

**PROPOSICIÓN DE UNA ETAPA DE FLOCULACIÓN – SEDIMENTACIÓN PARA
EL TRATAMIENTO DE AGUA DEL LAGO DE LA UIS: PRUEBA DE JARRAS Y
SIMULACIÓN COMPUTACIONAL**

JEFFERSON DOUGLAS OCHOA OJEDA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2018

**PROPOSICIÓN DE UNA ETAPA DE FOCULACIÓN – SEDIMENTACIÓN PARA
EL TRATAMIENTO DE AGUA DEL LAGO DE LA UIS: PRUEBA DE JARRAS Y
SIMULACIÓN COMPUTACIONAL**

JEFFERSON DOUGLAS OCHOA OJEDA

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Químico**

**Director
GIOVANNI MORALES MEDINA,
PhD Ingeniería Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2018

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias, felicidad, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía.

Le doy gracias a mi familia, Padre (Q.E.P.D.), Madre y Hermano, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, además, por ser fuente de energía cuando la necesité, por el ejemplo de perseverancia y constancia que los caracterizan y que me infundieron siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

Gracias a mis profesores, por su apoyo y motivación para la culminación de mis estudios profesionales, por su tiempo compartido, por impulsar el desarrollo de mi formación profesional y bríndame una amistad a lo largo de esta etapa de mi vida.

Gracias a mis amigos, que siempre me han prestado un gran apoyo moral y humano, necesarios en los momentos difíciles de este trabajo y en esta etapa de mi vida, a Karen J. Cepeda C., al Ingeniero Químico Omar Andrés Benavides P.

Al profesor Giovanni Morales Medina, por su entrega, dedicación y compromiso incondicional en el desarrollo de este proyecto, y por enseñarme que los grandes logros nacen de grandes sacrificios.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS.....	17
1.1 Objetivo general.....	17
1.2 Objetivos específicos	17
2. MARCO TEÓRICO	18
2.1 Generalidades.....	18
2.1.1 Tipos de Floculación	22
2.1.2 Sedimentación	23
2.2 Modelo matemático proceso de coagulación-floculación.....	25
2.3 Modelo matemático para etapa de sedimentación.....	28
2.3.1 Prueba de jarras	30
3. METODOLOGIA	32
3.1. Procedimiento para prueba en jarras.....	32
3.2 Determinación Experimental para caracterizar el agua	33
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1. Prueba de jarras	36
4.2. Etapa coagulación – floculación.....	49
4.2.1 Linealización ecuación diferencial tanque de Coagulación-Floculación.....	50
4.3 Simulación etapa de floculación.....	51
4.3.1 Análisis de diferentes perturbaciones en condiciones iniciales.....	53
4.3.2 Simulación tanque de sedimentación	55
5. CONCLUSIONES	59
6. RECOMENDACIONES.....	60
BIBLIOGRAFÍA.....	61
ANEXOS.....	64

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Factores importantes que influyen en la coagulación y floculación.....	20
Tabla 2. Clasificación de la dureza del agua (°HF).....	21
Tabla 3. Comparación floculación Pericinéctica y Ortocinéctica.	22
Tabla 4. Especificaciones test de jarras.....	33
Tabla 5. Requerimientos equipo test de jarras.	33
Tabla 6. Condiciones iniciales prueba de jarras.....	36
Tabla 7. Valor promedio de los parámetros iniciales para la prueba N°0.	37
Tabla 8. Valores medidos para los parámetros al minuto de prueba a 80rpm de agitación.	37
Tabla 9. Valores medidos para los parámetros en el minuto 16 de prueba a 40rpm de agitación.....	38
Tabla 10. Valores medidos para los parámetros pasados 20 min de reposo de la muestra.....	39
Tabla 11. Valores iniciales de los parámetros medidos para la muestra de agua del lago UIS utilizados para la prueba N°2.	40
Tabla 12. Valores medidos para los parámetros en el min 1 de prueba a 80rpm de agitación.	40
Tabla 13. Valores medidos para los parámetros en el minuto 16 de prueba a 60rpm de agitación.	41
Tabla 14. Valores medidos para los parámetros pasados 20 min de reposo de la muestra.....	42
Tabla 15. Prueba a 40 rpm, bajo diferentes concentraciones de sulfato de aluminio.	48

Tabla 16. Prueba a 60 rpm, bajo diferentes concentraciones de sulfato de aluminio.48

Tabla 17. Perturbaciones variando la concentración de coagulante (Xi).54

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Modelo de un tanque de sedimentación con deposición discreta de partículas	24
Figura 2. Volumen de control etapa de coagulación – floculación	25
Figura 3. Distribución espacial de un tanque de sedimentación simple	29
Figura 4. Equipo de prueba de jarras.....	31
Figura 5. Esquema del dispositivo de prueba de jarras	31
Figura 6. Protocolo determinación de dureza	34
Figura 7. Protocolo determinación de pH.....	35
Figura 8. Variación de Turbiedad respecto a cantidad de floculante y tiempo a 40rpm.....	43
Figura 9. Variación de Turbiedad respecto a cantidad de floculante y tiempo a 60rpm.....	43
Figura 10. Variación de Dureza respecto a cantidad de floculante y tiempo a 40rpm	44
Figura 11. Variación de Dureza respecto a cantidad de floculante y tiempo a 60rpm	44
Figura 12. Variación de pH respecto a cantidad de floculante y tiempo a 40rpm ..	45
Figura 13. Variación de pH respecto a cantidad de floculante y tiempo a 60rpm ..	45
Figura 14. Porcentaje de turbiedad remanente vs. Cantidad de floculante y tiempo a 40 rpm.....	46
Figura 15. Porcentaje de turbiedad remanente vs. Cantidad de floculante y tiempo a 60 rpm.....	47

