la cual se dictan disposiciones para promover el desarrollo de las micro, pequeñas y medianas empresa.* Bogotá : s.n., 10 de Junio de 2000.

20. **SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE (SDA).** Observatorio Ambiental de Bogotá. [En línea] 10 de Febrero de 2014. [Citado el: 13 de Marzo de 2014.] <http://oab.ambientebogota.gov.co/>.

21. **ANTEK S.A.** *Informe Caracterización de aguas residuales Express del Futuro.* Bogotá : Antek S.A., 2012.

22. **BRUNETTI, Aldo.** Ciencia y Tecnología. *El potencial Redox*. [En línea] 22 de Marzo de 2014. [Citado el: 11 de Septiembre de 2014.] <http://cienciaybiologia.com/ecologia/el-potencial-redox>.
23. **FUENTES, Francisco y MASSOL-DEYÁ, Arturo.** *MANUAL DE LABORATORIOS*. Puerto Rico : s.n., 2002.
24. **UNEP.** *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*.
25. **CONSEJO DE BOGOTÁ.** *PLAN DE DESARROLLO ECONÓMICO, SOCIAL, AMBIENTAL Y DE OBRAS PÚBLICAS PARA BOGOTÁ D.C. 2012-2016*. Bogotá : Consejo de Bogotá, 2012.
26. **JUNTA ADMINISTRADORA LOCAL DE TUNJUELITO.** *PLAN DE DESARROLLO ECONÓMICO, SOCIAL, AMBIENTAL Y DE OBRAS PÚBLICAS DE LA LOCALIDAD: "TUNJUELITO HUMANA: ACCION TRANSFORMADORA DEL TERRITORIO"*. Bogotá : s.n., 2012.
27. *Ayuda de memoria de la sesión de la Mesa de Trabajo Interinstitucional del proyecto SCTAR-SB.* **ALCALDÍA LOCAL DE TUNJUELITO.** Bogotá : s.n., 2013. 2013.
28. *Chemical and biological treatment technologies for leather tannery chemicals and wastewaters: A review.* **LOFRANO, Giusy, y otros.** 1 de Septiembre de 2013, Science of the Total Environment, Vols. 461-462, págs. 265-281.
29. **METCALF & EDDY.** *Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización*. Aravaca, Madrid : McGraw-Hill, 1995.
30. **METCALF & EDDY, INC.** *INGENIERIA DE AGUAS RESIDUALES TRATAMIENTO, VERTIDO Y REUTILIZACIÓN*. Arava (Madrid) : McGraw-Hill, 1995.
31. **ALONSO AGUADO, José.** Departamento de Química Analítica e Ingeniería Química. *Tratamiento electroquímico de aguas residuales*. [En línea] 17 de Septiembre de 2010. [Citado el: 13 de Octubre de 2013.] www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/09/17/131491.
32. *Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea.* **ARANGO RUÍZ, Álvaro y GARCÉS G. Luis.**

147, Medellín : Revista Universidad EAFIT, 2007, Revista Universidad EAFIT, Vol. 43, págs. 56-67.

33. *Electrochemical technologies in wastewater treatment. In: Separation and Purification Technology.* **CHEN, Guohua.** 1, Hong Kong : La separación y la tecnología de purificación, 2004, Vol. 38.

34. *Electrocoagulación: Una alternativa para depuración del lactosuero residual.* **GARCÍA PRIETO, Francisco, y otros.** 3, México : s.n., 6 de Diciembre de 2012, Revista AIDIS, Vol. 5, págs. 51-77.

35. *Removal of chromium (VI) from wastewater by combined electrocoagulation–electroflotation without a filter. In Separation and Purification Technology.* **PING, Gao, y otros.** 2, Hong Kong : s.n., Mayo de 2005, La separación y la tecnología de purificación , Vol. 43, págs. 117-123.

36. **RAJESHWAR, Krishnan y IBANEZ, Jorge.** Environmental electrochemistry: Fundamentals and aplicaciones in pollution abatement. [aut. libro] Academic Press Limited. *Environmental electrochemistry: Fundamentals and aplicaciones in pollution abatement.* San Diego, California : s.n., 1997, pág. 776.

37. **ECURED.** Enciclopedia Cubana en la red. [En línea] 28 de Abril de 2014. www.ecured.cu/index.php/leyes_de_la_electrólisis_de_Faraday.

38. *Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación.* **SOBERANIS, M. Piña, y otros.** 2, México : s.n., 13 de Abril de 2011, Revista mexicana de ingeniería química, Vol. 10, págs. 1-16. ISSN 1665-2738.

39. **MURAT, Eyvaz, y otros.** *Modern Electrochemical Methods in Nano, Surface and Corrosion Science.* Turquía : Mahmood Aliofkhazraei, 2014. págs. 201-238. Vol. Capítulo 8: Preventing of Cathode Passivation/Deposition in Electrochemical Treatment Methods. ISBN 978-953-51-1586-1.

40. *The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology.* **HOLT, Peter, BARTON, Geoffrey y MITCHELL, Cinthya.** 3, Sidney : s.n., 2005, In: Chemosphere, Vol. 59, págs. 355-367.

41. *Laboratory study of electro-coagulation-flotation for water treat-ment.* **JIA-QIAN, Jiang, y otros.** 16, Guildford : s.n., Septiembre de 2002, Water Research, Vol. 36, págs. 4064-4078.

42. *Electrocoagulation and coagulation by iron of latex particles in aqueous suspensions.* **O., Larue, E., Vorobiev y C., Vu: B., Durand.** 2, 1 de Mayo de 2003, Separation and Purification Technology, Vol. 31, págs. 177-192.
43. *Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater.* **MAHMUT, Bayramoglu, y otros.** 2, 15 de Junio de 2004, Separation and purification technology Vol 37 No 2, Vol. 37, págs. 127-125.
44. *Análisis de costos de la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea.* **ARANGO RUÍZ, Álvaro, y otros.** 2, Medellín : s.n., 08 de Agosto de 2008, Producción + Limpia Vol 3 No 2, Vol. 3, págs. 9-22.
45. **ICONTEC.** GTC 2. *Manual de métodos analíticos para el control de la calidad del agua.* Bogotá, Colombia : s.n.
46. **(SMC), Standard Methods Committee.** *Standard Methods for examination of water and wastewater.* 5. Bogotá : s.n., 2005.
47. **HERNÁNDEZ LEHMANN, Pablo Santiago.** Investigación sobre procesos avanzados de tratamiento y depuración de las aguas mediante electrocoagulación. Madrid, España : Universidad Politécnica de Madrid, Marzo de 2011.
48. **UMAÑA BUSTAMATE, Reydoret del Carmen.** *Tratamiento de aguas residuales de la industria de curtiembre mediante un sistema de lodos activados a escala piloto.* Tumaco, Chile : s.n., 2004.
49. **COLOMBIA. PUEBLO DE COLOMBIA.** Constitución Política de Colombia (4 de Julio de 1991). Bogotá D.C. : s.n., 1991.
50. **SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE (SDA).** *Matriz de parámetros físico-químicos.* Bogotá : Secretaría Distrital de Ambiente, 2010.
51. **DIRECCIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE (Colombia).** *MANUAL DE PROCEDIMIENTOS ANALITICOS PARA AGUAS Y EFLUENTES.* Bogotá D.C. : Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, 1996.
52. **ASOCIACIÓN AMERICANA DE LA SALUD PÚBLICA. APHA.** Standard Methods for the examination of water and wastewaters, 21 th edition. Washington : American Public Health Association, 2005. Vol. 21.
53. **CONSULTORIA Y SERVICIOS AMBIENTALES, CIAN LTDA.** *Resultados de laboratorio.* Bogotá : s.n., 2014.

54. **COMITÉ TÉCNICO DEL RÍO BOGOTÁ.** Datos requeridos para cada estructura a ser monitoreada en el Río Tunjuelo. *Estación de Bombeo de San Benito.* Bogotá, Colombia : Alcaldía Mayor de Bogotá. Dirección de prevención y atención de emergencias.
55. **DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DEL MEDIO AMBIENTE, DAMA.** Resolución 339 de 1999. *por la cual se adopta el sistema de clasificación empresarial por el impacto sobre el recurso hídrico denominado "Unidades de Contaminación Hídrica - UCH-" para la jurisdicción del DAMA.* Bogotá : DAMA, 23 de Abril de 1999.
56. **BELTRÁN, Angélica y SALGADO, Yudy.** *Diseño de una planta para el tratamiento de aguas residuales generadas por el sector de curtiembres en San Benito, Bogotá D.C.* Facatativá : Universidad de Cundinamarca, 2014.
57. *Techno-economical evaluation of electrocoagulation for the textile wastewater using different electrode connections.* **MEHMETt, Kobya, MAHMUT, Bayramoglu y MURAT, Eyvaz.** Turquía : s.n., 17 de Febrero de 2007, Journal of Hazardous Materials, Vol. 148, págs. 311-318.
58. *New bipolar electrocoagulation - electroflotation process for the treatment of laundry wastewater.* **JIAN TUAN, Ge, y otros.** 1, Abril de 2004, Separation and Purification Technology, Vol. 36, págs. 33-39.
59. **SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE, SDA.** Agua Superficial Indicadores en Corrientes, Rio Tunjuelo - WQI Tunjuelo. *Página del Observatorio ambiental de Bogotá.* [En línea] Enero de 2013. [Citado el: 25 de Marzo de 2013.] <http://oab.ambientebogota.gov.co/index.shtml?s=l&id=688&v=l>.
60. *Estudio de reducción fotocatalizada de cromo hexavalente.* **TAPIA Jaime, FREER Juanita, MANSILLA Hector, VILLASEÑOR Jorge, BRUHN Carlos y BASUALTO Silvia.** Chile : Instituto de química de recursos naturales, Universidad de Talca., 2002.
61. **MIRANDA ZOPPAS, Fernanda, y otros.** *Evaluación de la nitrificación en el tratamiento de las aguas residuales de curtido con bioreactor de membrana durante la aclimatación del lo.* Brasil : Univesidade Federal de Rio Grande Du Soul, 2012.
62. **ROJAS ROMERO, Jairo Alberto.** *Tratamiento De Agua Residuales - Teoria y Principios de diseño.* Bogota D.C. : Escuela Colombiana De Ingenieria, 1999.

63. **Universidad de Valencia.** PARAMETROS FISICO-QUIMICOS: POTENCIAL OXIREDUCCION.
64. **GÓMEZ, Clara, GONZÁLEZ, Remedios y VIRUELA, Rafael.** CONDUCTIVIDAD DE LAS DISOLUCIONES ELECTROLITICAS. Valencia : Universidad de Valencia, 2009.
65. Instalaciones eléctricas residenciales. *¿Cómo se usa el tester?* [En línea] Octubre de 2009. [Citado el: 28 de Agosto de 2014.] <http://impiantielettriciresidenziali.blogspot.com/2011/10/como-se-usa-el-tester.html>.
66. **ICONTEC.** Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. *NTC 5613.* Bogotá : s.n., 2008.
67. —. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. *NTC 1486.* Bogotá : s.n., 2008.

