

**TRATAMIENTO A NIVEL LABORATORIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA
INDUSTRIA PRODUCTORA DE CARNE DE POLLO EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ**

**PAULA ANGÉLICA ROA HERNÁNDEZ
ESTEBAN LEÓN DUSSAN**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
DÉCIMO SEMESTRE
BOGOTA D.C 2018**

**TRATAMIENTO A NIVEL LABORATORIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA
INDUSTRIA PRODUCTORA DE CARNE DE POLLO EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ**

**PAULA ANGÉLICA ROA HERNÁNDEZ
ESTEBAN LEÓN DUSSAN**

Trabajo como requisito para optar al título de Ingeniería Ambiental

**DIRECTORA
NIDIA ELENA ORTIZ PENAGOS
MSc. Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
DÉCIMO SEMESTRE
BOGOTÁ D.C 2018**

CONTENIDO

<i>RESUMEN</i>	6
1. <i>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</i>	7
2. <i>OBJETIVOS</i>	8
2.2 Objetivo general	8
2.3 Objetivos específicos.....	8
3. <i>JUSTIFICACIÓN</i>	9
4. <i>PERTINENCIA SOCIAL</i>	9
6. <i>MARCO TEÓRICO</i>	11
6.1 Tratamiento preliminar	13
6.2 Tratamiento primario	13
6.2.1 Coagulación / floculación.....	14
6.2.2 Sedimentación.....	15
6.3 Tratamiento secundario	15
6.3.1 Lodos activados	16
6.4 Proceso de producción de carne de pollo	21
7. <i>ALCANCE</i>	23
8. <i>METODOLOGÍA</i>	24
8.4 Implementación de lodos activados	27
8.5 Caracterización agua residual tratada.....	28
8.6 Comparación de parámetros físicoquímicos con normatividad.....	28
9. <i>RESULTADOS Y ANÁLISIS</i>	28
9.3 Tratamiento primario con coagulantes por prueba de jarras.....	30
9.3.1 Tratamiento con cloruro férrico, FeCl ₃	30
9.4 Tratamiento con lodos activados.....	38
<i>CONCLUSIONES</i>	43
<i>RECOMENDACIONES</i>	43

TABLAS

Tabla 1. Límites máximos permitidos según la Resolución 0631 de 2015 para vertimientos de beneficio de ganadería de aves de corral 7

Tabla 2. Parámetros de diseño para los procesos de lodos activados 20

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos del agua residual 24

Tabla 4. Parámetros del agua residual del proceso de producción de carne de pollo 28

Tabla 5. Turbiedad prueba de jarras con cloruro férrico, FeCl_3 30

Tabla 6. Sumatorias y promedios de las réplicas turbiedad prueba de jarras con cloruro férrico, FeCl_3 30

Tabla 7. Análisis de varianza turbiedad prueba de jarras con cloruro férrico, FeCl_3 31

Tabla 8. Curva de calibración de absorbancia en función de la demanda química de oxígeno (DQO) 33

Tabla 9. DQO prueba de jarras con cloruro férrico, FeCl_3 34

Tabla 10. Sumatorias y promedios de las réplicas prueba de jarras con cloruro férrico, FeCl_3 34

Tabla 11. Análisis de varianza DQO prueba de jarras con cloruro férrico, FeCl_3 35

Tabla 12. Turbiedad prueba de jarras con sulfato de aluminio, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 36

Tabla 13. Sumatorias y promedios de las réplicas de turbiedad prueba de jarras con sulfato de aluminio, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 37

Tabla 14. Análisis de varianza DQO prueba de jarras con sulfato de aluminio, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 37

Tabla 15. DQO obtenida por tratamiento con lodos activados con tratamiento previo con coagulante y sin coagulante..... 39

Tabla 16. Sumatorias y promedios de las réplicas para tratamiento con lodos activados y tratamiento previo con coagulante FeCl_3 39

Tabla 17. Análisis de varianza DQO tratamiento con lodos activados y tratamiento previo con coagulante FeCl_3 39

Tabla 18. Sumatorias y promedios de las réplicas de agua residual tratada con lodos activados sin coagulante..... 40

Tabla 19. Análisis de varianza DQO tratamiento con lodos activados sin coagulante..... 41

Tabla 20. DQO obtenida por tratamiento con lodos activados con tratamiento previo con coagulante y sin coagulante. Tiempo de 5 horas con lodos activados 42

Tabla 21. Parámetros del agua residual del proceso de producción de carne de pollo 42

ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Trampa de Grasas	13
Ilustración 2. Coagulación y floculación	15
Ilustración 3. Lodos activados.....	16
Ilustración 4. Proceso convencional de lodos activados.....	17
Ilustración 5. Aireación escalonada.....	18
Ilustración 6. Aireación activada	19
Ilustración 7. Estabilización por contacto	19
Ilustración 8. Completamente mezclado	20
Ilustración 9. Diagrama de flujo proceso producción carne de pollo.....	21
Ilustración 10. Insensibilización o aturdimiento	22
Ilustración 11. Escaldado.....	22
Ilustración 12. Ensayo de jarras.....	26
Ilustración 13. Lodos activados.....	27

GRÁFICAS

Grafica 1. Turbiedad prueba de jarras con cloruro férrico FeCl_3	31
Grafica 2. Curva de calibración de absorbancia en función de la demanda química de oxígeno (DQO)	34
Grafica 3. DQO prueba con coagulante cloruro férrico, FeCl_3	36
Grafica 4. Turbiedad prueba de jarras con sulfato de aluminio, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	38
Grafica 5. DQO Vs Concentración de lodos activados con coagulante FeCl_3	40
Grafica 6. DQO Vs Concentración de lodos activados sin coagulante	41

RESUMEN

Se evaluó una alternativa para el tratamiento de las aguas residuales de una empresa productora de carne de pollo, ubicada en la ciudad de Bogotá, con énfasis en la disminución de DQO; para el desarrollo de esta alternativa en la implementación industrial, los tiempos de retención son iguales o mayores a 24 horas. Por lo que se llevó a cabo un método en el cual, estos tiempos de retención fueran menores a un (1) día, permitiendo el tratamiento diario de las aguas residuales de esta empresa. Se inició evaluando los parámetros fisicoquímicos del agua residual cruda con base en los métodos normalizados para análisis de agua potable y residual; seguido a éste, se encontró el pH correspondiente al punto isoeléctrico para obtener la mayor precipitación de materia orgánica. En la etapa posterior, se realizaron ensayos de pruebas de jarras con tres (3) coagulantes: policloruro de aluminio, sulfato de aluminio y cloruro férrico, definiendo así el coagulante y dosis óptima, para la disminución de turbiedad y DQO. Haciendo elección del mejor coagulante, se realizó un tratamiento secundario biológico con lodos activados para tres (3) concentraciones de inóculo, el inóculo se obtuvo de la empresa Byodine ya desarrollado. Finalmente, se evaluaron nuevamente los parámetros fisicoquímicos del agua residual tratada, con base en los métodos normalizados para análisis de aguas y se compararon con los niveles máximos permisibles según la resolución 631 de 2015.

Después de desarrollar las etapas anteriores se identificó que, aunque la DQO del agua residual de esta empresa pasó de 32.500 mg/L de O₂ a 652 mg/L de O₂; sigue incumpliendo la norma; por lo cual fue necesario realizar nuevos ensayos con la mejor dosificación de inóculo (0,15%), incrementando el tiempo de tratamiento con lodos activados a 5 horas, tanto con tratamiento previo como sin tratamiento previo esta vez con cloruro férrico. Obteniendo concentraciones de DQO menores de 500 mg/L de O₂, y así cumpliendo con los máximos permisibles establecidos en la norma para los parámetros de interés.

Palabras claves: aguas residuales industriales, industria avícola, lodos activados, tecnologías limpias.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La empresa procesadora de pollos ubicada en la ciudad de Bogotá, genera aguas residuales con elevado contenido de materia orgánica, debido a los residuos solubles que quedan en suspensión los cuáles son piel, carne y sangre. El promedio de DQO para el agua residual de este tipo de empresas es de 30.000 mg/L O₂. Para disminuir la elevada carga de materia orgánica de los vertimientos de esta empresa procesadora de carne de pollos, se necesitan tratamientos fisicoquímicos y biológicos, pero debido a las grandes áreas y altos tiempos de retención que pueden ser de varios días, la empresa procesadora de carne de pollos, tiene dificultades para realizar el tratamiento; por ende actualmente, este proceso se lleva a cabo en esta empresa por medio de una trampa de grasas y posterior a ésta, se realiza un tratamiento con coagulante (cloruro férrico) para después ser vertido en la cuenca del río Fucha. Realizando este tratamiento la empresa es consciente de su incumplimiento con la norma, sin embargo, realizaron una inversión en un equipo para el tratamiento de sus aguas, no obstante, según operarios de esta empresa, manifiestan que este equipo no logra tratar el caudal de agua residual generado diariamente, a su vez, teniendo repercusiones en el costo de operación y mantenimiento de éste. Por los motivos antes mencionados es necesario crear una alternativa de tratamiento para estas aguas residuales que logre la disminución de la DQO a valores establecidos en la resolución 631 del 2015 que establece los límites máximos permitidos para vertimientos y resolución 3957 de 2009 para el control y manejo de los vertimientos realizados a la red de alcantarillado público en el Distrito Capital, siendo la primera normativa la que resulta ser más restrictiva frente a los parámetros a caracterizar de una industria ubicada en la ciudad de Bogotá que realiza vertimientos al sistema de alcantarillado [1,2].

Tabla 1. Límites máximos permitidos según la Resolución 0631 de 2015 para vertimientos de beneficio de ganadería de aves de corral

PARÁMETRO	UNIDADES	BENEFICIO DE GANADERÍA DE AVES DE CORRAL
pH	Unidades de pH	6 - 9
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	650
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	100

Sólidos Sedimentables (SSED)	mg/L	2
------------------------------	------	---

Fuente. [1]

El trabajo propuesto planteó la siguiente pregunta de investigación:

¿Para el tratamiento primario, cuáles coagulantes, qué dosis y cuál proporción de lodos activados son requeridos para que el agua residual proveniente de la industria productora de pollos, cumpla la DQO establecida en la normatividad ambiental de vertimientos, según la resolución 0631 del 2015, que permitan el tratamiento en un tiempo máximo de 24 horas?