Figura 16. Esquema del proceso coagulación (mezcla rápida) – floculación.....	50
Figura 17. Bloques de Simulink para simulación etapa de floculación.....	52
Figura 18. Respuesta de simulación etapa de floculación a condiciones iniciales.	53
Figura 19. Respuesta en etapa de floculación ante perturbación del 20% de la variable X_m	54
Figura 20. Concentración de sólidos suspendidos respecto a altura del tanque ...	58
Figura 21. Perfiles obtenidos por los autores Wei Zhang, Zhihong Zou y Jun Sui en simulación de un sedimentador	58

ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Protocolo aplicación prueba de jarras	64
ANEXO B. pH-metro (sensor utilizado en el método electroquímico)	65
ANEXO C. Kit para la determinación de dureza	66
ANEXO D. Turbidímetro para la determinación de turbidez	67
ANEXO E. Código en Software Matlab descripción proceso de sedimentación	70
ANEXO F. Diseño en Excel de tanque de sedimentación	75
ANEXO G. Matriz de diferencias finitas simulación sedimentación	76
ANEXO H. Datos resumidos simulación de sedimentación	77
ANEXO I. Linealización ecuación de balance en TK1	79
ANEXO J. Resultados prueba de jarras No 1 y No2.....	81
ANEXO K. Variación de porcentaje de turbiedad remanente vs. Tiempo de floculación en cada jarra	85

RESUMEN

TÍTULO: PROPOSICIÓN DE UNA ETAPA DE FLOCULACIÓN – SEDIMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA DEL LAGO DE LA UIS: PRUEBA DE JARRAS Y SIMULACIÓN COMPUTACIONAL*.

AUTORES: Jefferson Dooglas Ochoa Ojeda**

PALABRAS CLAVE: Tratamiento de aguas, Coagulación, Floculación, Sedimentación, Dosis adecuada de Sulfato de Aluminio, Simulación Computacional, MATLAB, Prueba de Jarras, Función de Transferencia, Sistema de Control.

DESCRIPCIÓN:

La necesidad de satisfacer los requerimientos diferentes a la preparación de alimentos y consumo humano, conduce a la aplicación de tratamientos primarios al agua para su uso en procesos de riego de jardines y zonas verdes, en sanitarios, riego de calles y baños. Las etapas del proceso de tratamiento primario de agua cruda comprenden la clarificación química por coagulación-floculación y la sedimentación; el aprovechamiento de fuentes hídricas cercanas a poblaciones rurales con base en las características del agua del lago de la Universidad Industrial de Santander fueron consideradas como caso de estudio en el presente proyecto.

El esquema general de trabajo consistió en la toma de muestras de agua del lago ubicado en el campus central de la Universidad Industrial de Santander siguiendo el protocolo de muestreo requerido, posteriormente se llevó a cabo la fase de caracterización del agua por medio del test de prueba de jarras, haciendo análisis de pH, Dureza y Turbidez para realizar la correspondiente comparación con las muestras tratadas. Mediante este test se buscó establecer la dosis adecuada de Sulfato de Aluminio ($Al_2(SO_4)_3$) variando las concentraciones del mismo a diferentes revoluciones del equipo.

Por último, se identificó y obtuvo por medio de simulación computacional manipulando el software MATLAB y la herramienta Simulink, la función de transferencia adecuada, que describe el sistema de control para el tratamiento primario de aguas aplicado en este proyecto y se analizaron resultados con variación en el tiempo y espacio. Además, en la etapa de sedimentación se analizó por medio del método de diferencias finitas y empleando un código

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Giovanni Morales Medina. Ingeniero Químico, Ph.D

desarrollado en Excel, los perfiles de concentración de sedimentos respecto al tiempo de sedimentación, comparándolos con un modelo reportado en la literatura.

ABSTRACT

TITLE: TRANSFER FUNCTIONS OBTAINING FOR THE FLOCCULATION PROCESS IN WATER TREATMENT BY COMPUTATIONAL SIMULATION.*

AUTHOR: Jefferson Dooglas Ochoa Ojeda.**

KEYWORDS: Water Treatment, Coagulation, Flocculation, Sedimentation, Adequate Dosage of Aluminum Sulphate, Computational Simulation, MATLAB, Test of Jugs, Transfer Function, Control System.

DESCRIPTION:

The need to meet different requirements of food preparation and human consumption, leads to the application of primary treatments to water for use in irrigation processes of gardens and green areas, in toilets, irrigation of streets and bathrooms. The primary stages of raw water treatment process include chemical clarification by coagulation-flocculation and sedimentation; in this project the use of water sources close to rural populations based on the characteristics of the water from the Universidad Industrial of Santander lake were considered as a case study.

