

Validación del Tratamiento por Electrocoagulación

**Validación del Tratamiento por Electrocoagulación de Agua Residual en el Efluente de  
la Cervecería del Valle como Pre Tratamiento al Sistema de Reúso**

**Lumar Jesús Osorio Tristancho y**

**Luis Ángel Marín Miranda**

**Universidad Nacional Abierta y a Distancia**

**Notas de autor**

**Lumar Jesús Osorio Tristancho y Luis Ángel Marín Miranda, Escuela de Ciencias  
Básicas, Tecnología e Ingeniería, Programa de Química, Universidad Nacional Abierta y a  
Distancia**

**Este proyecto ha sido financiado por los autores**

**La correspondencia relacionada con este proyecto a Lumar Jesús Osorio Tristancho y**

**Luis Ángel Marín Miranda**

**Programa de química, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Av. Roosevelt 36 – 36,  
Santiago de Cali**

**Contacto: [lumarjesus24@hotmail.com](mailto:lumarjesus24@hotmail.com); [monimarin2@hotmail.com](mailto:monimarin2@hotmail.com)**

Dedico esta obra a Dios y mis padres Lumar Said Osorio Rincón y Nohemí Tristancho Figueroa, quienes son el motor de mi vida, también a mis hermanas Belky Johana, Marilinzabella, Sandra Liceth, por confiar en mí y darme aliento durante mis estudios superiores, también a mi esposa Lady Johanna por apoyo para lograr mis objetivos.

Lumar Jesús Osorio Tristancho

Dedico esta obra a Dios porque él me lo ha dado todo, a mi madre Marlene Miranda Reyes, a mi esposa Mónica Pérez, a mis hermanos, Gustavo, Arley, Mauricio, Jhon, Jacqueline y Jhoanna porque siempre hemos trabajado en equipo para mantener una familia unida y fortalece el amor que nos une, porque este logro es de todos y en especial para ustedes.

Luis Ángel Marín Miranda

## Agradecimientos

Mi principal agradecimiento es para Dios por regalarme la existencia y permitir concluir una etapa más de mi vida, agradezco sincero a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, en especial a cada uno de los tutores.

A la empresa Cervecería del Valle que permitió llevar a cabo este proyecto de grado por darnos las herramientas, equipos, locaciones y recursos para el desarrollo de este proyecto.

Lumar Jesús Osorio Trisancho

Agradezco a mi empresa que siempre me apoyo para concluir un objetivo más en mi vida, a cada uno de los tutores que nos brindaron su experiencia y conocimiento, y a cada una de las personas que de una u otra forma aportaron para que hoy se cumpla este sueño.

Luis Ángel Marín Miranda

## Índice

|   |    |
|---|----|
| Resumen.....  | 10 |
| Introducción .....  | 14 |
| Capítulo 1. Antecedentes y Contexto.....                                  | 16 |
| 1.1 Planteamiento del problema.....                                       | 16 |
| 1.1.1 Situación Problema .....  | 16 |
| 1.1.2 Formulación del problema .....                                      | 17 |
| 1.2 Justificación .....   | 17 |
| 1.3 Objetivos .....   | 18 |
| 1.3.1 Objetivo General .....  | 18 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos.....  | 19 |
| Capítulo 2. Revisión de la Literatura .....                               | 20 |
| 2.1 Marco contextual.....   | 20 |
| 2.1.1 Historia y evolución de la electrocoagulación .....                 | 21 |
| 2.2 Marco Teórico.....  | 22 |
| 2.2.1 Industria Cervecera Bavaria en Colombia .....                       | 25 |
| 2.2.2 Proceso cervecero .....   | 25 |
| 2.2.3 Legislación Ambiental – Permiso de Vertimientos .....               | 27 |
| 2.2.4 Política de medio ambiente de ABInBev en Cervecería del Valle ..... | 28 |
| 2.2.5 Caracterización del agua residual .....                             | 30 |
| 2.2.5.1 Características físicas .....                                     | 30 |
| 2.2.5.1 Características químicas.....                                     | 33 |

|   |    |
|---|----|
| Capítulo 3. Metodología de la Investigación .....   | 38 |
| 3.1 Tipo de Investigación.....  | 38 |
| 3.2 Ruta Metodológica.....  | 38 |
| 3.2.1 Toma de muestras .....  | 38 |
| 3.2.2 Análisis fisicoquímicos del agua .....  | 39 |
| 3.2.2.1 Demanda química de oxígeno (DQO) .....  | 39 |
| 3.2.2.2 Potencial de hidrógeno (pH).....  | 41 |
| 3.2.2.3 Turbidez (NTU) .....  | 42 |
| 3.2.2.4 Sólidos suspendidos totales (SST) .....   | 43 |
| 3.2.2.5 Color.....  | 44 |
| 3.2.3 Construcción del prototipo de la celda de electrocoagulación.....   | 45 |
| 3.2.4 Metodología de ensayos.....   | 48 |
| Capítulo 4. Resultados y Discusión .....  | 54 |
| 4.1 Ensayo 1. Proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio y hierro con un amperio (1A).....            | 54 |
| 4.2.1 Ensayo 2. Proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio y hierro con treinta amperios (30A). ..... | 55 |
| 4.3 Ensayo 3. Proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio y Zinc.....                                  | 57 |
| 4.4 Ensayo 4. Proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio y Zinc más coagulante $Al_2(SO_4)_3$ .....   | 58 |
| 4.5 Ensayo 5. Proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio - aluminio. ....                             | 59 |
| 5. Conclusiones .....   | 54 |
| Referecias bibliográficas   |    |

## Lista de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Ubicación Cervecería del Valle.....                | 20 |
| Figura 2. Reactores tipo Bach.....                           | 24 |
| Figura 3. Industria cervecera Bavaria en Colombia.....       | 25 |
| Figura 4. Proceso cervecero.....                             | 27 |
| Figura 5. Sólidos suspendidos totales.....                   | 31 |
| Figura 6. Olor.....  | 32 |
| Figura 7. Color.....   | 32 |
| Figura 8. Temperatura.....                                   | 32 |
| Figura 9. Turbiedad.....                                     | 33 |
| Figura 10. Materia Orgánica.....                             | 33 |
| Figura 11. Grasas y aceites.....                             | 34 |
| Figura 12. DBO. Fuente.....                                  | 34 |
| Figura 13. DQO.....  | 34 |
| Figura 14. Oxígeno disuelto.....                             | 35 |
| Figura 15. Detergentes.....                                  | 35 |
| Figura 16. Alcalinidad.....                                  | 36 |
| Figura 17. Cloruros.....                                     | 36 |
| Figura 18. Metales pesados.....                              | 36 |
| Figura 19. Sulfuros.....                                     | 37 |
| Figura 20. Toma de muestra.....                              | 39 |
| Figura 21. Prototipo creado para los diferentes ensayos..... | 48 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 22. Evidencia fotográfica ensayo 1.....                   | 55  |
| Figura 23. Evidencia fotográfica ensayo 2.....                   | 56  |
| Figura 24. Evidencia fotográfica ensayo 3.....                   | 58  |
| Figura 25. Evidencia fotográfica ensayo 4.....                   | 59  |
| Figura 26. Evidencia fotográfica ensayo 5.....                   | 60  |
| Figura 27. Resultado final antes y después ensayo 5.....         | 60  |
| Figura 28. Porcentaje de remoción sustancias contaminantes ..... | 661 |
| Figura 29. Caída de voltajes de vs prototipos.....               | 662 |

## Lista de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos legales obligatorios para vertimientos..... | 28 |
| Tabla 2. Equipos requeridos para análisis de DQO.....                          | 40 |
| Tabla 3. Equipos requeridos para análisis de pH.....                           | 41 |
| Tabla 4. Equipos requeridos para análisis de Turbidez .....                    | 42 |
| Tabla 5. Equipos requeridos para análisis de SST .....                         | 43 |
| Tabla 6. Equipos requeridos para análisis de Color.....                        | 45 |
| Tabla 7. Tipos de arena para filtro. ....                                      | 47 |
| Tabla 8. Resultados ensayo 1.....  | 54 |
| Tabla 9. Resultados ensayo 2.....  | 55 |
| Tabla 10. Resultados ensayo 3.....   | 57 |
| Tabla 11. Resultados ensayo 4.....   | 58 |
| Tabla 12. Resultados ensayo 5.....   | 59 |
| Tabla 13. Porcentajes de remoción de ensayos.....                              | 61 |



## Siglas

|       |  |
|-------|--|
| pH:   | Potencial de hidrógeno                 |
| DBO:  | Demanda biológica de oxígeno           |
| DQO:  | Demanda química de oxígeno             |
| SST:  | Sólidos suspendidos totales            |
| NTU:  | Unidades nefelométricas de turbidez    |
| μS:   | micro Siemens                          |
| VCC:  | Voltaje de corriente continua          |
| VCA:  | Voltaje de corriente alterna           |
| UF:   | Ultrafiltración                        |
| OR:   | Osmosis inversa                        |
| PTAR: | Planta de tratamiento de agua residual |
| OD:   | Oxígeno disuelto                       |
| EC:   | Electrocoagulación                     |

## Resumen

Cervecería del Valle es una empresa que capta agua del río Cauca para elaborar sus productos, generando aguas residuales y un alto consumo de recursos hídricos, lo que lleva a la conciencia del impacto ambiental. Por ello, en la presente propuesta de trabajo aplicado se realizó un proceso de electrocoagulación para mejorar la calidad del agua y poder reutilizar este recurso hídrico, reduciendo la captación del río y aportando un impacto positivo al medio ambiente.

Se realizó la validación del proceso de electrocoagulación, para la mejora de parámetros fisicoquímicos como lo son la demanda química de oxígeno, pH, color, turbidez y sólidos suspendidos totales, análisis de parámetros operacionales utilizados específicamente en tratamientos de aguas residuales.

Se implementó la técnica en un reactor piloto de 18 litros, después de cinco ensayos se validó el montaje ideal de acuerdo con el mejor resultado fisicoquímico obtenido, el cual fue con electrodos de Aluminio – Aluminio, que se alimentó con corriente eléctrica de 30 voltios y 30 amperios en un período de tiempo de 60 minutos.

Se demostró mediante el diseño de validación experimental que la técnica es eficiente en la formación de hidróxidos complejos con propiedad de adsorción produciendo una floculación con los contaminantes drenados que contiene el agua residual proveniente del proceso cervecero, como materia orgánica, aceites, grasas, detergentes y algunos químicos como el fósforo y nitrato, permitiendo una mejora en la demanda química de oxígeno de 102mg/L a 61mg/L disminuyendo el 40.19%, color de 141.7 a 96.5 mejorando en un 31,82%, turbiedad de 16NTU a 11.3NTU mejorando en 29,37%, sólidos suspendidos totales de 25mg/L a 7mg/L eliminando el 72%.

**Palabras claves:** Agua residual, demanda química de oxígeno, electrocoagulación, industria cervecera, materia orgánica, sólidos suspendidos totales.

## Abstract

Cervecería del Valle is a company that captures water from the Cauca River to make its products, generating waste water and a high consumption of water resources, which leads to awareness of the environmental impact. Therefore, in the present applied work proposal, an electrocoagulation process was carried out to improve water quality and be able to reuse this water resource, reducing the catchment of the river and contributing a positive impact to the environment.