2. OBJETIVOS

2.2 Objetivo general

Reducir los niveles de DQO de las aguas residuales de una empresa avícola productora de carne de pollo, por medio de tratamiento primario y secundario a nivel laboratorio, que logre disminuir la materia orgánica acercando su concentración a la normativa ambiental de vertimientos, en un tiempo máximo de 24 horas.

2.3 Objetivos específicos

- Caracterizar el agua residual de una empresa de producción de carne de pollo empacado en la ciudad de Bogotá, determinando con base en los métodos normalizados para análisis de aguas potables y residuales los parámetros pH, turbiedad, DQO, sólidos en suspensión y sólidos sedimentables [3].
- Determinar experimentalmente el pH correspondiente al punto isoeléctrico del agua residual, para obtener la mayor precipitación de materia orgánica.
- Determinar tipo y dosificación óptima de coagulante por medio de ensayos de pruebas de jarras.
- Evaluar el efecto del tratamiento del agua residual con lodos activados sobre la disminución de DQO, posterior al tratamiento con el mejor resultado de coagulante encontrado en la fase anterior.

- Analizar la eficiencia del tratamiento comparando los parámetros obtenidos del agua residual previos al tratamiento, con los valores obtenidos después del tratamiento para estos mismos parámetros, y comparando estos a su vez con los máximos permisibles establecidos en la resolución 0631 de marzo de 2015 [1].

3. JUSTIFICACIÓN

Después de identificar que la mayoría de empresas productoras de carne de pollo incumplen la norma, se hace pertinente desarrollar un control frente a las aguas residuales provenientes de esta industria avícola. Aunque en Colombia existen alrededor de 170 plantas de tratamiento de aguas residuales, se calcula que, del volumen de agua generado por el sector urbano, solo el 1% recibe tratamiento antes de ser descargado a los cuerpos de agua. En promedio, las plantas liberan un 19% de agua en las mismas condiciones en que es recibida. Cundinamarca dispone de 24 plantas de tratamiento. Entre los ríos que actualmente reciben aportes constantes y considerables de aguas residuales sin tratar, se encuentran el Río Magdalena, el Río Cauca y el Río Bogotá, donde esta empresa genera vertimientos a la cuenca del Río Fucha, sin haber realizado algún tratamiento ya sea primario, secundario o terciario. Esto se puede evidenciar ya que los propietarios, empleados y la comunidad aledaña no se encuentran informados de las diferentes alternativas que se pueden implementar para el tratamiento de agua residual sin la necesidad de realizar grandes inversiones o tener a disposición grandes terrenos, así estarían ayudando a reducir los impactos ambientales y a su vez, evitando problemas legales con las entidades ambientales [4].

4. PERTINENCIA SOCIAL

El problema actual con el agua residual proveniente de la producción de carne de pollo en la ciudad de Bogotá, no solo influye en la dirección de la empresa, también tiene efecto sobre los trabajadores de la misma, la comunidad en el área de influencia y el medio ambiente, los trabajadores de la empresa pueden ser afectados negativamente debido a que los olores afectan el bienestar del trabajador, además de la posibilidad de sellamiento de estas empresas por la Secretaría Distrital de Ambiente, dejando sin empleo a los trabajadores. Realizando un tratamiento de esta agua residual, se tendría una capacitación en

los empleados, obteniendo educación ambiental. Por otro lado, tanto los empleados como la comunidad que se encuentra en el área de influencia de la empresa, los malos olores por la degradación de materia orgánica afectan la calidad de vida de los mismos; implementado el tratamiento de aguas residuales, se aportaría en pequeña medida, tanto el aspecto como la calidad del ambiente en la ciudad de Bogotá y la cuenca del río Fucha.

5. ESTADO DEL ARTE

El ambiente se a transformado en uno de los factores mas importantes alrededor del mundo a través de los años. Las industrias al ser las mayores generadoras de residuos líquidos y sólidos, son las que presentan una mayor preocupación referente a la conservación de ambiente. Antiguamente no era de gran importancia la generación de residuos al ambiente, puesto que lo primordial era el desarrollo económico del país. Pero estos residuos comenzaron a generar tanto impactos ambientales, como enfermedades a la población, creando una preocupación y así comenzando a generar medidas de mitigación.

Inicialmente en las industrias avícolas era de mayor prevalencia los residuos sólidos, puesto que el proceso generaba grandes cantidades de sólidos inorgánicos y orgánicos, con los cuales se empezaron a realizar procesos de compostaje para el debido manejo de éstos. Referente a los sólidos líquidos, estos simplemente eran vertidos a fuentes hídricas o sistemas de alcantarillado, que posteriormente llegarían a contaminar ríos. Como el aporte de vertimientos a diferentes fuentes hídricas comenzó a ser mayor, se tomó por implementar medidas para la disposición y control de estos vertimientos.

En la industria avícola, los mataderos de aves y las empresas productoras de carne de pollo generan gran cantidad de aguas residuales, caracterizadas por presentar altas concentraciones de materia orgánica biodegradable, materia coloidal y suspendida, tales como grasas, proteínas y celulosa. Estas aguas residuales son altamente contaminantes debido a su elevada demanda bioquímica de oxígeno (DBO), por lo que provocan un alto impacto ambiental en cuerpos receptores [5].

Los tratamientos de aguas residuales de las industrias avícolas se clasifican en tres categorías: primarios, para remover sólidos sedimentables y suspendidos; secundarios, para remover materia orgánica y terciarios, para remover nitrógeno y fósforo o sólidos suspendidos. Con esto es necesario que los efluentes de las industrias avícolas deben ser llevados a una planta de tratamiento antes de su descarga a los cuerpos de agua receptores o a las redes de alcantarillado [5].

La eficiencia de los sistemas de tratamiento empleando diferentes opciones como lodos activados, reactores anaerobios, productos químicos, pre tratamiento en sistemas de flotación por aire disuelto (DAF) y tamices, entre otros, han sido evaluados por varios investigadores, demostrando que remueven más del 80% de la demanda química de oxígeno (DQO) presente en esta agua [5].

Además de las tecnologías de tratamiento secundario, generalmente necesitan de otros tratamientos para la eliminación de materia orgánica, conocidos como tecnologías terciarias, avanzadas o de recuperación. Esas tecnologías tienen el propósito de reducir aún más los nutrientes, los sólidos suspendidos, los microorganismos u otros contaminantes aún presentes. Las tecnologías utilizadas pueden ser, como en el tratamiento secundario de aguas residuales, químicas, físicas o biológicas, son individuales o en combinación. Es considerar que el propósito de la eliminación de nutrientes para el tratamiento terciario de las aguas residuales para cumplimiento de normatividad ambiental vigente en relación con vertimientos, y para considerar la posibilidad de la recuperación se debe garantizar que el agua recuperada tenga suficiente calidad para ser reutilizada de manera segura y legal [6].

6. MARCO TEÓRICO

Existen dos principales propósitos en el tratamiento de aguas residuales, comenzando con la consecuente necesidad de una eliminación segura de los contaminantes que se encuentran en las aguas residuales recolectadas, cumpliendo al mismo tiempo con la normatividad ambiental de cada región para los niveles máximos permisibles [6].

El segundo propósito es la reutilización de aguas residuales, que, en su forma moderna, es un concepto relativamente nuevo en muchas comunidades del mundo, aunque se ha practicado de forma empírica durante más de 5000 años y es un fenómeno de factor en la naturaleza y en las cuencas fluviales en todo el mundo. Se puede indicar que la reutilización de aguas residuales tratadas como práctica tecnológica surgió durante el siglo XX, después de la implementación del tratamiento de aguas residuales a gran escala en todo el mundo desarrollado, y también del aumento de la población que vive en las ciudades modernas. En este momento hay grandes cantidades de aguas residuales tratadas disponibles para su reutilización, que se espera que aumenten en el futuro [6].

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales tienden a copiar procesos naturales, biológicos, físicos y químicos. Las diferencias entre las instalaciones se basan en el tipo de tecnología utilizada y su intensidad, así como en las posibles combinaciones de tecnologías. Entonces, todos los procesos se pueden definir en términos de fisicoquímica, bioquímica (incluida la microbiología) y la velocidad del proceso. Las tecnologías suspendidas requieren más energía para mantener el contacto entre los microorganismos y los nutrientes y por consiguiente altos tiempos de retención, generalmente de 22 días [6].

Los sistemas “blandos” usan reacciones bioquímicas a baja velocidad comparativa y la tasa de eficiencia generalmente se mejora aumentando el tiempo de retención hidráulica y ocupando grandes superficies. Por el contrario, los sistemas intensivos alcanzan altas velocidades de reacción bioquímica al forzar reacciones con la adición de oxígeno, reactivos específicos como nutrientes para los microorganismos o agitación (mecánica o por aire / oxígeno a presión), y una de sus principales ventajas es una buena relación eficiencia / espacio ocupado, que se determina con base en el caudal promedio a tratar en la planta y el tiempo de retención hidráulico, con el consiguiente cálculo del volumen del reactor requerido; según el volumen requerido para el tratamiento del agua, se analiza si se tiene esta disponibilidad de espacio.

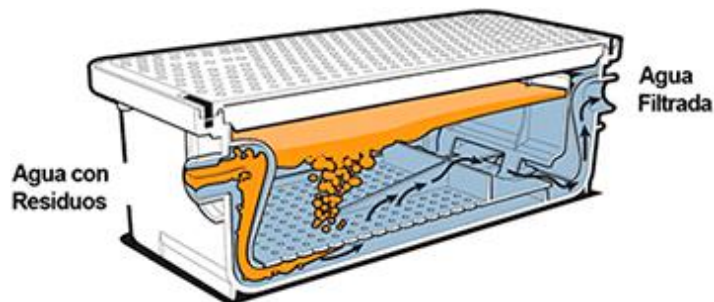
Adicionalmente a la determinación de la eficiencia de la planta, es de gran importancia la toma de decisión para la elección de la tecnología. Antes de decidir

qué tecnología debe implementarse para un sitio o uso dado, es necesario tener en cuenta la composición típica de las aguas residuales crudas; por otro lado se debe conocer el consumo de energía eléctrica, costo de inversión, costo de operación y mantenimiento, área posible construida, producción de lodos y producción de biogás [6].