12. ANEXOS

ANEXO A. FORMATO ENSAYOS ELECTROCOAGULACIÓN

FORMATO DE ENSAYOS ELECTROCOAGULACIÓN		
Fecha		
Participantes		
Nombre		
Objetivo		
Procedimiento		
Equipos a usar	Material de apoyo	Reactivos
Elementos de protección personal		
Flujo grama de proceso		

Condiciones de inicio		
Parámetro	Observaciones	
Ánodo		
Cátodo		
No electrodos - configuración		
Voltaje (V)		
Tiempo (min)		
Pretratamiento		
pH		
Distancia electrodos (cm)		
Montaje de la celda (dibujo)		
Resultados ensayo		
Apariencia agua (fotos)		
Antes	Después	Observaciones
Electrodos (fotos)		
Antes	Después	Observaciones
Variables	Observaciones	
Consumo energía		
Corriente (A)		
DQO		
Sulfuros		
SST		
SS		
pH		
Conductividad		

Muestras de agua					
Parámetro	Identificación	Recipiente	Volumen mínimo muestra	Preservación	Tiempo preservación
DQO					
Sulfuros					
SST					
SS					
Otro:					
Otro:					
Fecha programado laboratorio					

ANEXO B. RESULTADOS LABORATORIOS SULFUROS



REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO No. A-9046-14

Bogota D.C., Septiembre 3 de 2014

Página 1 de 11

DATOS DEL CLIENTE		IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	
CLAUDIA COLMENARES CARRERA 53 Nº 40 - 52 SUR 3045780142 alexacol.92@gmail.com		PRODUCTO/MATRIZ: AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL MUESTREO A CARGO DE: CLIENTE PROCEDIMIENTO DE MUESTREO: N.A. PLAN DE MUESTREO ANTEK No.: N.A. IDENTIFICACION DE MONITOREO: N.A. NUMERO TOTAL DE MUESTRAS: 32 LUGAR DE MUESTREO: N.E. TIPO DE MUESTREO: N.E.	
FECHA DE MUESTREO: 2014-07-30		FECHA DE RECEPCION DE MUESTRAS: 2014-08-28	
FECHA DE ANALISIS: 2014-08-28 AL 2014-09-03			

PARAMETRO	UNIDADES	TECNICA ANALITICA	METODO	MUESTRA DE ENSAYO 1	MUESTRA DE ENSAYO 2	MUESTRA DE ENSAYO 3	LIMITES RESOLUCIÓN 3957 DE 2009 DE SDA
SULFUROS	mg/L S-2	YODOMETRICO	SM 4500- S2 F	8,2	6,9	9,5	5

N.E. : NO ESTABLECIDO N.A. : NO APLICA

OBSERVACIONES:

METODO DE ANALISIS UTILIZADO: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER & WASTEWATER 22 nd EDITION 2012, APHA, AWWA, WEF.

RESULTADOS VALIDOS UNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) ANALIZADA(S)

PROHIBIDA LA REPRODUCCION PARCIAL DE ESTE INFORME SIN AUTORIZACION ESCRITA DEL LABORATORIO

LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS NO DEBEN SER UTILIZADOS COMO UNA CERTIFICACION DE CONFORMIDAD CON NORMAS DE PRODUCTO O COMO CERTIFICADO DEL SISTEMA DE CALIDAD DE LA ENTIDAD QUE LO PRODUCE

REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO No. A-9046-14

Bogota D.C., Septiembre 3 de 2014

Página 2 de 11

DATOS DEL CLIENTE		IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	
CLAUDIA COLMENARES CARRERA 53 Nº 40 - 52 SUR 3045780142 alexacol.92@gmail.com		PRODUCTO/MATRIZ: AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL MUESTREO A CARGO DE: CLIENTE PROCEDIMIENTO DE MUESTREO: N.A. PLAN DE MUESTREO ANTEK No.: N.A. IDENTIFICACION DE MONITOREO: N.A. NUMERO TOTAL DE MUESTRAS: 32 LUGAR DE MUESTREO: N.E. TIPO DE MUESTREO: N.E.	
FECHA DE MUESTREO: 2014-07-30		FECHA DE RECEPCION DE MUESTRAS: 2014-08-28	
FECHA DE ANALISIS: 2014-08-28 AL 2014-09-03			

PARAMETRO	UNIDADES	TECNICA ANALITICA	METODO	MUESTRA DE ENSAYO 4	MUESTRA DE ENSAYO 5	MUESTRA DE ENSAYO 6	LIMITES RESOLUCIÓN 3957 DE 2009 DE SDA
SULFUROS	mg/L S-2	YODOMETRICO	SM 4500- S2 F	8,7	2,0	6,5	5

N.E. : NO ESTABLECIDO N.A. : NO APLICA

OBSERVACIONES:

METODO DE ANALISIS UTILIZADO: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER & WASTEWATER 22 nd EDITION 2012, APHA, AWWA, WEF.

RESULTADOS VALIDOS UNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) ANALIZADA(S)

PROHIBIDA LA REPRODUCCION PARCIAL DE ESTE INFORME SIN AUTORIZACION ESCRITA DEL LABORATORIO

LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS NO DEBEN SER UTILIZADOS COMO UNA CERTIFICACION DE CONFORMIDAD CON NORMAS DE PRODUCTO O COMO CERTIFICADO DEL SISTEMA DE CALIDAD DE LA ENTIDAD QUE LO PRODUCE

REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO No. A-9046-14

LABORATORIO ALISTADO
Según Resolución M-3005

Bogotá D.C., Septiembre 3 de 2014

Pagina 3 de 11

DATOS DEL CLIENTE	IDENTIFICACION DE LA MUESTRA
CLAUDIA COLMENARES CARRERA 53 N° 40 - 52 SUR 3045760142 alexacol.92@gmail.com	PRODUCTO/MATRIZ: AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL MUESTREO A CARGO DE: CLIENTE PROCEDIMIENTO DE MUESTREO: N.A. PLAN DE MUESTREO ANTEK No.: N.A. IDENTIFICACION DE MONITOREO: N.A. NUMERO TOTAL DE MUESTRAS: 32 LUGAR DE MUESTREO: N.E. TIPO DE MUESTREO: N.E.
FECHA DE MUESTREO: 2014-07-30	FECHA DE RECEPCION DE MUESTRAS: 2014-08-28
FECHA DE ANALISIS: 2014-08-28 AL 2014-09-03	

PARAMETRO	UNIDADES	TECNICA ANALITICA	METODO	MUESTRA DE ENSAYO 7	MUESTRA DE ENSAYO 8	MUESTRA DE ENSAYO 9	LIMITES RESOLUCIÓN 3957 DE 2009 DE SDA
				ANTEK 181704	ANTEK 181705	ANTEK 181706	
SULFUROS	mg/L S-2	YODOMETRICO	SM 4500- S2 F	7,4	3,5	<1,5	5

N.E. : NO ESTABLECIDO N.A. : NO APLICA

OBSERVACIONES:

METODO DE ANALISIS UTILIZADO: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER & WASTEWATER 22 nd EDITION 2012, APHA, AWWA, WEF.

RESULTADOS VALIDOS UNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) ANALIZADA(S)

PROHIBIDA LA REPRODUCCION PARCIAL DE ESTE INFORME SIN AUTORIZACION ESCRITA DEL LABORATORIO

LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS NO DEBEN SER UTILIZADOS COMO UNA CERTIFICACION DE CONFORMIDAD CON NORMAS DE PRODUCTO O COMO CERTIFICADO DEL SISTEMA DE CALIDAD DE LA ENTIDAD QUE LO PRODUCE

REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO No. A-9046-14

LABORATORIO ALISTADO
Según Resolución M-3005

Bogotá D.C., Septiembre 3 de 2014

Pagina 4 de 11

DATOS DEL CLIENTE	IDENTIFICACION DE LA MUESTRA
CLAUDIA COLMENARES CARRERA 53 N° 40 - 52 SUR 3045760142 alexacol.92@gmail.com	PRODUCTO/MATRIZ: AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL MUESTREO A CARGO DE: CLIENTE PROCEDIMIENTO DE MUESTREO: N.A. PLAN DE MUESTREO ANTEK No.: N.A. IDENTIFICACION DE MONITOREO: N.A. NUMERO TOTAL DE MUESTRAS: 32 LUGAR DE MUESTREO: N.E. TIPO DE MUESTREO: N.E.
FECHA DE MUESTREO: 2014-07-30	FECHA DE RECEPCION DE MUESTRAS: 2014-08-28
FECHA DE ANALISIS: 2014-08-28 AL 2014-09-03	

PARAMETRO	UNIDADES	TECNICA ANALITICA	METODO	MUESTRA DE ENSAYO 10	MUESTRA DE ENSAYO 11	MUESTRA DE ENSAYO 12	LIMITES RESOLUCIÓN 3957 DE 2009 DE SDA
				ANTEK 181707	ANTEK 181708	ANTEK 181709	
SULFUROS	mg/L S-2	YODOMETRICO	SM 4500- S2 F	2,3	2,9	3,0	5

N.E. : NO ESTABLECIDO N.A. : NO APLICA

OBSERVACIONES:

METODO DE ANALISIS UTILIZADO: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER & WASTEWATER 22 nd EDITION 2012, APHA, AWWA, WEF.

RESULTADOS VALIDOS UNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) ANALIZADA(S)

PROHIBIDA LA REPRODUCCION PARCIAL DE ESTE INFORME SIN AUTORIZACION ESCRITA DEL LABORATORIO

LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS NO DEBEN SER UTILIZADOS COMO UNA CERTIFICACION DE CONFORMIDAD CON NORMAS DE PRODUCTO O COMO CERTIFICADO DEL SISTEMA DE CALIDAD DE LA ENTIDAD QUE LO PRODUCE

REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO No. A-9046-14

LABORATORIO ACREDITADO
Super Resolución 91003

Bogota D.C., Septiembre 3 de 2014

Pagina 5 de 11

DATOS DEL CLIENTE	IDENTIFICACION DE LA MUESTRA
CLAUDIA COLMENARES CARRERA 53 N° 40 - 52 SUR 3045780142 alexacol.92@gmail.com	PRODUCTO/MATRIZ: AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL MUESTREO A CARGO DE: CLIENTE PROCEDIMIENTO DE MUESTREO: N.A. PLAN DE MUESTREO ANTEK No.: N.A. IDENTIFICACION DE MONITOREO: N.A. NUMERO TOTAL DE MUESTRAS: 32 LUGAR DE MUESTREO: N.E. TIPO DE MUESTREO: N.E.
FECHA DE MUESTREO: 2014-07-30	FECHA DE RECEPCION DE MUESTRAS: 2014-08-28
FECHA DE ANALISIS: 2014-08-28 AL 2014-09-03	

PARAMETRO	UNIDADES	TECNICA ANALITICA	METODO	MUESTRA DE ENSAYO 13	MUESTRA DE ENSAYO 14	MUESTRA DE ENSAYO 15	LIMITES RESOLUCIÓN 3957 DE 2009 DE SDA
				ANTEK 181710	ANTEK 181711	ANTEK 181712	
SULFUROS	mg/L S-2	YODOMETRICO	SM 4500- S2 F	6,2	3,0	6,7	5

N.E. : NO ESTABLECIDO N.A. : NO APLICA

OBSERVACIONES:

METODO DE ANALISIS UTILIZADO: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER & WASTEWATER 22 nd EDITION 2012, APHA, AWWA, WEF.