The validation of the electrocoagulation process was carried out, to improve physicochemical parameters such as the chemical demand for oxygen, pH, color, turbidity and total suspended solids, analysis of operational parameters used specifically in wastewater treatments.

The technique was implemented in an 18-liter pilot reactor, after five tests the ideal assembly was validated according to the best physicochemical result obtained, which was with Aluminum-Aluminum electrodes, which was supplied with a 30-volt electrical current and 30 amps in a 60-minute time period.

It was demonstrated through the experimental validation design that the technique is efficient in the formation of complex hydroxides with adsorption property, producing a flocculation with the drained contaminants contained in the residual water from the brewing process, such as organic matter, oils, fats, detergents and some chemicals such as phosphorus and nitrate, allowing an improvement in the chemical oxygen demand from 102mg / L to 61mg / L decreasing 40.19%, color from 141.7 to 96.5 improving by 31.82%, turbidity from 16NTU to 11.3NTU improving in 29.37%, total suspended solids from 25mg / L to 7mg / L eliminating 72%.

**Keywords:** Waste water, chemical oxygen demand, electrocoagulation, beer industry, organic matter, total suspended solids.

## Introducción

El agua es un recurso de importancia en nuestro planeta debido a que es un recurso no renovable y su consumo debe ser consciente y responsable, puesto que sin agua no hay vida (Alzate, 2015). Con el tiempo, este recurso se ha agotado debido a su contaminación y elevada demanda.

Como afirma los Educadores por la sostenibilidad (2016), la escasez de agua es un problema en aumento a nivel mundial, por ello, se buscan alternativas para el reusó de las aguas utilizadas en cualquier proceso productivo, o realizar tratamientos más efectivos que garanticen su optimización. Por esta responsabilidad ambiental, se propone la búsqueda de mejorar las condiciones fisicoquímicas del agua residual proveniente del efluente de la Cervecería del Valle, e implementar un sistema de pre tratamiento al agua que será reutilizada en planta, por ejemplo para el caso de la Cervecería del Valle, la cual cuenta con un sistema de tratamiento de Ultrafiltración y Osmosis Inversa, cuyo principal objetivo es implementar un proceso de electrocoagulación como pre tratamiento para mejorar la calidad del agua que será tratada en su siguiente proceso.

Según Morante (2002) “La electrocoagulación es un proceso que aplica los principios de la coagulación–floculación en un reactor electrolítico. Este es un recipiente dotado de una fuente de corriente y varios electrodos encargados de aportar los iones desestabilizadores de partículas coloidales que reemplazan las funciones de los compuestos químicos que se utilizan en el tratamiento convencional” (p. 484)

La investigación que se presenta, corresponde a los resultados obtenidos de la experimentación en un reactor piloto de 18 litros; donde se evaluó el comportamiento e

influencia en el proceso de las variables: Tipo de electrodo, distancia entre ellos, voltaje y corriente, tiempo, temperatura de celda, porcentajes de remoción de contaminantes de acuerdo con los análisis de la demanda química de oxígeno, pH, color, turbidez y sólidos suspendidos totales.

## Capítulo 1. Antecedentes y contexto

### 1.1 Planteamiento del problema

#### 1.1.1 Situación Problema.

Nuestro planeta está sufriendo cambios devastadores a causa del impacto negativo al medio ambiente, cuya causa principal se debe al desarrollo tecnológico y social que cada vez es más acelerado llevando consigo un aumento en el consumo de nuestros recursos naturales y la contaminación de los recursos no renovables. Desde hace pocos años se ha empezado a tener conciencia y aun es mucho el camino a recorrer para tomar las medidas necesarias que minimicen la contaminación desenfrenada del medio ambiente.

Entre las problemáticas más importantes en la contaminación medioambiental actual podemos encontrar la captación indiscriminada de agua para usos agrícolas e industriales, además de la contaminación generada por el vertimiento a cuerpos de agua de efluentes industriales, urbanos y agro, y ganaderas los cuales son responsables de una gran carga de diferentes tipos de contaminante que con llevan a la desestabilización de los ecosistemas.

Como describe Canales, et al. (2005) el agua es el principal recurso para la elaboración de las cervezas y maltas al componer el 95% del producto, al momento de la elaboración de cerveza hay procesos secundarios como lavado de áreas, maquinaria y equipos que generan agua residual.



De acuerdo a cada uno de los procesos en la Cervecería del Valle se genera un agua residual que está compuesta por agentes contaminantes como residuos alcalinos, ácidos, grasas, aceites, carga orgánica y sólidos que deben ser removidos para poder verter el residuo líquido al río Cauca o ser tratados para posterior reúso.

### **1.1.2 Formulación del problema**

¿Qué impactos fisicoquímicos tendrá el proceso de electrocoagulación al aplicarse en el efluente residual de la “Cervecería del valle” como pre tratamiento al sistema de reúso?

## **1.2 Justificación**

A nivel industrial las compañías buscan procesos que sean eficientes, ágiles, que generen bajos costos y que sean amigables con el medio ambiente. Considerando este aspecto, con el desarrollo de este trabajo de grado se busca validar el proceso de electrocoagulación en el efluente de la planta de tratamiento de agua residual, como pre tratamiento al sistema de reúso de agua con lo cual se podrá entregar un agua de mejor calidad; además se minimizarán costos en limpieza y mantenimiento de equipos.

El uso de la tecnología ha facilitado los procesos ambientales, es por ello que la electrocoagulación puede ser una alternativa para el mejoramiento de los parámetros del agua de reúso en la cervecería del Valle. Como afirma Magaña et. al. (2019) el método de electrocoagulación fue eficiente en la remoción del color, la materia orgánica, la demanda química de oxígeno, la turbidez en el agua residual de la industria láctea.

Cervecería del valle es una industria que consume del recurso hídrico captado del río Cauca en un promedio de 95.000m<sup>3</sup>/mes, el costo de tratamiento de potabilización de cada metro cúbico (m<sup>3</sup>) tiene un costo aproximado de \$275COP. La propuesta busca impactar a este consumo positivamente en un 7.5% lo cual serían al año 86.400m<sup>3</sup> que en costos sería un ahorro de \$23.760.000, ya que se potencializa el sistema de agua de reúso al tener un pre tratamiento con el proceso de electrocoagulación, información validada con datos reales tomada en proceso.

Al realizar este pre tratamiento se extiende la vida útil de los equipos posteriores de sistema de reúso ultrafiltración (UF) y Osmosis Inversa (OR), su mantenimiento y la cantidad de químicos usados en aseos para cumplir con estándares de calidad.

En términos generales el trabajo a realizar permitirá un proceso ágil, económico y que genera gran beneficio a los analistas, al medio ambiente y a la empresa donde se genera ganancias.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Validar el proceso de electrocoagulación como pre tratamiento en el efluente de Cervecería del valle, que permita un mejoramiento en la calidad del agua y reúso en otros procesos.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Analizar los resultados fisicoquímicos del agua residual como la demanda química de oxígeno, turbidez, sólidos suspendidos totales, color y pH, antes y después del tratamiento por electrocoagulación.
- Establecer las condiciones experimentales para llevar a cabo el proceso de electrocoagulación.
- Diseñar un prototipo de celda para llevar a cabo el proceso de electrocoagulación.

## Capítulo 2. Revisión de la literatura

### 2.1 Marco contextual

El desarrollo de este trabajo se realizó en la empresa Cervecería del Valle que se encuentra ubicada en la zona sur del municipio de Yumbo – Valle del Cauca – Colombia.



*Figura 1.* Ubicación Cervecería del Valle. Fuente: Googlemaps.

Se trabajó en la planta de tratamiento de agua residual de esta empresa, en su proceso final donde se encuentra su efluente.

### **2.1.1 Historia y evolución 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 destacar su uso en el encendido de los motores de los automóviles, en procesos de síntesis química y métodos para la eliminación de la contaminación.

Esta ciencia 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. Desde el siglo XIX, exactamente en 1888, se efectuó el primer ensayo reportado en Londres por Webster. Su proceso utilizaba ánodos de hierro soluble, con una caída de potencial de 1.8 vatios entre los electrodos, distantes una pulgada, y una corriente anódica de 0.6 Amp/pe.

En 1893, Wolff electrolizó una solución concentrada de sal para producir cloro y soda cáustica, que utilizaba para esterilizar aguas negras en Brewster, NY. En 1896 se usó en Louisville, Kentucky, una modificación del proceso de Webster 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.

Durante las dos últimas décadas se han reportado trabajos en donde se utiliza el proceso para remover partículas dispersas de aceite, grasa y petróleo en el tratamiento de aguas residuales provenientes de procesos de electro plateado, textiles y en procesos de potabilización del agua misma, entre otros (Restrepo et al., 2006)

## **2.2 Marco Teórico**

“La electrocoagulación es un método alternativo para la depuración de aguas residuales. Consiste en un proceso de desestabilización de los contaminantes del agua que ya están en suspensión, emulsionados o disueltos, mediante la acción de corriente eléctrica directa con un determinado voltaje y por la acción de electrodos metálicos, normalmente aluminio/hierro. Se trata de un equipo compacto que opera en continuo, mediante una celda de especial diseño donde se hallan los electrodos metálicos para producir la electrocoagulación. En este proceso se genera una elevada carga de cationes que desestabilizan los contaminantes del agua residual, se forman hidróxidos complejos, estos tienen capacidad de adsorción produciendo

agregados (flóculos) con los contaminantes. De otro lado, por la acción del gas formado se genera turbulencia y se empuja hacia la superficie los flóculos producidos (Ortiz, 2018).

Reacciones en el proceso electroquímico. Como describen Suárez, Jácome y Ures (2015) la conductividad de una disolución electrolítica consiste en un transporte de carga eléctrica por los iones existentes en la disolución, que equivale al transporte de electrones desde el electrodo negativo hasta el positivo. Por consiguiente, el número de electrones tomados por el catión en el electrodo negativo, ha de ser igual al de los electrones depositados simultáneamente por el anión en el electrodo positivo.

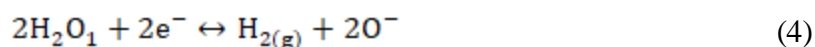
Es decir, en el electrodo donde los aniones depositan los electrones se denomina ánodo (+), aquí se produce una reacción química de oxidación o sea ganancia de electrones como se aprecia en las ecuaciones (1) y (2).

Al electrodo donde los cationes captan los electrones se denomina cátodo (-), se produce una reacción química de reducción o sea una pérdida de electrones, Ec. (3) y (4).