6.1 Tratamiento preliminar

El objetivo del tratamiento preliminar es la separación de las grasas y el agua (estas trampas de grasas logran retener entre 9.7 a 90.8 Kg/m³ [7] de grasa teniendo en cuenta su tamaño). El tratamiento preliminar ayuda a eliminar o reducir el tamaño de los sólidos grandes (0,2 a 0,5 pulgadas), arrastrados, suspendidos o flotantes. Estos sólidos consisten en pedazos de madera, tela, papel, plásticos, basura, etc., junto con algo de materia fecal. Se separan los sólidos inorgánicos pesados, como la arena y la grava, así como el metal o el vidrio. Estos objetos se llaman arenilla y cantidades excesivas de aceites o grasas [7,8].

Ilustración 1. Trampa de Grasas



Fuente [9]

6.2 Tratamiento primario

El tratamiento primario está diseñado para eliminar sólidos orgánicos e inorgánicos mediante los procesos físicos de sedimentación y flotación. Aproximadamente el 25-50% de la demanda de oxígeno bioquímico, DBO₅, entrante, el 50-70% del total de sólidos en suspensión (SS) y el 65% del aceite y la grasa se eliminan durante el tratamiento primario. Parte del nitrógeno orgánico, el fósforo orgánico y los metales pesados asociados con los

sólidos también se eliminan durante la sedimentación primaria, pero los componentes coloidales y disueltos no se ven afectados. El efluente de las unidades de sedimentación primaria se conoce como efluente primario [8].

La función del tratamiento primario es eliminar la mayor cantidad de sólidos en suspensión posible. El tratamiento primario utiliza clarificadores o tanques de sedimentación, que eliminan las sustancias orgánicas sedimentables y los sólidos inorgánicos sedimentables de las aguas residuales. El efluente del tratamiento primario, por lo tanto, contiene principalmente sólidos orgánicos e inorgánicos coloidales y disueltos. Los estándares de efluentes recientes y los estándares de calidad del agua requieren un mayor grado de eliminación de compuestos orgánicos de las aguas residuales de lo que se puede lograr por tratamiento primario únicamente [8].

6.2.1 Coagulación / floculación

Las partículas que contiene el flujo de agua residual suelen ser de tamaños muy pequeños, lo que conforma una suspensión coloidal. Estas suspensiones suelen ser muy estables, en muchas ocasiones debido a interacciones eléctricas entre las partículas, por lo tanto, tienen una velocidad de sedimentación extremadamente lenta [10].

Aunque existe una forma de mejorar la eficiencia de estos sistemas de eliminación de partículas en suspensión la cual es la adición de ciertos reactivos químicos que, en primer lugar, desestabilicen la suspensión coloidal y luego favorezcan la floculación de las mismas para obtener partículas fácilmente sedimentables [10].

La adición de un coagulante neutraliza las cargas, produciendo un colapso en los iones de la molécula, que rodean los coloides de modo que puedan aglomerarse.

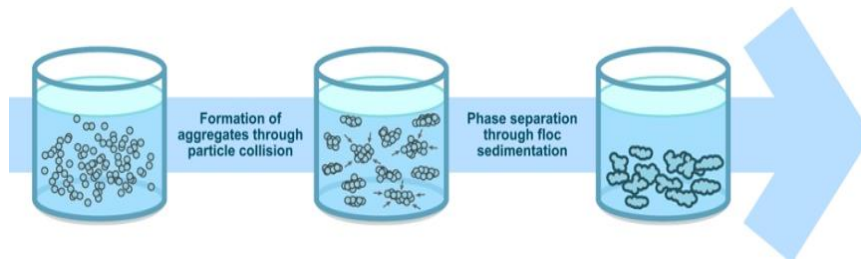
Los componentes utilizados son productos químicos que al adicionar al agua son capaces de producir una reacción química con los componentes químicos del agua, especialmente con la alcalinidad del agua para formar un precipitado voluminoso, absorbente, constituido generalmente por el hidróxido metálico del coagulante que se está utilizando. Los coagulantes más utilizados son el cloruro

férrico que opera mejor en un rango de pH entre 5,5 y 6,5; el policloruro de aluminio tiene amplio uso actualmente, debido a que opera en un mayor rango de pH desde niveles de 4 hasta valores altamente alcalinos de 11 y el sulfato de aluminio opera preferiblemente a valores básicos de pH [11].

La influencia de ciertas características en el agua es esencial para el desempeño del coagulante, estas son pH, temperatura, dosis del coagulante y agitación ya que determinan la eficiencia de la precipitación de las partículas del agua residual [11].

Y finalmente la floculación de estas partículas, es un proceso que consiste en la agitación de la masa coagulada que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad [11].

Ilustración 2. Coagulación y floculación



Fuente [12]

6.2.2 Sedimentación

Es un proceso físico de separación por gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo del sedimentador. Esta operación será más eficaz cuanto mayor sea el tamaño y la densidad de las partículas a separar del agua, es decir, cuanto mayor sea su velocidad de sedimentación [10].

6.3 Tratamiento secundario

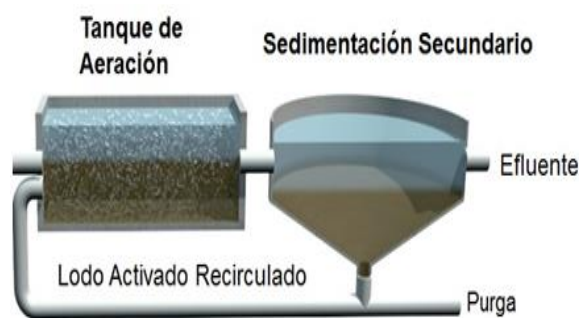
El objetivo del tratamiento secundario es el tratamiento posterior del efluente del tratamiento primario para eliminar los contaminantes orgánicos y los sólidos suspendidos.

En términos del tamaño de los sólidos, la distribución es aproximadamente 30% suspendida, 6% coloidal y aproximadamente 65% sólidos disueltos. La eliminación adicional de compuestos orgánicos se puede lograr mediante un tratamiento secundario. El proceso de tratamiento secundario consiste en el tratamiento biológico de las aguas residuales mediante la utilización de muchos tipos diferentes de microorganismos en un ambiente controlado. Se utilizan varios procesos biológicos aeróbicos para el tratamiento secundario que difieren principalmente en la manera en que se suministra oxígeno a los microorganismos y en la velocidad a la que los organismos metabolizan la materia orgánica [8].

6.3.1 Lodos activados

Es un sistema de mezcla completa, su nombre proviene de la producción de una masa activada de microorganismos capaz de estabilizar un residuo en medio aerobio. El ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de aireadores mecánicos, difusores o inyectores que también sirven para mantener el líquido en estado de mezcla completa. Al cabo de un periodo determinado de tiempo, la mezcla de las nuevas células con las antiguas se conduce hasta un tanque de sedimentación para ser separados. Una parte de las partículas sedimentadas se recirculan para mantener en el reactor la concentración de partículas deseadas, mientras que la otra parte se purga del sistema [13].

Ilustración 3. Lodos activados



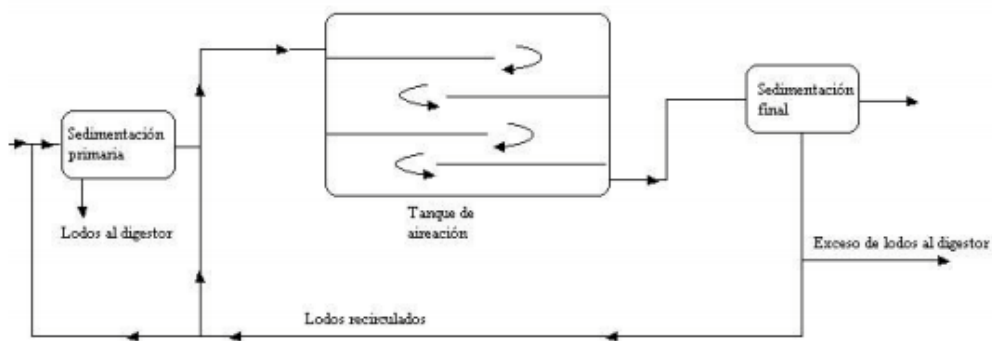
Fuente [13]

Existen diversas variaciones para desarrollar un sistema de lodos activados, enfocándose en reducir la inversión económica en operación del sistema. Por lo cual se asignaron nombre a los diferentes procesos de lodos activados, siendo estos:

Proceso convencional de lodos activados

El agua a tratar se mezcla con lodos activados que recirculan a la entrada del tanque de aireación, el volumen promedio de lodos recirculados esta entre el 20% y 30% del volumen de agua a tratar. El diseño del tanque de aireación esta dado para que el tiempo de residencia del agua sea de entre 6 y 8 horas, además de esto los lodos que recirculan deben tener un contenido de sólidos de 1000 a 2500 ppm del licor mixto. Para obtener mejores resultados, se debe tener en cuenta el índice de lodos y la edad de los mismos definiéndolos así cada planta de tratamiento. El promedio de eficiencia del proceso global de la planta esta entre 80-95% [14].

