

**DETERMINACIÓN Y EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE UNA
TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO Y REÚSO DE AGUA EN LA LAVANDERÍA DEL
HOSPITAL PABLO TOBÓN URIBE**

**INVESTIGADORAS:
MARÍA ALEJANDRA ARAQUE MESA
CATALINA MERA ARCILA**

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS
MEDELLÍN
2014**

**DETERMINACIÓN Y EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE UNA
TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO Y REÚSO DE AGUA EN LA LAVANDERÍA DEL
HOSPITAL PABLO TOBÓN URIBE**

INVESTIGADORAS:

**MARÍA ALEJANDRA ARAQUE MESA
CATALINA MERA ARCILA**

**Proyecto de Grado para optar al
Título de Ingeniero de Procesos**

ASESOR:

MSc. Yuan Constantino Kuan Duque

CO-ASESOR:

MSc. Ana Patricia Restrepo Mejía

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS
MEDELLÍN
2014**

Nota de aceptación

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Ciudad y fecha (día/mes/año)

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a las personas que les dieron la oportunidad de adelantar este trabajo de investigación como proyecto de grado para optar a su título como Ingenieras de Procesos:

Msc Yuan Constatino Kuan Duque asesor del proyecto

Msc. Ana Patricia Restrepo Mejía co-asesora del proyecto, por la asesoría, la colaboración, el apoyo durante toda la realización del proyecto.

Al ingeniero Nicolás Atehortúa y a todo el personal de la lavandería del Hospital Pablo Tobón Uribe, por su paciencia y suministración de la información necesaria para la realización del proyecto.

A los ingenieros de Tepsa, Hernán Restrepo y John Jaime Restrepo por su ayuda, paciencia, accesoria durante la etapa de experimentación.

Finalmente, a nuestras familias por su apoyo incondicional y paciencia durante toda la realización de este proyecto y de nuestro pregrado.

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCIÓN	2
3. OBJETIVOS.....	5
3.1 OBJETIVO GENERAL	5
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
4. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE ANTECEDENTES	6
4.1 Consumo de agua en hospitales:	6
4.2 Aguas residuales en hospitales.....	7
4.3 Reutilización del agua.....	9
4.4 Lavanderías Hospitalarias	10
4.4.1 Operación de lavanderías hospitalarias.....	10
4.5 Reutilización de agua en Hospitales	11
4.6 Tecnologías de reutilización de agua.....	12
4.6.1 Coagulación y Floculación	12
4.6.2 Ozonización	13
4.6.3 Procesos avanzados de oxidación (PAO'S)	14
4.6.4 Filtración	14
4.7 Antecedentes	15
5. DISEÑO METODOLÓGICO.....	18
5.1 Diagnostico preliminar de la lavandería.....	18
5.2 Aforos de caudal	19
5.3 Balances de materia del proceso de lavado	20
5.4 Matriz de selección de alternativas	20
5.5 Seguimiento y caracterización de la calidad fisicoquímica del efluente	22
5.5.1 Identificación del punto de monitoreo	22

5.5.2 Toma de muestras	23
5.6 Comparación de las características fisicoquímicas del efluente con la normatividad vigente de vertimientos	24
5.7 Evaluación del potencial de reúso de agua	24
5.8 Cuadro de decisión para la determinación del tratamiento de aguas residuales	25
5.9 Evaluación de tecnologías de tratamiento de aguas residuales	25
5.9.1 Experimentación de coagulación y floculación	25
5.9.1.1 Recolección de muestras representativas.....	26
5.9.1.2 Prueba de jarras	26
5.9.1.2.1 Preparación de soluciones de productos a evaluar	28
5.9.1.2.2 Condiciones de operación.....	28
5.9.1.2.3 Adición del floculante	29
5.9.1.3 Determinación del índice volumétrico de lodos (IVL).....	31
5.9.1.4 Determinación del índice másico de generación de lodos (IML).....	31
5.9.2 Filtración del clarificado	32
5.9.3 Desinfección con Cloro	32
5.10 Medición de calidad del agua tratada.....	32
5.10.1 Turbiedad	33
5.10.2 pH.....	33
5.10.3 Conductividad.....	33
5.10.4 Sólidos suspendidos totales.....	33
5.10.5 Coliformes totales	33
5.10.6 Dureza.....	34
5.10.7 Alcalinidad	34
5.10.8 DQO	34
5.11 Análisis de factibilidad técnica, económica y ambiental.....	35

5.11.1 Factibilidad técnica	35
5.11.1.1 Dimensionamiento de equipos	35
5.11.1.1.1 Bombas	35
5.11.1.1.2 Tanques	36
5.11.1.1.3 Agitadores	36
5.11.1.1.4 Clarificador de Lamelas	36
5.11.1.1.5 Filtro de arena a presión	39
5.11.2 Factibilidad económica	41
5.11.3 Factibilidad ambiental	42
6. RESULTADOS Y DISCUSIONES	43
6.1 Diagnóstico y caracterización inicial del efluente	43
6.1.1 Consumo de Agua	43
6.1.2 Índice de consumo de Agua	43
6.1.3 Caracterización	44
6.1.3.1 Resultados	44
6.1.3.2 Biodegradabilidad del efluente	48
6.2 Potencial de reúso del agua	48
6.3 Comparación de las características fisicoquímicas del efluente con la normatividad vigente de vertimientos	51
6.4 Balances de materia del proceso de lavado	52
6.5 Matriz de selección de alternativas	54
6.6 Cuadro de decisión para la determinación del tratamiento de aguas residuales	56
6.7 Resultados obtenidos de la evaluación de tecnologías de tratamiento de aguas residuales	58
6.7.1 Primer ensayo de tratabilidad	58
6.7.2 Segundo ensayo de tratabilidad	62
6.7.3 Tercer ensayo de tratabilidad	66

6.8 Medición calidad de agua tratada	69
6.8.1 Resultados de tratabilidad para el primer ensayo	69
6.8.2 Resultados de tratabilidad para el segundo ensayo.....	71
6.8.3 Resultados de tratabilidad para el tercer ensayo.....	74
6.8.4 Comparativo ensayos de tratabilidad.....	76
6.9 Análisis de factibilidad técnica, económica y ambiental.....	78
6.9.1 Resultados de factibilidad técnica.....	78
6.9.1.1 Bombas	78
6.9.1.2 Tanques.....	79
6.9.1.3 Agitadores.....	80
6.9.1.4 Clarificador de Lamelas	80
6.9.1.5 Filtro de arena por presión	81
6.9.2 Resultados de factibilidad económica	81
6.9.2.1 Costos de operación	81
6.9.2.1.1 Costos de químicos	81
6.9.2.1.2 Costo de disposición de lodos	82
6.9.2.1.3 Costo de energía	82
6.9.2.1.4 Mano de obra	83
6.9.2.2 Costo de equipos	83
6.9.2.2.1 Bombas	83
6.9.2.2.2 Tanques.....	84
6.9.2.2.3 Agitadores.....	85
6.9.2.2.4 Clarificador de Lamelas	85
6.9.2.2.5 Filtro de arena por presión	85
6.9.2.3 Costo total de la inversión.....	85
6.9.2.4 Costo actual de captación y vertimiento de agua	86

6.9.2.5 Ahorro de agua con la implementación de la planta de tratamiento.....	86
6.9.2.6 Gastos mensuales de la planta de tratamiento y la lavandería	86
6.9.2.7 Flujo de caja y tiempo de retorno de inversión	87
CONCLUSIONES.....	88
RECOMENDACIONES	90
ANEXOS	92
ANEXO 1	92
ANEXO 2.....	94
ANEXO 3.....	95
BIBLIOGRAFÍA.....	97

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Punto de monitoreo	23
Ilustración 2. Test de jarras	27
Ilustración 3. Zona de lavado y recepción de ropa sucia	92
Ilustración 4. Zona de pesaje y clasificación de ropa.....	92
Ilustración 5. Llenado de las lavadoras.....	93
Ilustración 6. Sistema de dosificación de químicos y detergentes usados en el proceso	93
Ilustración 7. Zona de planchado y doblado.....	93

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. pH vs Tiempo caracterización inicial del efluente	45
Gráfico 2. Temperatura vs Tiempo para el efluente caracterizado	45
Gráfico 3. Conductividad vs Tiempo para el efluente caracterizado.....	46
Gráfico 4. Resultados obtenidos de la matriz de selección de alternativas	55
Gráfico 5. Polígono obtenido de la matriz de selección de alternativas	56
Gráfico 6. Dosis de coagulante vs Turbiedad para el primer ensayo	60
Gráfico 7. Resultados de cloro residual para el primer ensayo.....	62
Gráfico 8. Dosis de coagulante vs Turbiedad para el segundo ensayo.....	63
Gráfico 9. Resultados de cloro residual para el segundo ensayo.....	65
Gráfico 10. Dosis de coagulante vs Turbiedad para el tercer ensayo.....	66
Gráfico 11. Resultados de cloro residual para el tercer ensayo.....	68
Gráfico 12. Comparación turbiedad versus Dosis de coagulante para los 3 ensayos	77
Gráfico 13. Comparación DQO versus Dosis de coagulante para los 3 ensayos	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Resultados obtenidos por Gautam, Kumar y Sabumon en 2007	17
Figura 2. Sistema de recirculación sin tratamiento	49
Figura 3. Sistema de recirculación con tratamiento	50
Figura 4. Diagrama balance proceso de lavado	53
Figura 5. Resumen de resultados Matriz de selección de alternativas	55
Figura 6. Tren de tratamiento de aguas para la lavandería del HPTU	58
Figura 7. Diagrama de flujo para la planta de tratamiento de agua	94

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de algunas aguas residuales hospitalarias	8
Tabla 2. Parámetros recomendados para el lavado de ropa en lavanderías hospitalarias	11
Tabla 3. Consumo de agua por cantidad de ropa lavada en la lavandería	18
Tabla 4. Especificaciones del proceso de lavado de la lavandería del HPTU	19
Tabla 5. Aspectos y criterios para seleccionar tecnologías de aguas residuales	21
Tabla 6. Condiciones de operación para el proceso de coagulación	28
Tabla 7. Condiciones de operación para la floculación.....	29
Tabla 8. Procedimiento secuencial para la prueba de jarras	30
Tabla 9. Granulometría de las capas soporte	40
Tabla 10. Velocidades de filtración de acuerdo al número de procesos preliminares	40
Tabla 11. Variables medidas in situ lavandería del Hospital.....	44
Tabla 12. Resultados de laboratorio.....	47
Tabla 13. Resultados de ciclos de concentración sin tratamiento.....	49
Tabla 14. Resultados de ciclos de concentración con tratamiento.....	50
Tabla 15. Comparación normativa ambiental vigente.....	51
Tabla 16. Cuadro de decisión para la determinación del tren de tratamiento.....	57
Tabla 17. Resultados obtenidos de dosis óptima de coagulante para el primer ensayo	59
Tabla 18. Resultados obtenidos para la generación de lodos	61
Tabla 19. Dosis adicionadas de hipoclorito usadas para la desinfección.....	61
Tabla 20. Resultados obtenidos de dosis óptima de coagulante para el segundo ensayo	62
Tabla 21. Resultados obtenidos para la generación de lodos	64
Tabla 22. Dosis adicionadas de hipoclorito usadas para la desinfección.....	65
Tabla 23. Resultados obtenidos de dosis óptima de coagulante para el tercer ensayo	66
Tabla 24. Resultados obtenidos para la generación de lodos	67
Tabla 25. Dosis adicionadas de hipoclorito usadas para la desinfección.....	68
Tabla 26. Resultados tratabilidad y medición de parámetros en coagulación y floculación	69

Tabla 27. Comparación de agua vertida con el agua después del tratamiento sin desinfección, ensayo uno	70
Tabla 28. Resultados tratabilidad y medición de parámetros en coagulación y floculación	71
Tabla 29. Resultados obtenidos de medición de DQO	72
Tabla 30. Comparación de agua vertida con el agua después del tratamiento sin desinfección, ensayo dos.....	73
Tabla 31. Resultados tratabilidad y medición de parámetros en coagulación y floculación	74
Tabla 32. Resultados obtenidos de medición de DQO	75
Tabla 33. Comparación de agua vertida con el agua después del tratamiento sin desinfección, ensayo tres	76
Tabla 34. Dimensionamiento bombas requeridas en la planta de tratamiento	79
Tabla 35. Dimensionamiento tanques requeridos en la planta de tratamiento.....	79
Tabla 36. Dimensionamiento clarificador de lamelas requeridos en la planta de tratamiento.....	80
Tabla 37. Costos de químicos por m ³ de agua tratada.....	81
Tabla 38. Costo de consumo de energía.....	82
Tabla 39. Constantes de costos para bombas para el año 2001	83
Tabla 40. Resultado de costo de compra de bombas.....	84
Tabla 41. Costo de compra de tanques.....	85
Tabla 42. Flujo de caja	87

1. RESUMEN

El presente estudio se llevó a cabo con el fin de seleccionar la tecnología de tratamiento de aguas residuales, para el reúso del agua utilizada en el proceso de lavado de la lavandería del Hospital Pablo Tobón Uribe. El proyecto consta de varias etapas: La primera de ellas involucró revisión bibliográfica y antecedentes para la implementación de un tratamiento de aguas residuales en lavanderías hospitalarias, seguido por un diagnóstico del proceso de lavado y del efluente vertido. Luego se realizó una matriz de selección de alternativas en donde se evaluaron diferentes parámetros de las tecnologías aplicables encontradas en la revisión bibliográfica y en antecedentes (Coagulación y floculación, ozonización, procesos avanzados de oxidación y filtración).

Conociendo los resultados de la matriz de selección de alternativas se planteó un cuadro de decisión para la determinación del tratamiento mas adecuado según las características iniciales encontradas en el efluente, del cual se determinó el tren de tratamiento mas acorde a las necesidades de la lavandería (Coagulación + Floculación + Filtración + Desinfección con hipoclorito de sodio), este se comprobó experimentalmente para conocer las dosis óptimas de coagulante e hipoclorito de sodio adicionados al agua y el porcentaje de remoción de la tratabilidad según la dosis óptima; se encontró que el intervalo adecuado para el coagulante es de 300 a 400 ppm, la dosis utilizada de floculante fue de 1 ppm según lo reportado en bibliografía y la dosis de hipoclorito de sodio seleccionada fue de 12 ppm. El porcentaje de remoción obtenido con estas dosis fue del 70%.

Por último se realizó un análisis de factibilidad técnica, económica y ambiental para el proyecto, y de esta manera verificar que la implementación de la tratabilidad fuera viable para la lavandería y por ende para el hospital; se obtuvo que el valor a invertir para el tratamiento de recirculación y vertimiento del agua es de \$115'249.111, la cual se recuperaría en un periodo de 5 años.

2. INTRODUCCIÓN

La población mundial ha experimentado un acelerado crecimiento, lo que ha dado lugar a una concentración de la población en áreas con abundancia de agua. De esta manera se ha observado un aumento de la demanda de agua potable en todo el mundo, debido al rápido crecimiento de la población y las actividades productivas, estos factores sumados a la creciente degradación de los cuerpos de agua, crean un escenario de escasez de agua potable cada vez más común (De Souza, 2012).

Dentro de este escenario, surge la necesidad de reducir el consumo de agua en todos los sectores económicos, incluido el sector terciario. Entre los segmentos que componen este sector resaltan los hospitales, que son instituciones que consumen una cantidad significativa de agua al día, entre 400 y 500 litros/cama/día, y por lo tanto generan grandes cantidades de residuos (Emmanuel, Perrodin, Keck, Blanchard, & Vermande, 2004)

Los efluentes de los hospitales muestran poca diferencia en comparación con los domésticos, con respecto a la concentración de la materia orgánica, metales y pH. Sin embargo, la presencia de sustancias como antibióticos, desinfectantes y productos químicos están presentes en altas concentraciones en los efluentes, los cuales por lo general son liberados sin tratamiento previo al alcantarillado público (De Souza, 2012).

En una comparación con los residuos generados en las unidades de salud, las lavanderías de los hospitales son una de las causas más importantes del deterioro ambiental, debido a sus difíciles características, por la presencia de desinfectantes, antibióticos, productos de limpieza y otros tensoactivos, además, la mitad del agua utilizada en los hospitales es para el consumo de la lavandería (De Souza, 2012).

El Hospital Pablo Tobón Uribe cuenta con una lavandería tipo industrial, la cual es la encargada de lavar toda la ropa proveniente de las distintas alas del hospital, desde cobijas hasta pijamas quirúrgicas. En dicha zona se realiza una previa clasificación de la ropa, en donde se divide en ropa de alta suciedad y de baja suciedad; dependiendo de su clasificación se realiza un ciclo de lavado pertinente. Actualmente se lavan diariamente 3.800 kg de ropa sucia aproximadamente (Atehortúa, 2012), en turnos de 24 horas.

La lavandería es una de las fuentes de mayor consumo de agua dentro del Hospital, la cual cuenta con tres lavadoras y cuyo consumo representa el 21% de las aguas consumidas, siendo este el segundo lugar de mayor gasto de agua dentro del Hospital (Atehortúa, 2012).

Según informa el Hospital Pablo Tobón Uribe el consumo aproximado de agua dentro de la lavandería en un año es de 40.700 m³ para lavar 1'370.000 kg de ropa, usando las tres lavadoras disponibles (Atehortúa, 2012). Actualmente el agua consumida en el proceso es vertida al alcantarillado público sin ningún tipo de tratamiento.

Los procesos y actividades que causan una alta cantidad de efluentes pueden indicar un potencial de reutilización de éstos, especialmente para la economía implicada en el consumo de agua. Un hecho importante para la reutilización es la identificación del proceso o etapa en la que se será capaz de aplicar el agua reutilizada, además debe existir una relación directa entre la calidad y cantidad de los recursos disponibles del efluente, con estándares de exigencia y calidad requeridos para las aplicaciones identificadas. Por lo general las aplicaciones se dan en el mismo proceso de donde salen los efluentes (De Souza, 2012).

Las tecnologías convencionales de tratamiento suelen ser capaces de reducir las concentraciones de materia orgánica de origen humano, detergentes, grasas, sólidos presentes en las aguas residuales hasta los niveles requeridos para su reutilización, sin embargo, algunos niveles de compuestos tóxicos y sustancias recalcitrantes, no se eliminan por estos tratamientos, lo que impide la reutilización del efluente tratado (De Souza, 2012).

Dentro de este contexto un número creciente de investigaciones han sido destinadas a la utilización de procesos de: Coagulación, floculación, filtración y desinfección con cloro, las cuales son de fácil operación y de poca adición de sustancias químicas. Los estudios demuestran que el uso combinado de los procesos de tratamiento de aguas convencionales, es beneficioso y hace el tratamiento más eficiente, dependiendo de las características de efluente.

Durante este proyecto fue estudiado el tratamiento del efluente de la lavandería del Hospital Pablo Tobón Uribe por medio de procesos convencionales de coagulación, floculación, filtración y desinfección con cloro, para fines de reúso en el proceso de lavado realizado en la lavandería.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la factibilidad técnica, ambiental, y económica para la implementación de una tecnología de tratamiento apta para la recirculación de aguas residuales en el proceso de lavado de la lavandería del Hospital Pablo Tobón Uribe.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar fisicoquímicamente el agua residual proveniente de los enjuagues del ciclo de lavado del Hospital Pablo Tobón Uribe.
- Seleccionar la tecnología de tratamiento de aguas residuales apta para el manejo de las aguas provenientes del proceso de lavado.
- Comprobar experimentalmente la aplicabilidad de la tecnología de tratamiento de aguas seleccionada para el proceso de lavado del Hospital Pablo Tobón Uribe.
- Evaluar la factibilidad económica del tratamiento seleccionado para tratar las aguas residuales del proceso de lavado.

4. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE ANTECEDENTES

4.1 Consumo de agua en hospitales:

Los hospitales son instituciones que generalmente se encuentran ocupadas las 24 horas del día durante todo el año y adicionalmente aunque sus instalaciones son diseñadas para un largo período de tiempo, en la práctica, su utilización es todavía más intensa que la que puede soportar (Brasil, 2009).

En general, se pueden analizar cuatro aspectos que se traducen en grandes costos para el hospital, estos son: agua, energía, combustibles y residuos sólidos (Velez, 2006).

Es importante anotar que los consumos en estos cuatro aspectos pueden tener grandes variaciones de hospital a hospital, dependiendo del número de pacientes, la antigüedad de la construcción, las instalaciones técnicas y el uso del edificio (Si tiene o no sistemas de aire acondicionado, calderas, etc.) (Velez, 2006).

Los centros hospitalarios consumen grandes cantidades de agua, además de la energía que se necesita para calentarla, bombearla y eliminarla. Los centros hospitalarios pueden conservar este valioso recurso natural vigilando de cerca su consumo de agua, instalando grifería y tecnologías de bajo consumo y asegurándose de que las fugas sean reparadas con rapidez. Para ejercer un impacto de conservación aún más intenso, los hospitales pueden recoger el agua de lluvia y reciclar las aguas residuales para usos no potables (Neira, 2008).

Se conoce que los hospitales consumen un volumen importante de agua al día, el consumo doméstico mínimo es de 100 L/persona al día, mientras que el valor de la demanda de los hospitales en general varía 400-1200 L/cama al día. En Estados Unidos, el promedio de consumo de agua en hospitales es de 968 L/cama al día. En Francia, la necesidad de agua promedio de las instalaciones de los hospitales se estima en 750 L/cama al día. En los países en desarrollo, este consumo parece estar alrededor de 500 L/cama al día. Este importante consumo de agua en los hospitales da grandes volúmenes de aguas residuales (Emmanuel, Perrodin, Keck, Blanchard, & Vermande, 2004).

El consumo de agua es un aspecto ambiental importante para el sector hospitalario ya que la mayoría de los procesos que ocurren allí hacen uso de este recurso (Lopez, 2010).

4.2 Aguas residuales en hospitales

El gran aumento de la demanda de agua, causada por el crecimiento y la concentración de la población y por lo tanto las actividades productivas, además de la creciente degradación de los cuerpos de agua, crean un escenario de escasez de recursos hídricos, cada vez más comunes en varias regiones. El agua, por lo tanto, se ha explotado de una manera inapropiada. Frente a esta realidad y la búsqueda del desarrollo sostenible, el consumo en su gran mayoría debe ser reemplazado por la reutilización del recurso. La reutilización del agua proviene de dos aspectos: uno es la disminución de la demanda con la reducción de los costos para este y otros hábitos de consumo y el menor volumen de residuos generados y por lo tanto menos efluentes tirados al medio ambiente (Andrade, 2008)

Así surge la necesidad de reducir el consumo de agua en todos los sectores económicos, desde el primario hasta el terciario, encontrándose en esta última clasificación los hospitales. Entre los segmentos que componen este sector los hospitales cabe destacar que tienen una peculiaridad adversa de los otros segmentos por el alto riesgo de contaminación por patógenos de las aguas residuales, así como el difícil tratamiento biológico por la presencia de antibióticos (Andrade, 2008).

Las aguas residuales generadas en un hospital pueden provenir de rechazos de los laboratorios, quirófanos, servicios de radiología, laboratorios médicos de análisis, investigación médica, lavanderías, cocinas y las mismas actividades que generan aguas residuales domésticas; en la Tabla 1 se resumen, las características de algunos de estos efluentes:

Tabla 1. Características de algunas aguas residuales hospitalarias

Sector	Características de los efluentes generados
Habitaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos orgánicos halogenados (AOX). • Productos farmacéuticos. • Desinfectantes.
Laboratorios de análisis médicos	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos de mercurio iónico • Metales pesados. • Sangre y excreciones. • Formaldehído y minerales diluidos ácido/base. • Fosfatos, AOX, grasas y aceites, y material particulado.
Lavandería	<ul style="list-style-type: none"> • Materia orgánica: <ul style="list-style-type: none"> ✓ Material particulado ✓ Proteínas (Productos de la sangre) ✓ Almidones ✓ Grasas y aceites ✓ Detergentes • Productos farmacéuticos. • AOX (desinfectantes y blanqueadores). • pH extremo (Detergentes alcalinos y ácidos desinfectantes).

Nota: Fuente (Andrade, 2008)

Se conoce que los hospitales producen tres tipos de aguas residuales y efluentes:

- a) Los rechazos de fuente doméstica como las aguas que provienen de las cocinas, los rechazos resultantes de las actividades de lavado e higiene de pacientes y personal
- b) Rechazos industriales como son las aguas provenientes de talleres de automóviles y de mantenimiento, que normalmente contiene cantidades importantes de aceites y detergentes
- c) De efluentes generados por las actividades del hospital de análisis y de investigación, que son muy específicas en los hospitales. Estos rechazos pueden contener productos químicos y líquidos radiactivos, biológicos, excreciones y

residuos de medicamentos contagiosos eliminados en las heces de los pacientes (Andrade, 2008).

Las aguas residuales y los efluentes presentan unas diluciones considerables de cargas orgánicas e inorgánicas. Los efluentes líquidos no tratados y tratados, generados en los servicios de salud representan un peligro potencial para la transmisión de sustancias químicas con efectos tóxicos y genotóxicos en los organismos en los ecosistemas acuáticos. Estos fluidos presentan una amplia variación en su constitución química, ya que pueden contener compuestos químicos, tales como metales pesados (Pb, Hg y Cr), antibióticos no biodegradables, entre otros (Andrade, 2008).

La composición de las aguas residuales procedentes de hospitales y centros de salud presenta fluctuaciones más o menos evidentes en su descarga a la red de alcantarillado debido a la gran diversidad de sustancias químicas y materiales biológicos eliminados en los mismos (Paz, y otros, 2004).

4.3 Reutilización del agua

La reutilización de agua reduce la demanda sobre las existencias de agua en bruto debido a la sustitución de fuentes, es decir, la sustitución de agua potable por una calidad del agua por debajo de la cual dicha sustitución es posible, en vista de la calidad requerida para el consumidor. En muchos casos existe una protección natural de las aguas de los manantiales, ya que eliminan los vertidos de aguas residuales en aguas superficiales. La decisión de recuperar la calidad del agua para su reutilización se ha convertido en una opción realista para la riqueza, necesaria al satisfacer las demandas de agua de las ciudades y campos de cultivo (Andrade, 2008).

El análisis de la viabilidad del uso de agua tratada se inicia con la caracterización cualitativa y cuantitativa de los efluentes generados, se establecen los criterios para la segregación y los tratamientos necesarios.