En el ánodo:

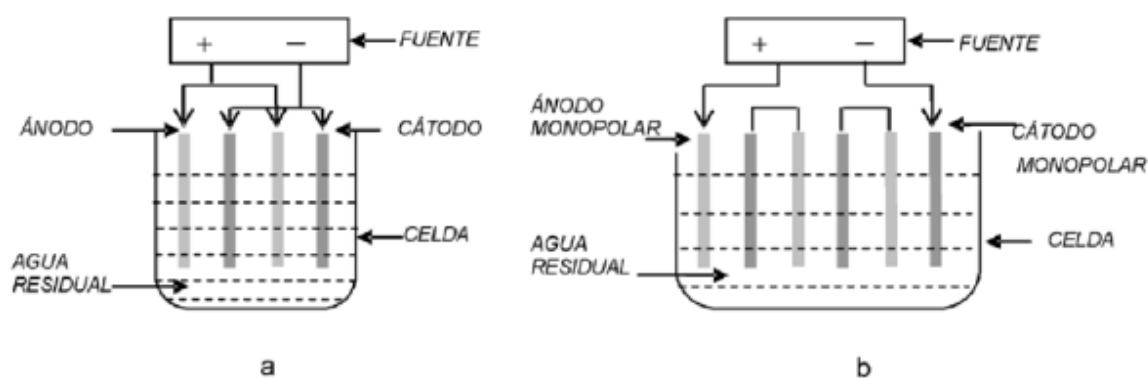


En el cátodo:



En un proceso electroquímico se producen simultáneamente 6 reacciones básicas entre dos electrodos y la solución electrolítica.

- Electroforesis: Los iones con carga positiva se mueven del ánodo al cátodo; mientras que los iones con carga negativa se mueven desde el cátodo al ánodo (Castanigno, 2000).
- Oxidación: Se proporcionan electrones al ánodo para oxidar las impurezas presentes en la solución (Medina, 2017).
- Reducción: Se captan electrones por el cátodo para reducir las impurezas (el negativo reduce) (Medina, 2017).
- Electrolisis: El agua se descompone por la acción de la corriente eléctrica. (Medina, 2017)
- Ataque electroquímico: El ataque electroquímico, sucede gracias a los electrones libres del metal dispuesto como electrodo, generando así los cationes por oxidación en el medio (Castaños, 2016).
- Polarización: Las moléculas y las impurezas del agua se polarizan en respuesta a la aplicación del campo eléctrico, de forma que los iones con carga negativa se acumulan en el ánodo y los de carga positiva en el cátodo (Benítez, 2015).



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

Figura 2. Reactores tipo Bach. Fuente: Ortiz, 2018.



## 2.2.1 Industria Cervecera Bavaria en Colombia.

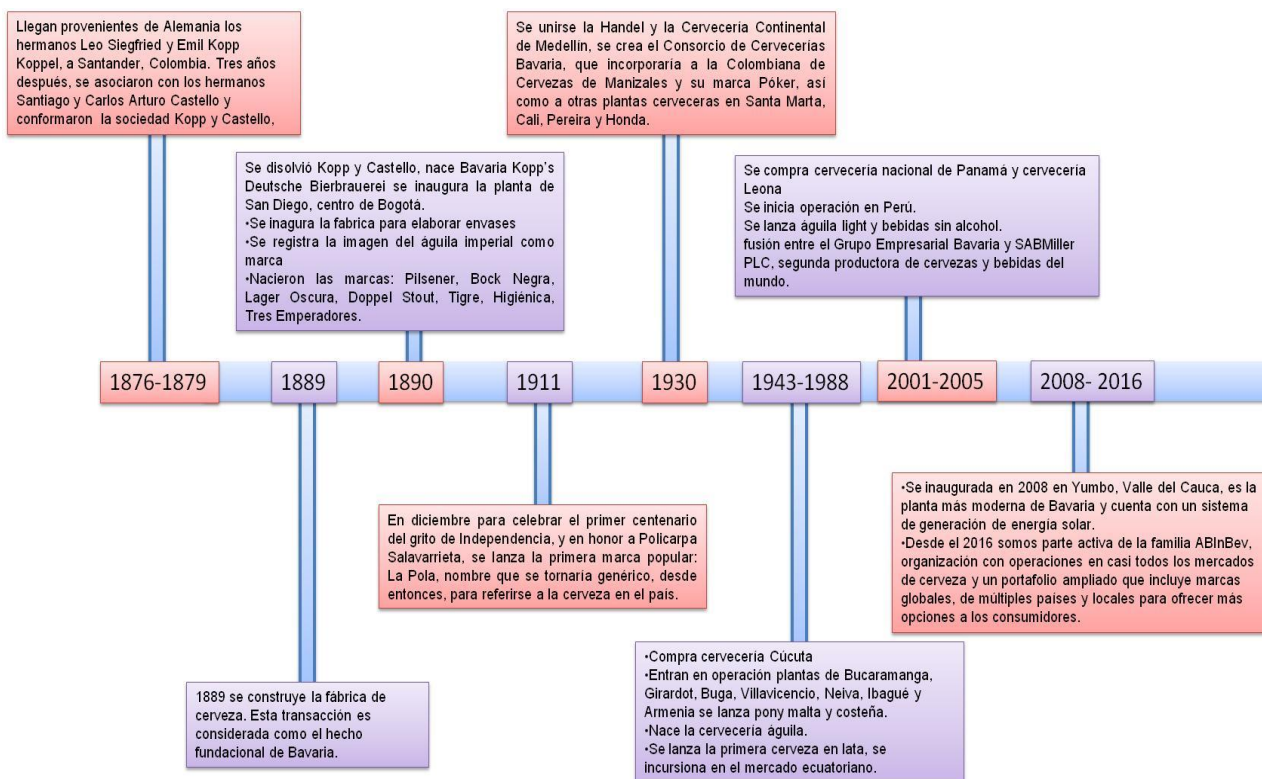


Figura 3. Industria cervecera Bavaria en Colombia. Fuente: Elaboración propia

## 2.2.2 Proceso cervecero.

La elaboración de Cerveza se lleva a cabo básicamente en las siguientes fases:

**- Elaboración del mosto.** En la sala de cocimiento se definen las características principales que determinan la identidad de cada marca, según las materias primas seleccionadas y el proceso aplicado. El proceso se inicia con la molienda de la malta de cebada, etapa necesaria para liberar el almidón del interior del grano. El almidón aportado por la malta es

transformado en azúcar fermentable gracias a varios cambios de temperatura. Posteriormente, el mosto dulce que contiene azúcar fermentable, proteínas, aminoácidos, vitaminas y minerales es separado de la cascara (de malta). El mosto es hervido, y durante este proceso el lúpulo se añade para darle el amargo y el aroma.

**- Fermentación y maduración.** Cuando el mosto se fermenta, la levadura transforma los azúcares del mosto en alcohol y gas carbónico, contribuyendo al aroma y sabor de la cerveza. Al final de este proceso se obtiene la “cerveza verde”, llamada así porque aún no ha alcanzado su punto ideal de maduración para su consumo; para lograrlo, se requiere mantener la cerveza en tanques con temperaturas bajo cero grados. Por efecto del tiempo y del frío, el sabor y el aroma se refinan y se obtiene un producto más estable.

**- Filtración.** Finalmente, es necesario estabilizar y otorgar esa apariencia limpia y clara a la cerveza. A través del proceso de filtración, se separan las levaduras y otros sólidos. Durante este proceso, se ajustan las cantidades de gas carbónico (CO<sub>2</sub>). Luego de este procedimiento aparece por fin la cerveza brillante que todos conocemos.

**- Envasado.** La cerveza se envasa en botellas de vidrio, latas de aluminio y barriles de acero inoxidable. Por ser un producto natural, a la cerveza no se le adicionan preservantes y para garantizar su estabilidad microbiológica se pasteuriza. Finalmente, todos los envases se rotulan según la marca (Bavaria, 2020).

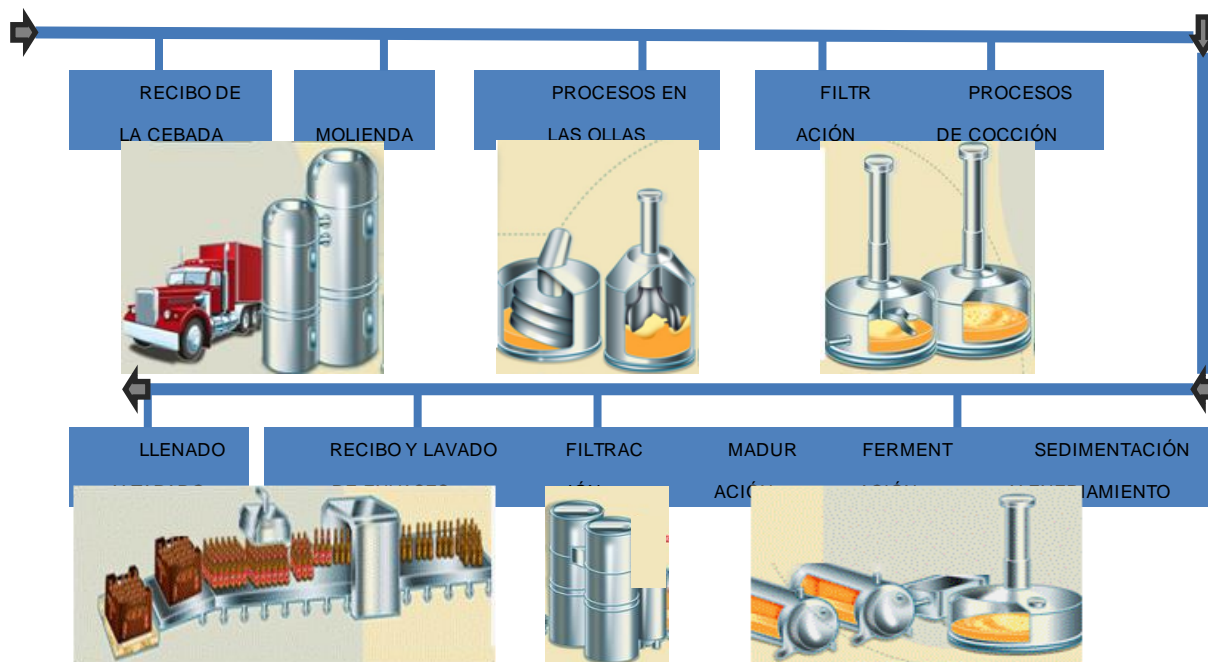


Figura 1. Proceso cervecero. Fuente: Bavaria (2020).

### 2.2.3 Legislación Ambiental – Permiso de Vertimientos

- **Resolución 631 de 2015.** Que de acuerdo con el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010, modificado por el artículo 1 del Decreto 4728 de 2010, corresponde al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, fijar los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir los vertimientos puntuales a las aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

**Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas - ARnD a cuerpos de aguas superficiales.**

Sector: Actividades de elaboración de productos alimenticios y bebidas.

Artículo 12. Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas - ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con elaboración de productos alimenticios y bebidas” (Ministerio de ambiente y desarrollo, 2015).

Tabla 1.

*Parámetros fisicoquímicos legales obligatorios para vertimientos*

| <b>Parámetro</b>  | <b>Unidades</b>     | <b>Elaboración de maltas y cervezas</b> |
|---|---------------------|---|
| pH  | Unidades de pH      | 6,00 a 9,00                             |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO)  | mg/L O <sub>2</sub> | 200                                     |
| Sólidos Suspendidos Totales (SST)   | mg/L                | 50                                      |
| Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436nm, 525nm V 620nm) | Análisis y reporte  |   |
| Turbidez (NTU)  | Análisis y reporte  |   |

Fuente: elaboración propia

#### **2.2.4 Política de medio ambiente de ABInBev en Cervecería del Valle**

Para cumplir nuestro sueño estamos trabajando con mucho empeño para lograr los más altos estándares de medio ambiente para toda la organización. Con el pleno compromiso y la activa participación de todos los líderes y empleados de la compañía alrededor del mundo, Anheuser-Busch InBev se compromete a:

- Cumplir todas las leyes y regulaciones ambientales, estándares y otros requerimientos a los cuales la compañía suscribe. En aquellas zonas en que las regulaciones ambientales sean limitadas, aplicaremos nuestros propios estándares más exigentes.
  