Ilustración 4. Proceso convencional de lodos activados

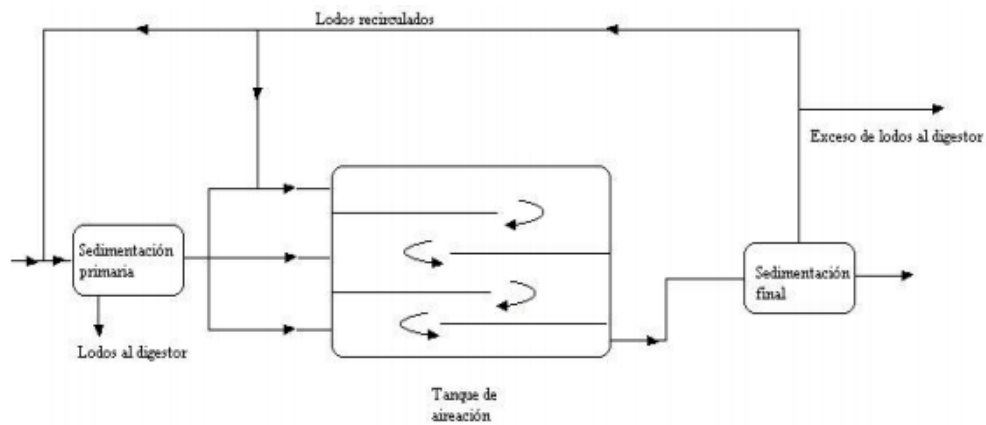


Fuente [14]

Aireación escalonada

Para este proceso el agua a tratar entra al tanque de aireación por diferentes lugares, aunque todos los lodos recirculados entran en el primer punto de entrada. Por lo cual la concentración de sólidos en el licor mixto es mayor en la primera etapa o lugar de entrada y va disminuyendo a medida que se introduce el agua a tratar en las etapas subsiguientes. En este proceso se logra un tratamiento equivalente a un proceso convencional de lodos activados en casi la mitad del tiempo, si los lodos tienen la edad adecuada para el tratamiento [14].

Ilustración 5. Aireación escalonada



Fuente [14]

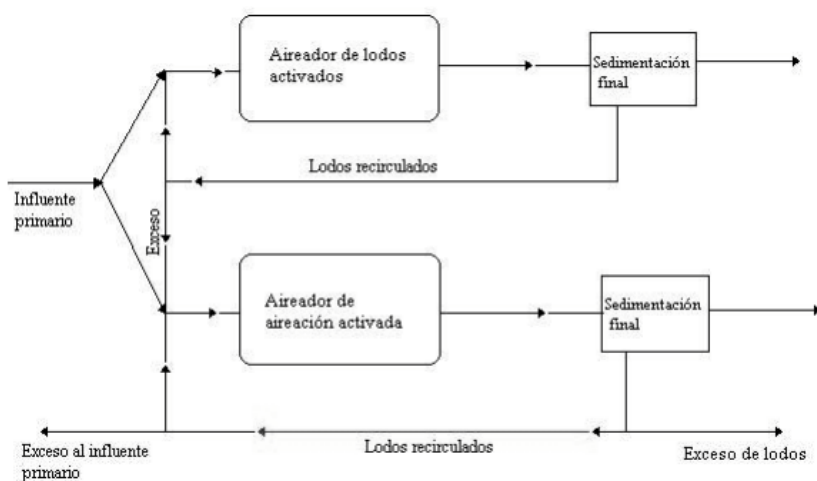
Aireación graduada

Este tratamiento de lodos activados se basó en la teoría de que el proceso necesita mayor cantidad de aire al principio del periodo de aireación, la cantidad de aire que se inyecta al agua a tratar varía dependiendo el caudal de la misma [14].

Aireación activada

En este tratamiento el tiempo de aireación es menos, lo que se hace es que el exceso de lodos activados que antes se desperdicia normalmente pasa a una sección de aireación activada que recibe una porción de agua a tratar sedimentada. En la sección de aireación activada se airea la porción de agua a tratar enviada con baja concentración de sólidos. (Entre 200-400 ppm) [14].

Ilustración 6. Aireación activada

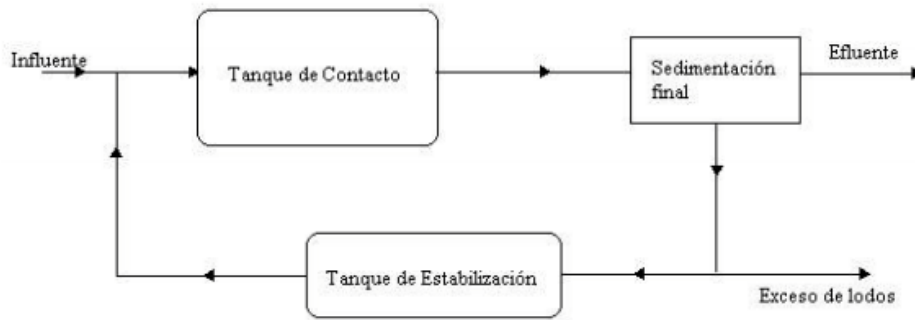


Fuente [14]

Estabilización por contacto

Para este proceso los lodos biológicamente activados se ponen en contacto con el agua a tratar entre 15-30 minutos solamente, tiempo en el cual los lodos activados absorben gran cantidad de la materia orgánica suspendida del agua a tratar. Después de esto, la mezcla fluye al tanque de sedimentación donde se separan los lodos llevándolos a un tanque regenerador donde se estabilizan y se regeneran por aireación [14].

Ilustración 7. Estabilización por contacto

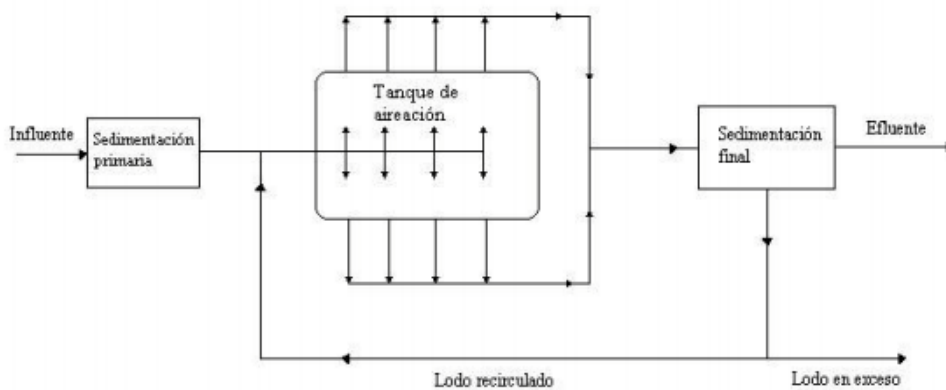


Fuente [14]

Completamente mezclados

El agua a tratar entra en el tanque donde se tiene aireadores mecánicos o de difusión de aire comprimido, por lo cual el contenido del reactor se mantiene más activo desarrollándose homogéneamente, una vez sedimentados una porción se recirculan y otro se descarga [14].

Ilustración 8. Completamente mezclado



Fuente [14]

Tabla 2. Parámetros de diseño para los procesos de lodos activados

Tipo de proceso	Tiempo	Edad	SSML	Retorno	F/M	Carga
-----------------	--------	------	------	---------	-----	-------

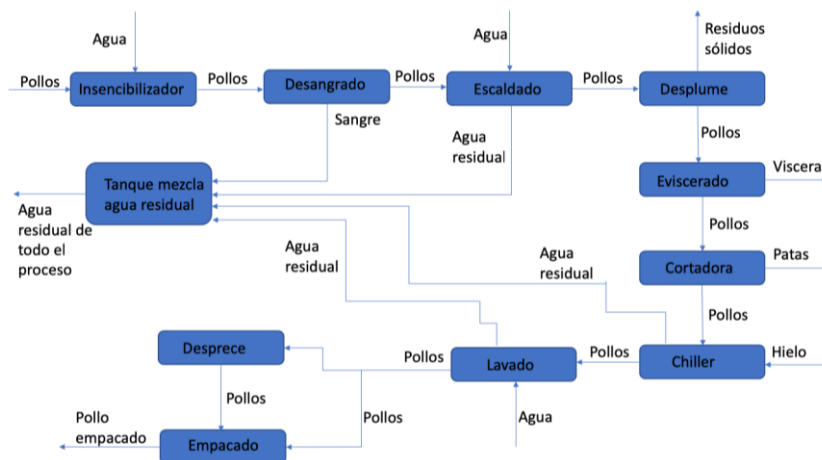
		de detención (horas)	de lodos (días)	(mg/L)	(fracción)	KgDBO ₅ /Kg SSVLMd	volumétrica KgDBO ₅ /m ³ d
Convencional		4 – 8	5 - 15	1.500- 3.000	0,25 - 0,5	0,2- 0,4	0,3 – 0,6
Completamente mezclado		4 – 8	5 – 15	2.500- 4.500	0,25 – 1,0	0,2 – 0,6	0,8 – 2,0
Aireación escalonada		3 – 5	5 – 15	2.000- 3.500	0,25 – 0,7	0,2 – 0,4	0,6 – 1,0
Estabilización	Contacto	0,5 - 1	5 - 15	1.000- 3.000	0,2 – 1,0		
	Estabilización	3 – 6	-	4.000- 10.000	-		
Aireación extendida		15 - 36	20 - 30	3.000- 6.000	0,75 – 1,5	0,05 – 0,15	0,1 – 0,4

Fuente [14]

6.4 Proceso de producción de carne de pollo

En la imagen 9 se muestra el proceso de producción de carne de pollo, en el que se identifican los procesos donde se generan vertimientos.

Ilustración 9. Diagrama de flujo proceso producción carne de pollo

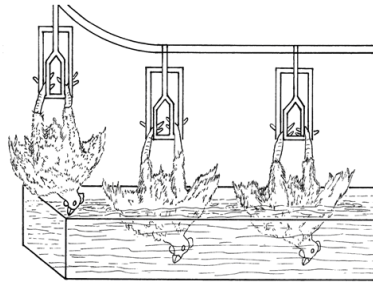


Fuente. Autores

Este proceso inicia con la fase de descarga y colgado, los pollos son descargados y liberados de su jaula hacia el área de colgado, se pueden utilizar bandas transportadoras automáticas o de forma manual, hasta ubicarlos en los ganchos de la cadena de procesamiento [15]

Posteriormente se encuentra el área de insensibilización o aturdimiento (Imagen 10), el cual tiene como objetivo causar la inconsciencia de las aves antes del sacrificio, existen dos métodos los cuales son por medio del shock eléctrico o cámara de gases [15].