RESULTADOS VALIDOS UNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) ANALIZADA(S)

PROHIBIDA LA REPRODUCCION PARCIAL DE ESTE INFORME SIN AUTORIZACION ESCRITA DEL LABORATORIO

LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS NO DEBEN SER UTILIZADOS COMO UNA CERTIFICACION DE CONFORMIDAD CON NORMAS DE PRODUCTO O COMO CERTIFICADO DEL SISTEMA DE CALIDAD DE LA ENTIDAD QUE LO PRODUCE

REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO No. A-9046-14

LABORATORIO ACREDITADO
Super Resolución 91003

Bogota D.C., Septiembre 3 de 2014

Pagina 6 de 11

DATOS DEL CLIENTE	IDENTIFICACION DE LA MUESTRA
CLAUDIA COLMENARES CARRERA 53 N° 40 - 52 SUR 3045780142 alexacol.92@gmail.com	PRODUCTO/MATRIZ: AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL MUESTREO A CARGO DE: CLIENTE PROCEDIMIENTO DE MUESTREO: N.A. PLAN DE MUESTREO ANTEK No.: N.A. IDENTIFICACION DE MONITOREO: N.A. NUMERO TOTAL DE MUESTRAS: 32 LUGAR DE MUESTREO: N.E. TIPO DE MUESTREO: N.E.
FECHA DE MUESTREO: 2014-07-30	FECHA DE RECEPCION DE MUESTRAS: 2014-08-28
FECHA DE ANALISIS: 2014-08-28 AL 2014-09-03	

PARAMETRO	UNIDADES	TECNICA ANALITICA	METODO	MUESTRA DE ENSAYO 16	MUESTRA DE ENSAYO 17	MUESTRA DE ENSAYO 18	LIMITES RESOLUCIÓN 3957 DE 2009 DE SDA
				ANTEK 181713	ANTEK 181714	ANTEK 181715	
SULFUROS	mg/L S-2	YODOMETRICO	SM 4500- S2 F	5,0	8,0	10,6	5

N.E. : NO ESTABLECIDO N.A. : NO APLICA

OBSERVACIONES:

METODO DE ANALISIS UTILIZADO: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER & WASTEWATER 22 nd EDITION 2012, APHA, AWWA, WEF.

RESULTADOS VALIDOS UNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) ANALIZADA(S)

PROHIBIDA LA REPRODUCCION PARCIAL DE ESTE INFORME SIN AUTORIZACION ESCRITA DEL LABORATORIO

LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS NO DEBEN SER UTILIZADOS COMO UNA CERTIFICACION DE CONFORMIDAD CON NORMAS DE PRODUCTO O COMO CERTIFICADO DEL SISTEMA DE CALIDAD DE LA ENTIDAD QUE LO PRODUCE

REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO No. A-9046-14

LABORATORIO ACREDITADO
Según Resolución N° 9001

Bogotá D.C., Septiembre 3 de 2014

Pagina 7 de 11

DATOS DEL CLIENTE	IDENTIFICACION DE LA MUESTRA
CLAUDIA COLMENARES CARRERA 53 N° 40 - 52 SUR 3045780142 alexacol.92@gmail.com	PRODUCTO/MATRIZ: AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL MUESTREO A CARGO DE: CLIENTE PROCEDIMIENTO DE MUESTREO: N.A. PLAN DE MUESTREO ANTEK No.: N.A. IDENTIFICACION DE MONITOREO: N.A. NUMERO TOTAL DE MUESTRAS: 32 LUGAR DE MUESTREO: N.E. TIPO DE MUESTREO: N.E.
FECHA DE MUESTREO: 2014-07-30	FECHA DE RECEPCION DE MUESTRAS: 2014-08-28
FECHA DE ANALISIS: 2014-08-28 AL 2014-09-03	

PARAMETRO	UNIDADES	TECNICA ANALITICA	METODO	MUESTRA DE ENSAYO 19	MUESTRA DE ENSAYO 20	MUESTRA DE ENSAYO 21	LIMITES RESOLUCIÓN 3957 DE 2009 DE SDA
				ANTEK 181716	ANTEK 181717	ANTEK 181718	
SULFUROS	mg/L S-2	YODOMETRICO	SM 4500- S2 F	4,0	2,0	7,1	5

N.E. : NO ESTABLECIDO N.A. : NO APLICA

OBSERVACIONES:

METODO DE ANALISIS UTILIZADO: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER & WASTEWATER 22 nd EDITION 2012, APHA, AWWA, WEF.

RESULTADOS VALIDOS UNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) ANALIZADA(S)

PROHIBIDA LA REPRODUCCION PARCIAL DE ESTE INFORME SIN AUTORIZACION ESCRITA DEL LABORATORIO

LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS NO DEBEN SER UTILIZADOS COMO UNA CERTIFICACION DE CONFORMIDAD CON NORMAS DE PRODUCTO O COMO CERTIFICADO DEL SISTEMA DE CALIDAD DE LA ENTIDAD QUE LO PRODUCE

REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO No. A-9046-14

LABORATORIO ACREDITADO
Según Resolución N° 9001

Bogotá D.C., Septiembre 3 de 2014

Pagina 8 de 11

DATOS DEL CLIENTE	IDENTIFICACION DE LA MUESTRA
CLAUDIA COLMENARES CARRERA 53 N° 40 - 52 SUR 3045780142 alexacol.92@gmail.com	PRODUCTO/MATRIZ: AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL MUESTREO A CARGO DE: CLIENTE PROCEDIMIENTO DE MUESTREO: N.A. PLAN DE MUESTREO ANTEK No.: N.A. IDENTIFICACION DE MONITOREO: N.A. NUMERO TOTAL DE MUESTRAS: 32 LUGAR DE MUESTREO: N.E. TIPO DE MUESTREO: N.E.
FECHA DE MUESTREO: 2014-07-30	FECHA DE RECEPCION DE MUESTRAS: 2014-08-28
FECHA DE ANALISIS: 2014-08-28 AL 2014-09-03	

PARAMETRO	UNIDADES	TECNICA ANALITICA	METODO	MUESTRA DE ENSAYO 22	MUESTRA DE ENSAYO 23	MUESTRA DE ENSAYO 24	LIMITES RESOLUCIÓN 3957 DE 2009 DE SDA
				ANTEK 181719	ANTEK 181720	ANTEK 181721	
SULFUROS	mg/L S-2	YODOMETRICO	SM 4500- S2 F	7,9	3,2	3,3	5

N.E. : NO ESTABLECIDO N.A. : NO APLICA

OBSERVACIONES:

METODO DE ANALISIS UTILIZADO: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER & WASTEWATER 22 nd EDITION 2012, APHA, AWWA, WEF.

RESULTADOS VALIDOS UNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) ANALIZADA(S)

PROHIBIDA LA REPRODUCCION PARCIAL DE ESTE INFORME SIN AUTORIZACION ESCRITA DEL LABORATORIO

LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS NO DEBEN SER UTILIZADOS COMO UNA CERTIFICACION DE CONFORMIDAD CON NORMAS DE PRODUCTO O COMO CERTIFICADO DEL SISTEMA DE CALIDAD DE LA ENTIDAD QUE LO PRODUCE

REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO No. A-9046-14

LABORATORIO ACREDITADO
Según Resolución N° 9011

Bogotá D.C., Septiembre 3 de 2014

Pagina 9 de 11

DATOS DEL CLIENTE		IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	
CLAUDIA COLMENARES CARRERA 53 N° 40 - 52 SUR 3045760142 alexacol.92@gmail.com		PRODUCTO/MATRIZ: AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL MUESTREO A CARGO DE: CLIENTE PROCEDIMIENTO DE MUESTREO: N.A. PLAN DE MUESTREO ANTEK No.: N.A. IDENTIFICACION DE MONITOREO: N.A. NUMERO TOTAL DE MUESTRAS: 32 LUGAR DE MUESTREO: N.E. TIPO DE MUESTREO: N.E.	
FECHA DE MUESTREO: 2014-07-30		FECHA DE RECEPCION DE MUESTRAS: 2014-08-28	
FECHA DE ANALISIS: 2014-08-28 AL 2014-09-03			

PARAMETRO	UNIDADES	TECNICA ANALITICA	METODO	MUESTRA DE ENSAYO 25	MUESTRA DE ENSAYO 26	MUESTRA DE ENSAYO 27	LIMITES RESOLUCIÓN 3957 DE 2009 DE SDA
SULFUROS	mg/L S-2	YODOMETRICO	SM 4500- S2 F	ANTEK 181722	ANTEK 181723	ANTEK 181724	5
				2,8	<1,5	5,3	

N.E. : NO ESTABLECIDO N.A. : NO APLICA

OBSERVACIONES:

METODO DE ANALISIS UTILIZADO: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER & WASTEWATER 22 nd EDITION 2012, APHA, AWWA, WEF.

RESULTADOS VALIDOS UNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) ANALIZADA(S)

PROHIBIDA LA REPRODUCCION PARCIAL DE ESTE INFORME SIN AUTORIZACION ESCRITA DEL LABORATORIO

LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS NO DEBEN SER UTILIZADOS COMO UNA CERTIFICACION DE CONFORMIDAD CON NORMAS DE PRODUCTO O COMO CERTIFICADO DEL SISTEMA DE CALIDAD DE LA ENTIDAD QUE LO PRODUCE

REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO No. A-9046-14

LABORATORIO ACREDITADO
Según Resolución N° 9011

Bogotá D.C., Septiembre 3 de 2014

Pagina 10 de 11

DATOS DEL CLIENTE		IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	
CLAUDIA COLMENARES CARRERA 53 N° 40 - 52 SUR 3045760142 alexacol.92@gmail.com		PRODUCTO/MATRIZ: AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL MUESTREO A CARGO DE: CLIENTE PROCEDIMIENTO DE MUESTREO: N.A. PLAN DE MUESTREO ANTEK No.: N.A. IDENTIFICACION DE MONITOREO: N.A. NUMERO TOTAL DE MUESTRAS: 32 LUGAR DE MUESTREO: N.E. TIPO DE MUESTREO: N.E.	
FECHA DE MUESTREO: 2014-07-30		FECHA DE RECEPCION DE MUESTRAS: 2014-08-28	
FECHA DE ANALISIS: 2014-08-28 AL 2014-09-03			

PARAMETRO	UNIDADES	TECNICA ANALITICA	METODO	MUESTRA DE ENSAYO 28	MUESTRA DE ENSAYO 29	MUESTRA DE ENSAYO 30	LIMITES RESOLUCIÓN 3957 DE 2009 DE SDA
SULFUROS	mg/L S-2	YODOMETRICO	SM 4500- S2 F	ANTEK 181725	ANTEK 181726	ANTEK 181727	5
				5,3	1,7	1,7	

N.E. : NO ESTABLECIDO N.A. : NO APLICA

OBSERVACIONES:

METODO DE ANALISIS UTILIZADO: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER & WASTEWATER 22 nd EDITION 2012, APHA, AWWA, WEF.