The general scheme of work consisted in the sampling of several points of the lake located in the central campus of the Industrial University of Santander following the protocol of required sampling. After that the characterization of the water was carried out by means of pH analysis, Hardness and Turbidity to make the corresponding comparison with the treated samples. The objective with the test of jugs was to establish the adequate dose of Aluminum Sulphate ($Al_2(SO_4)_3$) varying the concentrations of the same to different revolutions of the equipment.

Finally, the appropriate transfer function was identified and obtained by means of computer simulation manipulating the MATLAB software and the Simulink tool, which describes the control system for the primary treatment of water applied in this project. Furthermore, the results were analyzed with variation in time and space. In addition, in the sedimentation stage, the sediment concentration profiles versus sedimentation time were analyzed by means of the finite difference method and using a code developed in Excel, comparing them with a model reported in the literature.

* Undergraduate Project

** Physical and Chemical Engineering's Faculty. School of Chemical Engineering. Advisor: Giovanni Morales Medina. Chemical Engineer, Ph.D

INTRODUCCIÓN

El agua es la sustancia más importante en la tierra para la supervivencia de todos los organismos. La utilización inteligente y eficaz de los recursos hídricos es la necesidad de ahora y de todos los tiempos. Gran número de personas son afectadas por el consumo y el uso de agua contaminada, las enfermedades transmitidas debido a su consumo podrían afectar a cualquier persona, lo que puede incluso conducir a la muerte. Por lo anterior, grandes esfuerzos se han realizado por la aplicación de etapas de tratamiento a estos afluentes. Se considera agua tratada a “aquellas aguas residuales que han sido sometidas a operaciones o procesos unitarios de tratamiento que permiten cumplir con los criterios de calidad requeridos para su reúso¹”.

El tratamiento primario de agua de fuentes hídricas cercanas a poblaciones es una necesidad que satisface los requerimientos diferentes a la preparación de alimentos y consumo humano; el agua tratada puede ser utilizada en procesos de riego de jardines y zonas verdes, en sanitarios, riego de calles y baño. Las etapas del proceso de tratamiento primario de agua cruda comprenden la clarificación química por coagulación-floculación y la sedimentación; estas operaciones son efectuadas en la mayoría de las plantas de tratamiento. Con estas etapas de tratamiento, es posible dar uso al agua de fuentes hídricas cercanas a poblaciones que no cuenten con un servicio adecuado de acueducto; en este sentido, el agua del lago de la UIS puede ser utilizado como referente de una fuente hídrica cercana a una población, con lo cual, los análisis basados en el agua del lago de la UIS pueden ser utilizados para extrapolar y diseñar las etapas de tratamiento primario.

¹ COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución N° 1707 (13 de agosto del 2014) por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. Bogotá D.C. 1 p

Por otro lado, los análisis y las predicciones de los rendimientos de las etapas en procesos de tratamiento pueden ser facilitados por la aplicación de simulaciones computacionales. La simulación computacional se ha convertido en una de las principales herramientas en la deducción de soluciones a problemas industriales y de la vida cotidiana. En lo referente al proceso de floculación las simulaciones computacionales asumen mezcla perfecta en el tanque, con lo cual reportan el perfil de concentración dependiente solo del tiempo. Para el proceso posterior de sedimentación, las simulaciones computacionales consideran variación de la concentración tanto en el tiempo como en la posición. Los perfiles derivados de estas simulaciones conllevan a definir qué tan sensible es una etapa de floculación – sedimentación ante perturbaciones que ingresan al sistema.

Por último, el propósito principal de este trabajo es analizar una etapa de floculación - sedimentación para el tratamiento de fuentes hídricas cercanas a poblaciones con base en las características del agua del lago de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, a través de los resultados de una simulación computacional. El insumo para la simulación computacional se deriva de una prueba de jarras aplicada a muestras de agua del lago, considerando el coagulante sulfato de aluminio.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Analizar una etapa propuesta de floculación – sedimentación, en el tratamiento de agua del lago de la UIS, a partir de resultados de prueba de jarras y simulación computacional.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar la cantidad apropiada de Sulfato de Aluminio [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$] (coagulante), en el tratamiento del agua del lago de la UIS, utilizando el ensayo de prueba de jarras.
- Estimar las variaciones de concentración de Sulfato de Aluminio [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$] (coagulante), en un tanque de floculación a partir de un modelo matemático reportado en la literatura.
- Analizar las tendencias de concentración en tiempo y espacio en un tanque de sedimentación en el tratamiento de agua del lago de la UIS, utilizando simulación computacional.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades

La coagulación es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado. Las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas de la superficie del coloide permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos².

Los coagulantes son sustancias químicas principalmente de hierro o aluminio o en algunos casos materiales naturales de origen vegetal que, añadidas al agua reaccionan con sus componentes, principalmente con la alcalinidad, produciendo la unión de las partículas en suspensión presentes en ella y su agrupamiento en coágulos, los más usados en el tratamiento de aguas son compuestos inorgánicos de aluminio o hierro como el sulfato de aluminio, aluminato de sodio, sulfato ferroso, sulfato férrico y cloruro férrico³.