Ilustración 10. Insensibilización o aturdimiento



Fuente. Diario oficial de la federación productora de carne de pollo

Luego a este aturdimiento, se encuentra el degüello. Existen varias formas para el degüello, pero la más utilizada es el degüello interno el cual consiste en cortar la vena yugular y la arteria carótida en la cavidad bucal con una navaja en forma de gancho [15].

En la etapa posterior denominada desangrado, es donde se tiene una pérdida de 30 a 50% del total de la sangre, con esta cantidad de desangrado el pollo podría ingresar a la etapa de escaldado (Imagen 11), a partir de este momento el animal ya se encuentra muerto, y consiste en hacer pasar las aves desangradas por un tanque con agua caliente por un determinado tiempo [15].

Ilustración 11. Escaldado



Fuente. Industrias MAC

Seguidamente el desplumado tiene la finalidad de remover las plumas de las canales y no se debe provocar desgarramiento de la piel. Se realiza por medio del roce de dedos de goma sobre las plumas mientras las aves escaldadas pasan a través de la desplumadora, para poder seguir a la etapa de desprendimiento de la cabeza, corte de patas, descolgado de patas y lavado previo a evisceración [15].

En la evisceración el retiro del buche y la tráquea son manuales para finalmente seguir a la etapa de enfriamiento o “chilling”, la cual se rige por los mismos principios del escaldado, donde la diferencia es la temperatura del agua. El enfriamiento se realiza en dos etapas, la primera es el pre-enfriamiento, consiste en el lavado de las canales e hidratación promedio y la segunda el enfriamiento final con una disminución rápida de la temperatura corporal y finalización de la etapa de adsorción del agua. Como adición es importante considerar la disponibilidad de agua para todo este proceso [15].

7. ALCANCE

El desarrollo del proyecto se verá influenciado por el interés de la industria avícola en la aplicación de la alternativa de tratamiento, ya que muchas empresas son esquivas frente a estos temas ambientales, además que varias se negaron en brindar la posibilidad de tomar muestras de sus aguas residuales para realizar el tratamiento. Lo que da a entender que, obteniendo buenos resultados en el desarrollo del mismo, las empresas se verán interesadas en la adaptación de sus tecnologías básicas con el fin de tratar sus vertimientos. Sin embargo es necesario aclarar que la alternativa de tratamiento se desarrolla a nivel laboratorio, generando resultados que posteriormente pueden ser llevados planta piloto para finalmente alcanzar el nivel industrial.

Los lodos activados utilizados se adquirieron de la empresa Byodine, ya que era de gran importancia obtener resultados de disminución de DQO en tiempos menores a 24 horas adquiriendo valores permitidos en la resolución 631 de 2015 y que para su implementación en la empresa se debe realizar el diseño y elaboración de lodos activados según necesidades de la planta de tratamiento para cada empresa, con los resultados obtenidos en el laboratorio.

8. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente trabajo se tuvieron en cuenta seis (6) diferentes etapas las cuales fueron:

8.1 Muestreo y caracterización agua residual cruda

Se realizó un muestreo simple de 5 litros del agua residual mezclada de los procesos donde es generada (escaldado, lavado y chiller) en el homogeneizador de la planta de la industria, de una empresa productora de carne empacada de pollo, debido a que el proceso de generación de aguas residuales de esta industria es por baches, y se caracterizó el agua residual de esta industria avícola ubicada en la zona industrial en Bogotá. Se separaron las grasas del agua residual en un embudo de decantación y, posteriormente, se determinaron los siguientes parámetros:

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos del agua residual

Parámetro	Método	Definición
pH	SM 4500 B	El pH corresponde al logaritmo negativo de la concentración de iones hidrogeniones. Se determina por un método electrométrico que detecta la actividad de los iones de hidrógeno; se realiza con ayuda de medidas potenciométricas. [16].
Turbiedad	SM 2130 B	Se basa en una comparación de la luz dispersada por la muestra tomada en

Parámetro	Método	Definición
		condiciones definidas, con la intensidad de la luz dispersada por una suspensión de referencia estándar en las mismas condiciones. El polímero de formacina se usa como la suspensión primaria de referencia estándar [17].
DQO	SM 5220 C Reflujo cerrado	La DQO es la demanda química de oxígeno y corresponde a la materia oxidable por un compuesto químico como el dicromato de potasio. Se determina mediante la oxidación de las sustancias orgánicas e inorgánicas presentes, en una solución ácida (H_2SO_4), con un exceso conocido de dicromato de potasio en presencia de sulfato de plata que actúa como agente catalizador y de sulfato mercurico adicionado para remover la interferencia de cloruros; después de la digestión el oxígeno consumido se determina por medio de espectrofotometría [18, 19].
Sólidos en suspensión	SM 2540	Los sólidos en suspensión corresponden al material insoluble presente en el agua. Se determina por medio de la filtración de una fracción de la muestra en papel filtro; después de esto el residuo retenido en el filtro se seca a una temperatura constante de 100°C [20].

Parámetro	Método	Definición
Sólidos sedimentables	SM 2540 cono Imhoff	Los sólidos sedimentables corresponden a la fracción de los sólidos en suspensión con densidad mayor que la del agua. Se determinan por método volumétrico en el cual los sólidos sedimentables son asentados en un cono Imhoff en un período de una hora aproximadamente, y representan la cantidad de lodo removible por sedimentación simple [21].

En la tabla anterior se muestran los parámetros determinados, así como el método empleado con base en los métodos normalizados para análisis de aguas potables, residuales, en la norma NTC-ISO/IEC 17025 [22].

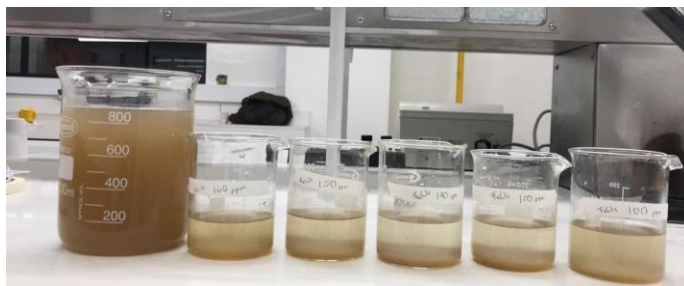
8.2 Determinación del punto isoeléctrico

Se determinó el punto isoeléctrico del agua residual, variando el pH del agua entre 4 y 9 por adición de ácido acético 1M y solución de hidróxido de sodio 0,1 M respectivamente, con el fin de obtener la mayor precipitación de materia orgánica.

8.3 Elección tipo y dosificación óptima de coagulante

Se ensayaron varios coagulantes (sulfato de aluminio, policloruro de aluminio y cloruro férrico) y mediante ensayos de pruebas de jarras se determinó la dosis de coagulante para obtener la mayor disminución de turbiedad y de materia orgánica. El pH utilizado fue el correspondiente al del punto isoeléctrico encontrado experimentalmente del agua residual.

Ilustración 12. Ensayo de jarras



8.4 Implementación de lodos activados

Para evaluar el efecto del tratamiento del agua residual con lodos activados, posterior al tratamiento con el mejor resultado de coagulante encontrado en la fase anterior, sobre la disminución de DQO, se realizó un tratamiento con microorganismos aerobios disponibles en el comercio por la empresa Byodine, con dosificación de aire mediante un compresor de 5W de potencia ensamblando en el ducto de salida un difusor para mejor distribución del aire, verificando que la concentración de oxígeno disuelto se mantuviera en 2 mg/L, para favorecer y acelerar la degradación y oxidación de la materia orgánica. El tratamiento de lodos activados utilizado corresponde a mezcla completa o completamente mezclados. Los reactores utilizados fueron vasos de precipitados de laboratorio de 250 mL. Posteriormente al tratamiento, el agua se dejó sedimentar en reposo durante una hora, donde se separan los lodos y se determinó la turbiedad y DQO en el agua tratada. Se ensayaron varias dosis de lodos activados (0,15%, 0,25% y 0,35%) para el tratamiento del agua residual sin tratamiento previo con coagulante y dosis a niveles un poco menores (0,1%, 0,15% y 0,2%), para el tratamiento del agua residual posteriormente tratada con el coagulante para el que se obtuvo la mayor disminución de materia orgánica y de turbiedad en la fase anterior. Todos los ensayos se realizaron a un tiempo constante de 2,5 horas y se halló el contenido de materia orgánica del agua tratada mediante determinación de DQO. Para cada ensayo se realizaron 2 réplicas. La unidad experimental fue de 150 ml de agua utilizada para cada ensayo.

Ilustración 13. Lodos activados



8.5 Caracterización agua residual tratada

El agua residual tratada se caracterizó por medio de análisis de los parámetros físico químicos expuestos en la Tabla 3 con base en los métodos normalizados para análisis de aguas.

8.6 Comparación de parámetros físicoquímicos con normatividad

A partir de los valores obtenidos de los análisis realizados al agua residual tratada, se compararon con los valores máximos permisibles para los parámetros evaluados según la resolución 0631 de 2015 [1]: pH, turbiedad, DQO, sólidos en suspensión y sólidos sedimentables.

9. RESULTADOS Y ANÁLISIS

9.1 Calidad del agua residual del proceso de producción de carne de pollo

Los resultados obtenidos de la caracterización de las aguas residuales, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros del agua residual del proceso de producción de carne de pollo

Parámetro	Réplicas	Determinación experimental	Límite máximo permisible (Resolución 0631 de 2015)
pH	Réplicas	6,6	6 – 9
		6,4	

	Promedio	6,5	
Turbiedad (NTU)	Réplicas	174,92	-
		174,66	
	Promedio	174,79	
DQO (mg/L O ₂)	Réplicas	32.400	650
		32.700	
	Promedio	32.550	
Sólidos suspendidos (mg/L)	Réplicas	540	100
		552	
	Promedio	546	
Sólidos sedimentables (mg/L)	Réplicas	210	2
		216	
	Promedio	213	

Se observa en la Tabla 4 que el parámetro contaminante más relevante es el contenido de materia orgánica reflejado en un valor de DQO de 32.550 mg/L de O₂, siendo el límite permisible de 650 mg/L de O₂. También el contenido de sólidos suspendidos y sedimentables se encuentran por encima de los límites máximos permisibles.