- Producir nuestros productos de la forma más responsable para el medio ambiente, manteniendo al mismo tiempo nuestro compromiso con la calidad, a través del uso eficiente de los recursos naturales a lo largo de toda la cadena de abastecimiento y fijando objetivos de mejora para incrementar nuestro desempeño ambiental.
  
- Incorporar objetivos ambientales en las evaluaciones de desempeños en todas nuestras operaciones, desde posiciones de gerenciamiento hasta todos los niveles de la organización.
  
- Fomentar la participación de los empleados y la responsabilidad individual frente a acciones ambientales.
  
- Integrar aspectos ambientales en nuestro plan de negocios, en la toma de decisiones y en nuestras actividades diarias.
  
- Mantener equipos de trabajos calificados y entrenados que garanticen operaciones confiables, seguras y eficientes, promoviendo nuestra mejora continua de nuestro desempeño ambiental.

- Promover la conciencia ambiental e incrementar el conocimiento de nuestros programas ambientales, involucrando en nuestros esfuerzos a todas las partes interesadas – incluyendo empleados de AB Inbev, clientes, proveedores, organizaciones comunitarias, funcionarios gubernamentales, organismos reguladores y otros grupos clave.
- Evaluar, comparar y comunicar continuamente nuestro desempeño ambiental.

Todos los empleados y contratistas que trabajan en representación de AB InBev tienen la responsabilidad de trabajar conforme con esta política. Ninguna de las metas de producción u objetivos financieros será excusa alguna para el incumplimiento de esta política.” (Bavaria, 2020).

### **2.2.5 Caracterización del agua residual.**

El agua residual se caracteriza por tener propiedades microbiológicas químicas y físicas.

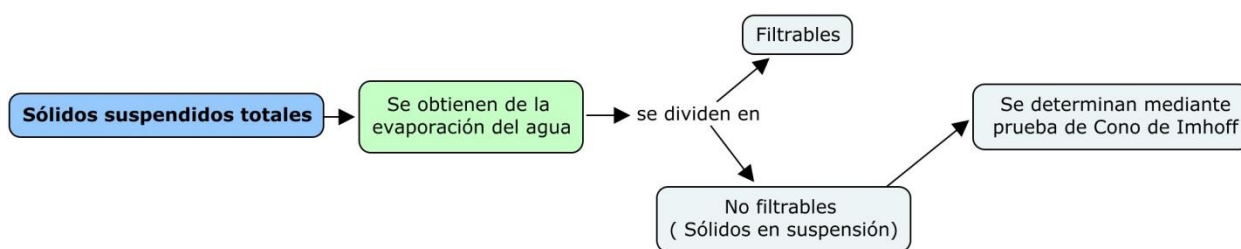
#### **2.2.5.1 Características físicas.**

Algunas de las características físicas del agua residual son:

- **Sólidos suspendidos totales.** Se entiende como la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación de entre 103 y 105 °C. Los sólidos totales pueden dividirse en filtrables y no filtrables (sólidos en suspensión). Estas categorías

pueden ser, divididas de acuerdo a su volatilidad en un rango de 550 hasta  $\pm 50$  °C. A esta temperatura la materia orgánica se oxida transformándose en gases (sólidos volátiles), quedando solo la materia inorgánica en forma de ceniza (sólidos fijos) (Da Cámara, Hernández y Paz, 2014).

- **Sólidos sedimentables.** “Estos se determinan con la prueba del Cono de Imhoff el cual utiliza un dispositivo cónico de un litro de capacidad con escala graduada en ml, el cual se llena con la muestra de agua, posterior a ello se dejará en reposo por un periodo de 60 minutos, los lodos sedimentados durante este tiempo se expresan en ml/L, con este dato se estimará el porcentaje de lodos en el agua residual (Da Cámara et al., 2014.).



*Figura 2.* Sólidos suspendidos totales. Fuente: Elaboración propia.

- **El olor.** El proceso de descomposición de la materia orgánica presente en el agua genera diferentes gases, los cuales son los responsables de los olores en las aguas residuales (Da Cámara et al., 2014)

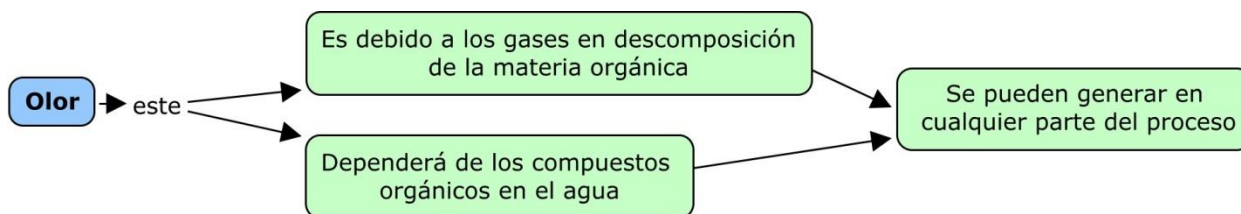


Figura 3. Olor. Fuente: Elaboración propia

- **El color.** El color es un parámetro utilizado para determinar la edad del agua residual, la cual se determina cualitativamente en función de su color y olor. Las aguas residuales tendrán un color y olor desagradable (Gutiérrez y Rivadeneira, 2017).



Figura 4. Color. Fuente: Elaboración propia

- **La temperatura.** Las reacciones químicas y la solubilidad del oxígeno en el agua son dependientes de la temperatura del agua, es por ello que este parámetro es de gran importancia en los tratamientos de agua residual (Gutiérrez y Rivadeneira, 2017).

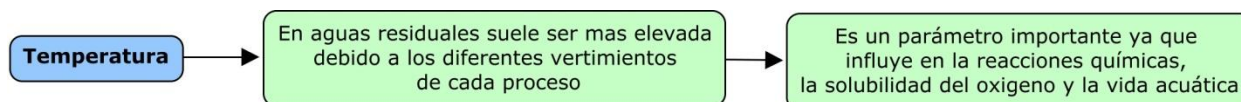


Figura 5. Temperatura. Fuente: Elaboración propia

- **La turbiedad.** La relación entre la materia residual y coloidal en suspensión ayuda a la determinación de la calidad de las aguas residuales o naturales (Gutiérrez y Rivadeneira, 2017).



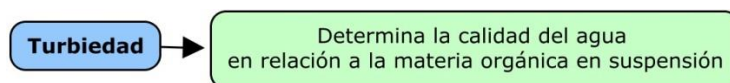


Figura 6. Turbiedad. Fuente: Elaboración propia

### 2.2.5.2 Características químicas.

Algunas de las características químicas del agua residual son:

- **Materia orgánica.** La materia orgánica en aguas residuales se compone principalmente de los sólidos filtrables y los sólidos en suspensión, en porcentajes aproximados de 40% y 75% respectivamente, los cuales provienen de 40-60% de proteínas, 8-12% de grasas y aceites, 25-50% carbohidratos y en pocos casos pueden tener cargas de azufre, hierro y fosforo (Torres, s.f.).

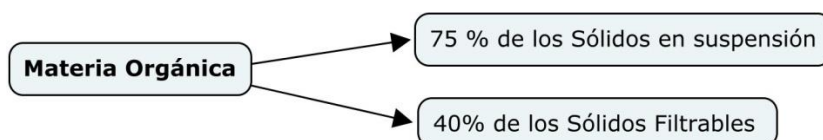


Figura 7. Materia Orgánica. Fuente: Elaboración propia

- **Grasas y aceites.** Son grasas y aceites de origen vegetal y animal para el consumo humano, por lo cual provienen principalmente de áreas como la cocina o servicios sanitarios, se pueden encontrar emulsificadas, el vertimiento a los cuerpos de agua de estas puede afectar la vida acuática (Gutiérrez y Rivadeneira, 2017).

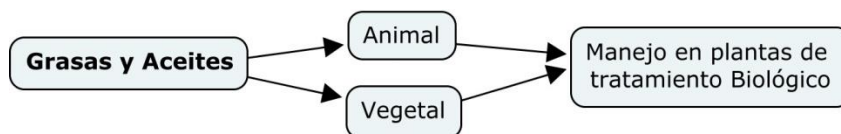


Figura 8. Grasas y aceites. Fuente: Elaboración propia

- **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).** Se utiliza para determinar las condiciones de las aguas residuales, este parámetro determina el oxígeno que requieren los microorganismos para degradar la materia orgánica, de igual manera permite analizar la eficiencia de los procesos en el tratamiento de las aguas residuales (IDEAM, 2007).

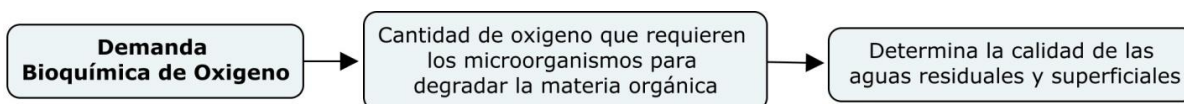


Figura 9. DBO. Fuente: Elaboración propia

- **Demanda química de oxígeno (DQO).** “La demanda química de oxígeno hace referencia a la cantidad de oxígeno que se necesita para la oxidación de la materia orgánica presente en un cuerpo de agua mediante un proceso químico, este parámetro es complemento a la DBO. Una de sus principales ventajas es que se puede medir este parámetro en poco tiempo.” (Gutiérrez, Rivadeneira, 2017, p. 23).

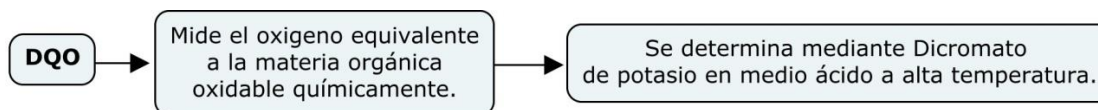


Figura 10. DQO. Fuente: Elaboración propia

- **Oxígeno disuelto.** Es esencial para muchos organismos vivos, el oxígeno proviene de la atmosfera y de algunos procesos de fotosíntesis. El oxígeno es un gas abundante en la atmosfera con un 21% aproximadamente del total del aire, este porcentaje de oxígeno se disuelve en el agua en promedio 7 mg/L, esta solubilidad dependerá también de la temperatura ambiente, ya que a mayor temperatura se tendrá menor solubilidad (IDEAM, 2004).



Figura 11. Oxígeno disuelto. Fuente: Elaboración propia.

- **Detergentes.** Son agentes tenso activos, constituidos principalmente por polifosfatos, carbonatos, fosfatos y derivados del petróleo. La importancia de estos en el tratamiento de las aguas reside en que son muy solubles en el agua y los microorganismos no pueden descomponerlos, favorecen la formación de espumas gracias a la disminución de la tensión superficial del agua, lo cual no favorece la solubilidad del oxígeno inhibiendo los procesos biológicos como los reactores aerobios y anaerobios (Gutiérrez y Rivadeneira, 2017).