El uso de un efluente tratado como una fuente de agua para lograr ciertos fines, implica un sistema de gestión que supervise continuamente esta fuente alternativa de agua (cantidad y calidad) con el fin de asegurar un buen funcionamiento y una mayor vida útil

de los equipos y los procesos relacionados, así como proteger a los usuarios de cualquier riesgo para la salud (Andrade, 2008)

4.4 Lavanderías Hospitalarias

El servicio de Lavandería es un servicio incluido dentro de los servicios generales hospitalarios, manejado por personal especializado y que dispone de tecnología adecuada para proporcionar una atención especial a través de rigurosa y constante supervisión. El servicio de lavandería en un hospital es una de las actividades relacionadas con su cadena logística interna y cuyo objetivo es proveer oportunamente prendas limpias para pacientes y personal asistencial a partir de las prendas sucias que se recogen en cada servicio del hospital (Campos, 2009)

La misión de la Lavandería hospitalaria, es el lavado e higienización de la ropa hospitalaria en general utilizada en las diferentes áreas de la institución, para que el usuario final disponga durante su estancia o su trabajo en el hospital una ropa adecuada (Campos, 2009).

4.4.1 Operación de lavanderías hospitalarias

La ropa llega a la unidad de procesamiento de la zona sucia, allí se ordenan antes de comenzar el proceso de lavado. A continuación se muestra una descripción de los procesos involucrados en el lavado de ropa:

a) Separación y clasificación: La calidad del lavado empieza con una buena separación de la ropa y cuando se clasifica de acuerdo con su grado de suciedad. Se clasifica de la siguiente manera:

- **Alta Suciedad:** Ropa con sangre, heces, vómitos y otras proteínas desagradables.
- **Baja Suciedad:** Ropa sin la presencia de fluidos corporales, sangre y/o productos químicos.

b) Ciclo de lavado: El proceso de lavado es la eliminación de la suciedad unida a la máquina, dejando un aspecto y olor agradable en la ropa, reduciendo a un nivel mínimo los agentes patógenos. El ciclo para ser utilizado en el proceso de lavado se determina de

acuerdo con el grado de suciedad, el tipo de máquina, el tipo de los equipos de lavandería y los productos utilizados (Andrade, 2008). Las etapas del proceso de lavado son:

- Humectación
- Prelavado
- Lavado
- Blanqueamiento
- Enjuague
- Neutralización o acidificación
- Suavizado
- Secado

4.5 Reutilización de agua en Hospitales

De acuerdo con la información proporcionada por la Agencia Nacional de Vigilancia Sanitaria, para la reutilización de aguas residuales tratadas en las lavanderías hospitalarias debe estar sujeto a las recomendaciones de el Manual de Servicios de Salud para el Procesamiento de Ropa (De Souza, 2012). En ausencia de una legislación específica para su reutilización en los hospitales se considera que la reutilización del agua debe someterse a las características recomendadas, que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros recomendados para el lavado de ropa en lavanderías hospitalarias

Parámetro	Valor Máximo
Dureza (mg/L)	100
Hierro (mg/L)	0,3
Manganeso (mg/L)	0,05
pH	6,5 a 9
Color Aparente (Pt/Co)	15
Turbidez (UT)	5
Aspecto	Limpia sin material en suspensión
Alcalinidad Libre	Ninguna
Alcalinidad Total (mg/L)	150-200
Cloruros (mg/L)	250
Sulfatos (mg/L)	250
Cobre (mg/L)	1

DQO (mg O ₂ /L)	<65
DBO (mg O ₂ /L)	No detectable

Nota: Fuente (Andrade, 2008)

4.6 Tecnologías de reutilización de agua

Hoy en día, hay sistemas y tecnologías de alta eficiencia en tratamiento de aguas de fácil implementación y que aportan ventajas en todos los sentidos, resultando estas actuaciones no sólo altamente rentables para la cuenta de resultados (*pues suelen generar beneficios económicos al siguiente año de su implementación*), sino también para el medio ambiente, pues la reducción de consumos va paralela a la reducción de los residuos resultantes, reduciendo la cantidad de agua a depurar y produciendo, por lo tanto, un menor gasto por ambos conceptos (Madrid, 2010).

Algunas de las posibles tecnologías a implementar dentro de la lavandería son:

4.6.1 Coagulación y Floculación

La coagulación puede entenderse como la desestabilización eléctrica de algunas partículas media te la adición de sustancia químicas que son los coagulantes. Esta operación se efectúa en unidades y tanques de mezcla rápida, en los cuales el agua se somete a agitación muy intensa para formar una solución homogénea de los coagulantes con el agua en el menor tiempo posible (Rodríguez, 1995).

El uso de cualquier otro proceso para la remoción de partículas muy finas, como la sedimentación simple, resulta muy poco económico y en ocasiones imposible, debido al alto tiempo requerido (Arboleda, 2002).

Para la evaluación de este proceso es necesario tener en cuenta las características físicas y químicas del agua, la dosis del coagulante, la concentración del coagulante, el punto de aplicación del coagulante, la intensidad y el tiempo de mezcla y el tipo de dispositivo de mezcla (Restrepo H. , 2009).

La floculación consiste en la aglomeración, mediante la agitación moderada del agua, de

las partículas que se desestabilizaron durante la coagulación, formando otras de mayor tamaño y peso específico (flóculos) (Rodríguez, 1995).

Los objetivos básicos de la floculación son reunir microflóculos para formar partículas con peso específico superior al del agua y compactar el flóculo disminuyendo su grado de hidratación para producir baja concentración volumétrica, lo cual produce una alta eficiencia en los procesos posteriores como sedimentación y filtración (Restrepo H. , 2009).

4.6.2 Ozonización

La ozonización es ampliamente utilizada en el tratamiento de las aguas, tanto potables como residuales. Permite la eliminación de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos, reduciéndose el olor, color, sabor y turbidez de las aguas, así como compuestos refractarios (Aguado, 2008).

Aunque es necesaria su generación “in situ” (mediante “descargas eléctricas silenciosas”) y su costo inicial es alto, es un potente desinfectante debido a su alta reactividad y poder de reducción (Aguado, 2008).

La ozonización se incluye dentro de los Procesos de Oxidación Avanzada, que se definen como “procesos de oxidación que implican la generación de radicales hidroxilo en cantidad suficiente para interactuar con los compuestos orgánicos del medio”. La molécula de ozono es una forma alotrópica triatómica del oxígeno termodinámicamente inestable, descomponiéndose espontáneamente a oxígeno. Es un oxidante fuerte, segundo después de los radicales hidroxilo libres, capaz de participar en numerosas reacciones químicas con sustancias inorgánicas y orgánicas. Las reacciones con ozono se pueden producir por dos mecanismos: las reacciones directas son reacciones muy selectivas, atacando a dobles enlaces y algunos grupos funcionales; y las reacciones indirectas son consecuencia de la acción de los radicales hidroxilos resultantes de la descomposición del ozono en el agua (Aguado, 2008).

El método más ampliamente utilizado para la generación de ozono para el tratamiento de aguas son las descargas en corona, o también conocido como “descargas eléctricas silenciosas”. Consiste en pasar oxígeno en forma gaseosa a través de dos electrodos

separados por un dieléctrico y un hueco de descargas. Se aplica un voltaje a los electrodos, causando que un electrón fluya a través del hueco de descargas. Esos electrones suministran la energía para disociar las moléculas de oxígeno, produciéndose así la formación de ozono (Aguado, 2008).

4.6.3 Procesos avanzados de oxidación (PAO'S)

Los procesos avanzados de oxidación involucran la generación de especies altamente oxidantes que reaccionan rápidamente y que pueden degradar fácilmente sustancias orgánicas. Se ha descubierto que estas características se deben a su viabilidad termodinámica y que su oxidación va aumentando conforme se forman radicales libres. Una de las especies más oxidantes que se logran formar dentro de estas reacciones son los radicales hidroxilo (HO) (Martinez de la Cruz, 2013).

Estos radicales pueden oxidar contaminantes orgánicos mediante la extracción de hidrógeno o mediante adición electrofílica a los dobles enlaces presentes para formar radicales libres que pueden reaccionar con moléculas de oxígeno formando peroxiradicales e iniciar una serie de reacciones oxidantes que llevan a la completa mineralización del contaminante orgánico que se desea degradar (Martinez de la Cruz, 2013).

4.6.4 Filtración

El proceso de filtración tiene como objetivo eliminar los sólidos presentes en el, efluente, se utiliza a menudo como una etapa final inmediatamente antes de la desinfección y de disposición final o reutilización (Mancuso, 2003).

Para ciertos usos del agua, la filtración puede preceder a algunos procesos más avanzados, tales como la adsorción de carbón activo. Son bien conocidas combinaciones de antracita y arena, carbón activado, arena y resina, resina y carbón activado (Mancuso, 2003).

En general, el proceso de filtración consiste en hacer pasar a través del medio filtrante el agua obtenida del sistema de decantación, que todavía tiene partículas en suspensión. Durante el paso de agua a través del lecho de filtro se retienen y se recogen en la parte

inferior del filtro agua con una turbidez menor de 2 unidades de turbidez (Azevedo & Libano, 2003).

4.7 Antecedentes

La implementación de tecnologías de tratamiento de aguas residuales en lavanderías hospitalarias ha sido poco reportada por investigadores y escasamente mencionada en la literatura.

Las características de los efluentes incluyen algunos compuestos que no permiten la adopción de un tratamiento de solución única. La literatura muestra que generalmente se podría utilizar más de un tratamiento (De Souza, 2012).

A pesar de que los tratamientos fisicoquímicos se consideran capaces de disminuir la concentración de los sólidos, no puede ser suficiente para la eliminación de otros compuestos. Debido a las características recalcitrantes del efluente de la lavandería hospitalaria, el uso de procesos de oxidación avanzada se ha presentado como una alternativa a la degradación de los contaminantes en estas aguas residuales (De Souza, 2012). Una alternativa para el tratamiento de efluentes de lavanderías hospitalarias es la combinación de procesos convencionales con procesos de oxidación avanzada, debido a la presencia de compuestos recalcitrantes. Entre los procesos de oxidación avanzada, los estudios sobre el uso de la radiación ultravioleta en combinación con peróxido de hidrógeno, mostraron la aplicabilidad de este proceso para reducir la concentración de sustancias orgánicas e inorgánicas, en los experimentos en escala de laboratorio y escala piloto. Por otra parte, estos procesos son fáciles de operar y requieren menos adición de sustancias químicas (De Souza, 2012).

Algunos investigadores han utilizado la fotocatalisis heterogénea y ozonización fotocatalítica para el tratamiento de efluentes de lavanderías hospitalarias (De Souza, 2012). Los mejores resultados se encontraron con el tratamiento de ozonización foto-catalítica, obteniéndose un 30% de eliminación de DQO, 75% de eliminación de la DBO, 49% de eliminación de turbidez y 100% de reducción de microorganismos (De Souza, 2012).

Algunos autores han encontrado que el proceso de UV/H₂O₂ en condiciones óptimas, obtiene un pH de 9, la eliminación de los tensoactivos en un 98%. Por otra parte, este proceso es capaz de mineralizar aproximadamente el 60% de la materia orgánica, sin embargo, el tratamiento no es eficaz en la eliminación de color y turbidez, para estos parámetros se estudiaron las tecnologías de coagulación, floculación, sedimentación (De Souza, 2012).

Usando químicos y anticoagulantes naturales, se encontró que para la eliminación de color y turbidez, se tomaron altas dosis de coagulantes, aproximadamente 600 mg/L para reducir el color y la turbidez en un 94% y 91%, respectivamente. Se observaron varias ventajas de la utilización de coagulantes naturales debido al bajo volumen de lodos generados. En el proceso combinado de coagulación, floculación y sedimentación seguido de UV/ H₂O₂, los resultados muestran que se puede obtener agua para su reutilización dentro de los parámetros establecidos por la legislación, sin embargo, para su reutilización en el proceso de lavado es necesario investigar la concentración final del ion sulfato, porque de esta unión de iones de calcio y magnesio, se puede promover la dureza permanente del agua (De Souza, 2012).

Otra de las alternativas encontradas en la literatura para el tratamiento de estos efluentes es el proceso de electrocoagulación, que presenta una reducción potencial de la toxicidad y puede ser integrado con otros procesos, tales como pre-o post-tratamiento (De Souza, 2012).

Otra opción implementada en Colombia fue la unificación de dos etapas del proceso de lavado para mejorar el pH y reducir el uso de cierto volumen de agua, además de reducir el tiempo de operación del proceso de lavado (Limpia, 2010).

Para la selección de las tecnologías de tratamiento apropiadas para ser aplicadas a los efluentes se tuvo en cuenta las características fisicoquímicas y biológicas del agua para seleccionar el tratamiento adecuado de aguas residuales (Andrade, 2008).

Como un ejemplo de aplicación de tratamientos fisicoquímico de aguas residuales en un hospital se puede citar el estudio realizado por Gautam, Kumar y Sabumon (2007) en un hospital de Tamil Nadu, en la India, donde el efluente se coaguló con FeCl₃, filtró y

desinfectó. Este Hospital cuenta con cerca de 2.000 camas, de las cuales 1.800 normalmente están ocupadas; el hospital genera cerca de 2.400 m³/día de aguas residuales. Las muestras compuestas se recogieron a partir del efluente y los tratamientos aplicados se realizaron simulando una planta de tratamiento según los parámetros analizados, antes y después de la simulación fueron medidos pH, sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales, DQO y bacterias formadoras de colonias (CFU_s) (Gautam, Kumar, & Sabumon, 2007).

Por medio de la simulación se determinó la dosis óptima de coagulante FeCl₃ (175 mg/L), el tiempo y la velocidad de agitación en el pH ideal (6,76). Después de este proceso se aplicó filtración rápida en arena y después de la filtración se realizó desinfección con el hipoclorito de calcio, con un contacto mínimo de 30 min, encontrando el punto de ruptura en una concentración de 20mg/L (Gautam, Kumar, & Sabumon, 2007).

La reducción total de bacterias formadoras de colonias (CFU_s) fue de 98,5% después de cloración. El agua fue tratada en gran medida y los parámetros estaban dentro de los límites para verterse, los resultados obtenidos se presentan en la Figura 1:

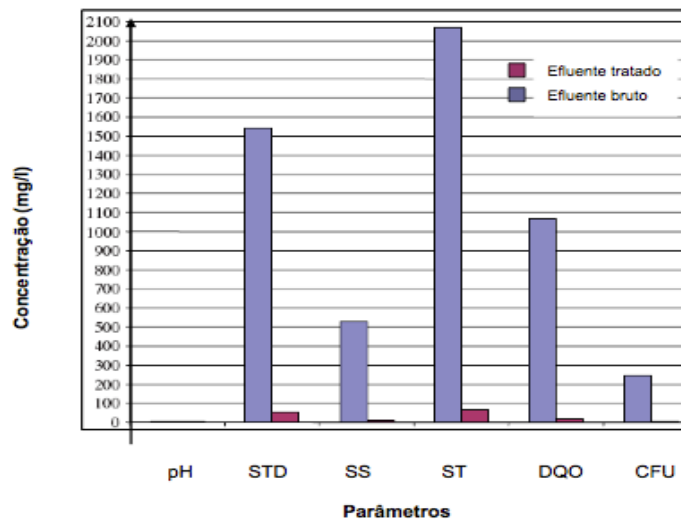


Figura 1. Resultados obtenidos por Gautam, Kumar y Sabumon en 2007

Gautam, Kumar y Sabumon, (2007) concluyeron en su estudio que el tratamiento con cloruro férrico es una gran opción para la eliminación de DQO, también establecen que los sólidos y los lodos sedimentados generados en la planta de tratamiento de aguas residuales requieren digestión anaeróbica para asegurar la eliminación de patógenos o pueden ser incinerados con los desechos infecciosos del hospital (Gautam, Kumar, &

Sabumon, 2007).

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1 Diagnostico preliminar de la lavandería

Inicialmente se realizó una visita de reconocimiento con el fin de observar todas las etapas del proceso de lavado que se lleva a cabo dentro de la lavandería. Posteriormente, se realizaron visitas durante todo el desarrollo del proyecto, con una frecuencia de una o dos veces por semana, con el objetivo de evaluar la cantidad de agua utilizada en el proceso de lavado y los horarios de producción de aguas residuales. De las visitas efectuadas se realizó un registro fotográfico, ver anexo 1.

Adicionalmente, con el objetivo de obtener una visión general del consumo de agua en la lavandería se realizó un consolidado del promedio mensual de agua gastada con respecto al volumen de ropa lavada, el cual se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Consumo de agua por cantidad de ropa lavada en la lavandería

DATOS	Kg. Prom. Trimestre 2012	Kg. Enero 2013	Kg. Febrero 2013	Kg. Mar 2013	Kg. Abr 2013	Kg. May 2013	Kg. Jun 2013	Kg. Prom. 2013
ROPA LAVADA POR EL HOSPITAL	106,178	108,037	102,287	108,836	114,249	110,734	108,064	108,701.2
CONSUMO DE AGUA m³	3,011	3,030	3,391	3,124	3,505	3,178	2,638	3,144.4

Nota: Fuente (Atehortúa, 2012)

También se solicitó al personal del hospital las especificaciones del proceso de lavado, el cual se muestra en la Tabla 4:

Tabla 4. Especificaciones del proceso de lavado de la lavandería del HPTU

INDUSTRIA Y/O INSTITUCIÓN HOSPITAL PABLO
TOBÓN URIBE

TIPO DE SUCIEDAD SÚPER ALTA E INFECTADA

PASO	ETAPA	PRODUCTO	DOSIS (L)	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (Min)	NIVEL DE AGUA (L)
CARGA DE ROPA :100 KG						
1	Enjuague			Fría	3	400
2	Desagüe					
3	Enjuague			Fría	3	400
4	Desagüe					
5	Precentrifugado				2	
6	Enjuague			Fría	3	400
7	Desagüe					
8	Enjuague			Fría	3	400
9	Desagüe					
10	Precentrifugado				2	
11	Humectación	Tetrasurf	100	Fría	4	400
		Tetrasol	100			
12	Desagüe					
13	Enjuague			Fría	3	400
14	Desagüe					
15	Prelavado	Tetrasurf	200	Fría	10	250
		Tetrasol	500			
16	Desagüe					
17	Blanque y Desinfección	Omega	600	60	20	250
		Genoxol	600			
18	Desagüe					
19	Enjuague			Fría	3	400
20	Desagüe					
21	Enjuague			Fría	3	400
22	Precentrifugado				2	
23	Suavizado	Acariz T.C	200	Fría	4	300
24	Desagüe					
25	Centrifugado				6	

Nota: Fuente (Atehortúa, 2012)

5.2 Aforos de caudal

Inicialmente se pensó en utilizar el método volumétrico para realizar los aforos de caudal pero debido a dificultades para tomar las muestras en la tubería de salida de agua del proceso no se logró realizar por este método, por este motivo se tuvo que recurrir al contador de agua disponible para las lavadoras de la lavandería. La metodología realizada para saber el caudal usado en cada ciclo de lavado fue:

1. Detener el proceso de lavado en dos de las tres lavadoras.
2. Revisar el valor del contador al iniciar el proceso de lavado (en una sola lavadora).
3. Esperar a que el ciclo de lavado se realice totalmente.

4. Revisar nuevamente el valor del contador y restarlo con el valor inicial para saber el caudal de agua utilizado en todo el ciclo de lavado.

Este proceso se realizó durante 5 ciclos de lavado de ropa de alta suciedad diferentes para comprobar que los valores obtenidos fueran confiables, el rango de caudal que se obtuvo fue de 3,2 a 4 m³ de agua por ciclo de lavado.

5.3 Balances de materia del proceso de lavado

Según las visitas realizadas y los datos recolectados al inicio del proyecto se realizaron los balances de materia del proceso de lavado de la lavandería, estos balances se realizaron teniendo en cuenta las entradas de agua y desagües en cada etapa del proceso, así como también las adiciones de productos químicos, por búsqueda bibliográfica se concluyó que el porcentaje de absorción de agua por parte de la ropa es despreciable.

5.4 Matriz de selección de alternativas

Los contaminantes presentes en aguas residuales pueden eliminarse con procesos químicos, físicos y/o biológicos. Los métodos individuales de tratamiento de aguas suelen clasificarse en operaciones físicas unitarias, procesos químicos unitarios y procesos biológicos unitarios.

Teniendo en cuenta esta clasificación se establecen algunos aspectos y criterios de decisión para seleccionar la tecnología de tratamiento de aguas residuales mas conveniente para la calidad de agua que se quiere lograr y para las condiciones dadas en la lavandería por el hospital; estos aspectos y criterios se muestran en la Tabla 5:

Tabla 5. Aspectos y criterios para seleccionar tecnologías de aguas residuales

Aspecto a evaluar	Criterio de evaluación
Seguridad industrial y Análisis de riesgo	Entorno general Entorno específico
Tecnología	Implementación Procesos requeridos Equipos requeridos Casos de estudio exitosos Control de proceso Automatización de proceso Vigencia tecnología Proveedores
Proceso Operativo	Complejidad Capacidad de producción Eficiencia de recuperación Cantidad de producto recuperado Materiales requeridos Servicios industriales requeridos Tiempo de proceso Costo de insumos Confiabilidad de proceso de recuperación Mantenimiento
Aspectos Ambientales	Lodos Emisiones Consumo de energía Residuos peligrosos

Costos de Inversión	Equipos principales Instalación Mano de obra Insumos de implementación Perdidas Garantías
Químicos Requeridos	Suministro Riesgo Consumo Residuos generados Toxicidad

5.5 Seguimiento y caracterización de la calidad fisicoquímica del efluente

Para obtener un primer diagnóstico confiable de las características del agua vertida en la lavandería del Hospital Pablo Tobón Uribe se contactó al laboratorio de Investigaciones Ambientales (GIA) de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) sede Medellín, se realizó la toma y análisis fisicoquímico de una muestra compuesta de todos los desagües de un ciclo de lavado; las pruebas realizadas fueron: pH, temperatura, conductividad, DBO, DQO, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, dureza, grasas y/o aceites, coliformes totales y fecales (American Public Health Association, 2012); según lo establecido por el Standar Methods.

5.5.1 Identificación del punto de monitoreo

Teniendo en cuenta las especificaciones del muestreo de las aguas residuales, el punto de monitoreo fue el desagüe de las lavadoras, provenientes del proceso de lavandería del Hospital Pablo Tobón Uribe.

Se encuentra ubicado en el Hospital, específicamente en una caja de inspección, con una abertura de 50 * 60 cm aproximadamente y una profundidad de 50 cm, de difícil acceso, ver Ilustración 1.



Ilustración 1. Punto de monitoreo

Es importante tener en cuenta que el flujo de agua se presenta por gravedad.

5.5.2 Toma de muestras

Se realizó muestreo puntual del proceso, garantizando que el día, y al momento del monitoreo se presentaran condiciones normales en el vertimiento. Se realizaron 5 tomas, con el fin de alcanzar el volumen necesario para los diferentes análisis a realizar; para cada muestra se registraron las condiciones de pH, Temperatura y Conductividad.

El agua presentaba características propias de procesos de lavado como espuma y turbiedad. Las muestras de campo recolectadas fueron preservadas en neveras de icopor con hielo de agua y se adicionaron los reactivos para fijar los parámetros que así lo requieren de acuerdo con lo estipulado en el Standard Methods (American Public Health Association, 2012).

La muestra de grasas y/o aceites se tomó directamente de la descarga en un frasco de vidrio de boca ancha, debidamente lavado, y se preservó con ácido sulfúrico (H_2SO_4) hasta un $pH < 2$.

5.6 Comparación de las características fisicoquímicas del efluente con la normatividad vigente de vertimientos

Se realizó una comparación de los resultados obtenidos en la caracterización inicial con la legislación ambiental vigente para vertimientos a cuerpos de aguas superficiales y a sistemas de alcantarillado público, todo esto con el fin de definir cuales eran los parámetros mas problemáticos que no se encontraban dentro de los valores máximos permitidos, y los cuales son primordiales para determinar el tratamiento a utilizar.

5.7 Evaluación del potencial de reúso de agua

Fue necesario evaluar la posibilidad de la reutilización del agua sin ningún tratamiento, ya que de esta forma se justificó la aplicabilidad de un tratamiento justo antes de dicha reutilización. Al no realizarse el tratamiento los parámetros contaminantes del agua aumentan sus concentraciones, lo que hace mas difícil el proceso de lavado y afecta la efectividad y cantidades de los detergentes y demás productos de limpieza utilizados; para esto se dispuso de los datos obtenidos en la caracterización inicial del efluente, la normativa ambiental vigente y los requisitos de calidad del agua en el proceso en el que se desea volver a utilizar. Se evaluó la reutilización total del efluente generado, pero a su vez la reutilización se puede lograr mezclando el efluente tratado con el suministro de agua del acueducto.

Sea cual sea el método de reutilización a utilizar se necesita supervisar el rendimiento de la actividad en la que el efluente tratado se esta utilizando con el fin de consolidar o hacer ajustes en el proceso y así asegurar el éxito del programa de reutilización, para aumentar la fiabilidad de la recirculación del agua, especialmente cuando las características del efluente pueden someterse a variaciones significativas.

Se estimó el rendimiento de la recirculación del agua al proceso de lavado, se calculó la concentración de los parámetros a medida que se aumenta el flujo del agua recirculada, y como se comportan los mismos en el tiempo, dándole un seguimiento a las variaciones en las concentraciones, y así poder garantizar que el agua cumpla con la normativa y asegurar la calidad de agua requerida para el proceso de lavado, al mismo tiempo se determinó el número de veces que podrá ser recirculada antes de ser desechada. Esto

por medio del planteamiento de dos escenarios; el primero de ellos se realizó teniendo en consideración la recirculación del agua sin ningún tipo de tratamiento; y el segundo con la implementación de un tratamiento de aguas residuales antes de la recirculación al proceso, este cálculo se realizará teniendo en cuenta que el tratamiento del agua tiene un porcentaje de remoción del 80% de los contaminantes presentes en el agua, según lo encontrado previamente en la literatura. Los ciclos de concentración se calculan dividiendo el flujo de agua recirculada sobre el flujo de agua fresca proveniente del acueducto público de EPM.

5.8 Cuadro de decisión para la determinación del tratamiento de aguas residuales

Con el fin de tener un criterio de decisión mas preciso y detallado del tratamiento más adecuado para el agua residual de la lavandería del Hospital Pablo Tobón Uribe, se realizó adicionalmente a la matriz de selección de alternativas un cuadro de decisión para determinar los parámetros a disminuir dando cumplimiento a la normativa ambiental y para llegar a la calidad de agua requerida para recircular al proceso de lavado.