RESULTADOS VALIDOS UNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) ANALIZADA(S)

PROHIBIDA LA REPRODUCCION PARCIAL DE ESTE INFORME SIN AUTORIZACION ESCRITA DEL LABORATORIO

LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS NO DEBEN SER UTILIZADOS COMO UNA CERTIFICACION DE CONFORMIDAD CON NORMAS DE PRODUCTO O COMO CERTIFICADO DEL SISTEMA DE CALIDAD DE LA ENTIDAD QUE LO PRODUCE

REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO No. A-9046-14

Según Resolución N° 001

Bogota D.C., Septiembre 3 de 2014

Pagina 11 de 11

DATOS DEL CLIENTE	IDENTIFICACION DE LA MUESTRA
CLAUDIA COLMENARES CARRERA 53 N° 40 - 52 SUR 3045780142 alexacol.92@gmail.com	PRODUCTO/MATRIZ: AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL MUESTREO A CARGO DE: CLIENTE PROCEDIMIENTO DE MUESTREO: N.A. PLAN DE MUESTREO ANTEK No.: N.A. IDENTIFICACION DE MONITOREO: N.A. NUMERO TOTAL DE MUESTRAS: 32 LUGAR DE MUESTREO: N.E. TIPO DE MUESTREO: N.E.
FECHA DE MUESTREO: 2014-07-30	FECHA DE RECEPCION DE MUESTRAS: 2014-08-28
FECHA DE ANALISIS: 2014-08-28 AL 2014-09-03	

PARAMETRO	UNIDADES	TECNICA ANALITICA	METODO	MUESTRA INICIAL	MUESTRA INICIAL CONEXION ELECTRODOS	LIMITES RESOLUCIÓN 3957 DE 2009 DE SDA
SULFUROS	mg/L S-2	YODOMETRICO	SM 4500- S2 F	ANTEK 181728	ANTEK 181729	5

N.E. : NO ESTABLECIDO N.A. : NO APLICA

OBSERVACIONES:

METODO DE ANALISIS UTILIZADO: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER & WASTEWATER 22 nd EDITION 2012, APHA, AWWA, WEF.

RESULTADOS VALIDOS UNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) ANALIZADA(S)

PROHIBIDA LA REPRODUCCION PARCIAL DE ESTE INFORME SIN AUTORIZACION ESCRITA DEL LABORATORIO

LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS NO DEBEN SER UTILIZADOS COMO UNA CERTIFICACION DE CONFORMIDAD CON NORMAS DE PRODUCTO O COMO CERTIFICADO DEL SISTEMA DE CALIDAD DE LA ENTIDAD QUE LO PRODUCE

ANEXO C. RESULTADOS DE ENSAYOS DE ELECTROCOAGULACIÓN

Ensayo 1					
Variable	Sin agitación	Voltaje	1	Tiempo	5
Entrada		Salida		Observaciones	
Peso electrodo Al (g)	16.496	Peso electrodo Al (g)	16.494		
Peso electrodo Al (g)	16.055	Peso electrodo Al (g)	16.024		
Peso electrodo Fe (g)	27.373	Peso electrodo Fe (g)	27.389		
Peso electrodo Fe (g)	38.939	Peso electrodo Fe (g)	38.932		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	0.033		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	-0.009		
Consumo energía (W-h)	0.455	Consumo energía (W-h)	0.455		
Potencia suministrada por la fuente (W)	5.46	Potencia suministrada por la fuente (W)	5.46		
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	623.8645056	Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	623.8645056		
Corriente en la fuente (A)	1.3	Corriente en la fuente (A)	1.3		
Voltaje en fuente (V)	4.2	Voltaje en fuente (V)	4.2		
Voltaje en electrodos (V)	1.05	Voltaje en electrodos (V)	1.03		
Voltaje en resistencias (V)	2.82	Voltaje en resistencias (V)	2.8		
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)	2559		
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)	8.2		
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)	3315		
SS (mm)	38	SS (mm)	255		
pH	10.407	pH	4.068		
pH ajustado	3.95	pH ajustado	NA		
Potencial redox (mV)	-186	Potencial redox (mV)	-183.6		
Resistencia (Ω)	3.2	Resistencia (Ω)	3.2		
Potencia de pérdidas (W)	5.408	Potencia de pérdidas (W)	5.408		
Temperatura ($^{\circ}C$)	16.8	Temperatura ($^{\circ}C$)	16.6		

Ensayo 2					
Variable	Sin agitación	Voltaje		Tiempo	
Entrada		Salida		Observaciones	
			1		12
Peso electrodo Al (g)	16.495	Peso electrodo Al (g)	16.492	Demasiados Sólidos Suspendidos	
Peso electrodo Al (g)	16.025	Peso electrodo Al (g)	16.021		
Peso electrodo Fe (g)	27.372	Peso electrodo Fe (g)	27.371		
Peso electrodo Fe (g)	38.934	Peso electrodo Fe (g)	38.932		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	0.007		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	0.003		
Consumo energía (W-h)	0.00208	Consumo energía (W-h)	0.0021		
Potencia suministrada por la fuente (W)	0.0104	Potencia suministrada por la fuente (W)	0.0105		
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	19.38040624	Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	19.19583094		
Corriente en la fuente (A)	0.01	Corriente en la fuente (A)	0.01		
Voltaje en fuente (V)	1.04	Voltaje en fuente (V)	1.05		
Voltaje en electrodos (V)	1.01	Voltaje en electrodos (V)	0.7		
Voltaje en resistencias (V)	0.03	Voltaje en resistencias (V)	0.02		
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)	2892		
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)	6.9		
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)	1458		
SS (mm)	23	SS (mm)	90		
pH	10.53	pH	3.95		
pH ajustado	4.128	pH ajustado			
Potencial redox (mV)	-192.6	Potencial redox (mV)	-203.9		
Resistencia (Ω)	3.2	Resistencia (Ω)	3.2		
Potencia de pérdidas (W)	0.00032	Potencia de pérdidas (W)	0.00032		
Temperatura ($^{\circ}C$)	20	Temperatura ($^{\circ}C$)	19.8		

Ensayo 3						
Variable	Sin agitación	Voltaje		1	Tiempo	20
Entrada		Salida		Observaciones		
Peso electrodo Al (g)	16.468	Peso electrodo Al (g)		16.475	Faltó conexión cátodo-cátodo se realizó a los 5 min	
Peso electrodo Al (g)	15.999	Peso electrodo Al (g)		15.991		
Peso electrodo Fe (g)	27.333	Peso electrodo Fe (g)		27.324		
Peso electrodo Fe (g)	38.905	Peso electrodo Fe (g)		38.984		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)		0.001		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)		-0.07		
Consumo energía (W-h)	0.007333333	Consumo energía (W-h)		0.013666667		
Potencia suministrada por la fuente (W)	0.022	Potencia suministrada por la fuente (W)		0.041		
Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)	36.64658635	Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)		78.65608777		
Corriente en la fuente (A)	0.02	Corriente en la fuente (A)		0.04		
Voltaje en fuente (V)	1.1	Voltaje en fuente (V)		1.025		
Voltaje en electrodos (V)	1.02	Voltaje en electrodos (V)		1.01		
Voltaje en resistencias (V)	0.06	Voltaje en resistencias (V)		0.15		
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)		2233		
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)		9.5		
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)		3705		
SS (mm)	25	SS (mm)		140		
pH	10.556	pH		4.28		
pH ajustado	4.296	pH ajustado	NA			
Potencial redox (mV)	-192.6	Potencial redox (mV)		-168.1		
Resistencia (Ω)	3.5	Resistencia (Ω)		3.5		
Potencia de pérdidas (W)	0.0014	Potencia de pérdidas (W)		0.0056		
Temperatura ($^{\circ}C$)	20	Temperatura ($^{\circ}C$)		16.4		

Ensayo 4						
Variable	Con agitación	Voltaje		3	Tiempo	5
Entrada		Salida		Observaciones		
Peso electrodo Al (g)	16.46	Peso electrodo Al (g)		16.457		
Peso electrodo Al (g)	15.985	Peso electrodo Al (g)		15.989		
Peso electrodo Fe (g)	27.31	Peso electrodo Fe (g)		27.226		
Peso electrodo Fe (g)	38.873	Peso electrodo Fe (g)		38.757		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)		-0.001		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)		0.2		
Consumo energía (W-h)	1.284666667	Consumo energía (W-h)		1.286666667		
Potencia suministrada por la fuente (W)	15.416	Potencia suministrada por la fuente (W)		15.44		
Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)	462.1045156	Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)		486.2543926		
Corriente en la fuente (A)	1.88	Corriente en la fuente (A)		1.93		
Voltaje en fuente (V)	8.2	Voltaje en fuente (V)		8		
Voltaje en electrodos (V)	3.07	Voltaje en electrodos (V)		3.05		
Voltaje en resistencias (V)	4.11	Voltaje en resistencias (V)		4.06		
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)		2944		
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)		8.7		
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)		1160		
SS (mm)	25	SS (mm)		140		
pH	10.469	pH		4.852		
pH ajustado	4.075	pH ajustado		NA		
Potencial redox (mV)	-189.9	Potencial redox (mV)		-136		
Resistencia (Ω)	3.5	Resistencia (Ω)		2.5		
Potencia de pérdidas (W)	12.3704	Potencia de pérdidas (W)		9.31225		
Temperatura ($^{\circ}C$)	20.4	Temperatura ($^{\circ}C$)		17.6		