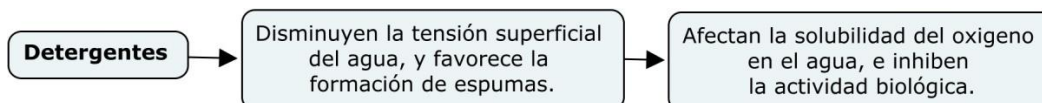


Figura 12. Detergentes. Fuente: Elaboración propia

- **Alcalinidad.** Se entiende como la capacidad del agua para neutralizar ácidos. Los agentes con mayor incidencia en la alcalinidad son los hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos. La alcalinidad

en el agua tiene incidencia en la corrosión de tuberías y equipos de las plantas de tratamiento, además de afectar directamente los procesos biológicos (IDEAM, 2005).

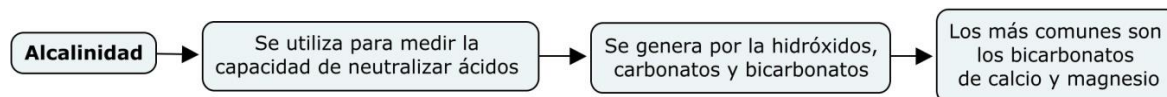


Figura 13. Alcalinidad. Fuente: Elaboración propia

- **Cloruros.** Son comunes en aguas residuales, concentraciones altas impiden el crecimiento de la vida vegetal, también es una de las principales causas de la corrosión de tuberías y equipos en las plantas de tratamientos (Secretaría de Economía Mexicana, 2001).

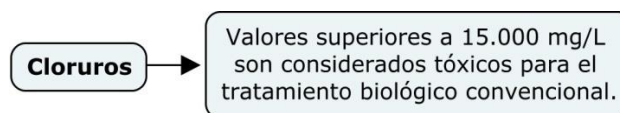


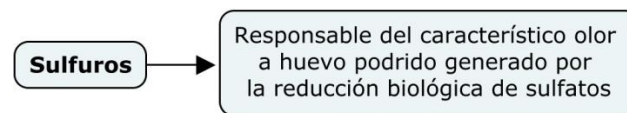
Figura 14. Cloruros. Fuente: Elaboración propia

- **Metales pesados.** Son siempre relacionados con la contaminación del agua, en las aguas residuales la actividad industrial es responsable de la incorporación de metales pesados, como el cromo, cobre, plomo, mercurio entre otros, por lo cual se debe realizar análisis de estos compuestos antes de disponer de las aguas de reusó (Gutiérrez y Rivadeneira, 2017).



Figura 15. Metales pesados. Fuente: Elaboración propia

- **Sulfuros.** Estos generan malos olores en las aguas residuales además de contribuir a la corrosión de equipos metálicos. Como tratamiento para el control de sulfuros en las aguas residuales se realiza tratamiento con bacterias sulfatos reductores. Con esto se logra eliminación de metales pesados por formación de sulfuros los cuales se precipitan, por otra parte, el tratamiento con bacterias ayuda a la disminución de olores (Gutiérrez y Rivadeneira, 2017).



*Figura 16.* Sulfuros. Fuente: Elaboración propia

## **Capítulo 3. Metodología de la investigación**

### **3.1 Tipo de Investigación.**

Investigación cuantitativa, experimental.

### **3.2 Ruta Metodológica.**

#### **3.2.1 Toma de muestras.**

Las muestras de agua que se utilizaron para este estudio se tomaron en el efluente de agua residual (canaleta Parshall) de la Cervecería del Valle, para esto se usó el método manual, un toma muestra de aluminio de 2 metros de largo, y para almacenarla y transportarla se usó una caneca de 25 litros limpia previamente desinfectada con una solución al 10% de NaClO llena por media hora y enjuagada, de acuerdo al manual de instrucciones en la toma de muestras, transporte y preservación para análisis de laboratorio (INS, 2011).

Se concedió el permiso con la empresa para realizar este estudio, se tomaron aproximadamente 15 litros de muestra homogénea en la caneca y se transportaron al lugar donde se realizaron los ensayos, para cada ensayo se usó un Bach distinto de agua.



*Figura 17.* Toma de muestra. Fuente: Autores

### **3.2.2 Análisis fisicoquímicos del agua.**

Para llevar a cabo el análisis fisicoquímico del agua, se analizaron los siguientes parámetros: Demanda química de oxígeno (DQO), potencial de hidrogeno (pH), turbidez (NTU), sólidos suspendidos totales (SST), color.

A continuación, se describe el procedimiento que se llevó a cabo en cada uno de ellos

#### ***3.2.2.1 Demanda química de oxígeno (DQO).***

Este análisis se realizó en las instalaciones de la cervecería del Valle en el laboratorio de BTS (sistema de tratamiento biológico). Se validó con la técnica de DQO en agua, norma de procedimiento de la Cervecería del Valle: ABInBev copec No.: COP-VPOQ-A2-0004, Departamento: ZBS / VPO Ambiental.

## - Equipos

Tabla 2.

*Equipos requeridos para análisis de DQO.*

| <b>Equipo</b> | <b>Marca</b> | <b>Modelo</b>  |
|---------------|--------------|----------------|
| Termoreactor  | HACH         | DRB 200        |
| Titulador     | Metrohm      | 702 SM Titrino |
| Desionizador  | Sartorius    | H2O-AOV-20     |

Fuente: elaboración propia

## - Método

El método utilizado es de reflujo cerrado, método titulométrico. Se lavaron los tubos de digestión con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 10% con el propósito de hacer limpieza del material a usar. En un tubo se realizó el blanco, donde se adicionaron 2,5 mL de agua desionizada, luego en los demás tubos se realizaron las muestras por triplicado donde se adicionaron 2,5mL de muestra, luego a todos los tubos de muestras junto con el blanco se adicionaron 1,5 mL de Dicromato de potasio (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) 0,10N y 3,5 mL de Ácido sulfúrico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, se taparon y se agitaron suavemente, luego todos los tubos se llevaron al termo-reactor por 2 horas a 150°C, pasado esto se dejaron enfriar en un tiempo de 20 minutos, se retiró las tapas y se adicionaron a cada uno de los tubo 2 gotas de ferroína junto con un magneto de agitación, y se titularon con Sulfato de amonio ferroso 0.10M (FAS), hasta que se observó un cambio de coloración agudo azul verdoso a marrón rojizo.

$$DQO \text{ como } mg \text{ O}_2/L = \frac{(A - B) * M * 8000}{mL \text{ de muestra}}$$



Dónde:

A= mililitros (mL) de FAS utilizados para la titulación del blanco,

B= mililitros (mL) de FAS utilizados para la titulación de la muestra,

M= Molaridad del FAS,

8000= peso de mili equivalente del oxígeno \* 1000 mL/L

### 3.2.2.2 *Potencial de hidrógeno (pH).*

Este análisis se realizó en las instalaciones de la cervecería del Valle en el laboratorio de BTS (Sistema de Tratamiento Biológico).

Este análisis se validó con la técnica (Instructivo determinación de pH – Agua), norma de procedimiento de la Cervecería del Valle: SAB Miller plc Código 05-000128 Actualización 3.

#### **- Equipos**

Tabla 3.

*Equipos requeridos para análisis de pH.*

| <b>Equipo</b> | <b>Marca</b>      | <b>Modelo</b>   |
|---------------|-------------------|-----------------|
| pHmetro       | Thermo Scientific | Orion Star A211 |
| Atemperador   | Memmert           | 31503-10        |

Fuente: elaboración propia

## - Método

Se verificó que el pHmetro estuviera calibrado con buffer pH 4.00 y buffer pH 7.00, luego se acondicionó la muestra a 20°C y se trasvasó a un vaso de precipitado de tal manera que el sensor de pH quedo sumergido más del 50%, se insertó un magneto de agitación para homogenizar la muestra, se encendió el agitador y se esperó que estabilice el dato del equipo para tomar lectura, se realizó esta medición por triplicados.

### 3.2.2.3 Turbidez (NTU).

Este análisis se realizó en las instalaciones de la cervecería del Valle en el laboratorio de BTS (Sistema De Tratamiento Biológico).

Este análisis se validó con la técnica (Instructivo turbiedad – Agua), norma de procedimiento de la Cervecería del Valle: SABMiller plc Código 05-000132 Actualización 3.

## - Equipos

Tabla 1.

*Equipos requeridos para análisis de Turbidez*

| <b>Equipo</b> | <b>Marca</b>     | <b>Modelo</b>          |
|---------------|------------------|------------------------|
| Turbidímetro  | Scientific, inc. | Micro 100 Turbidimeter |

Fuente: elaboración propia

## - Método

Primero se agitó la muestra para homogenizar, luego se adicionó la muestra al vial de lectura, luego se inyectó el vial al equipo y se esperó a que el dato medido sea estable para tomar el valor, se realizó por triplicado.

### 3.2.2.4 Sólidos suspendidos totales (SST).

Este análisis se realizó en las instalaciones de la cervecería del Valle en el laboratorio de BTS (Sistema De Tratamiento Biológico). Este análisis se validó con la norma de procedimiento de la Cervecería del Valle: ABInBev copec No.: COP-VPOQ-A2-0003, Departamento: ZBS / VPO Ambiental.

## - Equipos.

Tabla 5.

*Equipos requeridos para análisis de SST*

| <b>Equipo</b>                 | <b>Marca</b>      | <b>Modelo</b> |
|-------------------------------|-------------------|---------------|
| Horno                         | BINDER            | ED 23 - UL    |
| Bomba de vacío                | MILLIPORE         | WP6211560     |
| Balanza analítica             | METTLER<br>TOLEDO | AL204         |
| Sistema de filtrado y succión | SARTORIUS         | 16832         |

Fuente: elaboración propia

## - Método

Primero se pesaron los filtros de papel en la balanza analítica, para tener el primer peso (W1), luego se colocó el filtro en el sistema de succión uniformemente mojado, luego se añadieron 100 mL de muestra previamente agitada y se inició al vacío prendiendo la bomba del sistema de succión para filtrar el agua y retener los sólidos, después se pasó el filtro a un horno con una temperatura de 105°C por 2 horas para eliminar humedad y material orgánico, luego se llevó el filtro a un desecador por 30 minutos para eliminar humedad, después cuidadosamente se llevó el filtro nuevamente a la balanza analítica y se obtuvo el segundo peso (W2), estos pesos fueron tomados con exactitud en decimales, luego se realizó el siguiente calculo:

$$\text{Sólidos suspendidos} \left[ \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right] = \frac{(W2 - W1[\text{gramos}]) * 1000}{\text{Volumen de la muestra}}$$

### 3.2.2.5 Color

Este análisis se realizó en las instalaciones de la cervecería del Valle en el laboratorio de BTS (Sistema De Tratamiento Biológico). Se validó con la norma de procedimiento de la Cervecería del Valle: SABMiller plc Código 05-000133 Actualización 3.

## - Equipos

Tabla 6.

*Equipos requeridos para análisis de color*

| <b>Equipo</b> | <b>Marca</b> | <b>Modelo</b>        |
|---------------|--------------|----------------------|
| Fotómetro     | Merk         | Spectroquant NOVA 60 |

Fuente: elaboración propia

## - Método

Primero se verificó la calibración del equipo que estuviera vigente, se verificó que la celda de lectura estuviera limpia, se homogenizó la muestra y se adicionó a la celda de medición que luego se metió al equipo y se ingresó el código 0030 para indicar al equipo la lectura de color, se tomaron los resultados, se realizaron los análisis por triplicado.