Cada tipo de coagulante tiene un rango específico de pH donde tiene la mínima solubilidad y ocurre la máxima precipitación de partículas suspendidas dependiendo, también, de las características químicas del agua. Con excepción del aluminato de sodio, estos coagulantes son sales ácidas que disminuyen el pH del agua.

El Sulfato de Aluminio que en la práctica se le denomina como Alumbre, es catalogado como el coagulante estándar con mayor uso en el tratamiento de aguas por bajo costo, fácil preparación y manejo y adicionalmente porque es capaz de llevar a cabo una coagulación adecuada en un rango de pH bastante

² PPS. Petroleum and Petrochemical services [En línea]. Disponible en: <http://www.pps-sas.co/contenido-de-atraccion3/coagulacion-y-floculacion>

³ Cogollo, J.M. (2010) *Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del Hidroxicloruro de aluminio*. Revista Universidad Nacional. P 18-17

amplio. La dosis adecuada corresponde a aquella que produzca la menor turbiedad final. La dosis de alumbre varía normalmente entre 5 a 50 mg/L para aguas naturales. Comúnmente el pH efectivo para coagulación con alumbre es de 5,5 a 8,0 y se prefiere para tratar aguas superficiales de buena calidad por ser el único químico necesario para la coagulación⁴.

La floculación es el proceso que sigue a la coagulación, consiste en la agitación de la masa coagulada que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad⁵.

La coagulación y la floculación, son dos procesos que se deben efectuar en etapas sucesivas, de forma que una vez desestabilizadas las partículas, la colisión entre ellas permita el crecimiento de los microfloculos, apenas visibles a simple vista, hasta formar mayores flóculos con el fin de llevar a cabo la remoción de la turbiedad orgánica e inorgánica o solidos suspendidos que no se sedimentan rápidamente, así como la remoción de color, eliminación de virus, bacterias y microorganismos patógenos que presenten respuesta a estos métodos y también contribuyen con la destrucción de sustancias productoras de olor y sabor⁶. Así mismo, La tabla 1, se muestran los factores que intervienen en el proceso de coagulación y floculación.

Por otro lado, la sedimentación se define como una operación de separación sólido-fluido en la que las partículas sólidas de una suspensión, más densas que el fluido, se separan de éste por la acción de la gravedad⁷.

⁴ Castrillón, D., Giraldo, M. (2012) *Determinación de las dosis adecuadas del coagulantesulfato de Aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa santana* (Trabajo de grado). Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.

⁵ Acuña, D. (2008) *Modelo de correlación entre las variables medibles en línea que afectan el proceso de determinación de la dosis adecuada de coagulante en la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia, del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga SAESP* (Tesis de pregrado). Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga, Colombia.

⁶ Aguilar, M.I., Sáez, J., Lloréns, M., Soler, A. & Ortuño, J.F. Tratamiento físico – químico de aguas residuales, Coagulación – Floculación. Murcia, 2002. ISBN 84-8371-308-X

⁷ Material Docente Multimedia en las Áreas de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente. [En línea]. Disponible en: <http://www4.ujaen.es/~ecastro/proyecto/creditos.html>

Tabla 1. Factores importantes que influyen en la coagulación y floculación.

Coagulación	Floculación
<ul style="list-style-type: none"> • Valencia • Tamaño de partícula • Temperatura • Concentraciones de iones H⁺ o pH. • Relación cantidad-tiempo • Alcalinidad 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Concentración y naturaleza de las partículas 2. Tiempo de detención 3. Gradiente de velocidad

▪ Fuente: elaboración propia

- **pH:** Es la medida de la concentración que existe en una solución de acidez o de alcalinidad lo cual se manifiesta por la concentración de iones de hidronio {H₃O⁺} o potenciales de hidrogeno presentes en determinadas sustancias.

Existe una escala que mide el pH de 0 a 14, siendo 7 el punto medio que indica el equilibrio entre la acidez y la alcalinidad, sin embargo, por debajo de 7 se considera estado de acidez y por encima de 7 estados de alcalinidad respectivamente⁸.

- **Dureza:** Se denomina dureza del agua a la concentración de compuestos minerales que hay en una determinada cantidad de agua, en particular sales de magnesio y calcio. El agua denominada comúnmente como “dura” tiene una elevada concentración de dichas sales y el agua “blanda” las contiene en muy poca cantidad.

La unidad de medida de la dureza que se utiliza habitualmente son los grados hidrométricos franceses (°HF) (ver tabla 2), y el cálculo de este parámetro responde a la siguiente ecuación⁹:

⁸ Chile, I.,(2016) *Nutrición Cronobiológica Bioenergética*, EE.UU: Palibrio.

⁹ FACSA (2018). Ciclo Integral del Agua. [En línea]. Disponible en: <https://www.facsa.com/municipios/wp-content/uploads/2016/02/Facsa-dureza-del-agua-Alcora.pdf>

$$\frac{\frac{mg}{l}Ca \times 2.5 + \frac{mg}{l}Mg \times 4.2}{10} \quad (1)$$

Tabla 2. Clasificación de la dureza del agua (°HF).