Ensayo 5						
Variable	Con agitación	Voltaje		3	Tiempo	12
Entrada		Salida		Observaciones		
Peso electrodo Al (g)	16.446	Peso electrodo Al (g)		16.45		
Peso electrodo Al (g)	15.974	Peso electrodo Al (g)		15.968		
Peso electrodo Fe (g)	27.203	Peso electrodo Fe (g)		27.097		
Peso electrodo Fe (g)	38.707	Peso electrodo Fe (g)		38.144		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)		0.002		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)		0.669		
Consumo energía (W-h)	6.18	Consumo energía (W-h)		6.4		
Potencia suministrada por la fuente (W)	30.9	Potencia suministrada por la fuente (W)		32		
Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)	622.8087349	Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)		644.9799197		
Corriente en la fuente (A)	3.09	Corriente en la fuente (A)		3.2		
Voltaje en fuente (V)	10	Voltaje en fuente (V)		10		
Voltaje en electrodos (V)	2.97	Voltaje en electrodos (V)		2.97		
Voltaje en resistencias (V)	5.3	Voltaje en resistencias (V)		5.3		
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)		3110		
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)		2		
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)		9650		
SS (mm)	25	SS (mm)		150		
pH	10.469	pH		6.068		
pH ajustado	4.062	pH ajustado	NA			
Potencial redox (mV)	-182.6	Potencial redox (mV)		-67.2		
Resistencia (Ω)	3.1	Resistencia (Ω)		3.1		
Potencia de pérdidas (W)	29.59911	Potencia de pérdidas (W)		31.744		
Temperatura ($^{\circ}C$)	16.8	Temperatura ($^{\circ}C$)		16.7		

Ensayo 6							
Variable		Con agitación		Voltaje 3		Tiempo 20	
Entrada			Salida			Observaciones	
Peso electrodo Al (g)		16.439	Peso electrodo Al (g)		16.497		
Peso electrodo Al (g)		15.947	Peso electrodo Al (g)		15.975		
Peso electrodo Fe (g)		27.094	Peso electrodo Fe (g)		26.852		
Peso electrodo Fe (g)		38.136	Peso electrodo Fe (g)		37.73		
Cambio peso Al (g)			Cambio peso Al (g)		-0.086		
Cambio peso Fe (g)			Cambio peso Fe (g)		0.648		
Consumo energía (W-h)		5.97	Consumo energía (W-h)		5.79		
Potencia suministrada por la fuente (W)		17.91	Potencia suministrada por la fuente (W)		17.37		
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)		445.6632084	Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)		432.2261267		
Corriente en la fuente (A)		1.99	Corriente en la fuente (A)		1.93		
Voltaje en fuente (V)		9	Voltaje en fuente (V)		9		
Voltaje en electrodos (V)		3	Voltaje en electrodos (V)		3.04		
Voltaje en resistencias (V)		3.81	Voltaje en resistencias (V)		3.82		
DQO (mg/L)		6655	DQO (mg/L)		6788		
Sulfuros (mg/L)		4.8	Sulfuros (mg/L)		6.5		
SST (mg/L)		2340	SST (mg/L)		5055		
SS (mm)		25	SS (mm)		100		
pH		10.4	pH		7.253		
pH ajustado		3.958	pH ajustado		NA		
Potencial redox (mV)		-181.7	Potencial redox (mV)		-4.8		
Resistencia (Ω)		3.1	Resistencia (Ω)		3.1		
Potencia de pérdidas (W)		12.27631	Potencia de pérdidas (W)		11.54719		
Temperatura ($^{\circ}C$)		16.8	Temperatura ($^{\circ}C$)		17.5		

Ensayo 7						
Variable		Agitación	Voltaje	3	Tiempo	5
Entrada		Salida		Observaciones		
Peso electrodo Al (g)	16.447	Peso electrodo Al (g)		16.444		
Peso electrodo Al (g)	15.975	Peso electrodo Al (g)		15.97		
Peso electrodo Fe (g)	26.831	Peso electrodo Fe (g)		26.711		
Peso electrodo Fe (g)	37.721	Peso electrodo Fe (g)		37.662		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)		0.008		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)		0.179		
Consumo energía (W-h)	1.153333333	Consumo energía (W-h)		1.153333333		
Potencia suministrada por la fuente (W)	13.84	Potencia suministrada por la fuente (W)		13.84		
Conductividad ($\Omega^{-1}m^{-1}$)	435.8653363	Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)		435.8653363		
Corriente en la fuente (A)	1.73	Corriente en la fuente (A)		1.73		
Voltaje en fuente (V)	8	Voltaje en fuente (V)		8		
Voltaje en electrodos (V)	3.03	Voltaje en electrodos (V)		3.03		
Voltaje en resistencias (V)	3.65	Voltaje en resistencias (V)		3.65		
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)		2383		
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)		7.4		
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)		1170		
SS (mm)	25	SS (mm)		160		
pH	10.803	pH		4.972		
pH ajustado	4.052	pH ajustado		NA		
Potencial redox (mV)	-181.7	Potencial redox (mV)		-130.2		
Resistencia (Ω)	2.8	Resistencia (Ω)		2.8		
Potencia de pérdidas (W)	8.38012	Potencia de pérdidas (W)		8.38012		
Temperatura ($^{\circ}C$)	12.2	Temperatura ($^{\circ}C$)		19.5		

Ensayo 8					
Variable	Agitación	Voltaje		3	Tiempo 12
Entrada		Salida	Observaciones		
Peso electrodo Al (g)	16.479	Peso electrodo Al (g)	16.444		
Peso electrodo Al (g)	16.009	Peso electrodo Al (g)	15.97		
Peso electrodo Fe (g)	26.484	Peso electrodo Fe (g)	26.7		
Peso electrodo Fe (g)	37.59	Peso electrodo Fe (g)	37.657		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	0.074		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	-0.283		
Consumo energía (W-h)	3.402	Consumo energía (W-h)	3.438		
Potencia suministrada por la fuente (W)	17.01	Potencia suministrada por la fuente (W)	17.19		
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	423.2680723	Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	427.7470995		
Corriente en la fuente (A)	1.89	Corriente en la fuente (A)	1.91		
Voltaje en fuente (V)	9	Voltaje en fuente (V)	9		
Voltaje en electrodos (V)	3	Voltaje en electrodos (V)	2.71		
Voltaje en resistencias (V)	1.25	Voltaje en resistencias (V)	4.33		
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)	2487		
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)	3.5		
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)	150		
SS (mm)	25	SS (mm)	200		
pH	10.812	pH	5.85		
pH ajustado	4.032	pH ajustado	NA		
Potencial redox (mV)	-181.7	Potencial redox (mV)	-93.1		
Resistencia (Ω)	2.8	Resistencia (Ω)	2.8		
Potencia de pérdidas (W)	10.00188	Potencia de pérdidas (W)	10.21468		
Temperatura ($^{\circ}C$)	21	Temperatura ($^{\circ}C$)	20.3		

Ensayo 9				
Variable	Agitación	Voltaje	5	Tiempo 5
Entrada		Salida	Observaciones	
Peso electrodo Al (g)	16.409	Peso electrodo Al (g)	16.406	
Peso electrodo Al (g)	15.915	Peso electrodo Al (g)	15.906	
Peso electrodo Fe (g)	26.299	Peso electrodo Fe (g)	26.17	
Peso electrodo Fe (g)	37.499	Peso electrodo Fe (g)	37.116	
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	0.012	
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	0.512	
Consumo energía (W-h)	5.36	Consumo energía (W-h)	4.436666667	
Potencia suministrada por la fuente (W)	64.32	Potencia suministrada por la fuente (W)	53.24	
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	721.9924474	Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	886.8473896	
Corriente en la fuente (A)	4.8	Corriente en la fuente (A)	4.84	
Voltaje en fuente (V)	13.4	Voltaje en fuente (V)	11	
Voltaje en electrodos (V)	5.06	Voltaje en electrodos (V)	4.96	
Voltaje en resistencias (V)	5.2	Voltaje en resistencias (V)	5.32	
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)	4247	
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)	1.5	
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)	6645	
SS (mm)	25	SS (mm)	150	
pH	10.381	pH	5.642	
pH ajustado	3.993	pH ajustado	NA	
Potencial redox (mV)	-185.8	Potencial redox (mV)	-91.1	
Resistencia (Ω)	2.5	Resistencia (Ω)	2.3	
Potencia de pérdidas (W)	57.6	Potencia de pérdidas (W)	53.87888	
Temperatura ($^{\circ}C$)	19.2	Temperatura ($^{\circ}C$)	18.1	

Ensayo 10					
Variable	Agitación	Voltaje		3	Tiempo 20
Entrada		Salida		Observaciones	
Peso electrodo Al (g)	16.375	Peso electrodo Al (g)	16.375		
Peso electrodo Al (g)	15.894	Peso electrodo Al (g)	15.898		
Peso electrodo Fe (g)	26.107	Peso electrodo Fe (g)	25.974		
Peso electrodo Fe (g)	37.089	Peso electrodo Fe (g)	36.731		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	-0.004		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	0.491		
Consumo energía (W-h)	3.312	Consumo energía (W-h)	2.7		
Potencia suministrada por la fuente (W)	9.936	Potencia suministrada por la fuente (W)	8.1		
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	386.3160977	Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	453.501506		
Corriente en la fuente (A)	1.38	Corriente en la fuente (A)	1.35		
Voltaje en fuente (V)	7.2	Voltaje en fuente (V)	6		
Voltaje en electrodos (V)	3	Voltaje en electrodos (V)	3.02		
Voltaje en resistencias (V)	2.74	Voltaje en resistencias (V)	2.51		
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)	2311		
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)	2.3		
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)	3715		
SS (mm)	25	SS (mm)	200		
pH	10.4	pH	5.51		
pH ajustado	3.993	pH ajustado	N/A		
Potencial redox (mV)	-181.2	Potencial redox (mV)	-99.8		
Resistencia (Ω)	3.1	Resistencia (Ω)	3.1		
Potencia de pérdidas (W)	5.90364	Potencia de pérdidas (W)	5.64975		
Temperatura ($^{\circ}C$)	19.1	Temperatura ($^{\circ}C$)	20.9		

Ensayo 11					
Variable	Agitación	Voltaje		5	12
Entrada		Salida		Observaciones	
Peso electrodo Al (g)	16.375	Peso electrodo Al (g)		16.498	
Peso electrodo Al (g)	15.898	Peso electrodo Al (g)		15.972	
Peso electrodo Fe (g)	25.96	Peso electrodo Fe (g)		25.524	
Peso electrodo Fe (g)	36.715	Peso electrodo Fe (g)		36.134	
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)		-0.197	
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)		1.017	
Consumo energía (W-h)	14.97	Consumo energía (W-h)		15.904	
Potencia suministrada por la fuente (W)	74.85	Potencia suministrada por la fuente (W)		79.52	
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	670.5103748	Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)		626.0840236	
Corriente en la fuente (A)	4.99	Corriente en la fuente (A)		4.97	
Voltaje en fuente (V)	15	Voltaje en fuente (V)		16	
Voltaje en electrodos (V)	5.06	Voltaje en electrodos (V)		4.87	
Voltaje en resistencias (V)	5.59	Voltaje en resistencias (V)		7.76	
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)		4013	
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)		2.9	
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)		6095	
SS (mm)	25	SS (mm)		100	
pH	10.4	pH		6.799	
pH ajustado	4.056	pH ajustado		NA	
Potencial redox (mV)	-181.2	Potencial redox (mV)		-23.8	
Resistencia (Ω)	3	Resistencia (Ω)		3.2	
Potencia de pérdidas (W)	74.7003	Potencia de pérdidas (W)		79.04288	
Temperatura ($^{\circ}C$)	19.1	Temperatura ($^{\circ}C$)		20.1	