### **3.2.3 Construcción del prototipo de la celda de electrocoagulación.**

#### **- Materiales.**

- Fuente reguladora de voltaje de 110V AC - 0-12V DC/ 1 Amperios.
- Fuente reguladora de voltaje de 110V AC - 30V DC/ 30 Amperios
- Cables para conexión eléctrica con caimanes de sujeción.
- Tres Electrodo de Aluminio (300g).
- Tres electrodo de hierro (500g).

- Tres electrodos de Zinc (200g).
- Contenedor plástico.
- Tuvo en PVC de media pulgada (½”) por 30 cm.
- Probeta de 1000 mL.
- Segueta para corte.
- Pulidora eléctrica para corte de los electrodos.
- Caneca toma muestra 25L.
- Multímetro.
- Frascos plásticos.
- Recipiente de plástico 18L.
- Arena y antracita.
- Jeringa.
- Vasos de precipitados.
- Cinta negra.
- Alicata.
- Destornilladores.

**- Diseño y medidas.**

El volumen que trata la planta de agua residual varía de acuerdo con su nivel de afluente, depende de la producción de la planta, hectolitros envasados, producción por semana, normalmente se trata un promedio de 100m<sup>3</sup>/h, esta agua residual viene proveniente de las áreas de elaboración, envasado, logística y servicios.

Para este estudio se tomaron 25 L de muestra, y se analizaron 10 L/h, que representa una escala de 1:1000 a la propuesta que son 10.000 L/h.

El reactor de electrocoagulación se desarrolló de acuerdo a las siguientes características:

- Periodo de retención de 60 minutos.
- Dimensión del contenedor en vacío es de 37,1 L x 29,0 B x 17,2 H = 18505cm<sup>3</sup>.
- Nivel máximo de agua 10cm.
- Volumen de agua en litros 10,730L.
- Distancia entre electrodos es de 7,4cm.
- Numero de electrodos = 3c/u.
- Conductividad del agua 3300μS/cm
- Electrodo de hierro miden 29cm L x 0,5cm B x 15cm H = 217,5cm<sup>3</sup>.
- Electrodo de aluminio miden 29cm L x 0,5cm B x 17,2cm H = 249,4cm<sup>3</sup>.
- Electrodo de Zinc miden 29cm L x 0,2cm B x 17,2cm H = 99,8cm<sup>3</sup>.

Filtro de arena multicapa se diseñó para filtrar el resultado final del proceso de electrocoagulación y así terminar de remover sólidos que aun queden suspendidos.

Tabla 7.

*Tipos de arena para filtro*

| <b>Filtro Multicapas</b>                                |                     |
|---|---------------------|
| Capacidad del filtro (m <sup>3</sup> /h)                | 10m <sup>3</sup> /h |
| Capacidad de carga de arena de relleno (kg) 3,15-5,6 mm | 0,15                |
| Capacidad de carga de arena de relleno (kg) 2-3,15 mm   | 0,15                |
| Capacidad de carga de arena de relleno (kg) 0,6-1 mm    | 2,061               |
| Capacidad de carga de antracita de relleno (kg)         | 0,138               |

Fuente: elaboración propia



*Figura 18.* Prototipo creado para los diferentes ensayos. Fuente: Autores.

### 3.2.4 Metodología de ensayos

#### **- Ensayo 1. Proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio y hierro con un amperio (1A).**

La celda de electrocoagulación se conformó por electrodos de aluminio y hierro dispuestos en una configuración monopolar en paralelo a una distancia de los electrodos de 7,4cm cada uno, para este reactor se utilizó una fuente eléctrica regulable con alimentación de 110 Voltios y salida de 0-12 Voltios y 1 amperios.

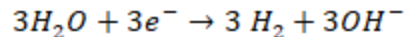
Para la prueba se trabajó a 12 voltios de corriente continua (DC) por un periodo de 60 minutos, con monitoreo de la continuidad eléctrica cada 5 minutos.

Los análisis fisicoquímicos de esta prueba se realizaron por triplicado.

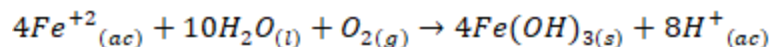
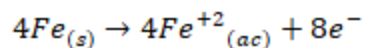
El ensayo realizado fue formado por cátodos de aluminio y ánodos de hierro formando las siguientes reacciones ocurridas en el sistema.



- En el cátodo:



- En el ánodo:



En el cátodo, el hidrógeno 1+, H(I), del H<sub>2</sub>O se reduce a hidrógeno H(0). El hierro sólido, con estado de oxidación cero, Fe(0), se oxida a Fe(II) en el ánodo

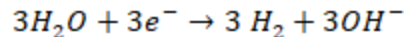
**- Ensayo 2. Proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio y hierro con treinta amperios (30A).**

La celda de electrocoagulación se conformó por electrodos de aluminio y hierro dispuestos en una configuración monopolar en paralelo a una distancia de los electrodos de 7,4cm cada uno, para este reactor se utilizó una fuente eléctrica regulable con alimentación de 110 Voltios y salida de 30 Voltios y 30 amperios, por un periodo de 60 minutos, con monitoreo de la continuidad eléctrica cada 5 minutos.

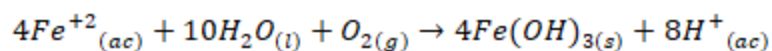
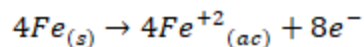
Los análisis fisicoquímicos de esta prueba se realizaron por triplicado.

El ensayo realizado fue formado por cationes de aluminio y aniones de hierro formando las siguientes reacciones ocurridas en el sistema y formación del coagulante.

- En el cátodo:



- En el ánodo:



En el cátodo, el hidrógeno  $H^+$ ,  $H(I)$ , del  $H_2O$  se reduce a hidrógeno  $H(0)$ . El hierro sólido, con estado de oxidación cero,  $Fe(0)$ , se oxida a  $Fe(II)$  en el ánodo

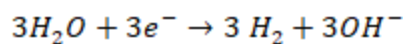
### - Ensayo 3. Proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio y Zinc.

La celda de electrocoagulación se conformó por electrodos de aluminio y Zinc dispuestos en una configuración monopolar en paralelo a una distancia de los electrodos de 7,4cm cada uno, para este reactor se utilizó una fuente eléctrica regulable con alimentación de 110 Voltios y salida de 30 Voltios y 30 amperios, por un periodo de 60 minutos, con monitoreo de la continuidad eléctrica cada 5 minutos.

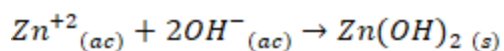
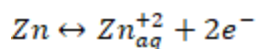
Los análisis fisicoquímicos de esta prueba se realizaron por triplicado.

El ensayo realizado fue formado por cátodo de aluminio y ánodo de zinc formando las siguientes reacciones ocurridas en el sistema y formación del coagulante.

- En el cátodo:



- En el ánodo:



**- Ensayo 4. Proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio y Zinc más coagulante Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.**

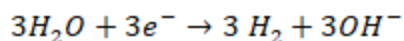
La celda de electrocoagulación se conformó por electrodos de aluminio y Zinc dispuestos en una configuración monopolar en paralelo a una distancia de los electrodos de 7,4cm cada uno, se adiciono al reactor 100ppm de sulfato de aluminio Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> como coagulante, ya que en resultados anteriores se genera la necesidad de ayudar al reactor a sedimentar.

Para este reactor se utilizó una fuente eléctrica regulable con alimentación de 110 Voltios y salida de 30 Voltios y 30 amperios, por un periodo de 60 minutos, con monitoreo de la continuidad eléctrica cada 5 minutos.

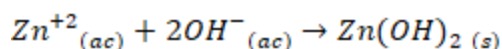
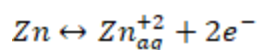
Los análisis fisicoquímicos de esta prueba se realizaron por triplicado.

En el ensayo realizado fue formado por cátodo de aluminio y el ánodo de zinc, formando las siguientes reacciones en el sistema y formación del coagulante.

- En el cátodo:



- En el ánodo:



### - Ensayo 5. Proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio - aluminio.

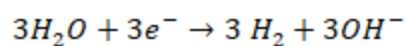
La celda de electrocoagulación se conformó por electrodos de aluminio – aluminio dispuestos en una configuración monopolar en paralelo a una distancia de los electrodos de 7,4cm cada uno, para este reactor se utilizó una fuente eléctrica regulable con alimentación de 110 Voltios y salida de 30 voltios y 30 amperios, por un periodo de 60 minutos, con monitoreo de la continuidad eléctrica cada 5 minutos.

Basados en la bibliografía, según Magaña et. al., 2019 sobre electrocoagulación, decidimos trabajar con electrodos de aluminio – aluminio, el cual presentaría la ventaja de invertir para cambiar la polaridad de electrodo de sacrificio sin inconvenientes en la reacción.

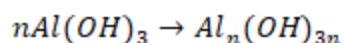
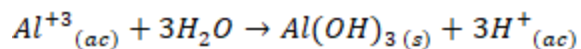
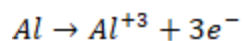
En este ensayo para terminar de remover sólidos (flóculos) producidos en la celda se realiza filtración en capas de arena.

Los análisis fisicoquímicos de esta prueba se realizaron por triplicado.

- En el cátodo:



- En el ánodo:



Como describe Magaña et. al., 2019 los iones  $\text{Al}^{+3}$  en combinación con los  $\text{OH}^-$  reaccionan para formar algunas especies monoméricas como  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}_2(\text{OH})_2^+$ , y otras poliméricas, tales como  $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$ ,  $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$ ,  $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$ ,  $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$  y  $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$  que por procesos de precipitación forman el  $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ , como se muestra en la reacción de ánodo. El  $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$  es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que expone una gran área superficial con propiedades absorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes.

## Capítulo 4. Resultados y discusión

### 4.1 Ensayo 1. Proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio y hierro con un amperio (1A).

Tabla 8.

*Resultados ensayo 1.*

| Análisis          | Antes              | Después           |                   |                   | % de remoción |
|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|
|                   | Muestra sin tratar | Muestra 1 tratada | Muestra 2 tratada | Muestra 3 tratada |               |
| <b>DQO (mg/l)</b> | 110                | 100               | 100               | 100               | 9,09          |
| <b>pH</b>         | 8,11               | 8,15              | 8,15              | 8,15              | -0,49         |
| <b>NTU</b>        | 8,5                | 8                 | 8                 | 8                 | 5,88          |
| <b>SST (mg/l)</b> | 21                 | 19                | 19                | 19                | 9,52          |
| <b>Color</b>      | 161,3              | 158,1             | 158,2             | 158,2             | 1,92          |

Fuente: elaboración propia

Pasados 15 minutos empieza la reacción en los electrodos de los extremos, donde se alcanza a ver burbujeo y generación de espuma.

En el monitoreo constante de la continuidad eléctrica evidenciamos que a los 25 minutos se cae el voltaje en los electrodos más distantes del circuito de 12V a 2V.

El proceso de electrocoagulación en este ensayo si obtuvo una mejora en la calidad del agua, donde los parámetros medidos bajaron, pero no fue lo suficiente para seleccionar este prototipo como el mejor porque la corriente no se mantiene constante y la generación de espuma no es consistente para separar el sólido.