DETALLE	INDICADOR
Agua muy blanda	< 7
Agua blanda	7-14
Agua de dureza intermedia	14-32
Agua dura	32-54
Agua muy dura	> 54

Fuente: elaboración propia

- Turbidez:** La turbidez es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el agua, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez¹⁰. La medida de la turbidez es una medida indirecta de la concentración de coloides, indica la efectividad del tratamiento de coagulación. Cuando la materia coloidal se transforma en materia particulada la turbidez disminuye, debido a que la materia particulada sedimenta disminuyendo así la dispersión de la luz.

¹⁰ MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA. Servicio de extensión agrícola. [En línea]. Disponible en: <http://academic.uprm.edu/gonzalezc/HTMLobj-859/maguaturbidez.pdf>

2.1.1 Tipos de Floculación: En la floculación se pueden evidenciar colisiones efectivas y producir adherencia entre las moléculas en la formación de flóculos. Existen dos tipos de contacto: floculación pericinética y floculación ortocinética. La tabla 3 presenta las características distintivas de la floculación pericinética y la floculación ortocinética. Al dispersarse el coagulante en la masa de agua y desestabilizarse las partículas, se precisa de la floculación pericinética para que las partículas coloidales de tamaño menor de un micrómetro empiecen a aglutinarse. El movimiento browniano actúa dentro de este rango de tamaño de partículas y forma el microflóculo inicial. Recién cuando este alcanza el tamaño de un micrómetro empieza a actuar la floculación ortocinética, promoviendo un desarrollo mayor del microflóculo¹¹.

Tabla 3. Comparación floculación Pericinética y Ortocinética.

Floculación Pericinética:	Floculación Ortocinética:
<ul style="list-style-type: none"> • Producida por el movimiento natural de las moléculas del agua, inducida por la energía térmica, este movimiento es conocido como el movimiento browniano (movimiento aleatorio que se observa en las partículas que se hallan en un medio fluido) dicho movimiento resulta del bombardeo rápido y al azar de partículas coloidales por las moléculas del fluido, • Solo influye en partículas de tamaños menores a un micrón y solo actúa al comienzo del proceso, en los primeros 6 a 10 segundos¹². 	<ul style="list-style-type: none"> • Se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, observando que la agitación acelera la agregación de las partículas coloidales. • Inducido por una energía exterior a la masa del agua que puede ser de origen mecánico o hidráulico.

Fuente: elaboración propia

¹¹ Vargas, L.(2018). *Floculación*. [En línea]. Disponible en: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/seis.pdf>

¹² BIOLOGIA-GEOLOGIA. *Propiedades de las dispersiones coloidales*. [En línea]. Disponible en: https://biologia-geologia.com/biologia2/1323_propiedades_de_las_dispersiones_coloidales.html

2.1.2 Sedimentación: Eliminación de materias por sedimentación se basa en las diferencias de peso específico entre partículas sólidas y el líquido en el que se encuentran, que acaban en el depósito de las materias en suspensión¹³. Puede producirse en una o varias etapas o en varios puntos del proceso de tratamiento. En una planta típica, el proceso de sedimentación se utiliza en tres de las fases del tratamiento:

- Desarenadores (la materia inorgánica se elimina)..
- Clarificadores o sedimentador primario (se separan sólidos orgánicos y otros).
- Clarificadores o sedimentares secundarios (los lodos se separan del efluente tratado).

2.1.2.1 Tipos de sedimentadores: Se consideran básicamente tres tipos o procesos de sedimentación, dependiendo de la naturaleza de los sólidos presentes en suspensión¹⁴:

- *Sedimentación discreta:* las partículas que se depositan se mantienen en forma individual, es decir que no se somete a un proceso de coalescencia con otras partículas. En este caso, las propiedades físicas de las partículas como tamaño, forma, peso específico, no cambian.
- *Sedimentación con floculación:* existe aglomeración de las partículas, lo cual produce un cambio en la densidad en la velocidad de sedimentación o precipitación.
- *Sedimentación por zonas:* las partículas forman una especie de manta que se sedimenta como una masa total presentando una interface distinta con la fase líquida.

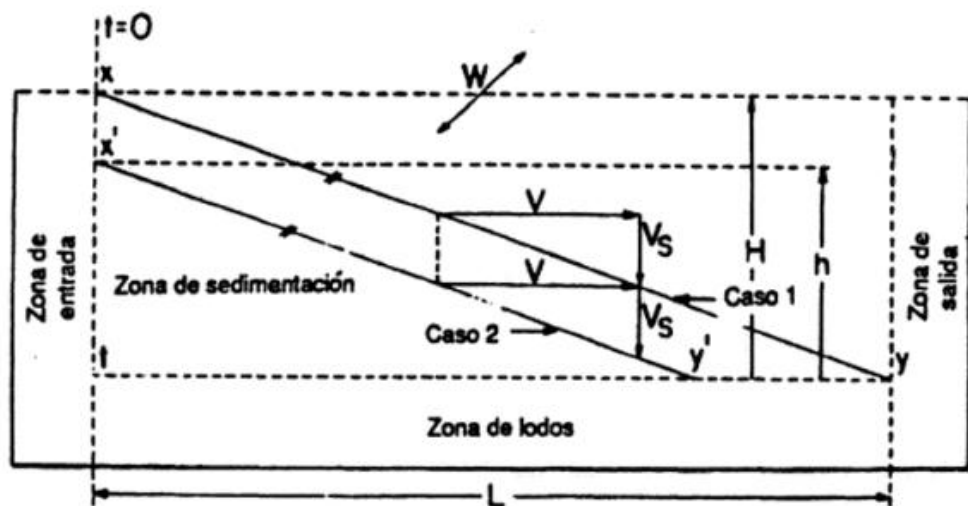
¹³ Ramalho, R.,(2003) *Tratamiento de Aguas Residuales*, Canadá: Reverté S.A.