Ensayo 12					
Variable	Agitación	Voltaje	5	Tiempo 20	
Entrada		Salida	Observaciones		
Peso electrodo Al (g)	16.323	Peso electrodo Al (g)	16.304		
Peso electrodo Al (g)	15.863	Peso electrodo Al (g)	15.857		
Peso electrodo Fe (g)	25.292	Peso electrodo Fe (g)	24.671		
Peso electrodo Fe (g)	36.035	Peso electrodo Fe (g)	35.728		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	0.025		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	0.928		
Consumo energía (W-h)	9.68	Consumo energía (W-h)	9.68		
Potencia suministrada por la fuente (W)	29.04	Potencia suministrada por la fuente (W)	29.04		
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	483.7349398	Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	483.7349398		
Corriente en la fuente (A)	2.64	Corriente en la fuente (A)	2.64		
Voltaje en fuente (V)	11	Voltaje en fuente (V)	11		
Voltaje en electrodos (V)	5.02	Voltaje en electrodos (V)	5.1		
Voltaje en resistencias (V)	4.82	Voltaje en resistencias (V)	4.84		
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)	1723		
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)	3		
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)	13650		
SS (mm)	25	SS (mm)	300		
pH	10.4	pH	7.42		
pH ajustado	4.056	pH ajustado	NA		
Potencial redox (mV)	-181.2	Potencial redox (mV)	-2.4		
Resistencia (Ω)	2.5	Resistencia (Ω)	2.8		
Potencia de pérdidas (W)	17.424	Potencia de pérdidas (W)	19.51488		
Temperatura ($^{\circ}C$)	19.1	Temperatura ($^{\circ}C$)	19.4		

Ensayo 13							
Variable		Agitación		Voltaje3		Tiempo 5	
Entrada		Salida				Observaciones	
Peso electrodo Al (g)	16.26	Peso electrodo Al (g)	16.291				
Peso electrodo Al (g)	15.804	Peso electrodo Al (g)	15.824				
Peso electrodo Fe (g)	24.61	Peso electrodo Fe (g)	24.52				
Peso electrodo Fe (g)	35.708	Peso electrodo Fe (g)	35.652				
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	-0.051				
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	0.146				
Consumo energía (W-h)	1.173333333	Consumo energía (W-h)	1.186666667				
Potencia suministrada por la fuente (W)	14.08	Potencia suministrada por la fuente (W)	14.24				
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	443.4236948	Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	448.4626004				
Corriente en la fuente (A)	1.76	Corriente en la fuente (A)	1.78				
Voltaje en fuente (V)	8	Voltaje en fuente (V)	8				
Voltaje en electrodos (V)	3	Voltaje en electrodos (V)	3.09				
Voltaje en resistencias (V)	3.29	Voltaje en resistencias (V)	3.31				
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)	1802				
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)	6.2				
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)	41250				
SS (mm)	25	SS (mm)	350				
pH	10.804	pH	6.89				
pH ajustado	5.921	pH ajustado	NA				
Potencial redox (mV)	-46.5	Potencial redox (mV)	-17.4				
Resistencia (Ω)	2	Resistencia (Ω)	2				
Potencia de pérdidas (W)	6.1952	Potencia de pérdidas (W)	6.3368				
Temperatura ($^{\circ}C$)	19.3	Temperatura ($^{\circ}C$)	19.9				

Ensayo 14					
Variable	Agitación	Voltaje	3	Tiempo	12
Entrada		Salida		Observaciones	
Peso electrodo Al (g)	16.242	Peso electrodo Al (g)	16.251	Calentamiento con plancha	
Peso electrodo Al (g)	15.786	Peso electrodo Al (g)	15.805		
Peso electrodo Fe (g)	24.459	Peso electrodo Fe (g)	24.07		
Peso electrodo Fe (g)	35.39	Peso electrodo Fe (g)	35.356		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	-0.028		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	0.423		
Consumo energía (W-h)	4.788	Consumo energía (W-h)	4.921		
Potencia suministrada por la fuente (W)	23.94	Potencia suministrada por la fuente (W)	24.605		
Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)	534.6544071	Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)	549.5059184		
Corriente en la fuente (A)	2.52	Corriente en la fuente (A)	2.59		
Voltaje en fuente (V)	9.5	Voltaje en fuente (V)	9.5		
Voltaje en electrodos (V)	3.01	Voltaje en electrodos (V)	2.99		
Voltaje en resistencias (V)	3.92	Voltaje en resistencias (V)	3.9		
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)	2709		
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)	3		
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)	9350		
SS (mm)	25	SS (mm)	No marcó		
pH	10.804	pH	8.235		
pH ajustado	5.982	pH ajustado	NA		
Potencial redox (mV)	-204.8	Potencial redox (mV)	-59.4		
Resistencia (Ω)	2	Resistencia (Ω)	2		
Potencia de pérdidas (W)	12.7008	Potencia de pérdidas (W)	13.4162		
Temperatura ($^{\circ}C$)	6.4	Temperatura ($^{\circ}C$)	18.2		

Ensayo 15						
Variable	Agitación	Voltaje		3	Tiempo	20
Entrada		Salida			Observaciones	
Peso electrodo Al (g)	16.194	Peso electrodo Al (g)		16.301		
Peso electrodo Al (g)	15.748	Peso electrodo Al (g)		15.821		
Peso electrodo Fe (g)	24.002	Peso electrodo Fe (g)		23.426		
Peso electrodo Fe (g)	35.307	Peso electrodo Fe (g)		35.06		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)		-0.18		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)		0.823		
Consumo energía (W-h)	7.38	Consumo energía (W-h)		7.47		
Potencia suministrada por la fuente (W)	22.14	Potencia suministrada por la fuente (W)		22.41		
Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)	550.9203481	Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)		557.6388889		
Corriente en la fuente (A)	2.46	Corriente en la fuente (A)		2.49		
Voltaje en fuente (V)	9	Voltaje en fuente (V)		9		
Voltaje en electrodos (V)	3.01	Voltaje en electrodos (V)		2.96		
Voltaje en resistencias (V)	3.84	Voltaje en resistencias (V)		3.88		
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)		2154		
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)		6.7		
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)		5300		
SS (mm)	25	SS (mm)		150		
pH	10.015	pH		6.905		
pH ajustado	5.934	pH ajustado		NA		
Potencial redox (mV)	-73.6	Potencial redox (mV)		-16.5		
Resistencia (Ω)	2	Resistencia (Ω)		2		
Potencia de pérdidas (W)	12.1032	Potencia de pérdidas (W)		12.4002		
Temperatura ($^{\circ}C$)	14	Temperatura ($^{\circ}C$)		18		

Ensayo 16					
Variable	Agitación	Voltaje	5	Tiempo	5
Entrada		Salida		Observaciones	
Peso electrodo Al (g)	16.178	Peso electrodo Al (g)	16.197		
Peso electrodo Al (g)	15.736	Peso electrodo Al (g)	15.147		
Peso electrodo Fe (g)	23.35	Peso electrodo Fe (g)	23.128		
Peso electrodo Fe (g)	35.037	Peso electrodo Fe (g)	34.952		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	0.57		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	0.307		
Consumo energía (W-h)	2.9325	Consumo energía (W-h)	3.028666667		
Potencia suministrada por la fuente (W)	35.19	Potencia suministrada por la fuente (W)	36.344		
Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	536.3148245	Conductividad($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	526.0959091		
Corriente en la fuente (A)	3.06	Corriente en la fuente (A)	3.08		
Voltaje en fuente (V)	11.5	Voltaje en fuente (V)	11.8		
Voltaje en electrodos (V)	5.01	Voltaje en electrodos (V)	5.08		
Voltaje en resistencias (V)	4.73	Voltaje en resistencias (V)	4.69		
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)	5116		
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)	5		
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)	3540		
SS (mm)	25	SS (mm)	100		
pH	10.015	pH	6.743		
pH ajustado	6.051	pH ajustado	NA		
Potencial redox (mV)	-73.6	Potencial redox (mV)	-29.1		
Resistencia (Ω)	1.8	Resistencia (Ω)	1.8		
Potencia de pérdidas (W)	16.85448	Potencia de pérdidas (W)	17.07552		
Temperatura ($^{\circ}C$)	18	Temperatura ($^{\circ}C$)	18.1		

Ensayo 17					
Variable	Agitación	Voltaje		5	Tiempo 12
Entrada		Salida			Observaciones
Peso electrodo Al (g)	16.133	Peso electrodo Al (g)		16.138	Daño cable resistencias
Peso electrodo Al (g)	15.689	Peso electrodo Al (g)		15.688	
Peso electrodo Fe (g)	22.909	Peso electrodo Fe (g)		22.465	
Peso electrodo Fe (g)	34.525	Peso electrodo Fe (g)		34.67	
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)		-0.004	
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)		0.299	
Consumo energía (W-h)	11.64	Consumo energía (W-h)		12	
Potencia suministrada por la fuente (W)	58.2	Potencia suministrada por la fuente (W)		60	
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	521.3587684	Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)		537.4832664	
Corriente en la fuente (A)	3.88	Corriente en la fuente (A)		4	
Voltaje en fuente (V)	15	Voltaje en fuente (V)		15	
Voltaje en electrodos (V)	4.98	Voltaje en electrodos (V)		4.72	
Voltaje en resistencias (V)	6.02	Voltaje en resistencias (V)		6.19	
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)		4439	
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)		8	
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)		9700	
SS (mm)	25	SS (mm)		11	
pH	10.015	pH		7.6	
pH ajustado	6.051	pH ajustado		NA	
Potencial redox (mV)	-73.6	Potencial redox (mV)		-28.4	
Resistencia (Ω)	2.5	Resistencia (Ω)		1.8	
Potencia de pérdidas (W)	37.636	Potencia de pérdidas (W)		28.8	
Temperatura ($^{\circ}C$)	18	Temperatura ($^{\circ}C$)		18	