5.9 Evaluación de tecnologías de tratamiento de aguas residuales

Los ensayos de tratabilidad del agua residual de la lavandería del Hospital Pablo Tobón Uribe se realizaron durante una semana de trabajo de la misma, durante la época de fin de año donde mas accidentalidad se presenta y por lo tanto mayor cantidad de ropa contaminada con medicamentos y fluidos humanos; las cuales son condiciones máximas de suciedad en la ropa lavada, por lo cual son datos representativos de la clase de ropa que se lava durante todo el transcurso del año.

5.9.1 Experimentación de coagulación y floculación

Luego de la revisión bibliográfica, se encontró que no existe en nuestro medio el conocimiento acerca de una metodología general, que permita de manera fácil y practica agrupar los diferentes parámetros que se deberían considerar en una evaluación de coagulantes, ya sea a escala de laboratorio o a escala industrial. A esto se le adiciona el hecho que en el medio hay disponibles una amplia variedad de productos, lo cual puede

dificultar aún más la tarea a la que se ve enfrentado un técnico operador de plantas cuando desea optimizar o seleccionar un producto específico para el tratamiento de un agua (Restrepo A. , 2010).

En las pruebas que se realicen a escala de laboratorio se deben simular confiablemente las condiciones a escala industrial, de tal forma que los resultados obtenidos puedan ser reproducidos en planta, en lo que respecta a iguales condiciones hidráulicas para los diferentes productos a evaluar, la prueba más utilizada para esta simulación es la prueba de jarras (Restrepo A. , 2010).

5.9.1.1 Recolección de muestras representativas

Se debe tener presente que la muestra tomada represente las condiciones promedio del agua, de lo contrario, los resultados de la prueba de jarras serán engañosos. Se requiere un mayor cuidado para decidir que muestra tomar, cuánta cantidad y con qué frecuencia (Restrepo A. , 2010).

Se recomienda tomar la muestra en intervalos cercanos de tiempo. Que sean proporcionales al flujo o caudal, y cuando termine el muestreo, combinar las muestras individuales en una muestra compuesta. Esta muestra compuesta representa las condiciones promedio del agua para el día, y se puede someter a la prueba de jarras para determinar los requerimientos de productos químicos y en general las condiciones del tratamiento (Restrepo A. , 2010).

La prueba de jarras se debe realizar tan pronto como sea posible, después del muestreo. Es necesario evitar cambios críticos, químicos o físicos, que pueden ocurrir cuando las muestras están en reposo (Restrepo A. , 2010).

5.9.1.2 Prueba de jarras

El equipo empleado para esta prueba consiste de un aparato agitador con velocidad constante o variable, una base iluminada, 6 jarras, o vasos de precipitado (beakers) de tamaño y forma similar y que permitan una buena visibilidad. Se pueden procesar simultáneamente 6 muestras, puede haber control visual de los efectos de los cambios a

varios parámetros durante una serie individual de pruebas. El volumen normalmente empleado es de 1–1.5 litros. Pueden ser de material plástico transparente o de vidrio (Ver figura 1). Además se requieren dispositivos para dosificar los diferentes productos, como jeringuillas, que permitan fácilmente realizar una adición en forma mas o menos simultanea a cada jarra. También se deberá disponer de un cronometro y dispositivos para toma de muestras. Por último se deberá tener un recipiente para evaluar la sedimentabilidad, tipo cono inhoff (Restrepo A. , 2010).

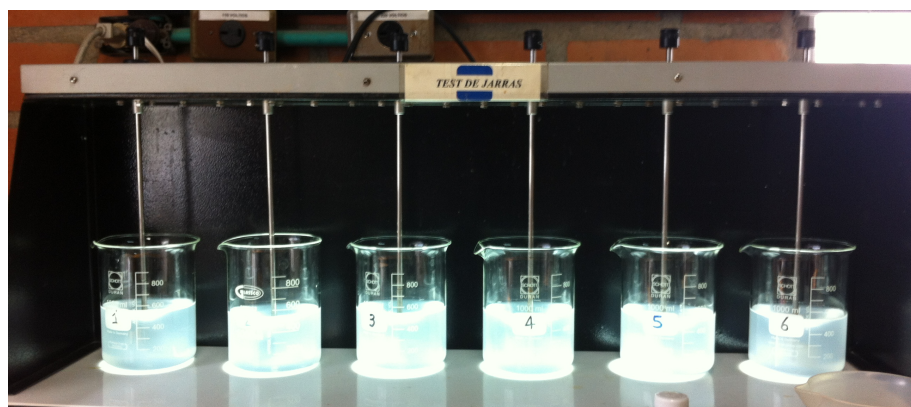


Ilustración 2. Test de jarras

El procedimiento básico consiste en una agitación intensa de la muestra simulando la coagulación y posteriormente se disminuye la intensidad de mezcla para realizar el proceso de floculación, terminada está se levantan las paletas de agitación para permitir la sedimentación del floculo formado sin interferencias mecánicas. Una vez completado el tiempo de sedimentación fijado, se toman muestras del clarificado para medir los parámetros de turbiedad, conductividad y pH (Restrepo A. , 2010).

Para la dosis óptima, se escoge aquella que dé en el clarificado un menor valor de turbiedad; al final de cada prueba, el volumen de lodos se debe medir, se determina el IVL, índice volumétrico de lodos y el IML, índice másico de lodos. Este procedimiento se repetirá bajo las mismas condiciones hidráulicas con otros productos. Es importante tener en cuenta que cada que se desee evaluar un producto diferente se deberá realizar una corrida diferente de jarras para cada producto o parámetro hidráulico a evaluar, ya que de lo contrario si se varía mas de un parámetro en cada corrida no será posible determinar la influencia de cada uno de ellos (Restrepo A. , 2010).

Para esta experimentación se evaluaron dos coagulantes diferentes sulfato de aluminio y Policloruro de aluminio (PAC), con el fin de determinar cual presentaba una mayor remoción de turbiedad y carga orgánica para el agua de la lavandería del Hospital Pablo Tobón Uribe

5.9.1.2.1 Preparación de soluciones de productos a evaluar

Los volúmenes a adicionar de las soluciones preparadas de los diferentes productos deben estar en el rango de 0.1 ml-20 ml. El cálculo para determinar estos volúmenes se muestra en la Ecuación 1:

$$V_s = \frac{D_x * V_a}{C} \text{ (Ecuación 1)}$$

V_s: Volumen de solución a adicionar de concentración C (mL)

D_x: Dosis de a aplicar en ppm (mg/L)

V_a: Volumen de agua a tratar (mL)

(Restrepo A. , 2010)

5.9.1.2.2 Condiciones de operación

Para esta tratabilidad se tuvieron en cuenta condiciones de operación mostradas en la Tabla 6, estas condiciones fueron seleccionadas según las características iniciales del agua a tratar.

Tabla 6. Condiciones de operación para el proceso de coagulación

Velocidad de agitación (RPM)	120-400
Tiempo de agitación (min)	1-5
Temperatura de las jarras (°C)	Ambiente (22-25)
Volumen de las jarras (mL)	1000-2000
pH	Agua del efluente sin tratar
Coagulantes recomendados	Sulfato de aluminio o PAC (Policloruro de aluminio)

5.9.1.2.3 Adición del floculante

Después de conocer la dosis óptima de coagulante hallada por la prueba de turbiedad, se adicionó el floculante a todas las jarras en una misma cantidad determinada por la ecuación 1 mostrada anteriormente, se deben tener en cuenta las condiciones de operación mostradas en la Tabla 7, estas condiciones de operación fueron escogidas por recomendación de expertos.

Tabla 7. Condiciones de operación para la floculación

Velocidad de agitación (RPM) y tiempo de agitación (s) inicial	120 20
Velocidad de agitación (RPM) y tiempo de agitación (s) formación de flóculos	40 120
Temperatura de las jarras (°C)	Ambiente (22-25)
Volumen de las jarras (mL)	1000-2000
pH	Agua del efluente sin tratar
Floculante recomendados	Polímero A-410

Durante el proceso de floculación se observó el tamaño y consistencia del flóculo que permitió evaluar las propiedades del flóculo en un tamaño específico. Un ejemplo de esto se muestra en la figura 2 que indica el **índice de Willcom**, el cual permite asignar un valor cualitativo para poder calificar la formación mas consistente de sedimentar de los flóculos (Giordani & Gonzales, 2008).

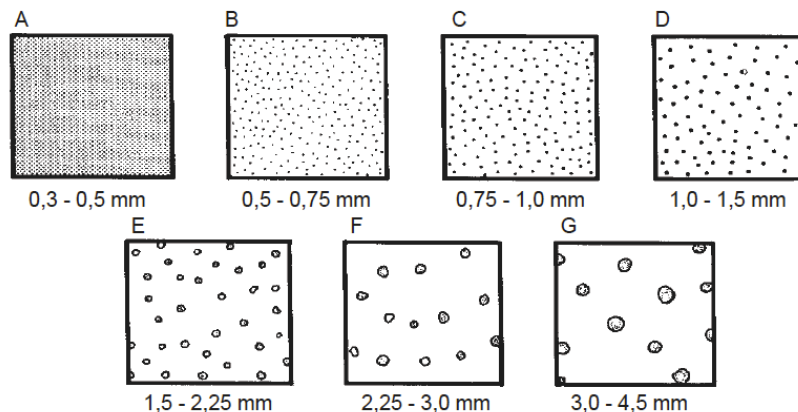


Figura 2. Índice de Willcom

En la Tabla 8 se muestra la metodología secuencial para la prueba de jarras, la cual indica paso a paso como se debe realizar.

Tabla 8. Procedimiento secuencial para la prueba de jarras

ETAPA	DESCRIPCIÓN	VELOCIDAD DE AGITACIÓN	Tiempo¹
1	Determinar condiciones iniciales del agua sin tratar		
2	Llenar los beakers con 1.000 ml o 2.000ml de agua sin tratar		
3	Adición de sulfato de aluminio o PAC, incrementando la cantidad de un beaker a otro		
4	Fase de agitación 1: coagulación	120-400 rpm ²	1-5 minutos
5	Fase de agitación 2: Crecimiento del flóculo	30-60 rpm	5-20 minutos
6	Interrupción de la agitación. Sedimentación de flóculos	0	5-10 minutos
7	Extracción de agua clarificada. Determinación de turbiedad, color, pH u otros parámetros	0	

¹ Los valores dependerán de las condiciones hidráulicas seleccionadas de acuerdo a la planta o a los valores a evaluar como parámetro de eficiencia.

² El equipo de jarras standard sólo permite 120, pero si el equipo permite trabajar a mayores velocidades se seleccionará la máxima posible.

8	Para dosis optima determinar IVL	0	30 min
9	Para lodo sedimentado a ½ hora Determinar IML	0	2-4 h

Nota: Fuente (Restrepo A. , 2010)

5.9.1.3 Determinación del índice volumétrico de lodos (IVL)

Se vertió el agua de la jarra correspondiente a la dosis óptima en un cilindro graduado o cono Inhoff y se mide el volumen de lodo sedimentado a la ½ hora. El IVL se calcula entonces con la Ecuación 2:

$$IVL = \frac{Vls}{Vm} \text{ (Ecuación 2)}$$

IVL: Índice volumétrico de lodos (mL)

Vls: Volumen de lodos sedimentables a la media hora (mL)

Vm: Volumen de agua tratada (mL)

5.9.1.4 Determinación del índice másico de generación de lodos (IML)

Cuando se termina el tiempo de decantación en la determinación del IVL, se drena con mucho cuidado el clarificado, hasta un punto en le que no se succione lodo. Se lee de nuevo el volumen, el cual generalmente es mayor que Vls y se anota como Visc. Se homogeniza este volumen y se determina el contenido en el de SS por filtración en papel según el procedimiento de Standard Methods para material seco. Determinado el valor de SS se calcula el IML de acuerdo a la Ecuación 3:

$$IML = \frac{\text{ppm sólido suspendido}}{\text{Litro de lodo}} * IVL \left(\frac{\text{Litro de lodo}}{\text{Litro de agua tratada}} \right) \text{ (Ecuación 3)}$$

$$\frac{\text{mg de sólido suspendido}}{\text{m}^3} * \frac{\text{Cantidad de agua vertida al día}}{1000 \text{ g}} * 1 \text{ kg} = \frac{\text{kg sólido seco}}{\text{día}}$$

$$\text{Cantidad de lodos húmedo (kg lodo húmedo/día)} = \frac{\text{kg sólido seco/día}}{\% \text{ kg de sólido/kg de lodo húmedo}}$$

5.9.2 Filtración del clarificado

Para dar continuación a la tratabilidad se filtró el clarificado obtenido de la jarra óptima del proceso de coagulación y floculación, esto con el fin de realizar una posterior desinfección al clarificado y darle mayor eficiencia a la tratabilidad seleccionada para el agua de la lavandería de I Hospital Pablo Tobón Uribe; esta filtración se realizó experimentalmente en una tela filtrante con tamaño de poro específico entre 20 y 25 μm .

5.9.3 Desinfección con Cloro

Para obtener un agua más descontaminada y adecuada para ser recirculada al proceso de lavado, como última etapa de tratamiento se realizó desinfección con hipoclorito de sodio con una concentración de 120 g/L, esto con el fin de eliminar los posibles patógenos presentes en el agua residual, y además obtener mayor remoción de materia orgánica.

Primero a la dosis óptima seleccionada en el proceso de coagulación y floculación se le adicionaron dosis crecientes de hipoclorito de sodio de: 3, 6 y 10 ppm. El volumen adicionado fue calculado con la ecuación 2, estas soluciones se dejan reposar por un periodo de media hora y posteriormente se realizaron mediciones de DQO y cloro residual.

5.10 Medición de calidad del agua tratada

En esta etapa del proyecto se comprobó la efectividad del tren de tratamiento escogido asegurando que se disminuyeran las concentraciones de los parámetros más problemáticos encontrados durante la caracterización inicial, afirmando que el agua tenga las condiciones idóneas para ser recirculada al proceso de lavado.

Los parámetros evaluados para garantizar la calidad del agua fueron:

5.10.1 Turbiedad

La turbiedad se midió por medio un turbidímetro TB200; esta medición se le realizó al agua sin tratar y a cada una de las jarras del procesos de coagulación y floculación, esto con el fin de conocer la dosis optima de coagulante y floculante.

5.10.2 pH

El pH se midió con un pH-metro Schott Instrument handylab; esta medición se le realizó al agua sin tratar y a cada una de las jarras del procesos de coagulación y floculación.

5.10.3 Conductividad

La conductividad se midió con un conductímetro Hach HQ14d ; esta medición se le realizó al agua sin tratar y a cada una de las jarras del procesos de coagulación y floculación.

5.10.4 Sólidos suspendidos totales

Los sólidos suspendidos totales se midieron por medio del método analítico SM-2540 D, mediante gravimetría en un horno secado, según lo establecido en el Standard Methods, esta medición se realizó en el laboratorio de Investigaciones ambientales (GIA) de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB); esta medida se realizó a la jarra catalogada como óptima para conocer el índice másico de formación de lodos (IML).

5.10.5 Coliformes totales

Los coliformes totales se midieron por medio del método analítico 9221G-922D, mediante filtración por membrana, según lo establecido en el Standard Methods (American Public Health Association, 2012), esta medición se realizó en el laboratorio de Investigaciones ambientales (GIA) de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB); esta medida se realizó a la jarra catalogada como óptima para conocer la cantidad de E-coli en la muestra y verificar la desinfección realizada con hipoclorito de sodio y garantizar la eliminación de patógenos en el agua.

5.10.6 Dureza

La dureza se midió por medio de la siguiente metodología: A un volumen de 50 mL de muestra de agua se le adicionó de 0,5 a 1 mL de buffer amoniacal con un pH de 10, adicionalmente se le agregaron de 2 a 3 gotas de negro de Erío Cromo, el cual se utilizó como indicador, y por ultimo se realizó una titulación con E.D.T.A (Ácido etilendiaminotetraacético) con una concentración de 0,01 M. Finalmente la dureza se obtiene con la Ecuación 4:

$$\text{Dureza (mg CaCO}_3\text{/L)} = \text{Volumen consumido de E.D.T.A} * 20 \text{ (Ecuación 4)}$$

Esta medición se le realizó al agua sin tratar y a la jarra catalogada como óptima.

5.10.7 Alcalinidad

La alcalinidad se midió por medio de la siguiente metodología: A un volumen de 50 mL de muestra de agua se le adiciona de 2 a 3 gotas de indicador Metil Naranja, y se titulo con ácido sulfúrico con una concentración de 0,02 N. Finalmente la alcalinidad se obtiene con la Ecuación 5:

$$\text{Alcalinidad (mg CaCO}_3\text{/L)} = \text{Volumen consumido de H}_2\text{SO}_4 * 20 \text{ (Ecuación 5)}$$

Esta medición se le realizó al agua sin tratar y a la jarra catalogada como óptima.

5.10.8 DQO

La DQO se midió por medio del método de Dicromato de Potasio, cuya metodología se encuentra estipulada en el Standard Methods (American Public Health Association, 2012)

5.11 Análisis de factibilidad técnica, económica y ambiental

5.11.1 Factibilidad técnica

El análisis de factibilidad técnica se realizó por medio de la selección del tren de tratamiento mas adecuado para las características del agua y por medio del dimensionamiento de los equipos requeridos para la implementación de la tratabilidad seleccionada, y por medio de los parámetros evaluados en la matriz de selección de alternativas.

5.11.1.1 Dimensionamiento de equipos

Los equipos requeridos para la implementación son: bombas de dosificación de químicos y para el transporte del agua, tanque de almacenamiento para el agua residual proveniente de la lavadora, tanques con agitación para los procesos de coagulación y floculación, clarificador para la sedimentación de los lodos, filtro de arena a presión y tanque para la desinfección con cloro. En el anexo 2 se muestra con detalle el diagrama de flujo con todos los equipos.

5.11.1.1.1 Bombas

El dimensionamiento de las bombas se realizó teniendo en cuenta la heurística propuesta por Walas (Walas, 2002).

$$h = \frac{\Delta P}{\rho * g} \text{ (Ecuación 6)}$$

h: Cabeza de la bomba (m)

ΔP: Cambio de presión en la bomba (Pa)

ρ: Densidad de la sustancia (kg/m³)

g: gravedad (m/s²)

$$\Delta P = \text{Presión en la descarga} - \text{Presión de succión (Ecuación 7)}$$

$$W_s = \frac{Q * \Delta P}{1714 * \eta} \text{ (Ecuación 8)}$$

Ws: Potencia de bomba (HP)

Q: Caudal (gpm)

ΔP: Cambio de presión en la bomba (psi)

H: Eficiencia de la bomba (Consultada en la heurística)

5.11.1.1.2 Tanques

El dimensionamiento de los tanques al igual que el de las bombas se realizó con la heurística de Walas (Walas, 2002).

$$V = Q * Tr \text{ (Ecuación 9)}$$

V: Volumen del tanque (m³)

Q: Caudal (m³/min)

Tr: Tiempo de residencia (min)

5.11.1.1.3 Agitadores

La potencia requerida por los agitadores para los tanques de coagulación y floculación, también fue realizada por lo sugerido en la heurística de Walas, en donde se indicaba que la potencia requerida para mezclado se encontraba en los intervalos de 0,2 a 0,5 HP (Walas, 2002).

5.11.1.1.4 Clarificador de Lamelas

El dimensionamiento de clarificador de lamelas se realizó según lo propuesto por Walas (Walas, 2002)

Inclinación de las placas:

$$I_p = \frac{\theta * \pi}{180} \text{ (Ecuación 10)}$$

Ip: Inclinación de las placas (Rad)

Q: Caudal (m³/min)

θ: Angulo de inclinación de las placas

Velocidad de sedimentación:

$$V_o = V_s * \text{seno } \theta + L * \text{coseno } \theta \text{ (Ecuación 11)}$$

Vo: Velocidad de sedimentación (m/h)

Vs: Velocidad de sedimentación libre (m/h)

L: Longitud relativa (m)

Largo de las placas:

$$l = e * L \text{ (Ecuación 12)}$$

l: largo de las placas (m)

e: 0,05 (constante)

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{V_o * 10000 * e}{3600 * \mu} \text{ (Ecuación 13)}$$

Re: Número de Reynolds <= 250 (adimensional)

μ: Viscosidad de la sustancia (cm²/s)

Tiempo de retención:

$$Tr = \frac{l * 60}{V_o} \text{ (Ecuación 14)}$$

Tr: Tiempo de residencia (min)

Área perpendicular al flujo en las placas:

$$A \perp Q = \frac{Q}{V_o} \text{ (Ecuación 15)}$$

A \perp Q: Área perpendicular al flujo en las placas (m²)

Área seccional del clarificador:

$$Asd = \frac{A \perp Q}{\text{seno } \theta} \text{ (Ecuación 16)}$$

Asd: Área seccional del clarificador (m²)

Ancho del clarificador:

$$Anclar = \sqrt{\frac{Asd}{Rla}} \text{ (Ecuación 17)}$$

Anclar: Ancho del clarificador (m)

Rla: 1,8 (constante)

Número de Lamelas:

$$\text{Número de lamelas} = \frac{L * \text{seno } \theta + e}{e * \text{Andec}} \text{ (Ecuación 18)}$$

Altura del clarificador:

$$hclar = L * \text{seno } \theta \text{ (Ecuación 19)}$$

hclar: Altura del clarificador (m)

5.11.1.1.5 Filtro de arena a presión

El dimensionamiento de filtro de arena a presión se diseñó según la siguiente metodología:

El filtro a presión es similar a un filtro de gravedad en lo referente al empleo de diferentes capas de grava y arena, disponiendo la arena fina en la parte superior del filtro y la grava más gruesa en la parte inferior del mismo. También, el flujo de agua es descendente y se distribuye desde la parte superior del filtro, y el efluente o agua filtrada es colectada en un arreglo de tuberías o colectores en el fondo del filtro. La diferencia entre estos dos tipos de filtro es que mientras que en el filtro lento el agua fluye por gravedad, en un filtro rápido el agua es forzada a fluir a través de las diferentes capas de material filtrante por presión de una bomba. En este tipo de filtro se pueden manejar relaciones Q/A de entre 80 y 120 Lpm/m², lo cual significa que con un área de filtración muy reducida se pueden manejar grandes volúmenes de agua (Blacio & Palacios, 2011).

Lecho filtrante: El medio filtrante debe estar compuesto por granos de arena duros redondeados, libres de arcilla y materia orgánica. La arena no debe contener más de 2% de carbonato de calcio y magnesio. Experimentalmente se ha encontrado que el diámetro efectivo de la arena debe ser del orden de 0,15 a 0,35 mm. La profundidad del lecho puede variar entre 0.5 y 1 m, de tal manera que el filtro pueda operar con un espesor mínimo de 0.30 m. El coeficiente de uniformidad puede ser menor a 3, se recomienda un rango de 1,8 a 2 (Blacio & Palacios, 2011).

La capa soporte debe reunir características similares a las indicadas para la arena. Debe considerarse una altura mínima de 0,3 m de grava dispuesta en tres capas de diferente granulometría. La grava más fina debe seleccionarse de acuerdo al tamaño de los orificios del drenaje, la tabla sintetiza las recomendaciones al respecto, indicando para cada límite máximos y mínimos para arenas finas y gruesas (Blacio & Palacios, 2011).

Tabla 9. Granulometría de las capas soporte

Capas	Diámetro mínimo (mm)	Diámetro máximo (mm)	Altura (cm)
1	0,5-2	1,5-4	5
2	2-2,5	4-15	5
3	5-20	10-40	10

Nota: Fuente (Blacio & Palacios, 2011)

Velocidad de diseño: La velocidad de diseño también es importante al decidir el número de unidades. Con velocidades mayores de 0,3 m/h se debe considerar como mínimo tres unidades (Blacio & Palacios, 2011).

El área de cada unidad es función de la velocidad de filtración (V_f), del caudal (Q), del número de turnos de operación (C) y del número de unidades (N) (Blacio & Palacios, 2011).

$$A_s = \frac{Q * C}{N * V_f} \text{ (Ecuación 20)}$$

Con operación continua el área de la unidad sería:

$$A_s = \frac{Q}{N * V_f} \text{ (Ecuación 21)}$$

Cuando el filtro es la única unidad de tratamiento, la velocidad será de 0,1 m/h. Se pueden considerar velocidades mayores, cuando se consideren otros procesos preliminares (Blacio & Palacios, 2011), como se muestra en la Tabla 10:

Tabla 10. Velocidades de filtración de acuerdo al número de procesos preliminares

Procesos	V_f (m/h)
Filtración	0,1-0,2
Sedimentación o pre filtración + Filtración	0,15-0,3
Floculación + Sedimentación o pre filtración + Filtración	0,3-0,5

Nota: Fuente (Blacio & Palacios, 2011)

El área requerida para la filtración se halla con la siguiente ecuación:

$$Af = \frac{Q}{Vs} \text{ (Ecuación 22)}$$

Af: Área de filtración (m²)

Q: Caudal (m³/h)

Vs: Velocidad de sedimentación (m/h)

5.11.2 Factibilidad económica

El análisis de factibilidad económica se evaluó a partir del cálculo del costo de equipos requeridos, costos de operación (energía, químicos requeridos, tratamiento de lodos y mano de obra), costo de captación y vertimiento anual de agua por consumo de la lavandería versus el ahorro al implementar la planta con una recirculación de agua del 65%, así como la recuperación de la inversión.

Los costos de algunos equipos se realizaron por medio de la metodología propuesta por Turton (Turton, 2009), el modelo utilizado para hallar los costos de los equipos es el siguiente:

$$\log(cp) = K1 + K2 * \log(A) + K3 * \log(A)^2 \text{ (Ecuación 23)}$$

$$\frac{C2}{C1} = \frac{I2}{I1} \text{ (Ecuación 24)}$$

cp: Costo de compra (\$)

K: Constantes de costo para cada equipo

A: Atributo (Potencia, área, volumen, etc.)

C1 y C2: Costo 1 y costo 2 (\$)

I1 y I2: CEPCI año 1 y CEPCI año 2 (adimensionales)

Y los demás equipos que no se encontraban en el libro de Turton fueron cotizados por diferentes proveedores.

Aunque los objetivos de optimizar el uso del agua y la reducción de residuos están

directamente relacionados con la valorización de los recursos naturales y, en consecuencia, reducir los costos para que estos beneficios puedan ser alcanzados, es necesario realizar una inversión inicial (Andrade, 2008).