¹⁴ *Ibid.*, p 93

2.1.2.2 Concepto de tanque de sedimentación ideal: Este concepto desarrollado por Hazen¹⁵ y Camp¹⁶, es la base para poder llegar a relaciones utilizadas en el diseño de tanques de sedimentación. El modelo seleccionado para un sedimentador es el de sección rectangular consistente en cuatro zonas (figura 1):

- *Zona de entrada:* en la cual el flujo puede considerarse laminar. Se supone que en el límite de esta zona (siguiendo la línea vertical xt) las partículas se distribuyen uniformemente según la sección de entrada.
- *Zona de sedimentación:* se supone que la partícula deja de estar en suspensión cuando llega al fondo de esta zona (línea horizontal ty).
- *Zona de salida:* el agua residual se recoge aquí antes de su paso al tratamiento posterior.
- *Zona de lodos:* zona reservada para la retirada de los lodos.

Figura 1. Modelo de un tanque de sedimentación con deposición discreta de partículas



Fuente: Ramalho, R. [13]

¹⁵ Ramalho, R., Ibid., p 98

¹⁶ Ibid., p 98

2.2 Modelo matemático proceso de coagulación-floculación

El modelo matemático expuesto a continuación, se basa en el desarrollado por Saitha M J, y colaboradores¹⁷. La reacción química general que ocurre en el proceso de coagulación (mezcla rápida) – floculación es:

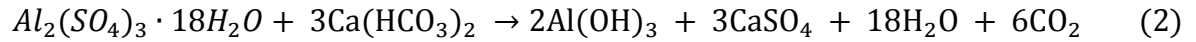
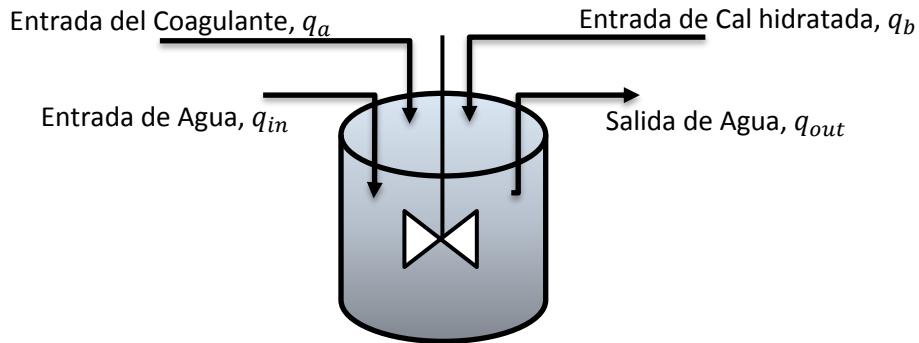


Figura 2. Volumen de control etapa de coagulación – floculación



Fuente: elaboración propia

Se adiciona cal hidratada como co-coagulante ya que es un producto alcalino muy efectivos y de menor coste en el tratamiento de aguas. De hecho, la mayoría de la cal que se produce se destina a mejorar la calidad del agua utilizada en procesos de riego de jardines y zonas verdes, en sanitarios, riego de calles y baño. En este sentido, la cal permite ablandar el agua, purificarla, eliminar en gran porcentaje su turbiedad, neutralizar la acidez, eliminar impurezas, etc.

En la mezcla rápida la diferencia de concentración iónica es (la figura 3 muestra el volumen de control en un tanque de coagulación - floculación):

$$x_i = [HCO_{3in}^-] - [Al_m^{3+}] - [Ca_m^{2+}] = [H_m^+] - [OH_m^-] \quad (3)$$

¹⁷ Saitha M J, Sadiq A, Laila Beebi M. Modelling And Simulation Of Water Treatment Plant For Optimum Coagulant Dosage Based On Hammerstein-Wiener Model, Proceedings of 25th IRF International Conference, 10th May 2015, Chennai, India.

Ahora, la relación entre la corriente de flujo de agua y la concentración iónica de entrada, puede expresarse como un balance de masa:

$$V \frac{dAl_m^{3+}}{dt} = [Al_{in}^{3+}]q_a - [Al_m^{3+}]q_{out} \quad (4)$$

$$V \frac{dCa_m^{2+}}{dt} = [Ca_{in}^{2+}]q_b - [Ca_m^{2+}]q_{out} \quad (5)$$

$$V \frac{dHCO_m^{3-}}{dt} = [HCO_{3in}^-]q_{in} - [HCO_m^-]q_{out} \quad (6)$$

En donde V es el volumen de líquido en el tanque, q_{in} es el caudal de entrada de agua y q_{out} es el caudal de salida de agua tratada.