Ensayo 18					
Variable	Agitación	Voltaje		5	Tiempo 20
Entrada		Salida			Observaciones
Peso electrodo Al (g)	16.084	Peso electrodo Al (g)		16.176	
Peso electrodo Al (g)	15.638	Peso electrodo Al (g)		15.727	
Peso electrodo Fe (g)	22.428	Peso electrodo Fe (g)		22.178	
Peso electrodo Fe (g)	34.037	Peso electrodo Fe (g)		33.205	
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)		-0.181	
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)		1.082	
Consumo energía (W-h)	11.232	Consumo energía (W-h)		11.196	
Potencia suministrada por la fuente (W)	33.696	Potencia suministrada por la fuente (W)		33.588	
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	582.2735386	Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)		580.4072773	
Corriente en la fuente (A)	3.12	Corriente en la fuente (A)		3.11	
Voltaje en fuente (V)	10.8	Voltaje en fuente (V)		10.8	
Voltaje en electrodos (V)	5.02	Voltaje en electrodos (V)		4.9	
Voltaje en resistencias (V)	4.24	Voltaje en resistencias (V)		4.29	
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)		4635	
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)		10.6	
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)		8250	
SS (mm)	25	SS (mm)		250	
pH	10.015	pH		8.194	
pH ajustado	6.08	pH ajustado		NA	
Potencial redox (mV)	-44	Potencial redox (mV)		-52.2	
Resistencia (Ω)	2.3	Resistencia (Ω)		2.2	
Potencia de pérdidas (W)	22.38912	Potencia de pérdidas (W)		21.27862	
Temperatura ($^{\circ}C$)	18.6	Temperatura ($^{\circ}C$)		19.2	

Ensayo 19					
Variable	Sin Agitación	Voltaje	3	Tiempo	5
Entrada		Salida		Observaciones	
Peso electrodo Al (g)	16.033	Peso electrodo Al (g)	16.072		
Peso electrodo Al (g)	15.602	Peso electrodo Al (g)	15.643		
Peso electrodo Fe (g)	22.097	Peso electrodo Fe (g)	22		
Peso electrodo Fe (g)	33.159	Peso electrodo Fe (g)	32.938		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	-0.08		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	0.30		
Consumo energía (W-h)	2.907	Consumo energía (W-h)	2.925		
Potencia suministrada por la fuente (W)	34.884	Potencia suministrada por la fuente (W)	35.1		
Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)	602.8024134	Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)	606.534936		
Corriente en la fuente (A)	3.23	Corriente en la fuente (A)	3.25		
Voltaje en fuente (V)	10.8	Voltaje en fuente (V)	10.8		
Voltaje en electrodos (V)	3.01	Voltaje en electrodos (V)	3		
Voltaje en resistencias (V)	4.59	Voltaje en resistencias (V)	4.61		
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)	9661		
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)	4		
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)	12195		
SS (mm)	25	SS (mm)	250		
pH	10.015	pH	6.875		
pH ajustado	6.08	pH ajustado	NA		
Potencial redox (mV)	-44	Potencial redox (mV)	-22		
Resistencia (Ω)	2	Resistencia (Ω)	2		
Potencia de pérdidas (W)	20.8658	Potencia de pérdidas (W)	21.125		
Temperatura ($^{\circ}C$)	18.6	Temperatura ($^{\circ}C$)	19		

Ensayo 20					
Variable	Sin Agitación	Voltaje	3	Tiempo	12
Entrada		Salida		Observaciones	
Peso electrodo Al (g)	16.001	Peso electrodo Al (g)	16.025		
Peso electrodo Al (g)	15.582	Peso electrodo Al (g)	15.601		
Peso electrodo Fe (g)	21.96	Peso electrodo Fe (g)	21.561		
Peso electrodo Fe (g)	32.898	Peso electrodo Fe (g)	32.703		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	-0.043		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	0.594		
Consumo energía (W-h)	5.46	Consumo energía (W-h)	5.62		
Potencia suministrada por la fuente (W)	27.3	Potencia suministrada por la fuente (W)	28.1		
Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)	550.248494	Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)	566.372992		
Corriente en la fuente (A)	2.73	Corriente en la fuente (A)	2.81		
Voltaje en fuente (V)	10	Voltaje en fuente (V)	10		
Voltaje en electrodos (V)	3.01	Voltaje en electrodos (V)	2.89		
Voltaje en resistencias (V)	4.04	Voltaje en resistencias (V)	4.08		
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)	2135		
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)	2		
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)	18905		
SS (mm)	25	SS (mm)	200		
pH	10.015	pH	7.6		
pH ajustado	6.08	pH ajustado	NA		
Potencial redox (mV)	-44	Potencial redox (mV)	-17.9		
Resistencia (Ω)	2	Resistencia (Ω)	1.9		
Potencia de pérdidas (W)	14.9058	Potencia de pérdidas (W)	15.00259		
Temperatura ($^{\circ}C$)	18.6	Temperatura ($^{\circ}C$)	17.7		

Ensayo 21					
Variable	Sin Agitación	Voltaje	3	Tiempo	20
Entrada		Salida		Observaciones	
Peso electrodo Al (g)	15.97	Peso electrodo Al (g)	16.061		
Peso electrodo Al (g)	15.538	Peso electrodo Al (g)	15.611		
Peso electrodo Fe (g)	21.51	Peso electrodo Fe (g)	20.931		
Peso electrodo Fe (g)	32.6	Peso electrodo Fe (g)	32.394		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	-0.164		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	0.785		
Consumo energía (W-h)	8.264666667	Consumo energía (W-h)	8.33		
Potencia suministrada por la fuente (W)	24.794	Potencia suministrada por la fuente (W)	24.99		
Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)	520.3441316	Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)	524.457524		
Corriente en la fuente (A)	2.53	Corriente en la fuente (A)	2.55		
Voltaje en fuente (V)	9.8	Voltaje en fuente (V)	9.8		
Voltaje en electrodos (V)	3.01	Voltaje en electrodos (V)	2.91		
Voltaje en resistencias (V)	3.93	Voltaje en resistencias (V)	4.13		
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)	5288		
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)	7.1		
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)	2355		
SS (mm)	25	SS (mm)	190		
pH	10.015	pH	7.6		
pH ajustado	6.003	pH ajustado	NA		
Potencial redox (mV)	-67.9	Potencial redox (mV)	-21.7		
Resistencia (Ω)	2	Resistencia (Ω)	2		
Potencia de pérdidas (W)	12.8018	Potencia de pérdidas (W)	13.005		
Temperatura ($^{\circ}C$)	13	Temperatura ($^{\circ}C$)	17.6		

Ensayo 22				
Variable	Agitación	Voltaje	1	Tiempo 5
Entrada		Salida		Observaciones
Peso electrodo Al (g)	16.061	Peso electrodo Al (g)	15.906	
Peso electrodo Al (g)	15.611	Peso electrodo Al (g)	15.504	
Peso electrodo Fe (g)	20.931	Peso electrodo Fe (g)	20.879	
Peso electrodo Fe (g)	32.394	Peso electrodo Fe (g)	32.364	
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	0.262	
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	0.082	
Consumo energía (W-h)	0.006416667	Consumo energía (W-h)	0.006416667	
Potencia suministrada por la fuente (W)	0.077	Potencia suministrada por la fuente (W)	0.077	
Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)	128.2630522	Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)	128.2630522	
Corriente en la fuente (A)	0.07	Corriente en la fuente (A)	0.07	
Voltaje en fuente (V)	1.1	Voltaje en fuente (V)	1.1	
Voltaje en electrodos (V)	1.02	Voltaje en electrodos (V)	1	
Voltaje en resistencias (V)	0.11	Voltaje en resistencias (V)	0.12	
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)	3444	
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)	7.9	
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)	7250	
SS (mm)	25	SS (mm)	100	
pH	10.015	pH	6.835	
pH ajustado	5.992	pH ajustado	NA	
Potencial redox (mV)	-70.1	Potencial redox (mV)	-22.6	
Resistencia (Ω)	2.1	Resistencia (Ω)	2.1	
Potencia de pérdidas (W)	0.01029	Potencia de pérdidas (W)	0.01029	
Temperatura ($^{\circ}C$)	15.7	Temperatura ($^{\circ}C$)	17.2	

Ensayo 23					
Variable	Agitación	Voltaje	1	Tiempo	12
Entrada		Salida		Observaciones	
Peso electrodo Al (g)	15.893	Peso electrodo Al (g)	15.897		
Peso electrodo Al (g)	15.49	Peso electrodo Al (g)	15.494		
Peso electrodo Fe (g)	20.836	Peso electrodo Fe (g)	20.833		
Peso electrodo Fe (g)	32.305	Peso electrodo Fe (g)	32.301		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	-0.008		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	0.007		
Consumo energía (W-h)	0.0176	Consumo energía (W-h)	0.0132		
Potencia suministrada por la fuente (W)	0.088	Potencia suministrada por la fuente (W)	0.066		
Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)	146.5863454	Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)	109.939759		
Corriente en la fuente (A)	0.08	Corriente en la fuente (A)	0.06		
Voltaje en fuente (V)	1.1	Voltaje en fuente (V)	1.1		
Voltaje en electrodos (V)	1.01	Voltaje en electrodos (V)	1.07		
Voltaje en resistencias (V)	0.15	Voltaje en resistencias (V)	0.13		
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)	2330		
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)	3.2		
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)	3240		
SS (mm)	25	SS (mm)	250		
pH	9.84	pH	6		
pH ajustado	6.02	pH ajustado	NA		
Potencial redox (mV)	-154.3	Potencial redox (mV)	-43.2		
Resistencia (Ω)	2.8	Resistencia (Ω)	2.8		
Potencia de pérdidas (W)	0.01792	Potencia de pérdidas (W)	0.01008		
Temperatura ($^{\circ}C$)					
	20.2	Temperatura ($^{\circ}C$)	17.7		

Ensayo 24					
Variable	Agitación	Voltaje		1	Tiempo 20
Entrada		Salida		Observaciones	
Peso electrodo Al (g)	15.871	Peso electrodo Al (g)	15.883		
Peso electrodo Al (g)	15.187	Peso electrodo Al (g)	15.5		
Peso electrodo Fe (g)	20.797	Peso electrodo Fe (g)	20.787		
Peso electrodo Fe (g)	32.262	Peso electrodo Fe (g)	32.265		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	-0.325		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	0.007		
Consumo energía (W-h)	0.032	Consumo energía (W-h)	0.028		
Potencia suministrada por la fuente (W)	0.096	Potencia suministrada por la fuente (W)	0.084		
Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)	134.3708166	Conductividad($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$)	117.5744645		
Corriente en la fuente (A)	0.08	Corriente en la fuente (A)	0.07		
Voltaje en fuente (V)	1.2	Voltaje en fuente (V)	1.2		
Voltaje en electrodos (V)	1.02	Voltaje en electrodos (V)	1.07		
Voltaje en resistencias (V)	0.15	Voltaje en resistencias (V)	0.16		
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)	2938		
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)	3.3		
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)	1800		
SS (mm)	25	SS (mm)	140		
pH	9.84	pH	6.179		
pH ajustado	5.996	pH ajustado	NA		
Potencial redox (mV)	-2.3	Potencial redox (mV)	-60.5		
Resistencia (Ω)	2.8	Resistencia (Ω)	2.3		
Potencia de pérdidas (W)	0.01792	Potencia de pérdidas (W)	0.01127		
Temperatura ($^{\circ}C$)	20.2	Temperatura ($^{\circ}C$)	19		