En la actualidad, es casi imposible imaginar el desarrollo de cualquier actividad sin tener en cuenta los aspectos económicos asociados. La decisión final dependerá de un equilibrio entre los costos asociados a la actividad de que se trate y los beneficios resultantes. En la mayoría de los casos, la aplicación de una medida sólo se realiza cuando los beneficios superan, o al menos son iguales a los costes relacionados con el despliegue (Andrade, 2008).

Por último el cálculo del tiempo de retorno de la inversión se realizó por medio de un flujo de caja y la siguiente ecuación:

$$T = \frac{I}{A - CO} \text{ (Ecuación 25)}$$

T: Tiempo de recuperación de la inversión (años)

I: Inversión inicial para la implementación de la planta (\$/año)

A: Ahorro (\$/año)

CO: Costos de operación (\$/año)

5.11.3 Factibilidad ambiental

La factibilidad ambiental de la implementación de la planta de tratamiento de aguas residuales para la lavandería del Hospital Pablo Tobón Uribe se evalúa por medio del cumplimiento de la normatividad ambiental vigente (Decreto 1594 de 1984 y la Resolución reglamentaria del Decreto 3930 de 2010, versión diciembre 2012).

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1 Diagnóstico y caracterización inicial del efluente

6.1.1 Consumo de Agua

El agua que consume el Hospital Pablo Tobón Uribe para sus procesos, específicamente para el proceso de lavado, proviene del acueducto de Empresas Públicas de Medellín.

- Lectura del contador al iniciar el monitoreo: 068796,1
- Lectura del contador al finalizar el monitoreo: 068799,5

6.1.2 Índice de consumo de Agua

Permite conocer el consumo de agua por unidad (Kilogramo) de producto; se calcula a través de la siguiente expresión matemática (Restrepo A. , 2010):

$$ICA = \frac{\text{Consumo de } H_2O}{\text{Producción}} \quad (\text{Ecuación 25})$$

Para el caso en particular la lavandería del Hospital Pablo Tobón Uribe, el cálculo es el siguiente:

$$\text{Consumo de agua por ciclo de lavado} = 3,4 \text{ m}^3$$

$$\text{Ropa lavada por ciclo de lavado} = 100 \text{ kg de ropa sucia}$$

$$ICA = \frac{3,4 \text{ m}^3}{100 \text{ kg de ropa sucia}} = 0,034 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

El cálculo anterior solo es en caso de una lavadora; como la lavandería cuenta con tres lavadoras del mismo tipo, del mismo consumo y de la misma capacidad, el índice de consumo de agua para las tres lavadoras es el siguiente:

$$0,034 \frac{m^3}{kg} * 3 = 0,102 \frac{m^3}{kg}$$

6.1.3 Caracterización

Las aguas residuales industriales son vertidas directamente y sin tratamiento a la red de alcantarillado. Estas son descargadas conforme al proceso productivo y se encuentran combinadas con aguas residuales domésticas, y de aguas lluvias.

6.1.3.1 Resultados

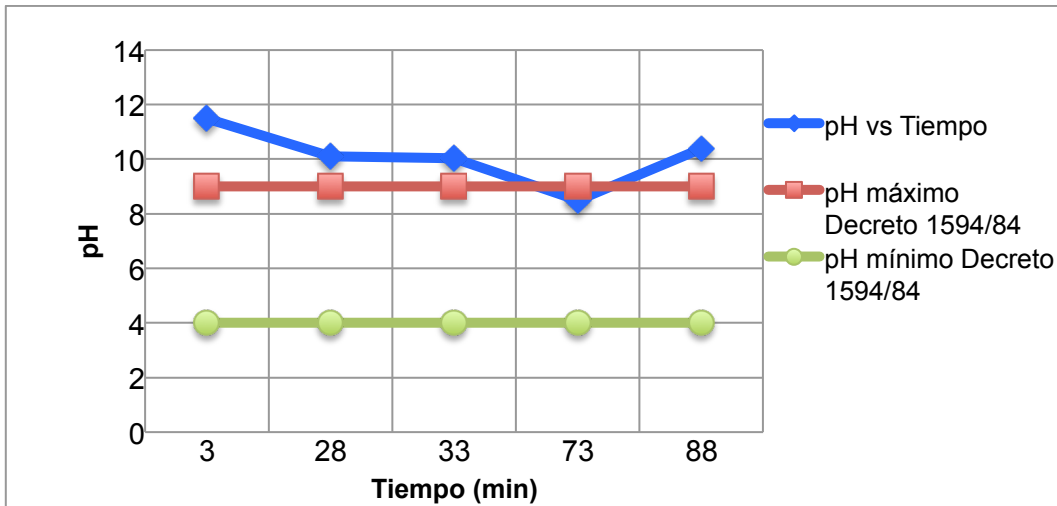
En la Tabla 11 se muestran los resultados de las muestras tomadas en cada desagüe, esto se realizó con el fin de conocer el comportamiento del pH, la temperatura y la conductividad del agua en varias etapas del ciclo de lavado:

Tabla 11. Variables medidas in situ lavandería del Hospital

Tiempo (min)	pH (U de pH)	Temperatura (°C)	Conductividad (µs/cm)	Observaciones
3	11,48	22,6	948	Agua turbia, con espuma, enjuague de prelavado
28	10,11	46,2	1047	Agua turbia, con espuma, enjuague de prelavado
33	10,03	33,4	580	Agua turbia, con espuma, enjuague de prelavado
73	8,49	23,3	175	Enjuague de lavado
88	10,38	22,7	205	Enjuague de lavado con espuma
Mínimo	8,49	22,6	174,5	
Máximo	11,48	46,2	1047	

Se graficó el comportamiento del pH, la temperatura y la conductividad para el efluente caracterizado, los resultados obtenidos se muestran en el Gráfico 1:

Gráfico 1. pH vs Tiempo caracterización inicial del efluente

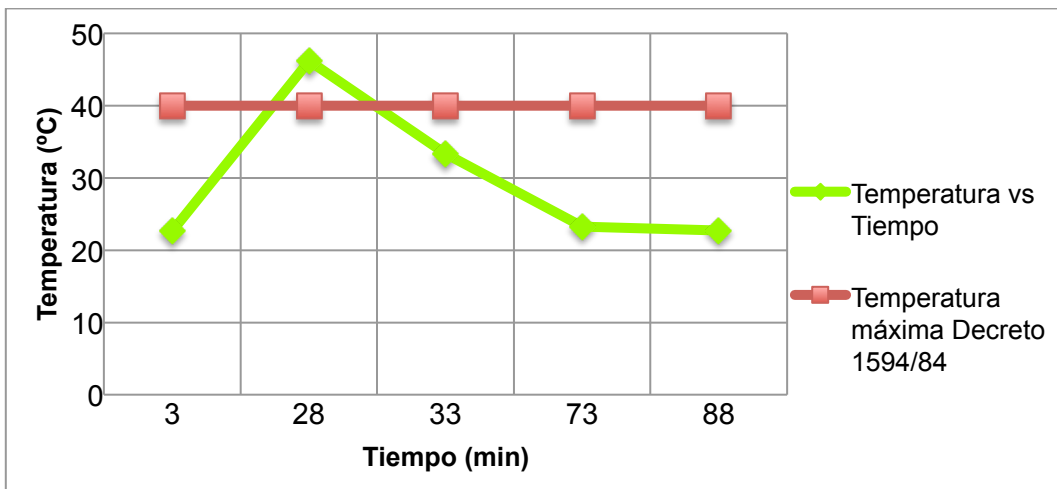


El pH presentó grandes variaciones a nivel temporal, oscilando entre 8,49 y 11,48 unidades de pH. Esto es debido a los productos químicos de naturaleza alcalina utilizados en los procesos de lavado.

Los valores obtenidos permiten definir a este tipo de aguas como de carácter alcalino, es claro que el pH reportado en el punto de caracterización se encuentra incumpliendo con lo exigido por el decreto 1594/84 (5-9 U de pH).

La temperatura al igual que el pH presentó variaciones a nivel temporal, oscilando entre 22,6 °C y 46,2 °C en el punto de caracterización, como se observa en el Gráfico 2:

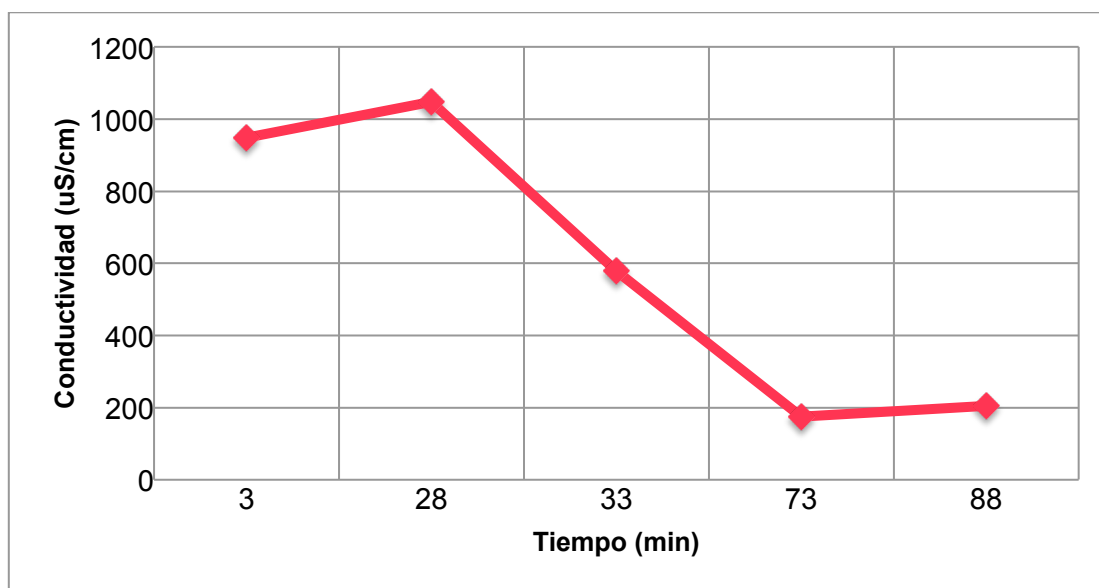
Gráfico 2. Temperatura vs Tiempo para el efluente caracterizado



Para el vertimiento de las aguas hacia el alcantarillado público, la normatividad ha definido como valor máximo permitido 40 °C. Con base a lo anterior se encontró que uno de los registros de temperatura incumplió con las exigencias establecidas en el Decreto 1594 de 1984 para descargar al alcantarillado.

También se observó la variación de la conductividad durante el ciclo de lavado debido a la adición de detergentes, desinfectantes, entre otros productos químicos, especialmente en la primera adición de detergente se observa aumento en esta variable pero en el transcurso del ciclo de lavado conforme se van realizando los enjuagues este parámetro disminuye.

Gráfico 3. Conductividad vs Tiempo para el efluente caracterizado



Posteriormente al agua recolectada se le realizaron mediciones de los siguientes parámetros que se encuentran dentro de la normativa ambiental aplicable para este tipo de procesos y que es necesario conocer antes de proponer cualquier alternativa de tratabilidad:

Tabla 12. Resultados de laboratorio

Lavandería del Hospital, desagüe de lavadoras		
Parámetros	Unidades	Resultados de Laboratorio
DBO	mg O ₂ /L	33,11
DQO	mg O ₂ /L	255,5
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	19,448
Sólidos Suspendidos	mg/L	52,60
Sólidos Sedimentables	mL/L-h	<0,1
Grasas y/o Aceites	mg/L	15,5
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	<1,8
Coliformes Totales	UFC/100 mL	1600

Con relación a los Sólidos Sedimentables se registró una concentración Menor a 0.10 mL/L-h, por tanto cumple con lo establecido para descargar al sistema de alcantarillado (Menor de 10 mL/L-h) establecido en el decreto 1594 de 1984 – Artículo 73 y en la resolución 3930 de 2010- Artículo 82.

La concentración de grasas y/o aceites en la descarga fue de 15,50 mg/L. El valor obtenido cumple con lo establecido para descargar al sistema de alcantarillado (≤ 100 mg/L) establecido en el decreto 1594/84 Artículo 73 y en la resolución 3930 de 2010- Artículo 82 (50 mg/L).

Con respecto a la DBO y la DQO se observa que los valores obtenidos están dentro de los rangos permitidos en la resolución 3930 de 2010 (DQO: 1200 y DBO:600), la cual será vigente a partir del 2014; y no aplican en el decreto 1594 de 1984- Artículo 73 y 74.

En relación a los coliformes totales (1.600 UFC/100 mL) se logró determinar que aunque no se cumplía con el valor máximo permitido en el decreto 1594 de 1984- Artículo 73 y 74 (1.000 UFC/100 mL), para la resolución 3930 de 2010- Artículo 82 sí logra dar cumplimiento ya que el límite permisible es mucho mayor ($1 \cdot 10^5$ UFC/100 mL). En el caso de los coliformes fecales (<1,8 UFC/100 mL) es preciso aclarar que el valor del parámetro no aplica en ninguna de las dos normativas ambientales mencionadas.

En los sólidos suspendidos (52,60 mg/L), se evidencia un cumplimiento de la resolución 3930 de 2010- Artículo 82, cuyo valor máximo permitido es 400 mg/L, y en relación a el

decreto 1594 de 1984 este parámetro no aplica para el proceso particular de lavanderías hospitalarias.

6.1.3.2 Biodegradabilidad del efluente

A pesar del comportamiento presentado por la DBO y la DQO, las cuales se encuentran cumpliendo con la normativa ambiental aplicable al proceso, y que además son valores relativamente bajos para la calidad de contaminantes y patógenos presentes en la ropa, la relación entre ambas presenta un concepto de No Biodegradabilidad, es decir, no son digeribles por los microorganismos encargados de depurar las cargas contaminantes.

$$\frac{DBO}{DQO} = \frac{33,11}{255,5} = 0,13$$

Debido a ello estas aguas requieren esencialmente un tratamiento fisicoquímico para poder disminuir la carga contaminante.

6.2 Potencial de reúso del agua

El potencial de reúso se realizó en dos escenarios, el primero recirculando el agua sin ningún tipo de tratamiento, y el segundo realizado un tratamiento con remoción del 80%, esto con el fin de conocer el aumento de los parámetros problema presentes en el agua y evaluados anteriormente, y de esta manera conocer que porcentaje del agua vertida puede ser recirculada al proceso de lavado.

Primer escenario: Como primer escenario se planteo un sistema de recirculación sin ningún tipo de tratamiento como se muestra en la Figura 2, esto con el fin de conocer como aumentaban las concentraciones de los diferentes parámetros a la medida que mayor cantidad de agua se recirculaba sin recibir ningún tipo de tratamiento.

SISTEMA SIN TRATAMIENTO

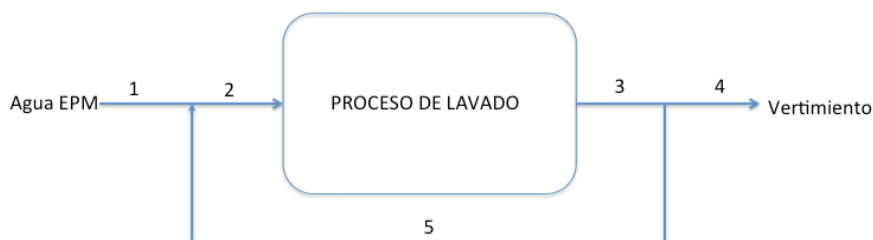


Figura 2. Sistema de recirculación sin tratamiento

Los resultados obtenidos para este escenario se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Resultados de ciclos de concentración sin tratamiento

% reuso	Q5	Q1	Ciclo de concentración	∫ de DBO (ppm)	∫ de DQO (ppm)	∫ de Dureza	∫ Sólidos suspendidos (ppm)	∫ Sólidos disueltos (ppm)	∫ de Grasa (ppm)	Q4
0	0	3,4	0	33,11	255,5	19,448	52,6	0,1	15,5	3,4
10%	0,34	3,06	0,11	36,79	283,89	21,609	58,44	0,11	17,22	3,06
20%	0,68	2,72	0,25	45,99	354,86	27,011	73,06	0,14	21,53	2,72
30%	1,02	2,38	0,43	65,69	506,94	38,587	104,37	0,20	30,75	2,38
40%	1,36	2,04	0,67	109,49	844,91	64,312	173,94	0,33	51,26	2,04
50%	1,7	1,7	1	218,98	1689,81	128,624	347,88	0,66	102,51	1,7
60%	2,04	1,36	1,5	547,45	4224,54	321,561	869,71	1,65	256,28	1,36
65%	2,21	1,19	1,86	1564,15	12070,11	918,745	2484,88	4,72	732,24	1,19
70%	2,38	1,02	2,33	1824,85	14081,79	1071,869	8282,94	15,75	2440,79	1,02
80%	2,72	0,68	4	9124,23	70408,95	5359,347	41414,71	78,74	12203,96	0,68
90%	3,06	0,34	9	91242,28	704089,51	53593,474	414147,14	787,35	122039,56	0,34
100%	3,4	0	0	91242,28	704089,51	53593,474	414147,14	787,35	122039,56	0

Se realizó un balance de materia para conocer que cantidad de agua se estaba recirculando al proceso, y según esta cantidad se observó el aumento en las concentraciones de los diferentes parámetros medidos en la caracterización inicial, el valor inicial de cada parámetro fue tomado según el resultado dado en dicha caracterización, en la Tabla 13 se puede observar que a medida que se ingresa más agua al proceso sin ningún tratamiento los parámetros como la DQO, los sólidos suspendidos, entre otros van aumentando su concentración lo que aumenta de manera significativa la carga orgánica del agua y hace que esta no sea biodegradable, además de que los detergentes usados en el lavado de la ropa no podrán cumplir su función de manera apropiada, lo que hace que no se cumpla con los estándares de limpieza establecidos para este proceso, por este motivo no es recomendable recircular el agua sin ningún tipo de tratamiento.

Segundo escenario: Para el segundo escenario se planteó un sistema con un tratamiento de aguas residuales con un porcentaje de remoción del 80%, como se muestra en la Figura 3, y se realizó el mismo ejercicio que en el escenario anterior.

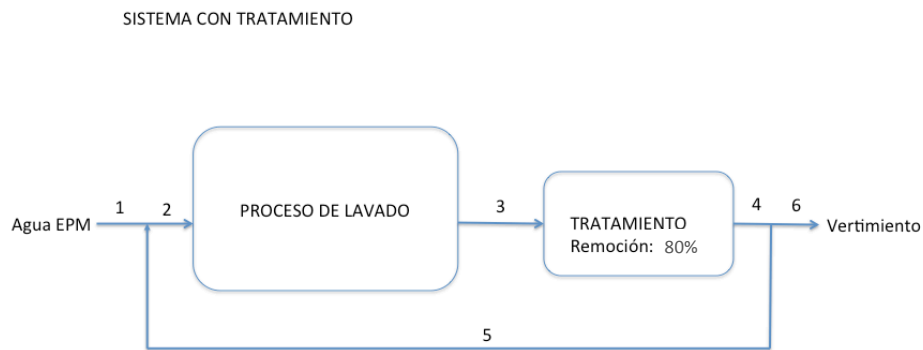


Figura 3. Sistema de recirculación con tratamiento

Los resultados obtenidos para este escenario se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Resultados de ciclos de concentración con tratamiento

% reuso	Q4	Q5	Q1	Q6	Ciclo de concentración
0	2,72	0	3,4	2,7	0
10%	2,72	0,27	3,1	2,4	0,09
20%	2,72	0,54	2,9	2,2	0,19
30%	2,72	0,82	2,6	1,9	0,32
40%	2,72	1,09	2,3	1,6	0,47
50%	2,72	1,36	2	1,4	0,67
60%	2,72	1,63	1,8	1,1	0,92
65%	2,72	1,77	1,6	1	1,08
70%	2,72	1,9	1,5	0,8	1,27
80%	2,72	2,18	1,2	0,5	1,78
90%	2,72	2,45	1	0,3	2,57
100%	2,72	2,72	0,7	0	4

Al igual que en el primer escenario se realizó un balance materia pero esta vez teniendo en cuenta un tratamiento con remoción de 80%, esto con el fin de conocer hasta que porcentaje era posible recircular de manera que el aumento en los ciclos de concentración no sobrepasara el valor de 1, estos ciclos de concentración se calculan dividiendo el flujo de agua recirculada sobre el flujo de agua fresca proveniente del acueducto; en la Tabla

14 se observa que después del 65% de recirculación los ciclos de concentración tienen un valor de 1,27 lo que no hace posible la recirculación de agua a partir de este valor sin que se afecten las condiciones apropiadas para el proceso de lavado realizado en la lavandería.

6.3 Comparación de las características fisicoquímicas del efluente con la normatividad vigente de vertimientos

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos mediante la caracterización fisicoquímica del agua previamente realizada y la normatividad ambiental aplicable al proceso de lavanderías hospitalarias, fue necesario realizar una comparación entre estos valores y así determinar que parámetros se encontraban dentro de la norma y cuales serian limitantes a la hora de proponer un tratamiento para la recirculación del agua al proceso.

En la Tabla 15 se presenta la comparación del estudio con lo exigido por el Decreto 1594 de 1984 y el borrador de la Resolución reglamentaria del Decreto 3930 de 2010, versión diciembre 2012, de vertimientos a cuerpos de aguas superficiales y a sistemas de alcantarillado público.

Tabla 15. Comparación normativa ambiental vigente

Parámetro	Unidades	Decreto 1594 de 1984 Artículo 73 y 74			Resolución reglamentaria del Decreto 3930 de 2010, versión diciembre 2012	
		Límite permisible	Resultado desagüe lavadora	Concepto	Límite permisible	Concepto
pH	pH	5 a 9	8,49-11,48	No cumple	5 a 9	No cumple
Temperatura	°C	Menos de 40	22,6-46,2	No cumple	Menos de 40	No cumple
Caudal	L/s	Qpromedio		N/A		

		*1,5				
DBO	mg O ₂ /L	Remoción de carga del 80%	33,11	N/A	600	Cumple
DQO	mg O ₂ /L	Remoción de carga del 80%	255,5	N/A	1200	Cumple
Sólidos Suspendidos	mg/L	Remoción de carga del 80%	52,6	N/A	400	Cumple
Sólidos Sedimentables	mL/L-h	<10	<10	Cumple	10	Cumple
Grasas y/o aceites	mg/L	<100	15,5	Cumple	50	Cumple
Dureza	mg CaCO ₃ /L	N/A	19,448	N/A	N/A	N/A
Coliformes fecales	UFC/100 mL	N/A	<1,8	N/A	N/A	N/A
Coliformes totales	UFC/100 mL	1000	1600	No cumple	1*10 ⁵	Cumple

Se evidencia que aunque para ambas normativas el pH y la temperatura están por encima de los valores máximos permitidos, es necesario además de lograr su disminución implementar un tratamiento de aguas que permita disminuir estos parámetros y adicionalmente la biodegradabilidad del agua, mas específicamente la DQO y así lograr recircular el agua actualmente vertida y cumplir con los requerimientos mínimos de calidad de agua para lavanderías hospitalarias.

6.4 Balances de materia del proceso de lavado

Los balances obtenidos para el proceso de lavado realizado en la lavandería se muestran en la Figura 4:

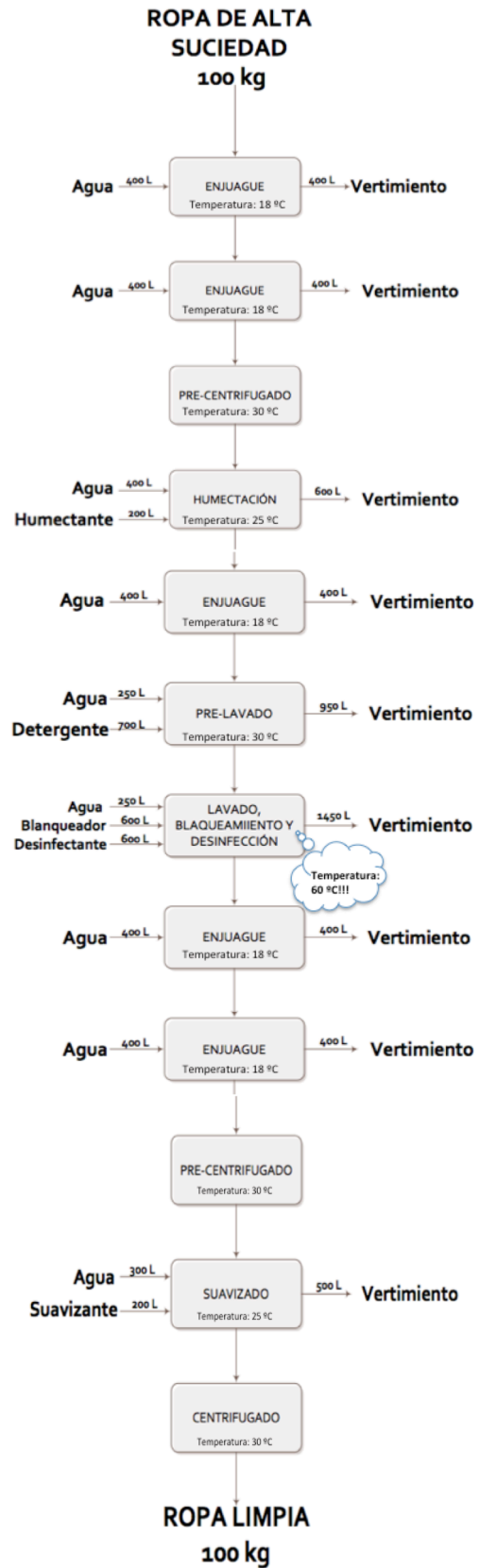


Figura 4. Diagrama balance proceso de lavado

Con los balances de agua realizados para el proceso de lavado se concluye que el 100% del agua captada del acueducto es vertida al alcantarillado público, junto con los químicos utilizados en el proceso.

6.5 Matriz de selección de alternativas

En la matriz de selección de alternativas de tratamiento de agua para la lavandería del Hospital Pablo Tobón Uribe se evaluaron las tecnologías que por revisión bibliográfica han sido implementadas en lavanderías industriales o en lavanderías hospitalarias específicamente, las tecnologías evaluadas fueron: Coagulación y floculación, ozonización, procesos avanzados de oxidación y filtración

Dentro de la matriz se evaluaron diferentes parámetros teniendo en cuenta diferentes aspectos y dándole un valor evaluativo a cada uno de ellos, a cada parámetro se le dio un porcentaje según su importancia como se puede ver en la figura 6.