Figura 19. Evidencia fotográfica ensayo 1. Fuente: Autores.

#### 4.2.1 Ensayo 2. Proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio y hierro con treinta amperios (30A).

Tabla 2.

Resultados ensayo 1.

| Análisis          | Antes              |                   | Después           |                   |            |
|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------|
|                   | Muestra sin tratar | Muestra 1 tratada | Muestra 2 tratada | Muestra 3 tratada | % remoción |
| <b>DQO (mg/l)</b> | 116                | 101               | 101               | 101               | 12,93      |
| <b>pH</b>         | 8,05               | 8,42              | 8,42              | 8,42              | -4,59      |
| <b>NTU</b>        | 11,3               | 10,5              | 10,5              | 10,5              | 7,07       |
| <b>SST (mg/l)</b> | 19                 | 17                | 17                | 17                | 10,5       |
| <b>Color</b>      | 173,3              | 128,8             | 128,8             | 128,8             | 25,67      |

Fuente: elaboración propia

En el monitoreo realizado al reactor se evidencia que después de los 15 minutos inicia una reacción constante en todos los electrodos. Se evidencio la formación de burbujas en el cátodo

las cuales corresponden a la liberación de hidrógeno el cual ayuda a arrastrar sedimentos suspendidos generando espuma en la parte superficial del reactor.

Se evidencia de igual manera algo de sedimentación y disminución en el color de agua, pasados 30 minutos la continuidad de la corriente cae hasta 15 voltios en los electrodos de hierro, se deja reaccionar durante 60 minutos

En este ensayo el proceso de la electrocoagulación mejoro con respecto al ensayo número uno, ya que se evidencia que al aumentar la corriente de un amperio a treinta amperios las reacciones en el reactor aparecieron más pronto y más estables, por lo que se generó espuma y mejoraron más los resultados de los análisis, pero aún no se seleccionó como el mejor prototipo ya que la corriente no fue constante en los 60 minutos.



*Figura 20.* Evidencia fotográfica ensayo 2. Fuente: Autores



### 4.3 Ensayo 3. Proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio y Zinc.

Tabla 3.

*Resultados ensayo 3.*

| Análisis          | Antes              |                   | Después           |                   |            |
|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------|
|                   | Muestra sin tratar | Muestra 1 tratada | Muestra 2 tratada | Muestra 3 tratada | % remoción |
| <b>DQO (mg/l)</b> | 96                 | 68                | 68                | 68                | 29,16      |
| <b>pH</b>         | 8,13               | 9,27              | 9,27              | 9,27              | -14,02     |
| <b>NTU</b>        | 5,58               | 4,98              | 4,98              | 4,98              | 10,75      |
| <b>SST (mg/l)</b> | 17                 | 16                | 16                | 16                | 5,88       |
| <b>Color</b>      | 127,7              | 83,6              | 83,6              | 83,6              | 34,53      |

Fuente: elaboración propia

Se monitorea la reacción en el reactor por 60 minutos, desde los 15 minutos muestra el inicio de la reacción evidenciando la generación de burbujas y la corriente a los 35 minutos cae a 20V manteniéndose así hasta finalizar la prueba.

En este ensayo se cambió uno de los electrodos que fue el de hierro por zinc, ya que este último es más conductor para favorecer el paso de corriente y reacción en el sistema, se evidencio que a diferencia de los ensayos 1 y 2 la corriente se mantuvo por más tiempo pero igual cae antes de los 60 minutos, los parámetros medidos mejoraron más que en los ensayos anteriores, pero específicamente los SST no se evidencio mejora significativa por lo que se generó burbujas muy finas que no permitieron a los sólidos sedimentarse ni flotar, por esto no se seleccionó como el mejor prototipo.



Figura 21. Evidencia fotográfica ensayo 3. Fuente: Autores

#### 4.4 Ensayo 4. Proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio y Zinc más coagulante $Al_2(SO_4)_3$ .

Tabla 11.

Resultados ensayo 4.

| Análisis          | Antes              |                   | Después           |                   |            |
|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------|
|                   | Muestra sin tratar | Muestra 1 tratada | Muestra 2 tratada | Muestra 3 tratada | % remoción |
| <b>DQO (mg/l)</b> | 98                 | 65                | 65                | 65                | 31,67      |
| <b>pH</b>         | 8,16               | 9,14              | 9,14              | 9,14              | -12        |
| <b>NTU</b>        | 9,03               | 6,7               | 6,7               | 6                 | 25,8       |
| <b>SST (mg/l)</b> | 22                 | 13                | 13                | 13                | 40,9       |
| <b>Color</b>      | 127,7              | 97                | 97                | 97                | 24,04      |

Fuente: elaboración propia

Se monitorea la reacción en el reactor por 60 minutos, desde los 15 minutos muestra el inicio de la reacción evidenciando la generación de burbujas y la corriente a los 35 minutos cae a 23V y se mantiene durante el resto de la prueba.

En este ensayo el proceso de electrocoagulación arrojó mejoras en la calidad del agua, a diferencia de los ensayos anteriores, en este se adicionó un agente coagulante que fue el sulfato

de aluminio para atrapar sólidos y ayudar a la sedimentación de los mismos, pero se evidencio que este coagulante no fue efectivo en este proceso, ya que aún quedan partículas de solidos suspendidas que no permiten el aprovechamiento completo del proceso, además en este ensayo la corriente no se mantuvo en el tiempo de prueba.



Figura 22. Evidencia fotográfica ensayo 4. Fuente: Autores

#### 4.5 Ensayo 5. Proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio - aluminio.

Tabla 4.

Resultados ensayo 5.

| Análisis          | Antes              |                   | Después           |                   |      | % remoción |
|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------|------------|
|                   | Muestra sin tratar | Muestra 1 tratada | Muestra 2 tratada | Muestra 3 tratada |      |            |
| <b>DQO (mg/l)</b> | 102                | 61                | 61                | 61                | 61   | 40,19      |
| <b>pH</b>         | 8,04               | 9                 | 9                 | 9                 | 9    | -11,9      |
| <b>NTU</b>        | 16                 | 11,3              | 11,3              | 11,3              | 11,3 | 29,37      |
| <b>SST (mg/l)</b> | 25                 | 7                 | 7                 | 7                 | 7    | 72         |
| <b>Color</b>      | 141,7              | 96,6              | 96,5              | 96,5              | 96,5 | 31,82      |

Fuente: elaboración propia

La reacción se inicia a los 15 minutos de iniciada la prueba, se evidencia gran generación de burbujeo y espuma. No se evidencia caída de voltaje durante los 60 minutos de prueba.

En este ensayo se cambió nuevamente uno de los electrodos a diferencia de los ensayos anteriores se usaron los electrodos del mismo material buscando el mejor conductor eléctrico para mantener la corriente durante toda la prueba ya que en los ensayos anteriores se caía, por lo que decidió trabajar todos los electrodos de aluminio manejando la misma corriente que en los ensayos 2, 3 y 4, se evidencio que la corriente se mantuvo durante toda la prueba siendo eficiente en el proceso y mejorando la calidad del agua más que los anteriores ensayos, la generación de burbujas fue constante y los sólidos fueron más pesados, por lo que se presentó sedimentación y flotación, en este ensayo se filtraron estos sólidos para analizar el resultado final, se escogió este ensayo como el mejor prototipo de electrocoagulación para este tipo de agua.



*Figura 23.* Evidencia fotográfica ensayo 5. Fuente: Autores



*Figura 24.* Resultado final antes y después ensayo 5. Fuente: Autores

Tabla 13.

Porcentajes de remoción de ensayos.

| %<br>remoción     | Aluminio-<br>Hierro 1A | Aluminio-<br>Hierro 30A | Aluminio-<br>Zinc | Aluminio-Zinc-<br>Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | Aluminio-<br>Aluminio |
|-------------------|------------------------|-------------------------|-------------------|---|-----------------------|
| <b>DQO (mg/l)</b> | 9,09                   | 12,93                   | 29,16             | 31,67   | 40,19                 |
| <b>NTU</b>        | 5,88                   | 7,07                    | 10,75             | 25,8  | 29,37                 |
| <b>SST (mg/l)</b> | 9,52                   | 10,5                    | 5,88              | 40,9  | 72                    |
| <b>COLOR</b>      | 1,92                   | 25,67                   | 34,53             | 24,04   | 31,82                 |
| <b>pH</b>         | -0,49                  | -4,59                   | -14,02            | -12   | -11,9                 |