9.2 Punto Isoeléctrico del agua residual

El pH correspondiente al punto isoelectrico encontrado experimentalmente, corresponde al mismo pH del agua residual de 6,5. Al adicionar ácido acético 1M al agua residual se observaba mayor solubilidad de los sólidos contenidos inicialmente en ésta. Por incremento del pH al adicionar solución de hidróxido de sodio, no se observó formación de precipitado. Donde se observaron más sólidos en suspensión fue en el agua residual sin cambiar el pH que esta tenía.

Por consiguiente, para la dosificación de los coagulantes ensayados mediante pruebas de jarras, no se cambió el pH original del agua residual.

9.3 Tratamiento primario con coagulantes por prueba de jarras

9.3.1 Tratamiento con cloruro férrico, FeCl₃

TURBIEDAD

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos de turbiedad del agua residual tratada por pruebas de jarras con el coagulante cloruro férrico y en la Tabla 6 y Tabla 7 los tratamientos estadísticos para el análisis de varianza.

Tabla 5. Turbiedad prueba de jarras con cloruro férrico, FeCl₃

Dosificación de cloruro férrico (mg/L)	Turbiedad (NTU)	
	Réplicas	
130	8,13	9,08
140	7,80	8,78
150	18,79	15,27
160	12,37	7,18
170	12,87	7,34

Fuente. Autores

Tabla 6. Sumatorias y promedios de las réplicas turbiedad prueba de jarras con cloruro férrico, FeCl₃

Concentración coagulante (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Suma	Promedio
130	8,13	17,21	8,60
	9,08		
140	7,80	16,58	8,29

	8,78		
150	18,79	34,06	17,03
	15,27		
160	12,37	19,55	9,77
	7,18		
170	12,87	20,21	10,10
	7,34		
Sumatoria	107,61		

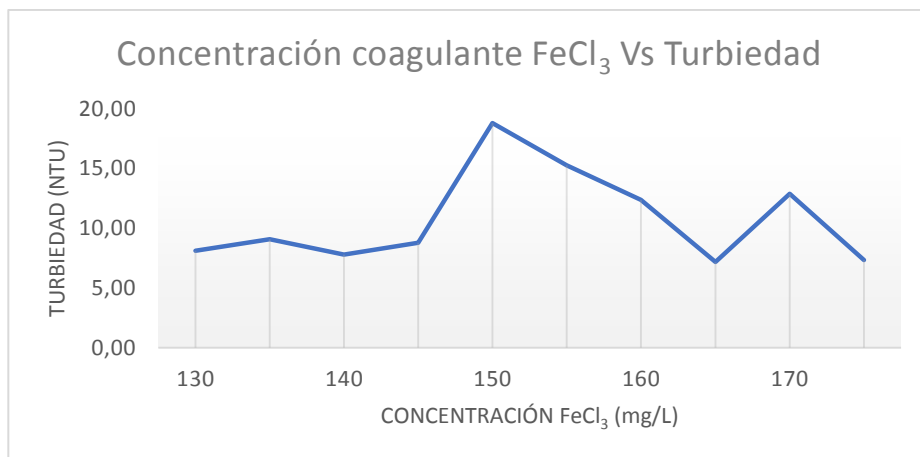
Fuente. Autores

Tabla 7. Análisis de varianza turbiedad prueba de jarras con cloruro férrico, FeCl₃

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F calculado	F tabulado
Concentración FeCl ₃	4	102,9	25,7	3,6	5,19
Error	5	35,9	7,2		
Total	9	138,8			

Fuente. Autores

Grafica 1. Turbiedad prueba de jarras con cloruro férrico FeCl₃



Fuente. Autores

Debido a que el F calculado es menor que el F tabulado, no hay diferencia significativa entre la turbiedad obtenida para las diferentes concentraciones de cloruro férrico (FeCl₃) ensayadas. Cada vez que se realice el tratamiento del agua residual, debe realizarse el ensayo de prueba de jarras dentro del rango de 130 a 170 mg/L de cloruro férrico, para determinar la dosis para la cual se obtiene la menor turbiedad.

Se obtuvo una disminución de turbiedad del agua residual sin tratar de 174,79 a valores menores de 20 unidades nefelométricas de turbiedad (NTU) que corresponde a una reducción del 86% de ésta.

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO, DQO:

Se realizó la curva de calibración para obtener la absorbancia en función de la demanda química de oxígeno, DQO, en mg/L en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 600 nm de acuerdo con el método SM 5220 utilizando solución de ftalato ácido de potasio a diferentes concentraciones, realizando oxidación con dicromato de potasio en medio ácido mediante reflujo durante 2 horas a 150°C y determinando la absorbancia. Los resultados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Curva de calibración de absorbancia en función de la demanda química de oxígeno (DQO)

DQO (mg/L O ₂)	Absorbancia
0,05	0,1550
0,15	0,2472
0,30	0,3605
0,45	0,4898
0,60	0,6065
0,75	0,7500
0,90	0,8234
1,00	0,9350
$A = 0,8082 * [DQO] + 0,1216$ Coeficiente de correlación lineal: $R = 0,9988$	

Los resultados de la demanda química de oxígeno, DQO, de la prueba de jarras con cloruro férrico, se muestran en la Tabla 9, y los correspondientes tratamientos estadísticos y análisis de varianza en la Tabla 10 y Tabla 11 respectivamente.

Grafica 2. Curva de calibración de absorbancia en función de la demanda química de oxígeno (DQO)

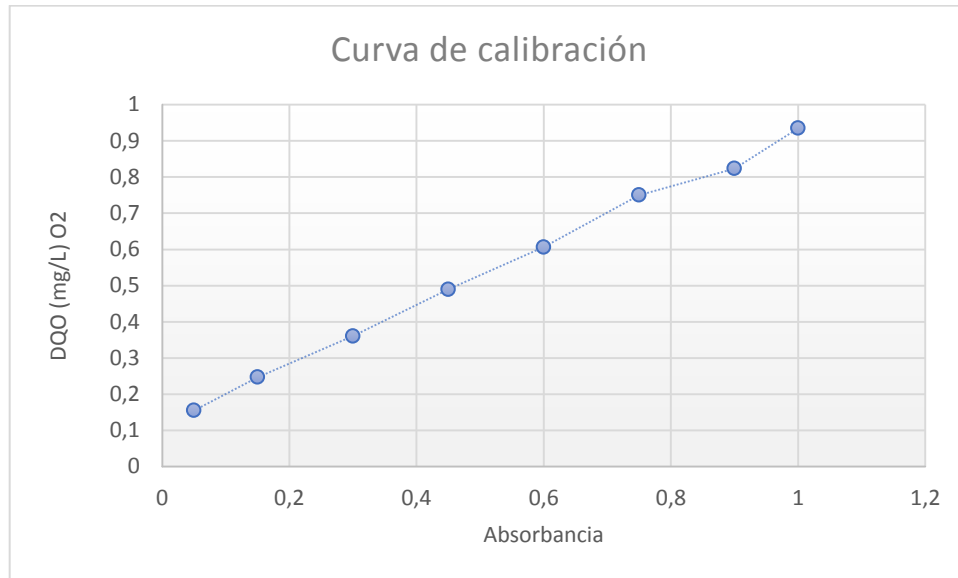


Tabla 9. DQO prueba de jarras con cloruro férrico, FeCl₃

Dosificación de cloruro férrico (mg/L)	DQO (mg/L O ₂)	
	Réplicas	
130	5.326	5.389
140	5.247	5.372
150	6.550	6.519
160	6.048	5.970
170	6.211	6.034

Fuente. Autores

Tabla 10. Sumatorias y promedios de las réplicas prueba de jarras con cloruro férrico, FeCl₃

Concentración coagulante (mg/L)	DQO (mg/L O ₂)	Suma	Promedio
130	5.326	10.715	5.358
	5.389		

140	5.247	10.619	5.310
	5.372		
150	6.550	13.069	6.535
	6.519		
160	6.048	12.018	6.009
	5.970		
170	6.211	12.245	6.123
	6.034		
Sumatoria	58.666		

Fuente. Autores

Tabla 11. Análisis de varianza DQO prueba de jarras con cloruro férrico, FeCl₃

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F calculado	F tabulado
Concentración FeCl ₃	4	2'273.188	568.297	98,04	5,19
Error	5	28.984	5.797		
Total	9	2'302.172			

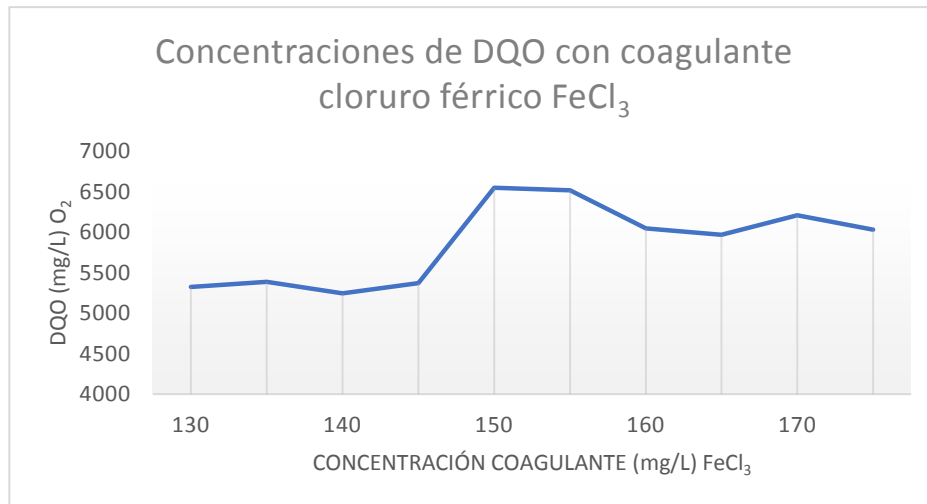
Fuente. Autores

Debido a que el F calculado es mayor que el F tabulado, sí hay diferencia significativa entre la demanda química de oxígeno, DQO, obtenida para las diferentes concentraciones de cloruro férrico (FeCl₃) ensayadas, ésto indica que se debe realizar un ensayo de jarras para cada muestra de agua, ya que siempre se va a encontrar una variación en la cantidad de coagulante (FeCl₃) a utilizar; por consiguiente, es necesario que en el laboratorio de la industria de pollos realicen diariamente el ensayo de prueba de jarras para determinar la dosis de coagulante a aplicar en la planta.