Los parámetros evaluados con cada uno de sus aspectos fueron (Restrepo A. , 2010):

- **Seguridad y análisis de riesgo:** Entorno en general (requerimientos de seguridad industrial, área de ubicación de la planta, red contra incendios, control de olores, etc.) y entorno específico (Normas de seguridad y riesgo durante la operación).
- **Tecnología:** Implementación, procesos requeridos, equipos requeridos, casos de estudio exitosos, control de proceso, automatización de proceso, vigencia de tecnología y proveedores.
- **Proceso operativo:** Complejidad, capacidad de producción, eficiencia de recuperación (vertimientos recuperados, agua residual recirculada), cantidad de producto recuperado, materiales requeridos (químicos y catalizadores) servicios industriales requeridos, tiempo de proceso, costo de insumos, confiabilidad del proceso de recuperación, mantenimiento (equipos, repuestos, paro de proceso).
- **Aspectos ambientales:** Lodos, emisiones, consumo de energía, residuos peligrosos.
- **Consumos energéticos:** Consumo de energía eléctrica por los equipos necesarios para la operación del tratamiento.
- **Costos de inversión:** Equipos principales, instalación, mano de obra, insumos implementación, pérdidas y garantías.

- **Químicos requeridos:** Suministro, riesgos, consumos, residuos generados y toxicidad.

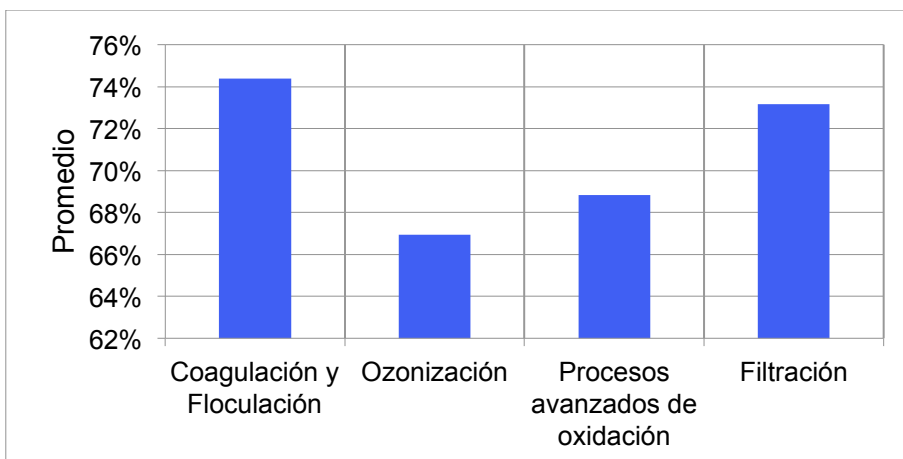
Cada uno de los parámetros y aspectos mencionados anteriormente se evaluaron según su porcentaje de importancia desde 0 a 100% dependiendo del aspecto que se evaluara, la información requerida para la evaluación de cada uno de los aspectos fue investigada en la bibliografía disponible para cada una de las tecnologías o consultada a proveedores. La Figura 5 muestra un resumen general de lo obtenido según lo evaluado para cada tecnología, la matriz de selección de alternativas completa se encuentra en el anexo 3 de este documento.

	RESUMEN	PESO POR ITEM EN %	Marco Referencia	Coagulación y Floculación	Ozonización	Procesos avanzados de oxidación	Filtración
1	SEGURIDAD INDUSTRIAL Y ANÁLISIS DE RIESGOS	5%	100%	55%	45%	48%	48%
2	TECNOLOGÍA	25%	100%	87%	76%	80%	90%
3	PROCESO OPERATIVO	25%	100%	83%	76%	80%	75%
4	ASPECTOS AMBIENTALES	10%	100%	77%	71%	69%	72%
5	CONSUMOS ENERGETICOS	10%	100%	50%	50%	50%	50%
6	COSTOS DE INVERSIÓN	20%	100%	67%	59%	61%	69%
7	QUÍMICOS REQUERIDOS	5%	100%	65%	56%	52%	73%
	PROMEDIO	100%	100%	74%	67%	69%	73%

Figura 5. Resumen de resultados Matriz de selección de alternativas

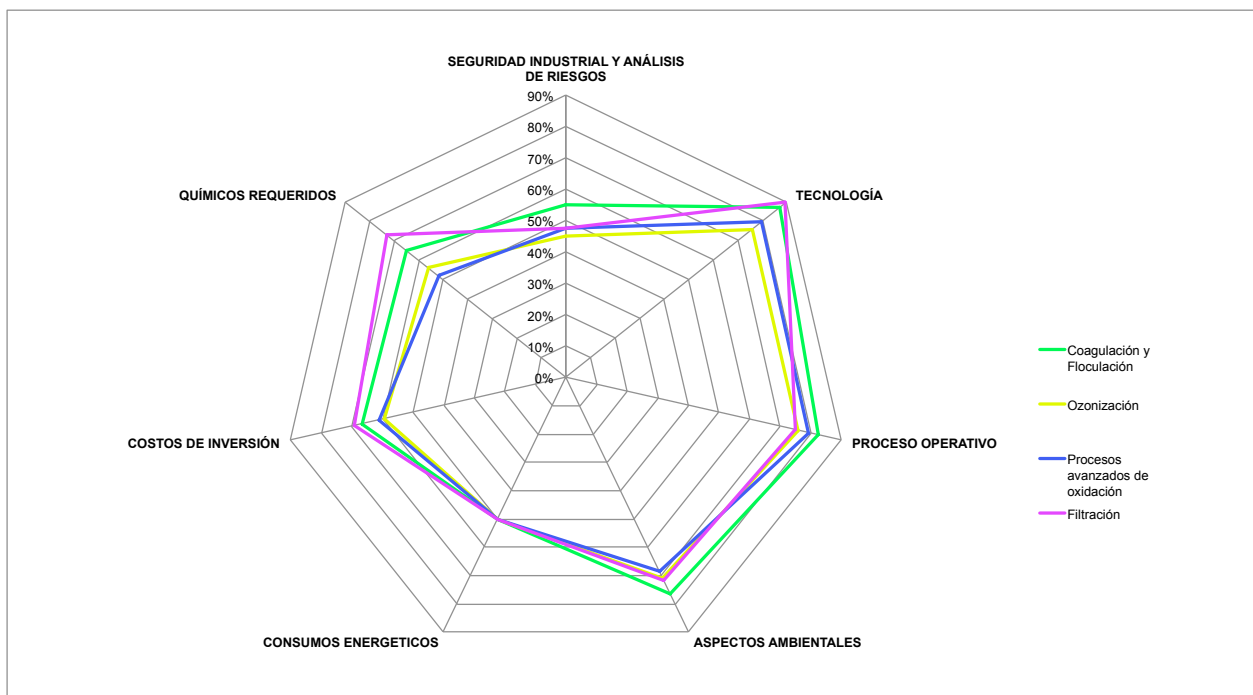
En el resumen de resultados y en el gráfico 4 se puede apreciar que la tecnología con mayor porcentaje fue coagulación y floculación, seguido por filtración, lo que da una primera idea de que estas tecnologías pueden ser mas adecuadas para implementar en la lavandería, según las características evaluadas de las tecnologías y las características del agua vertida.

Gráfico 4. Resultados obtenidos de la matriz de selección de alternativas



Otro método para evidenciar los resultados obtenidos de la matriz de selección de alternativas es el polígono mostrado a continuación, el cual tiene como variable de respuesta que el parámetro evaluado que se acerque más a la punta de este es el más adecuado según la evaluación que se está realizando, para este caso en particular se muestra en cada uno de los picos del polígono los aspectos evaluados para cada una de las tecnologías y el comportamiento que tiene cada una de ellas según los requerimientos específicos; en el gráfico 5 se puede ver que la tecnología que se acerca más a las 5 puntas del polígono es la coagulación y la floculación, lo que también da como respuesta que esta puede ser la tecnología requerida por el agua vertida en el proceso de lavado.

Gráfico 5. Polígono obtenido de la matriz de selección de alternativas



6.6 Cuadro de decisión para la determinación del tratamiento de aguas residuales

Con el fin de completar los resultados obtenidos por la matriz de selección de alternativas y de finalizar la selección del tratamiento adecuado para el tipo de agua vertida, se realizó un cuadro de decisión (Tabla 16), en el cual se tuvieron en cuenta las características que presenta el agua vertida actualmente, los límites permitidos por la normatividad ambiental vigente, la calidad del agua del acueducto de EPM y la calidad de agua establecida para lavanderías hospitalarias encontrada por revisión bibliográfica.

Tabla 16. Cuadro de decisión para la determinación del tren de tratamiento

Parámetro	Agua vertida de la lavandería del HPTU	Normatividad Vertimientos 3930 articulo 82 CIU 8610 alcantarillado	Requisito calidad para recirculación	Calidad EPM
pH	10 a 11,5	5 a 9	6,5 a 9	7 a 7,5
Conductividad (uS/cm)	400 a 500	N/A	N/A	70 a 80
Turbiedad (NTU)	20 a 80	N/A	5	< 1
Temperatura (°C)	22 a 46	< 40	25	25
DBO (ppm O ₂)	33	600	No detectable	N/D
DQO (ppm O ₂)	250 a 300	1200	< 65	< 10
Grasas y aceites (mg grasa/L)	15,5	50	N/A	N/D
Dureza (ppm CaCO ₃)	18 a 20	N/A	100	20 a 30
Alcalinidad (ppm CaCO ₃)	130 a 150	N/A	150 a 200	20 a 30
Coliformes totales (UFC/100 mL)	1600	1*10 ⁵	N/A	0
Sólidos sedimentables totales (mL/L-h)	< 10	10	N/A	N/D
Sólidos suspendidos totales (mg SS/L)	52,6	400	N/A	N/D

Con ayuda de los resultados obtenidos en el numeral 6.5, la comparación realizada y la opinión de expertos se logró determinar que para el tipo de agua vertida por el ciclo de lavado era necesario implementar más de un tratamiento que ayudara a remover la carga orgánica presente en el efluente, además de disminuir el pH y la temperatura.

En la Figura 6 se muestra el tren de tratamiento seleccionado, para tratar el agua residual del proceso de lavado en el Hospital Pablo Tobón Uribe fue: Coagulación + Floculación, seguido de una filtración y por último una desinfección con hipoclorito de sodio.

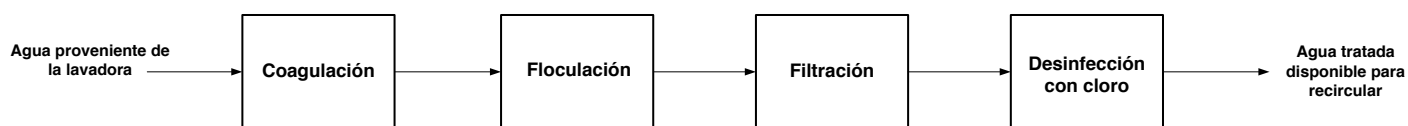


Figura 6. Tren de tratamiento de aguas para la lavandería del HPTU

Este tren de tratamiento fue seleccionado debido a que por revisión bibliográfica algunos de los coagulantes más utilizados en la industria, pueden ser adicionados sin necesidad de ajustar el pH, ya que su composición ayuda a disminuirlo, además de que se tienen antecedentes exitosos en los que este tipo de tratamiento presenta un gran porcentaje de remoción de carga orgánica, disminución en la turbiedad y color del agua. Adicionalmente la desinfección con hipoclorito de sodio permite disminuir la carga orgánica así como la presencia de patógenos como la E-coli.

6.7 Resultados obtenidos de la evaluación de tecnologías de tratamiento de aguas residuales

6.7.1 Primer ensayo de tratabilidad

Coagulación y floculación: Para el primer ensayo de tratabilidad se compararon los dos coagulantes recomendados (Sulfato de aluminio y PAC), ambos con una concentración de 100 g/L, esto con el fin de conocer cual de los dos presentaba mayor cantidad de remoción, y se usó como floculante el polímero A-410 con una concentración de 1 g/L, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 17:

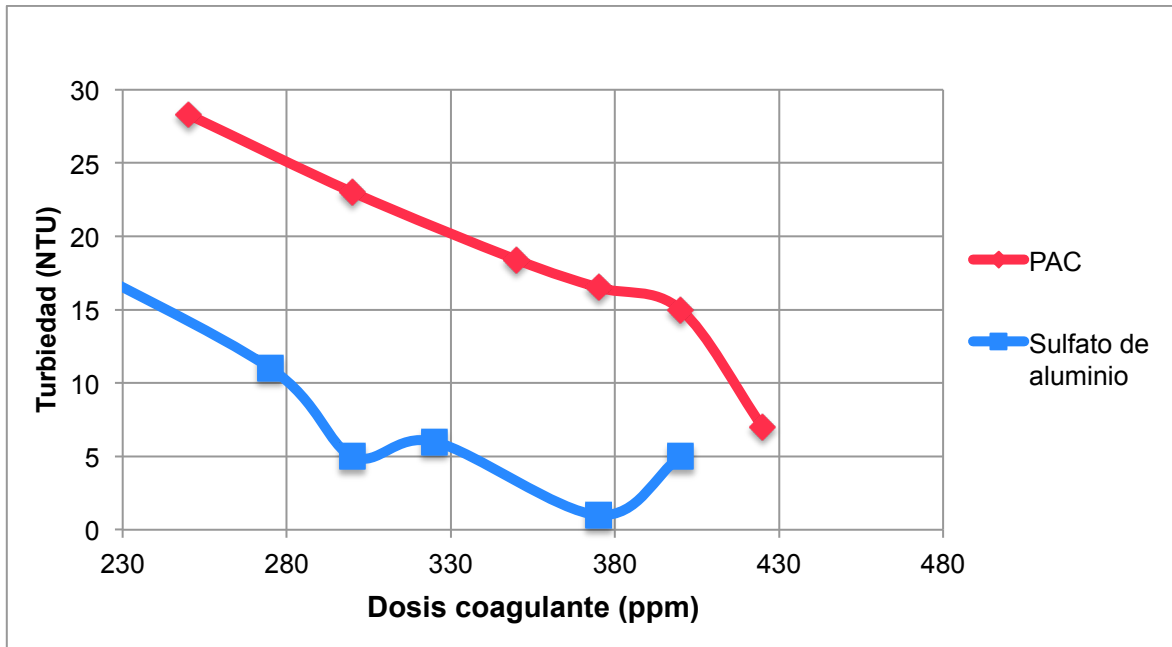
Tabla 17. Resultados obtenidos de dosis óptima de coagulante para el primer ensayo

Coagulante o Floculante	Jarras	Cantidad de agua a tratar (L)	Dosis de coagulante o floculante (mg/L)	Volumen a agregar de coagulante o floculante (mL)	Tiempo (s)	Velocidad de agitación (RPM)	Turbiedad (NTU)
Sulfato de aluminio	Jarra 1	0,5	200	1	60	120	20
	Jarra 2	0,5	275	1,375	60	120	11
	Jarra 3	0,5	300	1,5	60	120	5
	Jarra 4	0,5	325	1,625	60	120	6
	Jarra 5	0,5	375	1,875	60	120	1
	Jarra 6	0,5	400	2	60	120	5
PAC	Jarra 1	0,5	250	1,25	60	120	28,3
	Jarra 2	0,5	300	1,5	60	120	23
	Jarra 3	0,5	350	1,75	60	120	18,4
	Jarra 4	0,5	375	1,875	60	120	16,5
	Jarra 5	0,5	400	2	60	120	15
	Jarra 6	0,5	425	2,125	60	120	7
Floculante: Polimero A-410	Jarra 1	0,5	3	1,5	120	40	N/A
	Jarra 2	0,5	3	1,5	120	40	N/A
	Jarra 3	0,5	3	1,5	120	40	N/A
	Jarra 4	0,5	3	1,5	120	40	N/A
	Jarra 5	0,5	3	1,5	120	40	N/A
	Jarra 6	0,5	3	1,5	120	40	N/A

En la Tabla 17 se pueden observar los resultados obtenidos de la prueba de jarras, donde se utilizaron como coagulantes el sulfato de aluminio y el PAC, en diferentes dosis, se logró determinar la cantidad óptima de cada uno de ellos 375 y 425 ppm respectivamente, usando la metodología mencionada anteriormente en este documento.

Los rangos de dosis de coagulante en los que se inició la prueba fueron debido a las características iniciales del agua sin tratar, principalmente la turbiedad. Las dosis fueron aumentando de jarra en jarra y de esta forma se determinó de forma cualitativa el rango en el que se podría encontrar la dosis óptima de coagulante. Luego en cada una de las jarras se adicionó la misma cantidad de floculante y se observó la formación de flóculos en cada una de ellas y su posterior sedimentación, determinando finalmente como óptima aquella que tuviera mayor cantidad de flóculos y menor turbiedad. El comportamiento de la turbiedad se observa en el Gráfico 6:

Gráfico 6. Dosis de coagulante vs Turbiedad para el primer ensayo



De acuerdo al los puntos de quiebre observados en la gráfica se escogieron las dosis de 375 ppm para el sulfato de aluminio y 425 ppm para el PAC para realizar los ensayos de tratabilidad restantes.

Por los resultados de turbiedad observados en la tabla 17, se decidió continuar los ensayos siguientes con el sulfato de aluminio debido a la disminución de la turbiedad reportada 1 NTU, además de que la dosis seleccionada como óptima es menor que la del PAC.

Generación de lodos de los tratamientos de coagulación y floculación: A la jarra escogida como óptima (375 ppm de sulfato de aluminio), se le midió la cantidad de sólidos suspendidos generados por la adición de sulfato de aluminio y de polímero A-410, esto se realizó con el fin de conocer la cantidad de lodos generada en kilogramo por metro cúbico de agua tratada, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 18:

Tabla 18. Resultados obtenidos para la generación de lodos

Generación de lodos	
Vls (mL)	40
Vm (mL)	1000
lv	0,04
Visc (mL)	80
Sólidos suspendidos (ppm)	3084,67
IML (kg sólido seco/día)	11,104812
% de H ₂ O en la deshidratación de lodos	70%
IML (kg de lodo humedo/día)	37,01604

Se puede observar en la Tabla 18 que de los 1000 mL de la jarra escogida como óptima se generaron 40 mL de lodo sedimentable (Vls), de los cuales después de realizar la prueba de sólidos suspendidos se obtuvo una concentración de 3084,67 ppm.

Posteriormente se realizó el cálculo del índice másico de lodos (IML), obteniéndose un valor de 11,1048 kg sólido seco/día de agua tratada. Es necesario tratar los lodos generados durante el tratamiento, por lo que se asumió que estos tenían 70% de humedad, teniendo esto en cuenta se obtuvo que la cantidad de lodo húmedo por día sería de 37,016 Kg lodo húmedo/día.

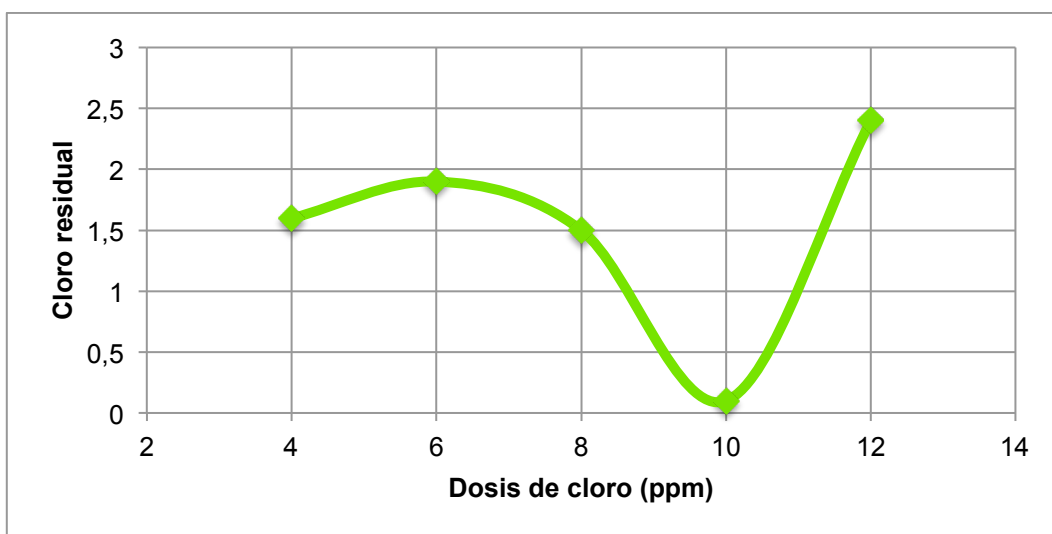
Desinfección con cloro: Después de la tratabilidad de coagulación y floculación se realizó el tratamiento de desinfección con hipoclorito de sodio, en la Tabla 19 se muestran las diferentes cantidades adicionadas a la muestra óptima:

Tabla 19. Dosis adicionadas de hipoclorito usadas para la desinfección

Cantidad de agua a tratar (L)	Dosis de cloro (mg/L)	Concentración cloro (mg/L)	Volumen a agregar de cloro (mL)	Cloro residual
0,03	4	1	0,12	1,6
0,03	6	1	0,18	1,9
0,03	8	1	0,24	1,5
0,03	10	1	0,3	0,1
0,03	12	1	0,36	2,4

Las dosis de cloro mostradas en la Tabla 19 fueron escogidas por recomendación de los ingenieros de la empresa Tepsa S.A, teniendo en cuenta el tipo de agua que se estaba tratando y sus características iniciales; el cloro residual se midió por medio de un colorímetro, usando fenolftaleína como indicador. Según los datos obtenidos de la desinfección mostrados en la Tabla 19 se realizó el siguiente gráfico:

Gráfico 7. Resultados de cloro residual para el primer ensayo



Del gráfico 7 se puede observar como al inicio de la cloración con 4 ppm se obtiene 1,5 de cloro residual, lo que quiere decir que en ese momento los compuestos orgánicos presentes en el agua comienzan a consumirse el cloro adicionado antes de que tenga oportunidad de actuar como desinfectante. Posteriormente, se evidencia como se empieza a consumir el cloro adicionado al agua, lográndose la desinfección de esta, además de que se forman cloraminas, estas se forman debido a la presencia de trazas de amoníaco presentes en el agua debido a los detergentes usados en el proceso de lavado. Al final en la dosis de 12 ppm seleccionada como óptima, evidencia un aumento en la cantidad de cloro residual, lo que indicó que en el agua tratada ya no se encontraban presentes más compuestos orgánicos que pudieran consumir el cloro agregado.

6.7.2 Segundo ensayo de tratabilidad

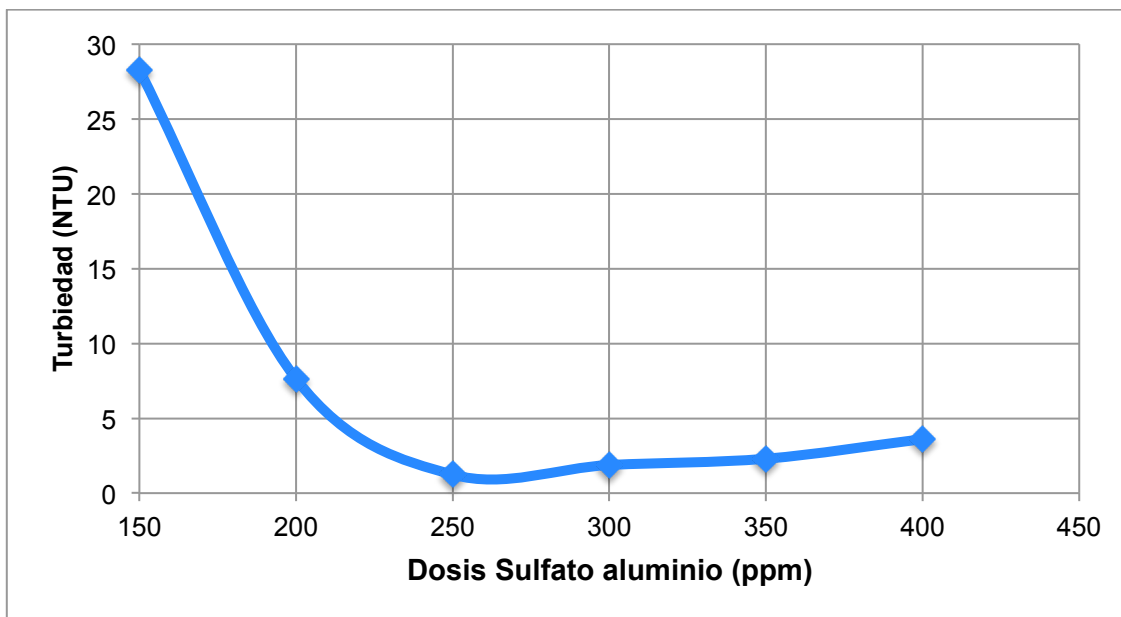
Coagulación y floculación: Para el segundo ensayo de tratabilidad solo se utilizó como coagulante el sulfato de aluminio con una concentración de 100 g/L, ya que en el primer ensayo se definió que este era el que mejor capacidad de remoción tenía, y de nuevo se usó como floculante el polímero A-410 con una concentración de 1 g/L, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. Resultados obtenidos de dosis óptima de coagulante para el segundo ensayo

Coagulante o Floculante	Jarras	Cantidad de agua a tratar (L)	Dosis de coagulante o floculante (mg/L)	Volumen a agregar de coagulante o floculante (mL)	Tiempo (s)	Velocidad de agitación (RPM)	Turbiedad (NTU)
Sulfato de aluminio	Jarra 1	2	150	3	60	120	28,3
	Jarra 2	2	200	4	60	120	7,64
	Jarra 3	2	250	5	60	120	1,24
	Jarra 4	2	300	6	60	120	1,88
	Jarra 5	2	350	7	60	120	2,3
	Jarra 6	2	400	8	60	120	3,61
Floculante: Polimero A-410	Jarra 1	2	1,5	3	120	40	N/A
	Jarra 2	2	1,5	3	120	40	N/A
	Jarra 3	2	1,5	3	120	40	N/A
	Jarra 4	2	1,5	3	120	40	N/A
	Jarra 5	2	1,5	3	120	40	N/A
	Jarra 6	2	1,5	3	120	40	N/A

La tabla 20 muestra los resultados de tratabilidad utilizando solo el coagulante que anteriormente se determinó como óptimo para la calidad de agua a tratar. Las dosis agregadas a cada una de las jarras se seleccionaron de manera similar al primer ensayo. La jarra 4 fue seleccionada como óptima para esta prueba con una concentración de 300 ppm, ya que además de que se observó una buena formación de flóculos, la turbiedad disminuyó considerablemente (1,88 NTU).