Agrupando términos se tiene:

$$V \left[\frac{dHCO_{3m}^-}{dt} - \frac{dAl_m^{3+}}{dt} - \frac{dCa_m^{2+}}{dt} \right] = [HCO_{3in}^-]q_{in} - [[HCO_{3m}^-]q_{out} - [Al_{in}^{3+}]q_a + [Al_m^{3+}]q_{out} - [Ca_{in}^{2+}]q_b + [Ca_{in}^{2+}]q_{out}] \quad (7)$$

Donde q_a corresponde al flujo de entrada de coagulante (sulfato de aluminio) y q_b es el flujo de entrada de cal viva al proceso.

Entonces el balance de masa para la etapa de Coagulación (mezcla rápida) es:

$$V \frac{dx_i}{dt} = [[HCO_{3in}^-]q_{in} - [Al_{in}^{3+}]q_a - [Ca_{in}^{2+}]q_b - x_i q_{out}] \quad (8)$$

$$A\Delta L_f \frac{dHCO_{3f}^-}{dt} - A\Delta L_f \frac{dAl_f^{3+}}{dt} - A\Delta L_f \frac{dCa_f^{2+}}{dt} = Av_f x_{i(t)} - [HCO_{3f}^-]Av_f - [Al_f^{3+}]Av_f - [Ca_f^{2+}]Av_f + r_{f(t)}A\Delta L_f \quad (9)$$

Donde A es el área transversal del tanque y ΔL_f es la altura del líquido en el tanque.

En la siguiente etapa, floculación, la diferencia de concentración iónica es:

$$x_f = [HCO_{3f}^-] - [Al_f^{3+}] - [Ca_f^{2+}] \quad (10)$$

Aplicando balance de concentración de especies iónicas, se obtiene:

$$v_f \frac{dx_f(t)}{dt} = x_i q_{out} - [HCO_3^-] + [Al_f^{3+}] + r_f(t) v_f \quad (11)$$

Donde v_f es el volumen de líquido en el tanque de floculación y donde r_f corresponde al término de floculación ortocinética.

$$r_f = -\frac{2}{3} G d^3 N_T^2 \eta \quad (12)$$

Donde G es el gradiente de concentración, d corresponde al término de diámetro de partícula, N_T^2 es el total de partículas suspendidas y η corresponde al factor de colisión eficiente.

Reemplazando en 11, las ecuaciones 10 y 12 se obtienen:

$$v_f \frac{dx_f(t)}{dt} = x_{i(t)} q_{out} - x_{f(t)} q_{outf} - \frac{2}{3} G_f \cdot d_f^3 \cdot N_T^2 \cdot \eta \cdot v_f - v_s A_t x_{f(t)} \quad (13)$$

El último término de la derecha, es una modificación al modelo propuesto por Saitha M J, y colaboradores, que considera la velocidad de sedimentación, según la ecuación de Stokes¹⁸.

$$v_s = \frac{g}{18} * \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{d^2}{\vartheta} \quad (14)$$

Donde g es la gravedad, ρ_s es la densidad de la partícula, ρ es la densidad del fluido (mezcla $H_2O - Al_2(SO_4)_3$), ϑ es la viscosidad cinemática y d es el diámetro de la partícula.

$$v_f \frac{dx_f(t)}{dt} = x_{i(t)} q_{out} - x_{f(t)} q_{outf} - \frac{2}{3} G_f \cdot d_f^3 \cdot N_T^2 \cdot \eta \cdot v_f - \frac{g}{18} * \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{d^2}{\vartheta} A_t x_{f(t)} \quad (15)$$

Donde A_t corresponde al área transversal de la partícula. La relación entre las densidades, se expresa en términos de las masas de coagulante y agua según:

$$\frac{\rho_s - \rho}{\rho} = \frac{\rho_s \frac{m_{f_1} + m_a}{v}}{m_{f_1} + m_a} = \frac{\rho_s v - m_{f_1} + m_a}{m_{f_1} + m_a} = \frac{\rho_s v}{m_{f_1} + m_a} - 1 \quad (16)$$

¹⁸ Perez P. Jorge Arturo, (1981), *Manual de tratamiento de aguas*, Medellín, Colombia, UNAL-Medellin.

$$\frac{\rho_s v}{m_{f1} + m_a} - 1 = \frac{\rho_s v}{x_{f(t)} M v + \rho_a v} - 1 = \frac{\rho_s}{x_{f(t)} M + \rho_a} - 1 \quad (17)$$