Se obtuvo una disminución de DQO desde 32.550 mg/L de O₂ del agua residual sin tratar hasta 5.310 mg/L de O₂ del agua residual tratada con cloruro férrico con dosificación de 140 mg/L que corresponde a una reducción del 83,7% de ésta. A pesar de que la disminución del contenido de materia orgánica es significativa, aún se encuentra en una concentración muy superior al límite máximo permisible de 650 mg/L de O₂ requerido

según la Resolución 0631 de 2015. Por consiguiente, es necesario un tratamiento secundario con lodos activados para disminuir aún más el contenido de DQO.

Grafica 3. DQO prueba con coagulante cloruro férrico, FeCl_3



9.3.2 Tratamiento con sulfato de aluminio, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

TURBIEDAD

En la Tabla 12 se presentan los resultados obtenidos de turbiedad del agua residual tratada por pruebas de jarras con el coagulante sulfato de aluminio y en la Tabla 13 y Tabla 14 los tratamientos estadísticos para el análisis de varianza. En las réplicas se puede evidenciar una diferencia alta de resultado en la turbiedad, esto se debe a que las muestras de agua residual caracterizadas corresponden a días diferentes y reflejan procesos no estandarizados en la planta de procesos, donde pueden utilizar la misma cantidad de agua de lavado para diferentes cargas de producción, por ende el agua residual cambiaba sus propiedades, concluyendo así que para cada muestra de agua es necesario realizar un ensayo de jarras para determinar la cantidad de coagulante.

Tabla 12. Turbiedad prueba de jarras con sulfato de aluminio, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Dosificación de sulfato de aluminio	Turbiedad (NTU)

180	19,31	33,45
190	30,6	48,6
200	15,31	29,7
210	35,89	41,6
220	34,4	40,8

Fuente. Autores

Tabla 13. Sumatorias y promedios de las réplicas de turbiedad prueba de jarras con sulfato de aluminio, $Al_2(SO_4)_3$

Concentración coagulante (mg/L)	Turbiedad	Suma	Promedio
180	19,31	52,76	26,38
	33,45		
190	30,60	79,20	39,60
	48,60		
200	15,31	45,01	22,50
	29,70		
210	35,89	77,49	38,74
	41,60		
220	34,30	75,10	37,55
	40,80		
Sumatoria	329,56		

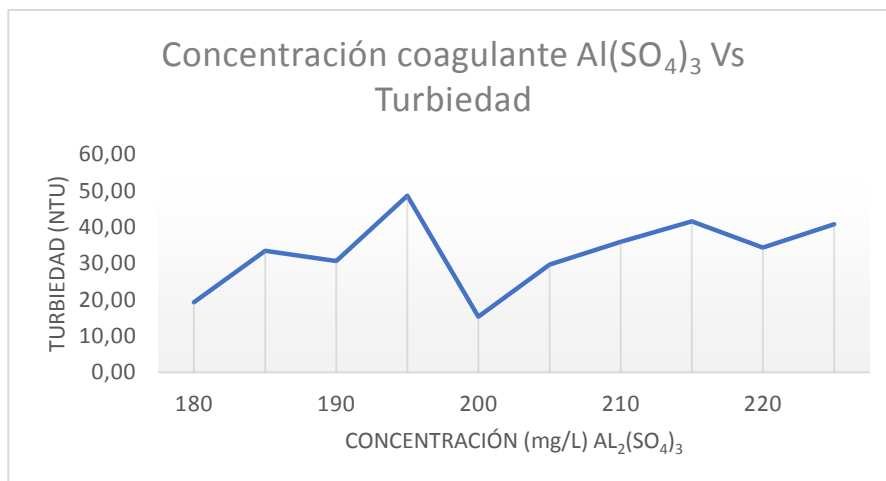
Fuente: Autores

Tabla 14. Análisis de varianza DQO prueba de jarras con sulfato de aluminio, $Al_2(SO_4)_3$

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F calculado	F tabulado
Concentración de $Al_2(SO_4)_3$	4	11.865,9	2.966,5	1,35	5,19
Error	5	10.959,5	2.191,9		
Total	9	905,4			

Fuente. Autores

Grafica 4. Turbiedad prueba de jarras con sulfato de aluminio, $Al_2(SO_4)_3$



Fuente. Autores

Debido a que el F calculado es menor que el F tabulado, no hay diferencia significativa entre las diferentes concentraciones de sulfato de aluminio, $Al_2(SO_4)_3$, ensayadas. Los resultados de disminución de turbiedad por prueba de jarras fueron más satisfactorios con el coagulante cloruro férrico que con sulfato de aluminio. Por consiguiente, no se determinó DQO para los tratamientos con este último coagulante.

Con policloruro de aluminio no se obtuvo clarificación del agua en los rangos de concentración ensayados desde 50 mg/L hasta 500 mg/L, ya que este coagulante reacciona con mayor efectividad a valores de pH básicos, y el agua residual a tratar tenía valores de pH inferiores a éste.

9.4 Tratamiento con lodos activados

En la Tabla 15 se muestran los resultados obtenidos de DQO del agua residual tratada con lodos activados, para los casos siguientes: con tratamiento previo con cloruro férrico como coagulante y sin tratamiento previo con coagulante. En la Tabla 16 se presenta el tratamiento estadístico y en la Tabla 17 el análisis de varianza. La cantidad de inóculo fue pesada para cada ensayo con base en el porcentaje respectivo a utilizar.

Tabla 15. DQO obtenida por tratamiento con lodos activados con tratamiento previo con coagulante y sin coagulante

LODOS ACTIVADOS			
SIN COAGULANTE		CON COAGULANTE	
%p/v LODOS	DQO (mg/L)	%p/v LODOS	DQO (mg/L)
0,15	760	0,1	680
0,15	640	0,1	624
0,25	720	0,2	696
0,25	1080	0,2	1008
0,35	800	0,3	1.320
0,35	1.480	0,3	1.400

Fuente. Autores

Tabla 16. Sumatorias y promedios de las réplicas para tratamiento con lodos activados y tratamiento previo con coagulante FeCl₃

Concentración lodos (%p/v)	Tratada con coagulante	Sumatoria	Promedio
0,1	680	1304	652
	624		
0,2	696	1704	852
	1008		
0,3	1320	2720	1360
	1400		
Sumatoria	5728		

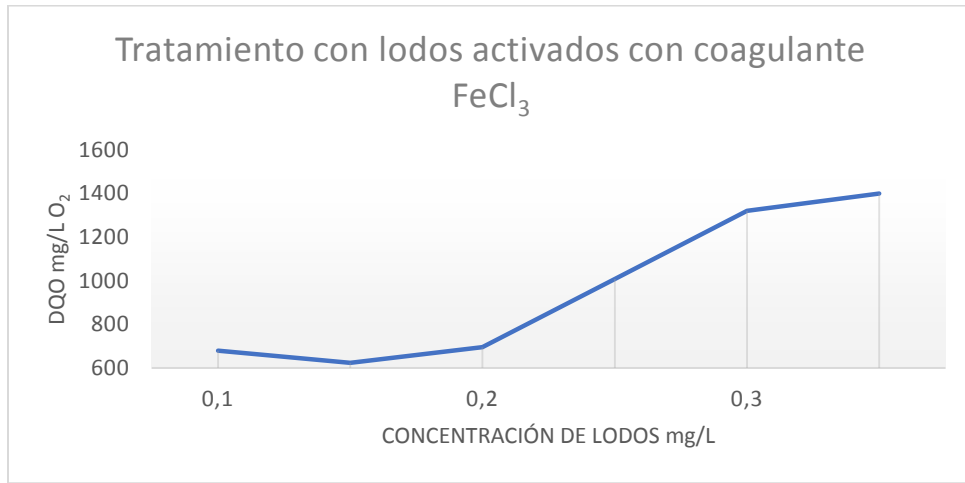
Fuente. Autores

Tabla 17. Análisis de varianza DQO tratamiento con lodos activados y tratamiento previo con coagulante FeCl₃

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F calculado	F tabulado
Concentración lodos (%p/v)	2	532.885,3	266.442,7	14,95	9,55
Error	3	53.440	17.813,3		
Total	5	586.325,3			

Fuente. Autores

Grafica 5. DQO Vs Concentración de lodos activados con coagulante FeCl₃



Fuente. Autores

El F calculado es mayor que el F tabulado, por consiguiente, sí hay efecto significativo en el porcentaje de lodos utilizados en el rango ensayado. Esto quiere decir que, para cada muestra de agua, no será necesario un ensayo diferente ya que el rango de resultado es bastante amplio el valor a utilizar de lodos activados es notorio.

En la Tabla 18 se presenta el tratamiento estadístico y en la Tabla 19 el análisis de varianza del agua tratada con lodos activados sin tratamiento previo con coagulante.