Gráfico 8. Dosis de coagulante vs Turbiedad para el segundo ensayo



Como se puede observar en el gráfico 8, el valor de la turbiedad disminuyó a medida que se fue aumentando la dosis de coagulante hasta llegar a la dosis de 300 ppm, a partir de ahí aunque se encuentra en valores relativamente bajos, se evidencia un aumento leve en

su valor con respecto a la dosis de 300 ppm, lo que quiere decir que en este rango es donde se puede determinar la dosis óptima para este tipo de agua.

Generación de lodos de los tratamientos de coagulación y floculación: A la jarra escogida como óptima se le midió la cantidad de sólidos suspendidos generados por la adición de sulfato de aluminio y de polímero A-410, esto se realizó con el fin de conocer la cantidad de lodos generada en kilogramo por metro cúbico de agua tratada, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 21.

Tabla 21. Resultados obtenidos para la generación de lodos

Generación de lodos	
Vls (mL)	100
Vm (mL)	2000
lv	0,05
Visc (mL)	200
Sólidos suspendidos (ppm)	1234
IML (kg sólido seco/día)	5,553
% de H2O en la deshidratación de lodos	70%
IML (kg de lodo húmedo/día)	18,51

En la tabla 21 se puede observar que de los 2000 mL de la jarra escogida como óptima se generaron 100 mL de lodo sedimentable (Vls), de los cuales después de realizar la prueba de sólidos suspendidos se obtuvo una concentración de 1234 ppm.

Posteriormente, se realizó el cálculo del índice másico de lodos (IML), obteniéndose un valor de 5,553 kg sólido seco/día de agua tratada, se obtuvo que la cantidad de lodo húmedo por día sería de 18,51 kg lodo húmedo/día, este valor es mucho menor que el obtenido durante el primer ensayo por lo que se puede concluir que la dosis obtenida como optima en este ensayo es mas adecuada para el tipo de agua a tratar, no solo por la baja cantidad de lodos generados si no también por la mayor cantidad de remoción de carga orgánica mostrada a esta concentración de coagulante (300 ppm).

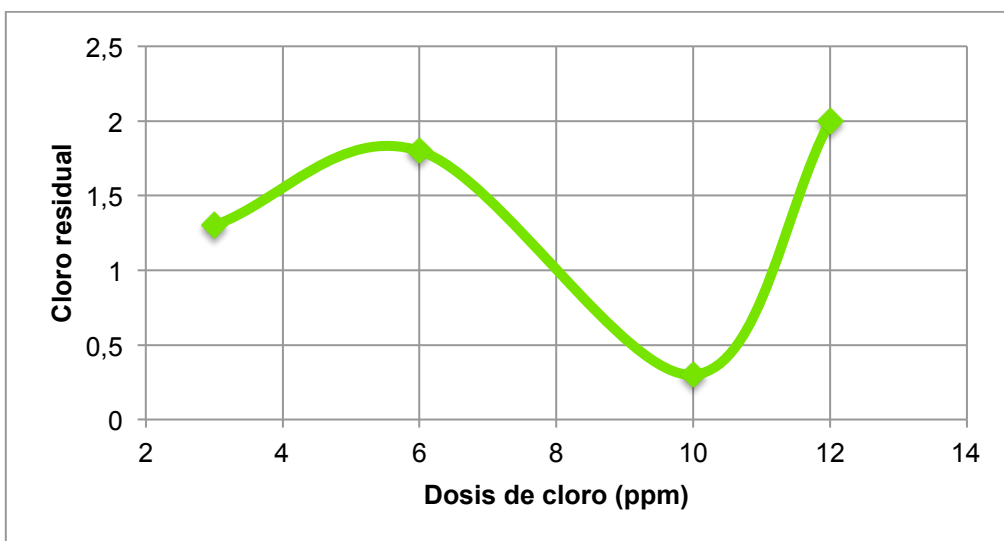
Desinfección con cloro: Después de la tratabilidad de coagulación y floculación se realizó el tratamiento de desinfección con hipoclorito de sodio, en la Tabla 22 se muestran las diferentes cantidades adicionadas a la muestra óptima:

Tabla 22. Dosis adicionadas de hipoclorito usadas para la desinfección

Cantidad de agua a tratar (L)	Dosis de cloro (mg/L)	Concentración cloro (mg/L)	Volumen a agregar de coagulante (mL)	Cloro residual
0,1	3	1	0,3	1,3
0,1	6	1	0,6	1,8
0,1	10	1	1	0,3
0,1	12	1	1,2	2

En la Tabla 22 se puede observar que las dosis de cloro usadas son diferentes a las presentadas en la tabla 19, esto se debe a que para el segundo ensayo se decidió usar diferentes concentraciones con el fin de visualizar el comportamiento de las mismas dentro de las muestras y poder determinar cual es la mas apropiado para el tratamiento a realizar dentro de la lavandería, al igual que en el primer ensayo el cloro residual se midió por medio de un colorímetro usando fenolftaleína como indicador. Según los datos obtenidos de la desinfección mostrados en la tabla 22 se realizó el siguiente gráfico:

Gráfico 9. Resultados de cloro residual para el segundo ensayo



A partir de los resultados obtenidos durante el segundo ensayo, el análisis de cloro residual evidenciado en el gráfico 9, determina al igual que en el primer ensayo, el mismo comportamiento de consumo de cloro por parte de los compuestos orgánicos presentes en el agua tratada. Se escogió como dosis óptima de cloro la de 12 ppm con una cantidad de cloro residual de 2, lo que indicó nuevamente que habían sido removidos los compuestos orgánicos y eliminadas las bacterias presentes en el agua.

6.7.3 Tercer ensayo de tratabilidad

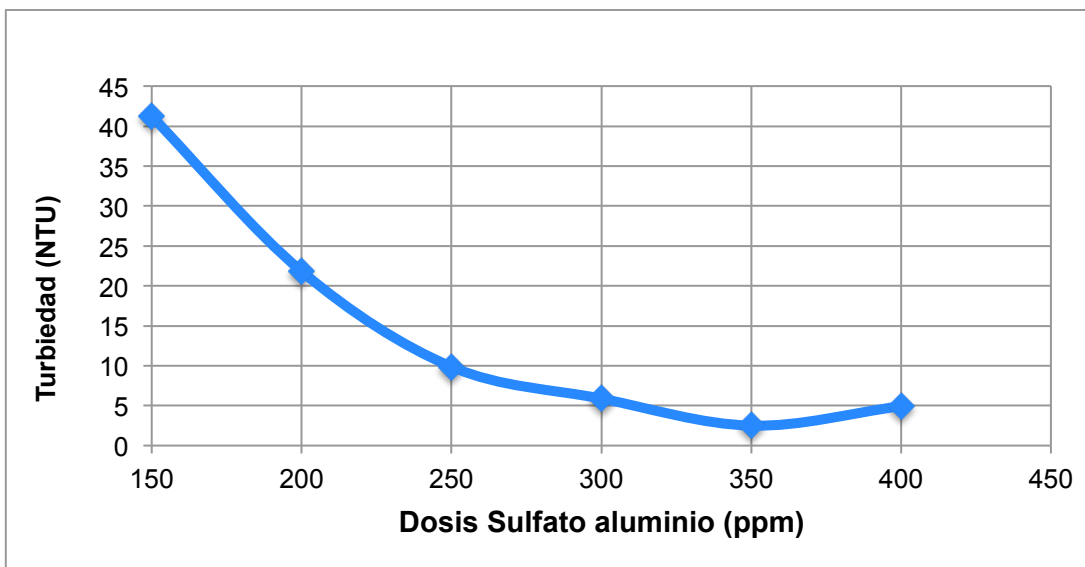
Coagulación y floculación: Para el tercer ensayo de tratabilidad al igual que en el segundo ensayo solo se utilizó como coagulante el sulfato de aluminio, y de nuevo se usó como floculante el polímero A-410, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 16.

Tabla 23. Resultados obtenidos de dosis óptima de coagulante para el tercer ensayo

Coagulante o Floculante	Jarras	Cantidad de agua a tratar (L)	Dosis de coagulante o floculante (mg/L)	Volumen a agregar de coagulante o floculante (mL)	Tiempo (s)	Velocidad de agitación (RPM)	Turbiedad (NTU)
Sulfato de aluminio	Jarra 1	2	150	3	60	120	41,23
	Jarra 2	2	200	4	60	120	21,82
	Jarra 3	2	250	5	60	120	9,87
	Jarra 4	2	300	6	60	120	5,88
	Jarra 5	2	350	7	60	120	2,5
	Jarra 6	2	400	8	60	120	4,93
Floculante: Polimero A-410	Jarra 1	2	1,5	3	120	40	N/A
	Jarra 2	2	1,5	3	120	40	N/A
	Jarra 3	2	1,5	3	120	40	N/A
	Jarra 4	2	1,5	3	120	40	N/A
	Jarra 5	2	1,5	3	120	40	N/A
	Jarra 6	2	1,5	3	120	40	N/A

Para este caso se siguió la metodología utilizada en los ensayos previos, logrando determinar como se muestra en la tabla 19, como jarra optima la 5 con una dosis de coagulante de 350 ppm.

Gráfico 10. Dosis de coagulante vs Turbiedad para el tercer ensayo



El gráfico 10 muestra el comportamiento de la turbiedad con las diferentes dosis de sulfato de aluminio, hasta llegar a la dosis de 350 ppm, donde se logró obtener el menor valor de turbiedad (2,5 NTU), lo que quiere decir que en este rango es donde se pudo determinar la dosis como óptima para las características que presentaba el agua a tratar.

Generación de lodos de los tratamientos de coagulación y floculación: A la jarra escogida como óptima se le midió la cantidad de sólidos suspendidos generados por la adición de sulfato de aluminio y de polímero A-410, esto se realizó con el fin de conocer la cantidad de lodos generada en kilogramo por metro cúbico de agua tratada, los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 24. Resultados obtenidos para la generación de lodos

Generación de lodos	
Vls (mL)	90
Vm (mL)	2000
lv	0,045
Visc (mL)	170
Sólidos suspendidos (ppm)	2259,34
IML (kg sólido seco/día)	9,150327
% de H₂O en la deshidratación de lodos	70%
IML (kg de lodo húmedo/día)	30,50109

Según los resultados obtenidos en la tabla 24 se determinó que de los 2000 mL de muestra se obtuvieron 90 mL de lodo sedimentable (Vls), de los cuales después de realizar la prueba de sólidos suspendidos se obtuvo una concentración de 2259,34 ppm. Adicionalmente se realizó el cálculo del índice másico de lodos (IML), obteniéndose un valor de 9,1503 kg sólido seco/día de agua tratada, se obtuvo que la cantidad de lodo húmedo por día sería de 30,501 kg lodo húmedo/día.

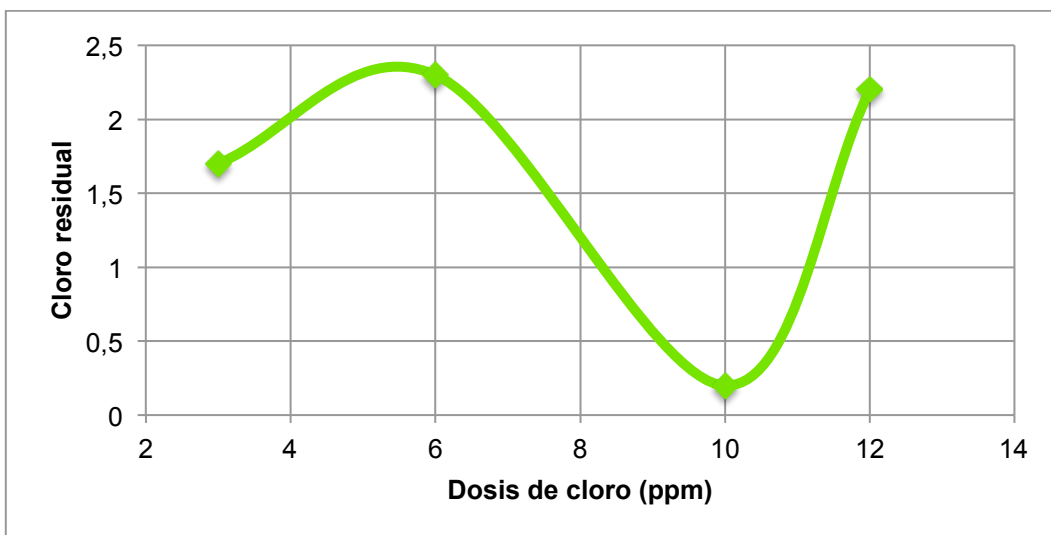
Desinfección con cloro: Después de la tratabilidad de coagulación y floculación se realizó el tratamiento de desinfección con hipoclorito de sodio, las dosis usadas para este ensayo fueron las mismas usadas en el ensayo 2, a continuación se muestran las cantidades adicionadas a la muestra óptima.

Tabla 25. Dosis adicionadas de hipoclorito usadas para la desinfección

Cantidad de agua a tratar (L)	Dosis de cloro (mg/L)	Concentración cloro (mg/L)	Volumen a agregar de coagulante (mL)	Cloro residual
0,1	3	1	0,3	1,7
0,1	6	1	0,6	2,3
0,1	10	1	1	0,2
0,1	12	1	1,2	2,2

Según los datos obtenidos de la desinfección mostrados en la tabla 25 se realizó el siguiente gráfico:

Gráfico 11. Resultados de cloro residual para el tercer ensayo



A partir de los resultados obtenidos durante el tercer ensayo, el análisis de cloro residual evidenciado en el gráfico 11, determina al igual que en el primer y segundo ensayo, el mismo comportamiento de consumo de cloro por parte de los compuestos orgánicos presentes en el agua tratada. Como comentario final de los tres ensayos realizados, se determina como dosis adecuada y óptima para la calidad y características del agua a tratar, la de 12 ppm, que durante los tres ensayos presentó valores similares e ideales para el objetivo del tratamiento que se planteó inicialmente.

6.8 Medición calidad de agua tratada

6.8.1 Resultados de tratabilidad para el primer ensayo

En la tabla 26 se muestran los resultados obtenidos de los parámetros medidos a cada una de jarras realizadas en este ensayo:

Tabla 26. Resultados tratabilidad y medición de parámetros en coagulación y floculación

Coagulante	Jarras	Dosis (ppm)	pH	Conductividad (uS/cm)	Temperatura (°C)	Turbiedad (NTU)	DQO
Sulfato de aluminio	Jarra 1	200	9,48	470	25,3	20	119,8
	Jarra 2	275	8,35	461	25	11	108,6
	Jarra 3	300	7,42	452	25,5	5	98,3
	Jarra 4	325	7,23	414	25,3	6	93,4
	Jarra 5	375	6,76	409	25,6	1	91,7
	Jarra 6	400	5,05	396	25,6	5	91,8
PAC	Jarra 1	250	10,1	468	25,8	28,3	185,7
	Jarra 2	300	9,67	462	25,6	23	165,8
	Jarra 3	350	9,05	445	25,3	18,4	164,3
	Jarra 4	375	8,44	430	25,3	16,5	121,1
	Jarra 5	400	8,03	436	25,2	15	119,4
	Jarra 6	425	7,74	445	24	7	114,7

Con el fin de corroborar la selección de las dosis seleccionadas como optimas, se realizaron mediciones a cada una de las jarras, de conductividad, pH, temperatura y DQO. La tabla 26 presenta un resumen detallado de cada una de estas mediciones, de las que se logran destacar la jarra 5 (sulfato de aluminio) y jarra 6 (PAC), mostrando valores de pH neutros (6,76 y 7,74 respectivamente), y adecuados según la metodología propuesta anteriormente, con estos valores se pudo determinar que no era necesario realizar un ajuste del pH antes de la tratabilidad, ya que ambos coagulantes logran disminuir este parámetro hasta valores adecuados para la calidad de agua requerida. Para el caso de la conductividad se observó una leve disminución a medida que se aumentaban las dosis para ambos coagulantes, es importante aclarar que este tratamiento no garantiza la disminución o cambio representativo en este parámetro por lo que se debería recurrir a un tipo de tratamiento mas avanzado, lo que para el caso de estudio y lo que se quiere lograr no es relevante. La temperatura se mantuvo ambiente y constante durante todo el ensayo, lo que quiere decir que esta tratabilidad no afecta este parámetro.

La demanda química de oxígeno (DQO), disminuyó, tal y como los demás parámetros a medida que se aumentaban las dosis de coagulante, lo que garantiza según los resultados obtenidos que el tratamiento seleccionado remueve gran cantidad de carga orgánica en el agua, en las jarras seleccionadas como óptimas se obtuvieron valores de 91,7 ppm para el sulfato de aluminio y 114,7 ppm para el PAC, iniciando con un valor del agua sin ningún tipo de tratamiento de 255,34 ppm.

Para este ensayo se realizaron mediciones de los parámetros problema antes y después del tratamiento, para obtener el porcentaje de remoción dado por el tren de tratabilidad seleccionado para el agua de la lavandería del Hospital Pablo Tobón Uribe, los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 27 y se refieren a la jarra óptima del sulfato de aluminio:

Tabla 27. Comparación de agua vertida con el agua después del tratamiento sin desinfección, ensayo uno

Parámetros medidos	Agua sin tratamiento	Jarra óptima
pH	10,63	6,76
Conductividad (uS/cm)	475	409
Turbiedad (NTU)	30,3	1
Volumen muestra (mL)	1000	1000
Temperatura (°C)	19,4	25,6
DQO	255,345	96,574
Dureza (ppm de CaCO₃)	19,4	15,629
Alcalinidad (ppm de CaCO₃)	137,5	32,13
Vis (mL)	N/A	40
Clarificado obtenido (mL)	N/A	960

Según la comparación de parámetros del agua sin tratamiento versus la jarra seleccionada como óptima (como se aclaró anteriormente se seleccionó el sulfato de aluminio como coagulante adecuado), se observó después de realizada toda la tratabilidad propuesta (Coagulación + Floculación + Filtración + Desinfección), disminución en los parámetros identificados como problema, evidenciado en los valores registrados de DQO, turbiedad, alcalinidad y pH, además de una buena obtención de clarificado, para la recirculación del agua al proceso, el porcentaje de remoción fue de 62,17%.

6.8.2 Resultados de tratabilidad para el segundo ensayo

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los parámetros medidos a cada una de jarras realizadas en este ensayo:

Tabla 28. Resultados tratabilidad y medición de parámetros en coagulación y floculación

Coagulante	Jarras	Dosis (ppm)	pH	Conductividad (uS/cm)	Temperatura (°C)	Turbiedad (NTU)	DQO
Sulfato de aluminio	Jarra 1	150	7,95	374	20,8	28,3	222,7
	Jarra 2	200	7,01	392	20,8	7,64	117,9
	Jarra 3	250	6,29	405	20,8	1,24	110,4
	Jarra 4	300	6,29	405	20,8	1,88	72,51
	Jarra 5	350	5,03	431	20,8	2,3	68,8
	Jarra 6	400	4,76	453	20,8	3,61	63,9

Durante este ensayo con el coagulante seleccionado previamente (sulfato de aluminio), tal y como se muestra en la tabla 28, se realizaron pruebas de pH, conductividad, temperatura y DQO, para así determinar cual dosis era mas adecuada al tratar el agua proveniente de la lavandería.

El pH presentó un comportamiento similar al mostrado anteriormente, encontrándose en valores neutros, y para la jarra seleccionada como óptima registró un valor de 6,29, lo que demuestra una vez mas que el coagulante seleccionado ayuda a disminuir el pH y dejarlo en valores adecuados para la buena acción de la tratabilidad.

Para el caso de la conductividad, durante este ensayo se evidencia que a medida que se fue aumentando la dosis de coagulante, esta fue aumentando, caso contrario a lo ocurrido durante el primer ensayo, posiblemente por las características y condiciones del agua tomada del ciclo de lavado, que durante todos los ensayos realizados fue de diferentes días. La temperatura no se vio afectada durante el ensayo, manteniéndose ambiente (20,8 °C).

Con respecto a la DQO se muestra que al inicio de la tratabilidad presenta valores de 222,7 ppm con una dosis de coagulante de 150 ppm, y que a medida que fue transcurriendo el tratamiento y aumentando la dosis hasta llegar a la seleccionada como

óptima (300 ppm), presentó una disminución considerable registrando para esta dosis un valor de 72,51 ppm. Se muestra además, el buen comportamiento de las dosis de 350 y 400 ppm que registraron valores de 68,8 y 63,9 ppm respectivamente.

Se seleccionó como óptima la dosis de 300 ppm que presentó una buena remoción de carga orgánica, encontrándose en un valor cercano a lo establecido al principio del proyecto, y aunque las concentraciones siguientes (350 y 400 ppm) mostraron evidentemente una mayor reducción de carga orgánica, también se tuvieron en cuenta los valores obtenidos durante las pruebas de turbiedad y pH que para esta dosis fueron mas sobresalientes con valores de 1,88 NTU y 6,29 respectivamente.

Para el segundo ensayo se hicieron mediciones de DQO en el laboratorio de Tepsa S.A, estas mediciones se realizaron para el agua sin tratamiento, la jarra escogida como óptima (dosis de 300 ppm de sulfato de aluminio) y a las pruebas de desinfección realizadas con dosis de hipoclorito de sodio ascendente, los resultados obtenidos son:

Tabla 29. Resultados obtenidos de medición de DQO

Muestras	Volumen de FAS (mL)	Volumen de FAS blanco (mL)	Concentración de Fas	Volumen titulación (mL)	Promedio volumen muestras	DQO (ppm O2)
Agua sin tratar	3	4,12	0,073099415	17,1	3,1	238,6
	3,2	4,12	0,073099415	17,1		
Agua con dosis optima de coagulante y floculante (300 ppm)	3,82	4,12	0,073099415	17,1	3,81	72,515
	3,8	4,12	0,073099415	17,1		
Agua con coag+floc y cloro con 3 ppm	3,72	4,12	0,073099415	17,1	3,76	84,211
	3,8	4,12	0,073099415	17,1		
Agua con coag+floc y cloro con 6 ppm	3,64	4,12	0,073099415	17,1	3,71	95,906
	3,78	4,12	0,073099415	17,1		
Agua con coag+floc y cloro con 10 ppm	3,88	4,12	0,073099415	17,1	3,84	65,497
	3,8	4,12	0,073099415	17,1		

Además del buen resultado obtenido en los ensayos de coagulación y floculación, era necesario determinar cual de las dosis adicionadas de hipoclorito de sodio sería la mas apropiada para lograr aún mas porcentaje de remoción de carga orgánica. La Tabla 29 muestra mediciones de DQO, tanto para el agua sin tratar, la dosis óptima de coagulante, así como para el agua con dosis de cloro adicionadas en orden ascendente. Se pudo

determinar que la concentración de DQO en la dosis óptima de coagulante fue de 72,515 ppm, una reducción considerable con respecto al valor registrado al inicio del tratamiento.

Con la adición de 3 ppm aunque la DQO continuó en un valor bajo con respecto al reportado al inicio, se evidencia un aumento con respecto al valor obtenido con la dosis óptima de coagulante (300 ppm), el cual fue 84,211 ppm. Para el caso de 6 ppm, se evidenció un comportamiento parecido.

En cambio con la adición de 10 ppm de hipoclorito de sodio, se logró disminuir aún mas lo obtenido con la dosis óptima de coagulante, registrando un valor de 65,497 ppm, lo que quiere decir que esta dosis fue exitosa en la remoción de mas carga orgánica para el agua que ya reportaba valores relativamente bajos en comparación con el inicial.

Al igual que en el primer ensayo se realizaron mediciones de los parámetros problema antes y después de la tratabilidad seleccionada, para conocer el porcentaje de remoción de dicha tratabilidad, los resultados son los siguientes:

Tabla 30. Comparación de agua vertida con el agua después del tratamiento sin desinfección, ensayo dos

Parámetros medidos	Agua sin tratamiento	Jarra óptima
pH	10,61	6,29
Conductividad (uS/cm)	398	405
Turbiedad (NTU)	71,8	1,88
Volumen muestra (mL)	2000	2000
Temperatura (°C)	19,8	20,8
DQO	238,596	72,515
Dureza (ppm de CaCO₃)	20	19
Alcalinidad (ppm de CaCO₃)	134	22
Vis (mL)	N/A	100
Clarificado obtenido (mL)	N/A	1900

La tabla 30 muestra detalladamente la comparación realizada entre el agua sin tratar y la jarra seleccionada como óptima, y a la cual se le realizó toda la tratabilidad, evidenciando al igual que el ensayo anterior una disminución de los parámetros mas afectados y que dificultarían la recirculación mas adelante, el porcentaje de remoción obtenido durante este ensayo fue del 70%, por lo que se puede decir que el tren de tratabilidad propuesto podría llegar a lograr los objetivos propuestos al inicio del proyecto.

6.8.3 Resultados de tratabilidad para el tercer ensayo

En la Tabla 31 se muestran los resultados obtenidos de los parámetros medidos a cada una de jarras realizadas en este ensayo, cabe aclarar que las dosis de coagulante adicionada son iguales a las dosis adicionadas en el segundo ensayo:

Tabla 31. Resultados tratabilidad y medición de parámetros en coagulación y floculación

Coagulante	Jarras	Dosis (ppm)	pH	Conductividad (uS/cm)	Temperatura (°C)	Turbiedad (NTU)	DQO
Sulfato de aluminio	Jarra 1	150	8,05	415	20,8	41,23	250,6
	Jarra 2	200	7,03	396	20,8	21,82	211,8
	Jarra 3	250	6,19	398	20,8	9,87	152,4
	Jarra 4	300	6,15	394	20,8	5,88	92,3
	Jarra 5	350	6,11	436	20,8	2,5	85,38012
	Jarra 6	400	5,12	425	20,8	4,93	78,2

La tabla 31 muestra de forma detallada los resultados de las pruebas realizadas a cada una de las jarras con sulfato de aluminio como coagulante. El pH al igual que en los ensayos previamente realizados se encontró en un rango neutro, y la jarra seleccionada como óptima con un valor adecuado para la efectividad del tratamiento (6,11), y aunque la dosis de 400 ppm de sulfato de aluminio mostró un buen comportamiento (5,12), para este caso por el valor obtenido de pH hubiera sido necesario un ajuste, lo que implica un gasto adicional en los costos fijos de la planta de tratamiento. La temperatura no se vio afectada manteniéndose constante durante todo el ensayo en 20,8 °C.