Ensayo 25					
Variable	pH 11	Voltaje		3	Tiempo 20
Entrada		Salida		Observaciones	
Peso electrodo Al (g)	15.868	Peso electrodo Al (g)	15.952		
Peso electrodo Al (g)	15.48	Peso electrodo Al (g)	15.617		
Peso electrodo Fe (g)	20.734	Peso electrodo Fe (g)	20.56		
Peso electrodo Fe (g)	32.328	Peso electrodo Fe (g)	31.744		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	-0.221		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	0.758		
Consumo energía (W-h)	5.653333333	Consumo energía (W-h)	5.44		
Potencia suministrada por la fuente (W)	16.96	Potencia suministrada por la fuente (W)	16.32		
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	534.123996	Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	513.9683735		
Corriente en la fuente (A)	2.12	Corriente en la fuente (A)	2.04		
Voltaje en fuente (V)	8	Voltaje en fuente (V)	8		
Voltaje en electrodos (V)	2.86	Voltaje en electrodos (V)	2.65		
Voltaje en resistencias (V)	2.78	Voltaje en resistencias (V)	3.15		
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)	3979		
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)	2.8		
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)	1600		
SS (mm)	25	SS (mm)	150		
pH	9.84	pH	10.423		
pH ajustado	NA	pH ajustado	NA		
Potencial redox (mV)	-154.3	Potencial redox (mV)	-182.9		
Resistencia (Ω)	1.4	Resistencia (Ω)	1.9		
Potencia de pérdidas (W)	6.29216	Potencia de pérdidas (W)	7.90704		
Temperatura ($^{\circ}C$)	20.2	Temperatura ($^{\circ}C$)	17.2		

Ensayo 26					
Variable	pH 11	Voltaje		3	Tiempo 5
Entrada		Salida			Observaciones
Peso electrodo Al (g)	15.856	Peso electrodo Al (g)		15.869	
Peso electrodo Al (g)	15.438	Peso electrodo Al (g)		15.447	
Peso electrodo Fe (g)	20.506	Peso electrodo Fe (g)		20.363	
Peso electrodo Fe (g)	31.675	Peso electrodo Fe (g)		31.666	
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)		-0.022	
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)		0.152	
Consumo energía (W-h)	1.561	Consumo energía (W-h)		1.596	
Potencia suministrada por la fuente (W)	18.732	Potencia suministrada por la fuente (W)		19.152	
Conductividad($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$)	535.0837875	Conductividad($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$)		547.0811819	
Corriente en la fuente (A)	2.23	Corriente en la fuente (A)		2.28	
Voltaje en fuente (V)	8.4	Voltaje en fuente (V)		8.4	
Voltaje en electrodos (V)	3	Voltaje en electrodos (V)		3.11	
Voltaje en resistencias (V)	3	Voltaje en resistencias (V)		2.95	
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)		3492	
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)		1.5	
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)		2110	
SS (mm)	25	SS (mm)		70	
pH	9.84	pH		10.045	
pH ajustado	NA	pH ajustado		NA	
Potencial redox (mV)	-154.3	Potencial redox (mV)		-163.3	
Resistencia (Ω)	1.8	Resistencia (Ω)		1.8	
Potencia de pérdidas (W)	8.95122	Potencia de pérdidas (W)		9.35712	
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	20.2	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)		17.2	

Ensayo 27					
Variable	pH 11	Voltaje	3	Tiempo	12
Entrada		Salida		Observaciones	
Peso electrodo Al (g)	15.833	Peso electrodo Al (g)	15.867		
Peso electrodo Al (g)	15.421	Peso electrodo Al (g)	15.457		
Peso electrodo Fe (g)	20.302	Peso electrodo Fe (g)	19.982		
Peso electrodo Fe (g)	31.501	Peso electrodo Fe (g)	31.337		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	-0.07		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	0.484		
Consumo energía (W-h)	5.04	Consumo energía (W-h)	5.12		
Potencia suministrada por la fuente (W)	25.2	Potencia suministrada por la fuente (W)	25.6		
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	507.9216867	Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	515.9839357		
Corriente en la fuente (A)	2.52	Corriente en la fuente (A)	2.56		
Voltaje en fuente (V)	10	Voltaje en fuente (V)	10		
Voltaje en electrodos (V)	3.01	Voltaje en electrodos (V)	3		
Voltaje en resistencias (V)	3.76	Voltaje en resistencias (V)	3.81		
DQO (mg/L)	6655	DQO (mg/L)	2840		
Sulfuros (mg/L)	4.8	Sulfuros (mg/L)	5.3		
SST (mg/L)	2340	SST (mg/L)	2150		
SS (mm)	25	SS (mm)	300		
pH	9.541	pH	9.888		
pH ajustado	NA	pH ajustado	NA		
Potencial redox (mV)	-134.8	Potencial redox (mV)	-154.8		
Resistencia (Ω)	1.8	Resistencia (Ω)	1.8		
Potencia de pérdidas (W)	11.43072	Potencia de pérdidas (W)	11.79648		
Temperatura ($^{\circ}C$)	18.6	Temperatura ($^{\circ}C$)	17		

Ensayo 28					
Variable	pH 4	Voltaje	3	Tiempo	15
Conexión electrodos	Monopolar en paralelo MP-P				
Entrada	Salida			Observaciones	
Peso electrodo Al (g)	15.805	Peso electrodo Al (g)	15.807		
Peso electrodo Al (g)	15.374	Peso electrodo Al (g)	15.381		
Peso electrodo Fe (g)	19.908	Peso electrodo Fe (g)	19.468		
Peso electrodo Fe (g)	31.293	Peso electrodo Fe (g)	31.051		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	-0.009		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	0.682		
Consumo energía (W-h)	5.635	Consumo energía (W-h)	5.658		
Potencia suministrada por la fuente (W)	22.54	Potencia suministrada por la fuente (W)	22.632		
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	536.7529902	Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	538.9438188		
Corriente en la fuente (A)	2.45	Corriente en la fuente (A)	2.46		
Voltaje en fuente (V)	9.2	Voltaje en fuente (V)	9.2		
Voltaje en electrodos (V)	3.02	Voltaje en electrodos (V)	3.19		
Voltaje en resistencias (V)	3.81	Voltaje en resistencias (V)	3.73		
DQO (mg/L)	5022	DQO (mg/L)	1991		
Sulfuros (mg/L)	8.7	Sulfuros (mg/L)	5.3		
SST (mg/L)	3150	SST (mg/L)	1315		
SS (mm)	25	SS (mm)	60		
pH	8.46	pH	5.194		
pH ajustado	3.998	pH ajustado	NA		
Potencial redox (mV)	-186.3	Potencial redox (mV)	-117.1		
Resistencia (Ω)	1.8	Resistencia (Ω)	1.8		
Potencia de pérdidas (W)	10.8045	Potencia de pérdidas (W)	10.89288		
Temperatura ($^{\circ}C$)	18.8	Temperatura ($^{\circ}C$)	17.9		

Ensayo 29					
Variable	pH 4	Voltaje	3	Tiempo	15
Conexión electrodos	Monopolar en serie MP-S				
Entrada	Salida			Observaciones	
Peso electrodo Al (g)	15.769	Peso electrodo Al (g)	15.773		
Peso electrodo Al (g)	15.34	Peso electrodo Al (g)	15.339		
Peso electrodo Fe (g)	19.447	Peso electrodo Fe (g)	19.43		
Peso electrodo Fe (g)	31.01	Peso electrodo Fe (g)	30.942		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	-0.003		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	0.085		
Consumo energía (W-h)	0.192	Consumo energía (W-h)	0.2275		
Potencia suministrada por la fuente (W)	0.768	Potencia suministrada por la fuente (W)	0.91		
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	151.1671687	Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	149.7274814		
Corriente en la fuente (A)	0.24	Corriente en la fuente (A)	0.26		
Voltaje en fuente (V)	3.2	Voltaje en fuente (V)	3.5		
Voltaje en electrodos (V)	3.02	Voltaje en electrodos (V)	3.05		
Voltaje en resistencias (V)	0.37	Voltaje en resistencias (V)	0.9		
DQO (mg/L)	5022	DQO (mg/L)	2807		
Sulfuros (mg/L)	8.7	Sulfuros (mg/L)	1.7		
SST (mg/L)	3150	SST (mg/L)	618		
SS (mm)	25	SS (mm)	40		
pH	8.46	pH	4.046		
pH ajustado	4.024	pH ajustado	NA		
Potencial redox (mV)	-186.3	Potencial redox (mV)	-178.1		
Resistencia (Ω)	1.8	Resistencia (Ω)	1.8		
Potencia de pérdidas (W)	0.10368	Potencia de pérdidas (W)	0.12168		
Temperatura ($^{\circ}C$)	18.8	Temperatura ($^{\circ}C$)	18		

Ensayo 30					
Variable		pH 4	Voltaje 3		Tiempo 15
Conexión electrodos		Bipolar en serie BP-S			
Entrada		Salida		Observaciones	
Peso electrodo Al (g)	15.739	Peso electrodo Al (g)	15.753		
Peso electrodo Al (g)	15.302	Peso electrodo Al (g)	15.302		
Peso electrodo Fe (g)	19.392	Peso electrodo Fe (g)	19.388		
Peso electrodo Fe (g)	30.904	Peso electrodo Fe (g)	30.842		
Cambio peso Al (g)		Cambio peso Al (g)	-0.014		
Cambio peso Fe (g)		Cambio peso Fe (g)	0.066		
Consumo energía (W-h)	0.1785	Consumo energía (W-h)	0.175		
Potencia suministrada por la fuente (W)	0.714	Potencia suministrada por la fuente (W)	0.7		
Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	124.4906095	Conductividad($\Omega^{-1}m^{-1}$)	115.1749857		
Corriente en la fuente (A)	0.21	Corriente en la fuente (A)	0.2		
Voltaje en fuente (V)	3.4	Voltaje en fuente (V)	3.5		
Voltaje en electrodos (V)	3.07	Voltaje en electrodos (V)	3.03		
Voltaje en resistencias (V)	4.034	Voltaje en resistencias (V)	0.33		
DQO (mg/L)	5022	DQO (mg/L)	2842		
Sulfuros (mg/L)	8.7	Sulfuros (mg/L)	1.7		
SST (mg/L)	3150	SST (mg/L)	2085		
SS (mm)	25	SS (mm)	20		
pH	8.46	pH	4.032		
pH ajustado	3.963	pH ajustado	NA		
Potencial redox (mV)	-186.3	Potencial redox (mV)	-184.3		
Resistencia (Ω)	1.8	Resistencia (Ω)	1.7		
Potencia de pérdidas (W)	0.07938	Potencia de pérdidas (W)	0.068		
Temperatura ($^{\circ}C$)	18.8	Temperatura ($^{\circ}C$)	17.9		

ANEXO D. VÍDEOS ELECTROCOAGULACIÓN