Tabla 18. Sumatorias y promedios de las réplicas de agua residual tratada con lodos activados sin coagulante

Concentración lodos (%p/v)	Sin coagulante	Sumatoria	Promedio
0,15	760	1.400	700
	640		
0,25	720	1.800	900
	1.080		
0,35	800	2.280	1.140
	1.480		

Sumatoria	5.480		
-----------	-------	--	--

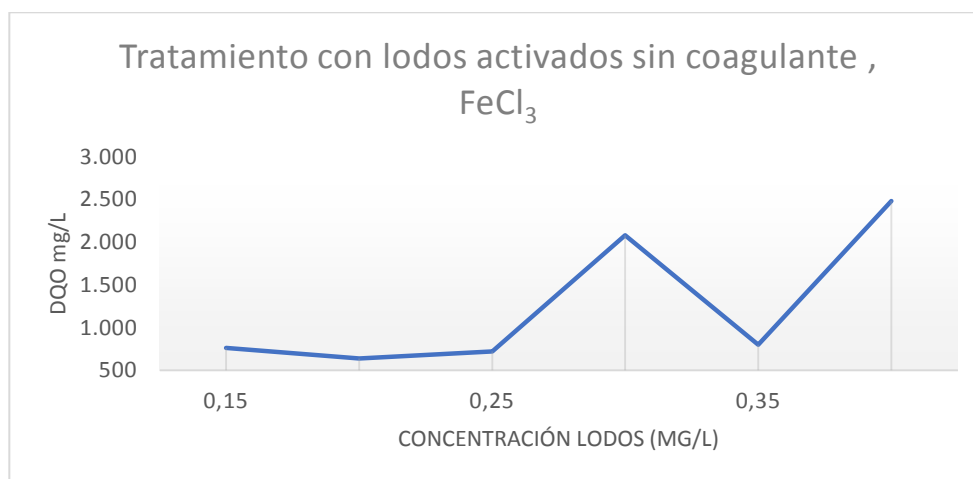
Fuente. Autores

Tabla 19. Análisis de varianza DQO tratamiento con lodos activados sin coagulante

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F calculado	F tabulado
Concentración lodos (%p/v)	2	194.133,3	97.066,7	0,96	9,55
Error	3	303.200	101.066,7		
Total	5	497.333,3			

Fuente. Autores

Grafica 6. DQO Vs Concentración de lodos activados sin coagulante



Fuente. Autores

El F calculado es menor que el F tabulado, por consiguiente, no hay efecto significativo en el porcentaje de lodos utilizados en el rango ensayado. Por lo que se puede utilizar cualquier porcentaje de lodos activados dentro del rango ensayado, ya que no afecta el resultado.

Debido a que se obtuvieron contenidos de DQO cercanos al cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015 de 650 mg/L de O₂, pero no inferiores, se realizó por duplicado otro ensayo incrementando el tiempo de tratamiento con lodos activados de 2,5 horas a 5

horas, con los porcentajes de lodos para los que se obtuvieron las menores concentraciones de DQO. Los resultados se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. DQO obtenida por tratamiento con lodos activados con tratamiento previo con coagulante y sin coagulante. Tiempo de 5 horas con lodos activados

LODOS ACTIVADOS			
SIN COAGULANTE		CON COAGULANTE	
%p/v LODOS	DQO (mg/L)	%p/v LODOS	DQO (mg/L)
0,15	320	0,1	580
0,15	340	0,1	550

Fuente. Autores

De los resultados obtenidos en la Tabla 19, se observa que al incrementar el tiempo de tratamiento con lodos activados de 2,5 horas a 5 horas, se obtiene DQO por debajo del límite máximo permisible, siendo más favorable no utilizar previamente coagulante, posiblemente porque la presencia de iones cloruro del coagulante cloruro férrico, inhibe o dificulta la acción de los microorganismos aerobios, debido a que la presencia de metales pesados como el hierro que ejercen este efecto inhibitorio en el crecimiento y acción de los microorganismos.

En la Tabla 21 se muestran los resultados de los parámetros del agua antes y después del tratamiento con lodos activados durante 5 horas sin tratamiento previo con coagulante.

Tabla 21. Parámetros del agua residual del proceso de producción de carne de pollo

Parámetro	Agua sin tratar	Agua tratada	Límite máximo permisible (Resolución 0631 de 2015)
pH	6,5	6,7	6 - 9
Turbiedad (NTU)	174,79	10,4	-
DQO (mg/L O ₂)	32.550	330	650
Sólidos suspendidos (mg/L)	546	0	100
Sólidos sedimentables (mg/L)	213	0	2

Se observa en la Tabla 4 que el parámetro contaminante más relevante es el contenido de materia orgánica reflejado en un valor de DQO de 32.550 mg/L de O₂, siendo el límite permisible de 650 mg/L de O₂. También el contenido de sólidos suspendidos y sedimentables se encuentran por encima de los límites máximos permisibles.

CONCLUSIONES

- Las aguas residuales del proceso de producción de carne de pollo tienen concentraciones elevadas de materia orgánica con DQO promedio de 32.550 mg/L de O₂, que por su origen biológico, pueden ser tratadas con microorganismos aerobios que degradan la materia orgánica, sin requerimiento de tratamiento preliminar con coagulantes.
- El pH del agua residual (6,4 – 6,7) fue favorable tanto para el proceso de tratamiento con lodos activados como para el tratamiento primario con coagulantes, debido a que este pH corresponde al del punto isoeléctrico y, por consiguiente, no es necesario ajustarlo a valores diferentes.
- El cloruro férrico presentó mejores resultados como coagulante para disminuir turbiedad y materia orgánica en dosis entre 140 y 160 mg/L comparado con el sulfato de aluminio; sin embargo, solamente se alcanzó disminución de DQO hasta 5.300 mg/L de O₂, siendo necesario el tratamiento con lodos activados para alcanzar los límites permisibles.
- El tiempo de tratamiento del agua residual del proceso de producción de carne de pollo con lodos activados es relevante, siendo insuficiente 2,5 horas, requiriendo 5 horas para obtener una concentración de DQO por debajo de los límites máximos permisibles de 650 mg/L según la Resolución 0631 de 2015.
- El sistema de tratamiento con lodos activados utilizado, correspondiente a un sistema “completamente mezclados”, alcanzó a disminuir la concentración de DQO de 32.550 mg/L de O₂ hasta niveles menores a 400 mg/L en 5 horas de tratamiento, con cumplimiento del límite máximo permisible de 650 mg/L de DQO según la Resolución 0631 de 2015. Este tiempo viabiliza su implementación industrial, que presenta una ventaja sobre los tratamientos anaerobios que requieren varios días de proceso para la degradación de la materia orgánica.

RECOMENDACIONES

- El sistema de aireación con difusores en el proceso con lodos activados incrementa la eficiencia del proceso para la degradación de la materia orgánica, siendo menos favorable la aireación por ductos sin el uso de difusores, debido a que el menor tamaño de la burbuja de aire, genera mejor distribución del mismo en el agua a tratar.
- Se recomienda implementar el tratamiento con coagulantes después del tratamiento con lodos activados, para considerar la posibilidad de reutilizar el agua tratada.
- Es indispensable que el inóculo a utilizar, sea uno ya desarrollado, para que así el proceso de lodos activados sea de un tiempo mínimo a implementar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. D. A. Y. D. SOSTENIBLE, «RESOLUCIÓN 631 DE 2015,» Bogotá, 2015.
- [2] A. m. d. Bogotá, «Por la cual se establece la normatividad para el control y manejo de vertimientos realizados a la red de alcantarillado público en el Distrito Capital,» Bogotá, 2009.
- [3] Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. APHA, AWWA, WPCF. Díaz de Santos. 1997.
- [4] M. A. Pinzón, «PROPUESTA DE DISEÑO DE UN MÓDULO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA PEQUEÑAS EMPRESAS DE JUGOS CÍTRICOS EN BOGOTÁ,» Bogotá, 2012.
- [5] Y. Caldera, «EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE INDUSTRIA AVÍCOLA,» Wastewater Treatment System Evaluation of a Poultry Industry, vol. XX, 2010.
- [6] M. Salgot, «Wastewater treatment and water reuse, » *ELSEVIER*, p. 25, 2017.
- [7] Durman, «Trampa de grasas,» Bogotá, 2018.
- [8] A. Sonune, «Developments in wastewater treatment methods, » *Desalination*, pp. 55 - 63, 2004.
- [9] QUIMA, *Trampa de grasas*, Mexico, 2018.
- [10] C, Envitech, «Filtración mediante membranas para el tratamiento aguas residuales,» Barcelona, 2017.
- [11] Y. A. Cárdenas, «COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN,» Lima, 2000.
- [12] C. H. R. M., «DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO POR REFLUJO,» IDEAM, Bogotá, 2007.

- [13] L. Méndez, «TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE LODOS,» *Instituto de Investigación FIGMMG*, vol. 7, nº 14, pp. 74-83, 2004.
- [14] L. F. G. Valencia, *Arranque y operacion de un reactor experimental de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales urbanas*, Manizales, 2003.
- [15] D. R. Saldaña, «La carne de pollo (procesamiento),» Trillas, México, 2011.
- [16] Ceibas, «Determinación De PH En Laboratorio Y Campo SM4500H+,» Neiva, 2017.
- [17] Nemi, «2130 B. Nephelometric Method,» EPA, United States, 2000.
- [18] C. H. R. M., «DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO POR REFLUJO,» IDEAM, Bogotá, 2007.
- [19] U. t. d. Santander, *Demanda química de oxígeno*, Santander: Calameo, 2012.
- [20] A. M. MOLINA, «EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LA REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS,»
- [21] M. A. G. Duque, «Propuesta para la adecuada disposición de los vertimientos líquidos de la empresa AlucolLtda,» Pereira, 2010.
- [22] IDEAM, «LISTA DE LABORATORIOS AMBIENTALES ACREDITADOS POR EL IDEAM- MATRIZ AGUA,» Bogotá, 2016.
- [23] R. Devi, «COD and BOD removal from domestic wastewater, » *Bioresource Technology*, pp.
- [24] L. BOERIU, «THE TERTIARY TREATMENT STAGE, » *Bulletin of the Transylvania University of Braşov*, vol. 6, 2013.
- [26] A. H. Sabeen, «Quantification of environmental impacts of domestic wastewater, » *Journal of Cleaner Production*, pp. 221-233, 2018.
- [27] Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. APHA, AWWA, WPCF. Díaz de Santos. 1997.
- [28] M. O. N. R., «DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO 5 días, INCUBACIÓN,» IDEAM, Bogotá.