Debido a la variabilidad del agua tomada para cada ensayo, la conductividad en este caso estuvo variable entre dosis y dosis, registrando un valor para la jarra seleccionada como óptima de 436 uS/cm.

La carga orgánica presente en el agua también sufrió una disminución considerable con respecto al valor registrado al inicio del ensayo (273,68 ppm), llegando a un valor de 85,38 ppm. Al igual que en el ensayo anterior la dosis siguiente a la óptima mostró una mayor disminución en este parámetro con un valor de 78,2 ppm, pero fue seleccionada finalmente la dosis de 350 ppm por el comportamiento en la medición de parámetros claves como el pH y la turbiedad que revelaron valores de 6,11 y 2,5 NTU

respectivamente, contra un valor de turbiedad de 4,93 NTU, demasiado alto para el objetivo planteado al inicio de la tratabilidad.

Al igual que en el segundo ensayo, en este ensayo también se realizaron mediciones de DQO al agua sin tratamiento, la jarra escogida como óptima (dosis de 350 ppm de sulfato de aluminio) y a las pruebas de desinfección realizadas con dosis de hipoclorito de sodio ascendente se muestran en la Tabla 32:

Tabla 32. Resultados obtenidos de medición de DQO

Muestras	Volumen de FAS (mL)	Volumen de FAS blanco (mL)	Concentración de Fas	Volumen titulación (mL)	Promedio volumen muestras	DQO (ppm O ₂)
Agua sin tratar	3,1	4,12	0,073099415	17,1	2,95	273,684
	2,8	4,12	0,073099415	17,1		
Agua con dosis optima de coagulante y floculante (350 ppm)	3,78	4,12	0,073099415	17,1	3,755	85,3801
	3,73	4,12	0,073099415	17,1		
Agua con coag+floc y cloro con 3 ppm	3,78	4,12	0,073099415	17,1	3,765	83,0409
	3,75	4,12	0,073099415	17,1		
Agua con coag+floc y cloro con 6 ppm	3,76	4,12	0,073099415	17,1	3,785	78,3626
	3,81	4,12	0,073099415	17,1		
Agua con coag+floc y cloro con 10 ppm	3,79	4,12	0,073099415	17,1	3,82	70,1754
	3,85	4,12	0,073099415	17,1		

La Tabla 32 muestra el comportamiento de la DQO durante las mediciones a cada una de las concentraciones de hipoclorito de sodio, allí se puede observar que de manera similar al ensayo anterior hay una disminución considerable registrando un valor de 85,3801 ppm, y al adicionar las diferentes dosis de hipoclorito se observó una tendencia a la bajo de DQO, un comportamiento más coherente que el anterior, pero de igual forma se concluyó como óptima la dosis de 10 ppm ya que reportó el menor valor de las tres evaluadas, además de que la carga orgánica disminuyó con respecto a la obtenida con la dosis óptima de coagulante, el valor registrado fue de 70,1754 ppm.

Al igual que en el primer ensayo y el segundo ensayo se realizaron mediciones de los parámetros problema antes y después de la tratabilidad seleccionada, para conocer el

porcentaje de remoción de dicha tratabilidad, esta comparación se muestra en la Tabla 33.

Tabla 33. Comparación de agua vertida con el agua después del tratamiento sin desinfección, ensayo tres

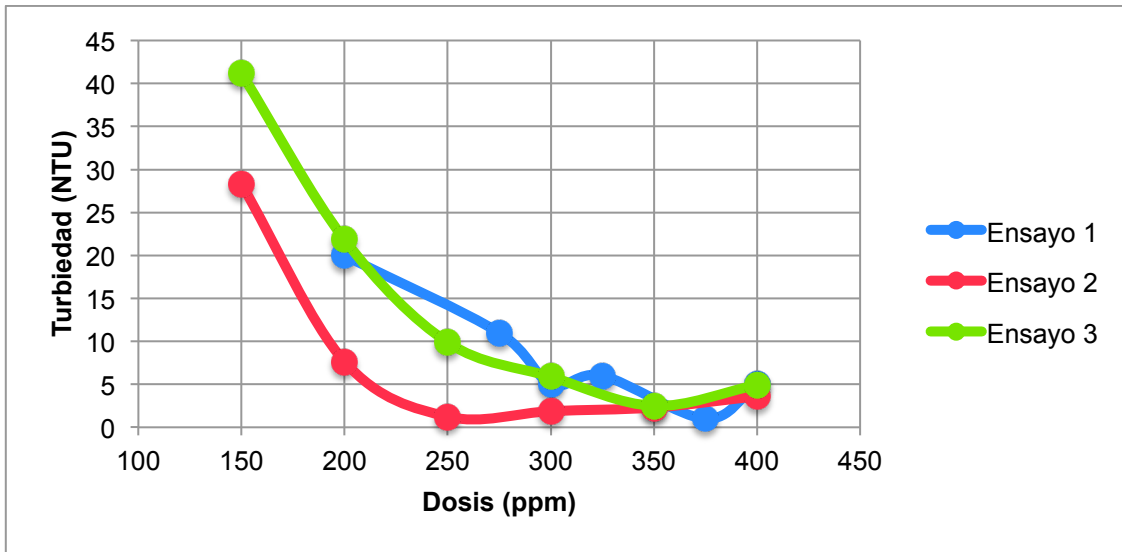
Parámetros medidos	Agua sin tratamiento	Jarra óptima
pH	10,7	6,11
Conductividad (uS/cm)	425	436
Turbiedad (NTU)	61,5	2,5
Volumen muestra (mL)	2000	2000
Temperatura (°C)	20,2	20,8
DQO	273,6842	85,380
Dureza (ppm de CaCO₃)	18	17
Alcalinidad (ppm de CaCO₃)	144	26
Vis (mL)	N/A	90
Clarificado obtenido (mL)	N/A	1910

La Tabla 33 muestra nuevamente la comparación realizada entre el agua sin tratar y la jarra seleccionada como óptima que para este caso fue la de 350 ppm, a la cual se le realizó toda la tratabilidad, para este ensayo se tuvo un porcentaje de remoción de 68,88%, evidenciando una disminución de los parámetros más afectados y que dificultarían la recirculación más adelante, por lo que se puede decir que el tren de tratabilidad propuesto confirma nuevamente su aplicabilidad para el proceso estudiado.

6.8.4 Comparativo ensayos de tratabilidad

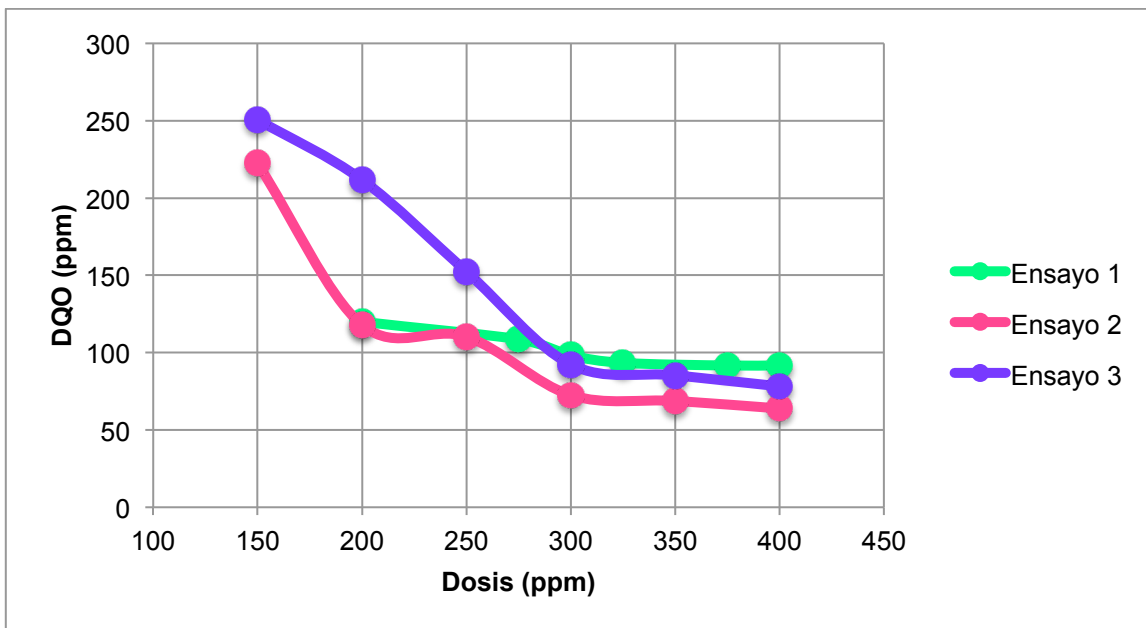
Es pertinente efectuar una comparación de los resultados más relevantes de los tres experimentos realizados, para definir el rango de dosis óptima de coagulante e hipoclorito de sodio, observar el comportamiento de la tratabilidad en agua con características variables, e identificar el cambio de los parámetros a disminuir durante la adición de las dosis seleccionadas en cada ensayo, en los gráficos 12 y 13 se evidencia dicha comparación para los parámetros de turbiedad y DQO:

Grafico 12. Comparación turbiedad versus Dosis de coagulante para los 3 ensayos



El comportamiento evidenciado en el gráfico 12, demuestra para la turbiedad que el ensayo 2 es el mas adecuado en la dosis de 300 ppm con un valor de 1,88 NTU. Los demás ensayos presentaron un comportamiento similar, pero con concentraciones mas elevadas y con mayor posibilidad de generación de lodos y subproductos indeseados para el proceso y la factibilidad económica del proyecto, además de otros aspectos y parámetros que se discutirán mas adelante.

Grafico 13. Comparación DQO versus Dosis de coagulante para los 3 ensayos



La demanda química de oxígeno para los 3 ensayos presento comportamientos variables entre ensayo y ensayo: durante el primero se evidencia una leve disminución en la carga orgánica (64%) presente en el agua sin tratar, además de que dicha reducción se observa en dosis muy elevadas de coagulante.

Para el caso del segundo ensayo, se comprueba nuevamente su resultado exitoso con esa concentración de coagulante (300 ppm) para la calidad del agua a tratar; se evidencia una notable disminución de la DQO que se encontraba en valores cercanos a 238 ppm y logra obtener luego de la desinfección un valor de 65 ppm, lo que representa un 72% de remoción de carga orgánica, por lo que se considera adecuado para el proceso que se requiere en la lavandería. El tercer ensayo muestra un comportamiento similar al segundo, solo que su disminución a una dosis de coagulante de 350 ppm, no fue tan acertada como la anteriormente mencionada (70,17 ppm).

6.9 Análisis de factibilidad técnica, económica y ambiental

6.9.1 Resultados de factibilidad técnica

A continuación se muestran los resultados el dimensionamiento de los equipos requeridos en la planta de tratamiento de aguas residuales.

6.9.1.1 Bombas

Siguiendo la metodología establecida previamente y tomando en cuenta los siguientes datos se halló la cabeza de presión y la potencia requerida para cada una de las bombas del proceso. El flujo establecido para cada bomba se estimó de acuerdo al vertimiento de agua actual de cada una de las lavadoras de la lavandería ($90 \text{ m}^3/\text{h}$), la presión de succión se estableció a la presión atmosférica de la ciudad de Medellín (0,84 atm), la densidad del agua ($1000 \text{ kg}/\text{m}^3$), la densidad del sulfato de aluminio puro ($2670 \text{ kg}/\text{m}^3$), la densidad del polímero A-410 ($1070 \text{ kg}/\text{m}^3$), la densidad del hipoclorito de sodio ($1110 \text{ kg}/\text{m}^3$) y la gravedad ($9,81 \text{ m}/\text{s}^2$). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 34.

Tabla 34. Dimensionamiento bombas requeridas en la planta de tratamiento

Bomba	P succión (Pa)	P descarga (Pa)	Delta P (Pa)	Cabeza bomba (m)	Delta P (psi)	Eficiencia	Potencia (HP)	Potencia (kW)	Tipo de bomba
1 (Foso-tanque coagulación)	85113	405300	320187	32,6388	46,440	40%	1,1184	0,8340	Bomba centrífuga de una sola etapa
2 (Dosificadora de coagulante)	85113	303975	218862	8,3558	31,744	40%	0,7645	0,5701	Bomba centrífuga de una sola etapa
3 (Dosificadora de floculante)	85113	303975	218862	20,8506	31,744	40%	0,7645	0,5701	Bomba centrífuga de una sola etapa
4 (Clarificador-filtro)	85113	506625	421512	42,9676	61,136	40%	1,4723	1,0979	Bomba centrífuga de una sola etapa
5 (Dosificadora de hipoclorito de sodio)	85113	303975	218862	20,0992	31,744	40%	0,7645	0,5701	Bomba centrífuga de una sola etapa
6 (Recirculación)	85113	810600	725487	73,9538	105,225	40%	2,5341	1,8897	Bomba centrífuga de una sola etapa

La presión de descarga para cada una de las bombas se tuvo en cuenta según la distancia que debía recorrer el fluido para llegar a cada uno de los procesos realizados, el cálculo de la cabeza de presión, la eficiencia, la potencia y el tipo de bomba se hallaron según la metodología propuesta (heurística de Walas).

6.9.1.2 Tanques

Los tanques de almacenamiento de agua y de proceso se diseñaron según la metodología descrita previamente, para el diseño de estos tanques se tuvo en cuenta el tiempo de residencia que necesitaba cada uno de los procesos para llevarse a cabo y el flujo de agua vertido cada hora en la lavandería, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35. Dimensionamiento tanques requeridos en la planta de tratamiento.

Tanque	Tiempo de residencia (min)	Volumen (m3)	Volumen (L)
Foso de recepción	75	4,6875	4687,5
Coagulación	1	0,0625	62,5
Floculación	5	0,3125	312,5
Desinfección	30	1,875	1875

De acuerdo a las dimensiones calculadas para cada uno de los tanques se puede ver que son tanques pequeños y no ocuparían mucho espacio dentro de las instalaciones del hospital, además que algunos de los tanques se pueden disponer de tal manera que el agua pase de un tanque de otro por medio de gravedad.

6.9.1.3 Agitadores

Los agitadores necesarios para los procesos de coagulación y floculación fueron diseñados según la metodología mencionada en el numeral 5.11.1.3, los agitadores diseñados tienen ambos una potencia de 0,2 HP o de 0,149 kW.

6.9.1.4 Clarificador de Lamelas

Para el caso del clarificador de lamelas se tuvieron en cuenta datos obtenidos de Walas como son: grado de inclinación (55°), velocidad de sedimentación libre (0,8 m/h), caudal del agua (3,75 m³/h), e (0,05 m), viscosidad del agua (0,00893 cm/s) y longitud relativa (2,293 m), obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 36.

Tabla 36. Dimensionamiento clarificador de lamelas requeridos en la planta de tratamiento.

Inclinación de las placas (rad)	0,9599
Velocidad de sedimentación (m/h)	1,6827
Largo de las placas (m)	0,1120
Reynolds ≤ 250	26,1711
Tiempo de retención (min)	3,9918
Area seccional del clarificador (m²)	2,7200
Ancho del clarificador (m²)	1,2293
Número de lamelas	31,0000
Altura del clarificador (m)	1,8340
Radio del clarificador (m)	0,4585
Volumen del clarificador (m³)	0,4037

6.9.1.5 Filtro de arena por presión

El filtro de arena fue diseñado teniendo en cuenta el caudal de vertimiento de la lavadora, el cual es mencionado anteriormente, y una velocidad de filtración recomendada por la literatura; se obtuvo que el área necesaria para realizar la filtración de 3,75 m³/h es de 1,3693 m².

6.9.2 Resultados de factibilidad económica

A continuación se muestran los resultados obtenidos para los costos de operación (costo de químicos, costo de energía, mano de obra y disposición de lodos), costo de compra de equipos, costo actual de captación y vertimiento de agua de EPM versus el ahorro al implementar la planta de tratamiento, el flujo de caja para hallar el tiempo de retorno de inversión y los gastos mensuales aproximados de la lavandería con la implementación de la planta de tratamiento de agua

6.9.2.1 Costos de operación

Entre los costos de operación se encuentran los siguientes costos:

6.9.2.1.1 Costos de químicos

Por medio de proveedores se conoce el precio de compra del sulfato de aluminio, del polímero A-410 y del hipoclorito de sodio al 12%, 1.800, 12.000 y 1.200 pesos por kilogramo respectivamente. La tabla 37 muestra el resumen de los costos por m³ de agua tratada, los resultados obtenidos para los costos de químicos se muestran en la Tabla 37.

Tabla 37. Costos de químicos por m³ de agua tratada.

Producto químico	Dosis (g/m ³)	Producto puro (kg/día)	% de pureza	Costo químico (\$/m ³ agua tratada)	Costo químico (\$/día)
Sulfato de aluminio	300	27	100	540	48600
Polímero A-410	1,5	0,135	100	18	1620
Hipoclorito de sodio	12	1,08	12	14,4	1296
Total				\$ 572	\$ 51.516

En la tabla 37 se puede observar que el costo total por m³ de agua tratada es de \$572 el cual es un valor favorable con respecto al costo de vertimiento cobrado por EPM.

6.9.2.1.2 Costo de disposición de lodos

Para el costo de la disposición de lodos se tiene en cuenta los resultados obtenidos en la tabla 19, y se consultó que el costo por la disposición de los lodos es de aproximadamente \$200 por kilogramo de lodo húmedo según proveedores de este servicio, lo que da un valor de \$ 41 por m³ de agua tratada, ó \$3.702 al día.

6.9.2.1.3 Costo de energía

Para estimar el costo de consumo de energía se tuvo en cuenta el precio de servicio cobrado por EPM (\$ 420 kWh) para el sector industrial y la potencia de los equipos que requieren de este servicio (bombas y agitadores), los resultados se muestran en la Tabla 38.

Tabla 38. Costo de consumo de energía

Equipo	Potencia (kW)	Costo (\$/día)	Costo (\$/m ³)
Bomba 1 (Foso-tanque coagulación)	0,834	\$ 8.407	\$ 93
Bomba 2 (Dosificadora de coagulante)	0,570	\$ 5.746	\$ 64
Bomba 3 (Dosificadora de floculante)	0,570	\$ 5.746	\$ 64
Bomba 4 (Clarificador-filtro)	1,098	\$ 11.067	\$ 123
Bomba 5 (Dosificadora de hipoclorito de sodio)	0,570	\$ 5.746	\$ 64
Bomba 6 (Recirculación)	1,890	\$ 19.048	\$ 212
Agitador coagulación	0,1491	\$ 1.503	\$ 17
Agitador floculación	0,1491	\$ 1.503	\$ 17
Total	5,830	\$ 58.768	\$ 653

Con respecto al costo de consumo de energía se puede observar que la potencia total requerida para suplir las necesidades de los equipos de la planta de tratamiento es de 5,830 kW, y el costo diario es de \$58.768 por día, lo que al mes sería un costo de \$1'763.026.

6.9.2.1.4 Mano de obra

Para la mano de obra se tuvo en cuenta que la lavandería del hospital trabaja las 24 horas del día, los siete días de la semana, que el salario mínimo legal vigente es de \$582.000, que las horas de trabajo anuales son 8760, además de que la planta deberá tener 2 turnos al día (diurno y nocturno) y que cada operario debe hacer un turno diario, lo que daría como resultado dos operarios disponibles para la operación diaria de la planta y que en un año de trabajo cada operario debe trabajar 350 turnos, lo que tendría un costo mensual de \$ 1'213.886 para el pago de los dos operarios, lo que en un año tendría un valor de \$14'566.629.

6.9.2.2 Costo de equipos

Para el costo de inversión de los equipos necesarios para la implementación de la planta de tratamiento se utilizó la metodología planteada en el numeral 5.11.2 de este documento.

6.9.2.2.1 Bombas

El costo de las bombas requeridas en la planta se realizaron utilizando la metodología propuesta por Turton, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 39.

Tabla 39. Constantes de costos para bombas para el año 2001

Constante de costo bombas	
K1	3,3892
K2	0,0536
K3	0,1538

Para determinar los costos de las bombas en el presente año se tuvo que usar el CEPCI (Plant Cost Index), debido a que las constantes de costos encontradas en Turton están referenciadas para el año 2001, los valores de CEPCI utilizados para el año 2001 y el año 2012 fueron: 394 y 582,2 respectivamente, además se utilizó el cambio del dólar actual (\$1.950) ya que los costos calculados con la metodología de Turton están planteados con

valores en dólares y es necesario conocer el costo de compra en la moneda local (COP). Los costos de compra hallados para cada una de las bombas se muestran en la Tabla 40.

Tabla 40. Resultado de costo de compra de bombas

Bomba	Potencia (kW)	Costo de compra 2001 (\$)	Costo compra 2012 (\$)
1 (Foso-tanque coagulación)	0,8340	\$ 4.742.037	\$ 7.007.142
2 (Dosificadora de coagulante)	0,5701	\$ 4.734.938	\$ 6.996.652
3 (Dosificadora de floculante)	0,5701	\$ 4.734.938	\$ 6.996.652
4 (Clarificador-filtro)	1,0979	\$ 4.804.657	\$ 7.099.673
5 (Dosificadora de hipoclorito de sodio)	0,5701	\$ 4.734.938	\$ 6.996.652
6 (Recirculación)	1,8897	\$ 5.079.234	\$ 7.505.406
Total		\$ 28.830.742	\$ 42.602.178

Los cálculos de costo de compra para las bombas no se realizaron con el CEPCI para el año 2013 porque aun no se encuentra disponible, pero el costo de compra en el año 2012 es una buena aproximación del costo de compra; se obtuvieron costos que oscilan entre los 6 y 7 millones de pesos por bomba, y un total de \$42'602.178 por la compra de las 6 bombas requeridas en el proceso.

6.9.2.2.2 Tanques

Para el caso de los tanques de proceso se contacto a varios proveedores de tanques plásticos para conocer los precios reales de cada uno de los tanques según su volumen de capacidad, los proveedores de los cuales se tomaron los costos fueron Rotoplast y Colempaques, en la Tabla 41 se muestran los costos obtenidos:

Tabla 41. Costo de compra de tanques

Tanque	Volumen (L)	Costo de compra (\$)
Foso de recepción	4687,5	\$ 1.630.000
Coagulación	62,5	\$ 72.500
Floculación	312,5	\$ 210.500
Desinfección	1875	\$ 752.000
Total		\$ 2.665.000

El total de costo para los tanques obtenido es de \$2'665.000.

6.9.2.2.3 Agitadores

Los costos de compra de los agitadores al igual que el de los tanques fueron consultados con un proveedor (Bombas y riegos) según la potencia requerida, los costo dado por el proveedor fue de \$2'500.000 por cada agitador.

6.9.2.2.4 Clarificador de Lamelas

El costo aproximado según la capacidad de este equipo fue proporcionado por el proveedor Eduardoño, el costo de compra dado fue de \$7'800.000.

6.9.2.2.5 Filtro de arena por presión

En el caso de este equipo se realizó contacto con la empresa Inge-aguas, este proveedor dio un costo aproximado \$3'650.000.

En general se obtiene que el costo de compra de los equipos es de \$61'717.178.

6.9.2.3 Costo total de la inversión

Teniendo en cuenta los costos calculados en los numerales anteriores, el costo total de la inversión para la implementación de la planta de tratamiento es de \$115'249.911.

6.9.2.4 Costo actual de captación y vertimiento de agua

Con el fin de comprobar la factibilidad económica de la implementación de la planta de tratamiento se tuvieron en cuenta las tarifas de acueducto y alcantarillado para el sector industrial de EPM: \$1.400 y \$2.200 respectivamente, lo que en total da un valor a pagar de \$3.600 por m³ de agua captada y vertida, lo que mensualmente tiene un valor de \$9'720.000 sólo para la lavandería y lo que al año equivale a \$116'640.000 por el uso de 32.400 m³ de agua al año.

Comparando el valor monetario actualmente pagado al año solo por la demanda de agua sin recircular y sin realizar ningún tratamiento con el costo de inversión de la planta, se puede concluir que se pagaría menos dinero por la captación y vertimiento de agua, además de que parte del agua del proceso de lavado sería recirculada, lo que implica un uso adecuado del recurso y adicionalmente se cumpliría con la normatividad ambiental vigente.

6.9.2.5 Ahorro de agua con la implementación de la planta de tratamiento

Teniendo en cuenta los resultados de los ciclos de concentración calculados para el proceso de lavado de la lavandería; tratando el total del agua vertida diaria (90 m³) y recirculando el 65% del agua tratada (58,5 m³ al día) según lo obtenido en los ciclos de concentración, la lavandería tendría un ahorro de \$40'824.000 al año y solo tendría que captar 31,5 m³ al día de agua del acueducto de EPM.

6.9.2.6 Gastos mensuales de la planta de tratamiento y la lavandería

Según los costos de operación obtenidos para la implementación del tratamiento y la captación de 31,5 m³ de agua al día del acueducto público, los gastos mensuales serían de \$7'863.061, este valor comparado con lo actualmente pagado solo por la captación y el vertimiento da un ahorro mensual de \$1'856.939.

6.9.2.7 Flujo de caja y tiempo de retorno de inversión

Para obtener el tiempo de retorno de la inversión se realizó el flujo de caja mostrado a continuación y se utilizó la ecuación 28, dando un tiempo para recuperar la inversión de 5 años.

Tabla 42. Flujo de caja

Período (meses)	Ahorro (\$/mes)	Inversión (\$/año)	Costos de operación (\$/mes)	Utilidad (\$/mes)
1	\$ 6.318.000	\$ 115.249.911	\$ 4.461.061	\$ 113.392.971
2	\$ 6.318.000		\$ 4.461.061	\$ 1.856.939
3	\$ 6.318.000		\$ 4.461.061	\$ 1.856.939
4	\$ 6.318.000		\$ 4.461.061	\$ 1.856.939
5	\$ 6.318.000		\$ 4.461.061	\$ 1.856.939
6	\$ 6.318.000		\$ 4.461.061	\$ 1.856.939
7	\$ 6.318.000		\$ 4.461.061	\$ 1.856.939
8	\$ 6.318.000		\$ 4.461.061	\$ 1.856.939
9	\$ 6.318.000		\$ 4.461.061	\$ 1.856.939
10	\$ 6.318.000		\$ 4.461.061	\$ 1.856.939
11	\$ 6.318.000		\$ 4.461.061	\$ 1.856.939
12	\$ 6.318.000		\$ 4.461.061	\$ 1.856.939
Total	\$ 75.816.000		\$ 53.532.726	\$ 92.966.637

Para el flujo de caja realizado se supuso un periodo de operación de la planta de un año, teniendo en cuenta el ahorro mensual de recirculación de agua, la inversión inicial, los costos de operación mensuales y la utilidad mensual. A partir de esta información se puede concluir que aunque la inversión inicial tiene un valor cercano a lo gastado actualmente en un año de operación de la lavandería, solo teniendo en cuenta el consumo de agua; se debe tener en cuenta que la implementación de la planta de tratamiento para el vertimiento y recirculación traerá beneficios a largo plazo para el Hospital, ya que el ahorro monetario generado por la recirculación de agua podría ser utilizado en otros proyectos y áreas del Hospital después de recuperada la inversión.