Fuente: elaboración propia

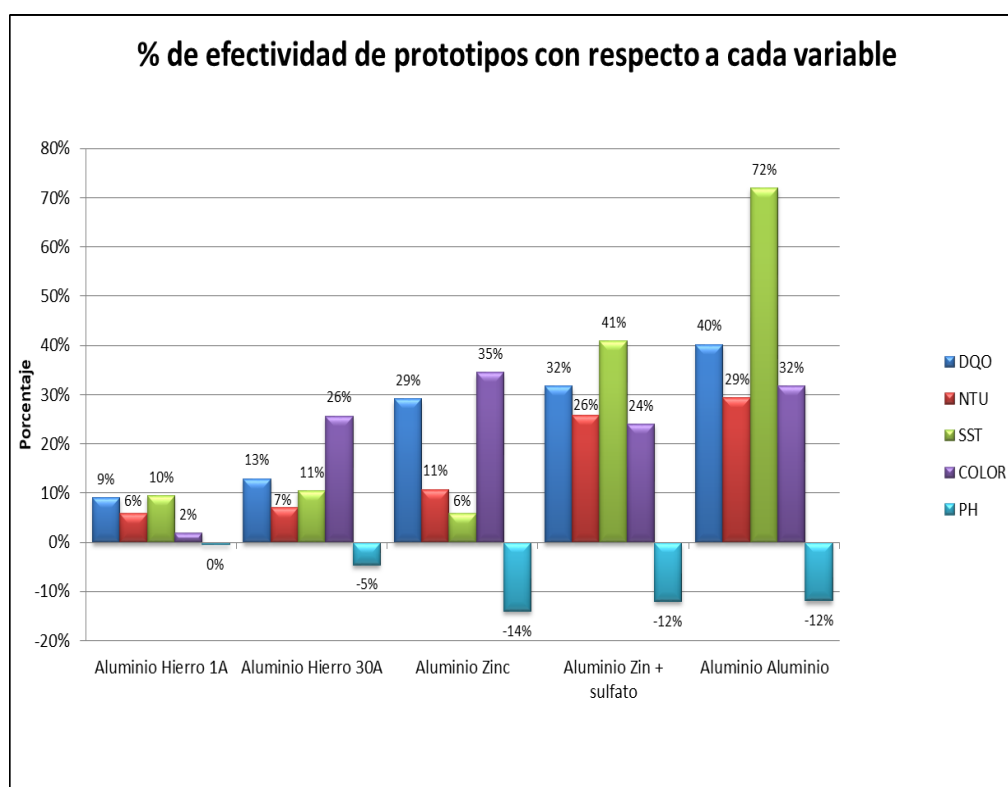


Figura 25. Porcentaje de remoción sustancias contaminantes. Fuente: Autores

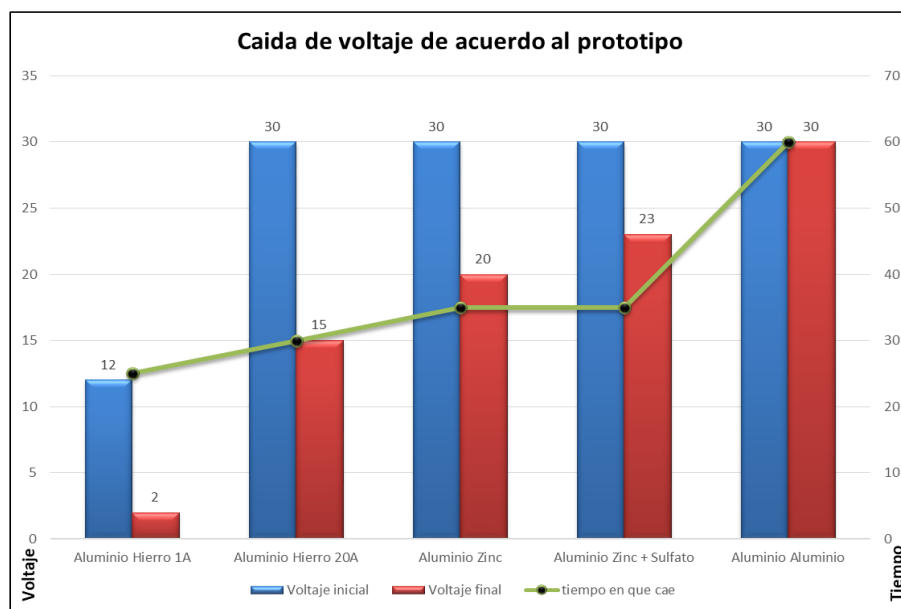


Figura 26. Caída de voltajes de vs prototipos. Fuente: Autores.

De acuerdo a la Figura 28, se observa que el mejor ensayo fue el 5, que se realizó con electrodos de aluminio tanto en el ánodo como en el cátodo, evidenciando más eficiencia en la mejora de calidad del agua, los resultados fisicoquímicos fueron mejores frente a los demás ensayos y fue el único que mantuvo la corriente eléctrica durante toda la prueba además de mantener las reacciones constantes en toda el área del prototipo.

El ensayo 5 es favorecido frente a los demás porque el aluminio (3,8 S/m) es mayor conductor eléctrico que el hierro (1,0 S/m) y el zinc (1,6 S/m), al presentarse una corriente continua el flujo de electrones entre los electrodos de aluminio y los compuestos presentes en el efluente generaron la reducción en el cátodo y la producción de iones metálicos y oxígeno en el ánodo, afirmando la ley de Faraday que fundamenta la electrocoagulación el número de moles formados en un electrodo, esta estequiométricamente relacionado con la cantidad de electricidad del sistema (Suárez, Jácome y Ures, 2015); además de que el agua residual analizada favoreció las reacciones por su alta conductividad (3250 $\mu$ S/cm), esto permitió que se generaran las burbujas

en el sistema con más consistencia separando los sólidos. Estas reacciones de óxido reducción se presentaron en los cinco ensayos, pero como se visualiza en la Figura 29, la continuidad eléctrica con electrodos de hierro y zinc cae, evidenciando que estos materiales no fueron suficientemente conductores para este tipo de agua residual.

## 5. Conclusiones

Las modificaciones entre los diferentes electrodos, voltajes y amperaje, permitió desarrollar la mejor celda de electrocoagulación para este estudio (Aluminio – Aluminio). La celda con electrodos de aluminio – aluminio a 30 amperios y 30 voltios, dieron como resultado una mejor desestabilización de los contaminantes del agua que formaron hidróxidos complejos con mayor capacidad de adsorción produciendo flóculos y aumentando la eficacia y la eficiencia del porcentaje de remoción.

Los resultados demuestran que se cumple con la mejora en la calidad del agua y el estudio de remoción en el tratamiento de las aguas de la cervecería, para cada uno de los parámetros antes del análisis por electrocoagulación muestra los siguientes resultados: DQO 102mg/L, pH 8,04, NTU 16, SST 25mg/L, Color 141,7 los cuales mantienen los valores permitidos. Sin embargo, con el proceso de electrocoagulación se logró una mejora significativa en cada parámetro. Podemos validar este punto con el ensayo número 5 (electrodos aluminio- aluminio) el cual mostró el mejor resultado, DQO 61mg/L, pH 9,00, NTU 11,3, SST 7mg/L, Color 96,5. Con estos datos se pudo determinar el porcentaje de efectividad de la prueba para cada parámetro. La DQO se redujo en 40,2%, NTU en 29,4%, SST 72%, Color en 31,8%, aunque el pH se incrementó de 8,04 a 9,00 aún permanece dentro de lo permitido por la norma.

Los resultados obtenidos muestran que el proceso de acuerdo con este efluente presenta un comportamiento lineal para los contaminantes cuando se mantiene la misma corriente 30A en el tiempo de exposición, con lo cual podemos concluir que a mayor tiempo de exposición se obtendrán mejores resultados en el tratamiento.



Se establecieron límites de corrientes para cada uno de los prototipos de acuerdo con los electrodos con relación al pH, ya que al presentar mayor exposición y corriente el pH tiende a incrementarse.

Otra ventaja de importancia en los análisis realizados es la calidad de lodos sedimentados en el tratamiento, ya que presentan mejor compactación y menor retención de humedad, lo cual facilita el tratamiento final de estos.

La recomendación para la ejecución del proceso de electrocoagulación para el efluente residual como un pre tratamiento al sistema de agua de reúso en la cervecería del valle, es con electrodos de Aluminio-Aluminio con una intensidad de corriente de 30A con posterior filtración.

## Referencias bibliográficas

- Alzate, J. (20 de abril de 2015). Sin agua no hay vida. [Mensaje en un blog]. Recuperado de:  
<https://www.elcolombiano.com/opinion/columnistas/sin-agua-no-hay-vida-GY1753558>
- Bavaria. (2020). Proceso productivo. Colombia. Recuperado de <https://bavaria.co>
- Bavaria.co. (2020). Política de medio ambiente AbInbev Cervecería del Valle. Colombia.  
Recuperado de <https://www.bavaria.co/cerveza/proceso-cervezero-bavaria>
- Benítez, F. (25 de 04 de 2015). Polarización electroquímica [Mensaje en un blog]. Recuperado  
de <https://es.scribd.com/doc/313412822/POLARIZACION-ELECTROQUIMICA>
- Canales, C., Rodríguez, A., Pascual, A., Olalla, J., Quesada, C., Roca, F., Montá, E., Sánchez, P.,  
Santamaría, M. y Nava, B. (2005). Guía de mejores técnicas disponibles en España del  
sector cervecero. (C. d. ambiente, Ed.) Ministerio del medio ambiente. Recuperado de:  
[http://prtr-](http://prtr-es.es/Data/images/Gu%C3%ADa%20MTD%20en%20Espa%C3%B1a%20Sector%20Cervezero-A2401D26BE1CD61C.pdf)  
[es.es/Data/images/Gu%C3%ADa%20MTD%20en%20Espa%C3%B1a%20Sector%20Cervezero-A2401D26BE1CD61C.pdf](http://prtr-es.es/Data/images/Gu%C3%ADa%20MTD%20en%20Espa%C3%B1a%20Sector%20Cervezero-A2401D26BE1CD61C.pdf)
- Castagnino, J. (2000). Electroforesis Capilar. Rev. Bioquímica, 25(1), 13 - 32

Castaños, E. (13 de octubre de 2016). La corrosión de los metales [Mensaje en un blog].

Recuperado de <https://cienciaonthecrest.com/2016/10/13/la-corrosion-de-los-metales/>

Campos, E. (2017). Electroquímica (tesis de pregrado). Universidad autónoma de México, Ciudad de México, México.

Da Cámara, L., Hernández y Paz, L. (2014). Manual de diseño para planta de tratamiento de aguas residuales alimenticias. Artículo original. Recuperado de [https://www.academia.edu/35569956/MANUAL\\_DE\\_DISE%C3%91O\\_PARA\\_PLANTAS\\_DE\\_TRATAMIENTO\\_DE\\_AGUAS\\_RESIDUALES\\_ALIMENTICIAS](https://www.academia.edu/35569956/MANUAL_DE_DISE%C3%91O_PARA_PLANTAS_DE_TRATAMIENTO_DE_AGUAS_RESIDUALES_ALIMENTICIAS)

Educadores por la Sostenibilidad. (2016). La crisis del agua: Un problema tan grave como el del cambio climático. *Revista latinoamericana de ciencias sociales niñez y juventud*, 14(1), 711 – 712.

Gutiérrez, J. y Rivadeneira, W. (2017). Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales de la industria carbonera (tesis de pregrado). Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2007). Informe sobre la demanda bioquímica de oxígeno cinco días, incubación electrométrica. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Bioqu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/ca6e1594-4217-4aa3-9627-d60e5c077dfa>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2004). Informe sobre la determinación de oxígeno disuelto por el método yodométrico modificación de azida.

Recuperado de

<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Ox%C3%ADgeno+Disuelto+M%C3%A9todo+Winkler.pdf/e2c95674-b399-4f85-b19e-a3a19b801dbf>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2005). Informe sobre PSO Determinación de alcalinidad por potenciometría. Recuperado de

<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Alcalinidad+total+en+agua+por+electrometr%C3%ADa..pdf/dd9a3610-8ff7-49bc-97eb-5306362466df>

Instituto Nacional de Salud – INS. (2011). Manual de instrucciones para toma, preservación y transporte de agua de consumo humano para análisis de laboratorio. Recuperado de

<https://www.ins.gov.co/sivicap/Documentacion%20SIVICAP/2011%20Manual%20toma%20de%20muestras%20agua.pdf>

Magaña, L., Rojas, A., González, Y. y Ojeda, E. (2019). Remoción de contaminantes del residual lácteo por electrocoagulación. Artículo original. Recuperado de:

<http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v40n1/2224-6185-rtq-40-01-17.pdf>

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible de Colombia. (2015). Resolución 0631 de 2015 por la cual se establecen los parámetros y los valores límites permisibles en los vertimiento puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado

público y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible de Colombia.

Morante G. (2002). Electrocoagulación de aguas residuales. *Revista Colombiana de física*, 34(2), 484.

Ortiz, C. (2018). Electrocoagulación de aguas residuales (tesis de pregrado). Universidad Popular del Cesar, Valledupar, Colombia.

Restrepo, A., Arango, A., y Garcés, L. (2006). La Electrocoagulación retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Rev. Producción más limpia*, 1(2), 60-61.

Secretaria de Economía Mexicana. (2001). Informe sobre el análisis de agua determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas método de prueba. Recuperado de <https://aniq.org.mx/Pqta/pdf/NMX-AA-quimicosgpo2.pdf>

Suárez, J., Jácome, A. y Ures, P. (2015). Electrocoagulación y electroflotación (tesis de pregrado). Universidad de la Colonia, España.

Torres, A. (s.f.). Análisis de aguas residuales [Mensaje en un blog]. Recuperado de [http://a21-granada.org/red-gramas/images/Presentacion\\_ANTONIO.pdf](http://a21-granada.org/red-gramas/images/Presentacion_ANTONIO.pdf)