CONCLUSIONES

Durante el diagnóstico realizado a la lavandería y al proceso de lavado se identificaron los efluentes generados y el consumo de agua durante cada ciclo de lavado, el cual tiene un valor de 3,75 m³/h.

La caracterización inicial del efluente se realizó con el fin de conocer los parámetros que no cumplían con las normativas ambientales vigentes, y además fue la base para comenzar la investigación de las posibles tecnologías aplicables al agua para ser recirculada y dar cumplimiento a la normatividad. También con esta caracterización se identificó que el agua vertida actualmente al alcantarillado público no es biodegradable debido a su alto contenido de carga orgánica, lo que significa que es necesaria la implementación de un tratamiento fisicoquímico para hacer efectiva la disminución de dicha carga orgánica.

De acuerdo a los resultados dados por ciclos de concentración se puede concluir que el agua no puede ser recirculada al proceso de lavado sin ningún tipo de tratamiento, ya que la concentración de sus parámetros aumenta a medida que esta ingresa al ciclo de lavado, disminuyendo así su calidad para ser utilizada en un proceso tan exigente y delicado, y además haciendo que no se cumpla la normatividad ambiental vigente ya que se sobre pasaba los valores máximos permisibles por la autoridad ambiental. También por medio de los ciclos de concentración se encontró que al realizar un tratamiento apropiado para el agua se puede recircular hasta un 65% del esta cumpliendo con la calidad de agua necesaria para el proceso y dando cumplimiento a la normatividad ambiental.

Los balances de agua realizados al proceso de lavado se hicieron teniendo en cuenta todas las adiciones de productos químicos y agua utilizados en cada uno de los enjuagues del ciclo y despreciando la absorción de agua por parte de la ropa, dando como resultado entradas iguales a salidas.

Por medio de revisión bibliográfica, la matriz de selección de alternativas y el cuadro de decisión para la determinación del tratamiento de agua se definió el tren de tratabilidad pertinente para el agua vertida por lavandería del Hospital Pablo Tobón Uribe (Coagulación + Floculación + Filtración + Desinfección con hipoclorito de sodio). Se

encontró que la dosis óptima de coagulante (300-400 ppm), la dosis de floculante (1 ppm) y la dosis de hipoclorito de sodio (12 ppm), dando un porcentaje de remoción de carga orgánica del 72%; el rango de coagulante es amplio debido a la variabilidad del agua entre ciclo y ciclo de lavado.

Con el análisis económico realizado para la implementación del tren de tratabilidad se encontró que recirculando el 65% del agua vertida actualmente se logra un ahorro de \$6'318.000 al mes, consiguiendo recircular 1755 m³ de agua al mes.

También por medio del análisis económico se hallaron los costos de operación anuales de la planta de tratamiento a implementar (mano de obra \$14'566.629, costo de consumo de energía \$19'087.624, costo de productos químicos \$18'545.760, costo de disposición de lodos \$1'332.720), y el costo de los equipos de \$61'717.118 (6 bombas, 4 tanques, 2 agitadores, un clarificador de lamelas y un filtro de arena por presión), dando un total de inversión de \$115'249.911, con un tiempo de recuperación de la inversión de 5 años. De acuerdo a los costos de inversión obtenidos se puede concluir que el proyecto es viable teniendo en cuenta solo el costo actual de consumo y vertimiento de agua por parte de la lavandería (\$116'640.000 al año).

Se determino mediante el análisis económico que la implementación de un tratamiento de agua para la recirculación al proceso de lavado trae beneficios a largo plazo para la economía del hospital, dándole al Hospital Pablo Tobón Uribe reconocimiento dentro del sector salud por ser pionero en la implementación de este tipo de sistema dentro de sus instalaciones, además de que el dinero ahorrado podría ser destinado a otras áreas o proyectos realizados dentro del hospital.

RECOMENDACIONES

Para investigaciones futuras se debería realizar una caracterización completa de cada uno de los enjuagues del ciclo de lavado para conocer mas a fondo el comportamiento de los detergentes e influencia de los mismos en el agua, durante este proyecto solo se realizó una caracterización con una muestra compuesta de todos los desagües presentes en el proceso de lavado, no fue posible realizar dichas caracterizaciones por dificultades económicas y alto costo de las pruebas a realizar a cada uno de los enjuagues.

Se recomienda evaluar otros coagulantes que posiblemente tengan mayor facilidad de remoción de carga orgánica, puedan ser mas económicos que el evaluado en este proyecto.

Con respecto al proceso de desinfección se podrían usar otros desinfectantes como: Cloro liquido o gaseosos, hipoclorito de calcio, ozono, dióxido de cloro, permanganato de potasio y mezclas de ozono y peróxido de hidrógeno. También para este proceso se podría utilizar desinfección con ultravioleta, la cual presenta ventajas como: minimización de residuos generados, disminución de costos de implementación, operación y mantenimiento, debido a que la remoción de carga orgánica es mayor.

Para el proceso de filtración con arena se podrían usar diferentes combinaciones de arena con antracita, carbón activado o resinas. En la industria se encuentran gran variedad de filtros la selección de este depende del flujo de agua que se quiera filtrar, la eficiencia de proceso que se quiera lograr y las necesidades del proceso.

Los lodos generados pueden ser dispuesto por medio de un filtro de bolsa para deshumedecerlos y poder ser entregados a un gestor de residuos.

Es importante recordar que, cualquiera que sea la forma de reutilización utilizada, sobre todo en este caso, es clave realizar actividades de capacitación acerca del funcionamiento de la planta de tratamiento, además de tener planes de vigilancia, esto se puede realizar mediante la implementación de sistemas de monitoreo con el fin de consolidar o hacer ajustes en el proceso y asegurar el éxito del programa. Para todos y cualquier de implementación de plantas de tratamiento, se recomienda llevar a cabo pruebas piloto,

antes de la implementación de toda la infraestructura, además de estudio de viabilidad técnica.

Se identificó que la osmosis inversa es el tratamiento mas adecuado para este tipo de agua, debido a que por medio de su implementación se logran reducir los parámetros de conductividad y alcalinidad en el agua, además de que se logra un mayor grado de pureza del agua tratada; es importante aclarar que la implementación y operación de este tratamiento tiene un costo elevado y que económicamente no es viable para las necesidades de la lavandería del Hospital Pablo Tobón Uribe.

ANEXOS

ANEXO 1

Registro fotográfico de las visitas realizadas a la lavandería del Hospital Pablo Tobón Uribe



Ilustración 3. Zona de lavado y recepción de ropa sucia



Ilustración 4. Zona de pesaje y clasificación de ropa



Ilustración 5. Llenado de las lavadoras



Ilustración 6. Sistema de dosificación de químicos y detergentes usados en el proceso



Ilustración 7. Zona de planchado y doblado

ANEXO 2

L-100	T-100	T-101	T-102	P-100	P-101	P-102	P-103	C-100
Lavadora	Fosa recepción	Tanque Coagulación	Tanque Floculación	Bomba centrífuga Fosa-Coagulación	Bomba centrífuga Sulfato de aluminio	Bomba centrífuga Polímero A-410	Bomba centrífuga Hipoclorito de sodio	Clarificador de Lamelas
P-104	F-100	T-103	P-105					
Bomba centrífuga Clarificador-Filtro	Filtro de arena a presión	Tanque Desinfección	Bomba centrífuga Recirculación					

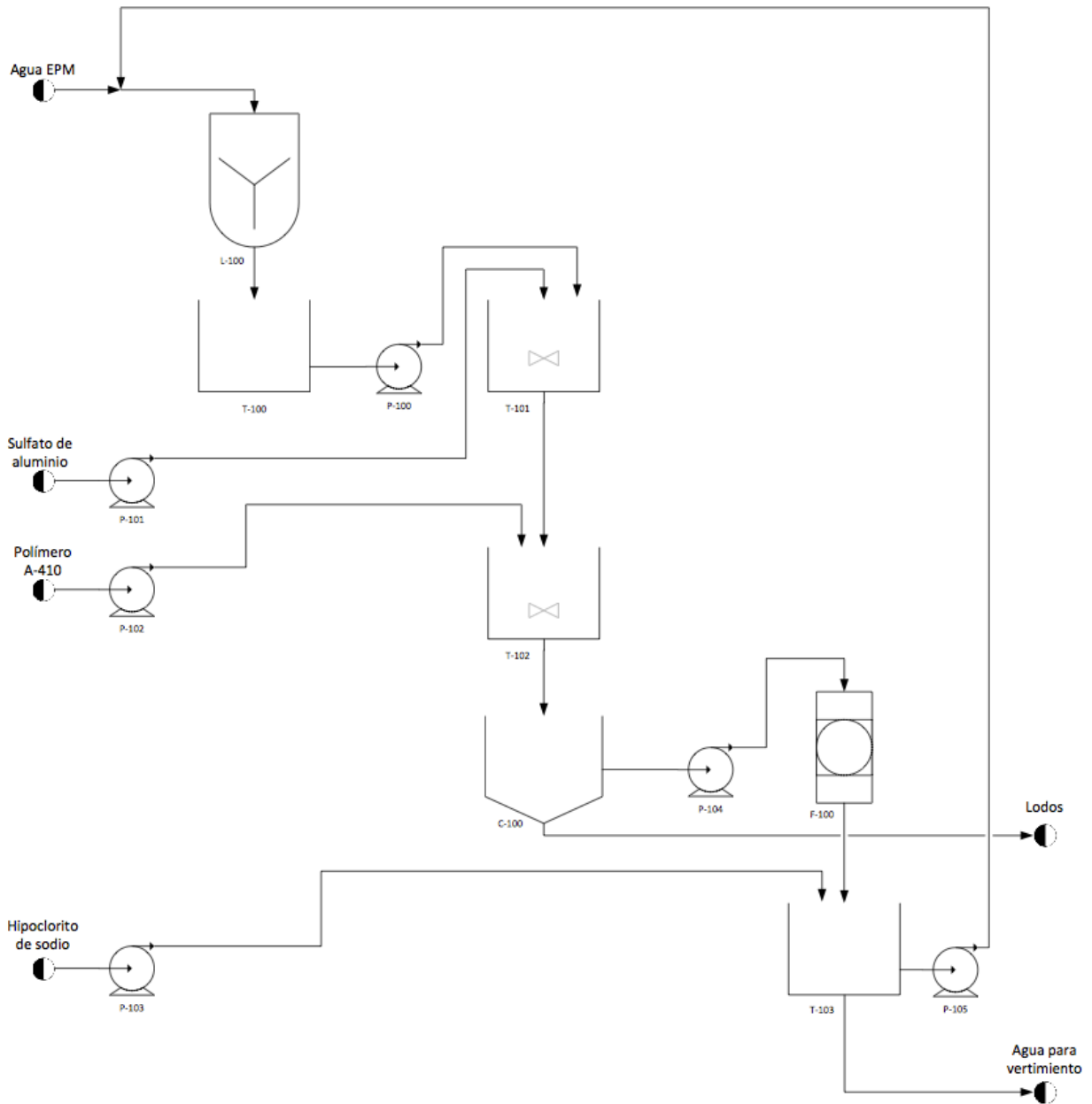


Figura 7. Diagrama de flujo para la planta de tratamiento de agua

ANEXO 3

Matriz de selección de alternativas de tecnologías de tratamiento de aguas residuales

UNIVERSIDAD EAFIT							
Hospital Pablo Tobón Uribe Polígono de comparación de Tecnologías aplicables							
PROYECTO:		EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES					
FECHA:		28 de Octubre de 2013					
1	SEGURIDAD INDUSTRIAL Y ANÁLISIS DE RIESGOS	PESO POR ITEM EN %	Marco Referencia	Coagulación y Floculación	Ozonización	Procesos avanzados de oxidación	Filtración
1	ENTORNO GENERAL (Requerimientos de seguridad industrial para área ubicación planta, red contra incendio, insonorización, control olores, etc)	50%	100%	50%	40%	45%	45%
2	ENTORNO ESPECIFICO (Normas de seguridad y riesgos durante la operación)	50%	100%	60%	50%	50%	50%
SUBTOTAL		100%	100%	55%	45%	48%	48%
2	TECNOLOGÍA	PESO POR ITEM EN %	Marco Referencia	Coagulación y Floculación	Ozonización	Procesos avanzados de oxidación	Filtración
1	IMPLEMENTACIÓN (complejidad, áreas requeridas, etc)	20%	100%	70%	70%	70%	70%
2	PROCESOS REQUERIDOS	5%	100%	55%	50%	50%	80%
3	EQUIPOS REQUERIDOS	5%	100%	85%	80%	80%	90%
4	CASOS DE ESTUDIO EXITOSOS	10%	100%	100%	90%	90%	100%
5	CONTROL DE PROCESO (Variables a controlar, PH, Temperatura, Concentración)	20%	100%	95%	60%	70%	95%
6	AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO	20%	100%	85%	80%	85%	90%
7	VIGENCIA TECNOLÓGICA (investigación, desarrollo, innovación)	15%	100%	100%	90%	95%	100%
8	PROVEEDORES	5%	100%	100%	95%	95%	100%
SUBTOTAL		100%	100%	87%	76%	80%	90%
3	PROCESO OPERATIVO	PESO POR ITEM EN %	Marco Referencia	Coagulación y Floculación	Ozonización	Procesos avanzados de oxidación	Filtración
1	COMPLEJIDAD (n° de diferentes equipos, facilidad al aplicar el proceso)	5%	100%	100%	90%	85%	100%
2	CAPACIDADES DE PRODUCCIÓN	15%	100%	80%	75%	85%	90%
3	EFICIENCIA RECUPERACIÓN (vertimientos recuperados, agua residual recirculada)	35%	100%	90%	80%	85%	70%
4	CANTIDAD PRODUCTO RECUPERADO	10%	100%	80%	85%	80%	70%
5	MATERIALES REQUERIDOS (Químicos, catalizadores)	5%	100%	85%	70%	75%	90%
6	SERVICIOS INDUSTRIALES REQUERIDOS	5%	100%	90%	80%	85%	85%
7	TIEMPO DE PROCESO	5%	100%	50%	50%	50%	50%
8	COSTO INSUMOS	10%	100%	70%	65%	65%	75%
9	CONFIABILIDAD PROCESO DE RECUPERACIÓN	5%	100%	90%	80%	90%	75%
10	MANTENIMIENTO (equipos, repuestos, paros de proceso)	5%	100%	65%	65%	65%	50%
SUBTOTAL		100%	100%	83%	76%	80%	75%

4	ASPECTOS AMBIENTALES	PESO POR ITEM EN %	Marco Referencia	Coagulación y Floculación	Ozonización	Procesos avanzados de oxidación	Filtración
1	LODOS	25%	100%	70%	70%	70%	50%
2	EMISIONES	30%	100%	100%	90%	90%	100%
3	CONSUMO DE ENERGIA	20%	100%	20%	20%	20%	40%
4	RESIDUOS PELIGROSOS	25%	100%	100%	90%	80%	85%
	SUBTOTAL	100%	100%	77%	71%	69%	72%
5	CONSUMOS ENERGETICOS	PESO POR ITEM EN %	Marco Referencia	Coagulación y Floculación	Ozonización	Procesos avanzados de oxidación	Filtración
1	PRETRATAMIENTO	30%	100%	50%	50%	50%	50%
2	TRATAMIENTO PRIMARIO	30%	100%	50%	50%	50%	50%
3	TRATAMIENTO SECUNDARIO	40%	100%	50%	50%	50%	50%
	SUBTOTAL	100%	100%	50%	50%	50%	50%
6	COSTOS DE INVERSIÓN	PESO POR ITEM EN %	Marco Referencia	Coagulación y Floculación	Ozonización	Procesos avanzados de oxidación	Filtración
1	EQUIPOS PRINCIPALES	25%	100%	40%	20%	35%	50%
2	INSTALACIÓN	15%	100%	70%	65%	60%	70%
3	MANO DE OBRA	20%	100%	70%	70%	70%	70%
5	INSUMOS IMPLEMENTACIÓN	10%	100%	60%	65%	55%	75%
6	PÉRDIDAS	15%	100%	85%	80%	80%	85%
7	GARANTÍAS	15%	100%	90%	80%	80%	80%
	SUBTOTAL	100%	100%	67%	59%	61%	69%
7	QUÍMICOS REQUERIDOS	PESO POR ITEM EN %	Marco Referencia	Coagulación y Floculación	Ozonización	Procesos avanzados de oxidación	Filtración
1	SUMINISTRO	30%	100%	65%	40%	35%	80%
2	RIESGOS	10%	100%	80%	70%	60%	80%
3	CONSUMOS	20%	100%	30%	40%	35%	60%
4	RESIDUOS GENERADOS	30%	100%	75%	70%	70%	70%
5	TOXICIDAD	10%	100%	90%	80%	75%	80%
	SUBTOTAL	100%	100%	65%	56%	52%	73%

BIBLIOGRAFÍA

- Aguado, J. (2008). *Aplicación de la ozonización en el tratamiento de aguas: descripción y funcionamiento*. Universidad de Alcalá. Madrid: Universia.
- Ambientales, C. N. (2006). *Guía Sectorial de Producción Más Limpia Hospitales, Clínicas y Centros de Salud*. Medellín: Centro Nacional de Producción Más Limpia.
- American Public Health Association. (2012). *Standard Methods for the Examination of water and wastewater* (22 ed.). New York: Joint Editorial Board.
- Andrade, L. (2008). *Reuso de água em hospitais: O caso do hospital "Santa Casa de Misericórdia de Itajubá"*. Universidad Federal de Engenharia de Itajubá. Itajubá: Unifei.
- Aquara. (12 de Noviembre de 2009). *Aquara Tratamiento de Aguas y Aguas Residuales*. Recuperado el 8 de Agosto de 2013, de Aquara Tratamiento de Aguas y Aguas Residuales: <http://www.aquara.com.pe/microfiltracion.php>
- Arboleda, J. (2002). *Teoría y práctica de purificación de agua* (3ª Edición ed., Vol. 1). Bogotá: Mc GrawHill.
- Arias, E. B. (2013). *Propuesta Técnico – Económica GIA2P-125-13*. Universidad Pontificia Bolivariana, Antioquia. Medellín: Grupo de Investigaciones Ambientales.
- Atehortúa, N. (15 de Noviembre de 2012). Descripción Proceso de Lavado de la Lavandería del Hospital Pablo Tobón Uribe. (M. A. Mera, Entrevistador)
- Azevedo, E. D., & Libano, M. (2003). *Avaliação da necessidade de tecnologias adicionais de tratamento em função da qualidade requerida para água de uso hospitalar*. 22ª Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro.
- Barrie, D. (1994). How Hospital Line and Laundry are Provided. *Journal of Hospital Infection* , 219-235.
- Bedoya, E. (2013). *Propuesta Técnico – Económica GIA2P-125-13*. Universidad Pontificia Bolivariana, Antioquia. Medellín: UPB.
- Blacio, D., & Palacios, J. (2011). *Filtros biológicos para la potabilización de agua, posibilidad de uso de filtros de arena con agua superficial de nuestra region*. Universidad de Cuenca, Facultad de ingeniería civil. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Blanck, R., & Paz, F. (2009). *Tecnologías de Ultrafiltración, una alternativa sustentable para el tratamiento de agua*. México D.F: ACS Medio Ambiente.

- Borgez, L. Z. (2003). *Caracterização da Água Cinza para Promoção da Sustentabilidade dos Recursos Hídricos*. Universidade Federal do Paraná. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.
- Borrero, J. L. (2002). *Eliminación de nutrientes mediante procesos de membrana*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Brasil. (2009). *Processamento de roupas em serviços de saúde: prevenção e controle de riscos / Agência Nacional de Vigilância Sanitária*. Brasília: Agência Nacional de Vigilância Sanitária.
- Campos, B. (2009). *Dirección de desarrollo de servicios de salud area de analisis y políticas de servicios de salud plan maestro de equipamientos de salud*. Secretario Distrital de Salud. Bogotá: Secretario Distrital de Salud.
- Chiemchaisri, C. Y. (1992). Organic stabilization and nitrogen removal in membrane separation bioreactor for domestic wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 25(10), 231-240.
- Cicek, N. J. (2001). Effect of solids retention time on the performance and biological characteristics of a membrane bioreactor. *Water Science and Technology*, 43(11), 43-50.
- De Souza, R. C. (2012). *Tratamento de efluentes de lavanderia hospital para fin de reuso*. Universidade Estadual de Maringá. Maringá: Universidade Estadual de Maringá.
- Emmanuel, E., Perrodin, Y., Keck, G., Blanchard, J.-M., & Vermande, P. (8 de Diciembre de 2004). Ecotoxicological risk assessment of hospital wastewater: a proposed framework for raw effluents discharging into urban sewer network. *Journal of Hazardous Materials*, 11.
- Gautam, K., Kumar, S., & Sabumon, P. (2007). Preliminary study of physico-chemical treatment options for hospital wastewater. *Journal of Environmental Managemen*, 83, 298-306.
- Giordani, S., & Gonzales, L. (2008). Factibilidad del uso de polimeros para la clarificación de agua potable en la ciudad de Mérida. *Revista Científica Juvenil*, VI-VIII(97-108), 102-103.
- Iglesias, M. F. (2000). *Osmosis Inversa: Fundamentos, tecnología y aplicaciones*. Madrid: McGraw Hill.
- Jan Hoinkis, V. P. (25 de Diciembre de 2007). Wastewater recycling in laundries—From pilot to large-scale plant. *Chemical Engineering and Processing*.

- Konkewicz, L. R. (12 de Febrero de 2008). *Prevenção e controle de infecções relacionado ao processamento das roupas hospitalares*. Recuperado el 30 de Julio de 2013, de Prevenção e controle de infecções relacionado ao processamento das roupas hospitalares : www.cih.com.br
- León, G. (26 de Octubre de 2011). Impacto Ambiental de los proyectos de aguas residuales. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.
- Li, Y. Z. (2008). Simultaneous nitrification–denitrification achieved by an innovative internal-loop airlift MBR: Comparative study. *Bioresource Technology*, 99(13), 5867-5872.
- Limpia, C. R. (2010). *Documentación de Caso Exitoso Programa de Uso Eficiente y Racional del Agua en la Fundación Clínica Valle de Lili Cali*. . Cali: Centro Regional de Producción Más Limpia.
- Lopez, C. (2010). *Guía de Ahorro y Eficiencia Energética en Hospitales*. Madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- Madrid, F. d. (2010). *Guía de Ahorro y Eficiencia Energética en Hospitales*. Madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- Mancuso, P. (2003). *Reuso de Água. São Paulo*. São Paulo: Manole.
- Martinez de la Cruz, A. (2013). Procesos avanzados de oxidación por acción de BiVO₄ para la purificación de agua. En A. Martinez de la Cruz, *Procesos avanzados de oxidación* (Vol. XVI, págs. 59-62). México: FIME-UANL.
- McCabe, W., & Smith, J. (1998). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Charlotte: McGrall Hill.
- Montalvo, V. (2012). *Estandarización de los procesos de lavado de prendas de uso hospitalario, a fin de evitar la propagación de enfermedades infecto contagiosas*. Universidad Técnica del Norte. Ibarra: Universidad Técnica del Norte.
- Neira, M. (2008). Hospitales Saludables Planeta Saludable Personas Saludables. *Organización Mundial de la Salud*.
- Paz, M., Murzio, H., Gemini, V., Magdaleno, A., Rossi, S., Korol, S., y otros. (2004). Aguas residuales de un Centro Hospitalario de Buenos Aires, Argentina: Características químicas, biológicas y toxicológicas. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 4(83), 6.
- PREVENTION, C. F. (13 de Noviembre de 2003). *Guidelines for environmental infection control in health-care facilities*. Recuperado el 27 de Julio de 2013, de Control Practices Advisory Committee: www.cdc.gov/ncidod/dhqp/gl_environinfection.html

- Ramos, R. L. (2009). *Remoción de arsénico de aguas por separación por medio de membrana*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México D.F: Fondo universitario Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Restrepo, A. (2010). *Metodología propuesta para la evaluación de coagulantes, floculantes y acondicionadores de lodos en tratamiento de aguas*. Tepsa S.A. Medellín: Tepsa S.A.
- Restrepo, H. (2009). *Evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de tratamiento de agua potable*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Rodríguez, C. (1995). *Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales* (2ª edición ed.). Bogotá: Norma.
- Saavedra, A., & Romero, J. (2010). *Aspectos generales sobre procesos y tecnologías de membranas*. Santiago de Chile: Universidad Sanitago de Chile.
- Sarioglu, M. I. (2009). Model evaluation of simultaneous nitrification and denitrification in a membrane bioreactor operated without an anoxic reactor. *Journal of Membrane Science*, 337(1-2), 17-27.
- Teck, H. C. (2009). Influence of a prolonged solid retention time environment on nitrification/denitrification and sludge production in a submerged membrane bioreactor. *Desalination*, 245(1-3), 28-43.
- Totagua. (26 de Octubre de 2009). *Totagua Depuración y Reutilización de Aguas Residuales*. Recuperado el 8 de Agosto de 2013, de Totagua Depuración y Reutilización de Aguas Residuales: <http://www.totagua.com>
- Turton, R. (2009). *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Process* (3ª Edición ed.). Boston: Prentice Hall.
- Uribe, H. P. (23 de Marzo de 2012). *Hospital Pablo Tobón Uribe*. Recuperado el 27 de Julio de 2013, de Hospital Pablo Tobón Uribe : <http://www.hptu.org.co>
- Uribe, N. A. (15 de Noviembre de 2012). Descripción Proceso de Lavado. (M. A. Mera, Entrevistador)
- Urioz, R. R. (2011). *Eliminación Biológica de Nitrógeno de un Efluente con Alta Carga Orgánica y Amoniacal*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Velez, C. (2006). *Guía Sectorial de Producción Más Limpia Hospitales, Clínicas y Centros de Salud*. Medellín: Norma.
- Walas, S. (2002). *Chemical Process Equipment: Selection and Design*. Boston: Butterworth.