Donde M corresponde al peso molecular del sulfato de aluminio. Reemplazando esta expresión en el balance de especies iónicas resulta:

$$v_f \frac{dx_{f(t)}}{dt} = x_{i(t)} q_{out} - x_{f(t)} q_{outf} - \frac{2}{3} G_f \cdot d_f^3 \cdot N_T^2 \cdot \eta \cdot v_f - \frac{g}{18} \left(\frac{\rho_s}{x_{f(t)} M + \rho_a} - 1 \right) \frac{d^2 A_t x_{f(t)}}{\vartheta} \quad (18)$$

$$v_f \frac{dx_{f(t)}}{dt} + x_{f(t)} q_{outf} + \frac{g}{18} \left(\frac{\rho_s}{x_{f(t)} M + \rho_a} - 1 \right) \left(\frac{A_t x_{f(t)} d^2}{\vartheta} \right) = x_{i(t)} q_{out} - \frac{2}{3} G_f \cdot d_f^3 \cdot N_T^2 \cdot \eta \cdot v_f \quad (19)$$

$$v_f \frac{dx_{f(t)}}{dt} + x_{f(t)} q_{outf} + \frac{g d^2 A_t}{18 \vartheta} \left(\frac{\rho_s x_{f(t)}}{x_{f(t)} M + \rho_a} - x_{f(t)} \right) = x_{i(t)} q_{out} - \frac{2}{3} G_f \cdot d_f^3 \cdot N_T^2 \cdot \eta \cdot v_f \quad (20)$$

$$\frac{dx_f}{dt} + x_{f(t)} \frac{q_{outf}}{v_f} + \frac{g d^2 A_t}{18 \vartheta v_f} \left(\frac{\rho_s x_{f(t)} - x_{f(t)}^2 M - x_{f(t)} \rho_a}{x_{f(t)} M + \rho_a} \right) = x_{i(t)} \frac{q_{out}}{v_f} - \frac{2}{3} G_f \cdot d_f^3 \cdot N_T^2 \cdot \eta \cdot v_f \quad (21)$$

La expresión anterior, reporta la variación en la concentración de sulfato de aluminio en la etapa de coagulación – floculación. Esta ecuación es de tipo no lineal, que puede ser resuelta por el método de Runge-Kutta de cuarto orden.

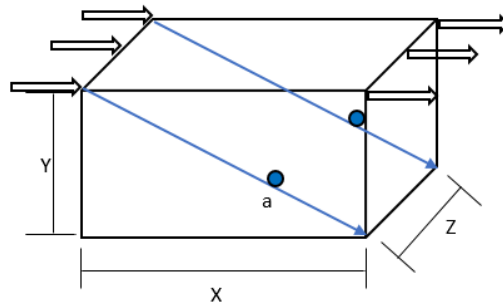
2.3 Modelo matemático para etapa de sedimentación

El modelo de transporte de sedimentos también se llama ecuación de conservación de masa sólida suspendida. Además de los movimientos de convección y difusión, el sedimento suspendido en el tanque de sedimentación tiene la velocidad de ajuste contra el fluido. La figura 3 ilustra la disposición espacial de un tanque de sedimentación simple, en donde no hay variación en la coordenada z ; la ecuación de conservación de masa aplicada al sistema de la figura 3 puede ser expresada de la siguiente manera¹⁹:

¹⁹ Zhang, W., Zou Z., Suis, J. *Numerical simulation of a horizontal sedimentation tank considering sludge recirculation*. Science Direct. Journal of Environmental Science 2012, 22(10) 1534-1538.

$$\frac{dc}{dt} + u \frac{dc}{dx} + v \frac{dc}{dy} = \Gamma \frac{d^2c}{dx^2} + \Gamma \frac{d^2c}{dy^2} + v_s \frac{dc}{dy} \quad (22)$$

Figura 3. Distribución espacial de un tanque de sedimentación simple



Fuente: elaboración propia

Donde, C (g/m^3) denota la concentración del sedimento suspendido, t (min) denota el tiempo, u (m/min) y v (m/min) denotan las componentes de velocidad en la dirección horizontal y vertical del flujo de agua, respectivamente; “ x ” y “ y ” indican la dirección horizontal y vertical, respectivamente; Γ (m/min) es el coeficiente de difusión, y v_s es la velocidad de ajuste del sedimento suspendido.

A partir de esta ecuación, es posible predecir y analizar la distribución de la concentración de sedimentos en el tanque tanto en el tiempo como en el espacio. La solución de la ecuación 22 puede ser obtenida aplicando el método de diferencias finitas, el cual, por las características del sistema será implementado en una hoja de cálculo de Excel.

2.3.1 Prueba de jarras: La prueba de jarras es un procedimiento común de laboratorio para determinar las condiciones adecuadas de funcionamiento para el agua o el tratamiento de aguas residuales, consiste en un arreglo jarras de volumen de agua constante a los que se les agregan diferentes dosis de coagulantes que requieren de una mezcla rápida seguida de una mezcla lenta utilizando un conjunto de paletas que componen un agitador múltiple de laboratorio de 6 plazas²⁰.

Este método permite realizar ajustes en el pH, las variaciones en la dosis de coagulante o polímero, alternando velocidades de mezclado, o la prueba de coagulante o diferentes tipos de polímeros, a pequeña escala con el fin de predecir el funcionamiento de una operación a gran escala de tratamiento. Una prueba de jarras simula los procesos de coagulación y floculación que fomentan la eliminación de los coloides en suspensión y materia orgánica que puede conducir a problemas de turbidez, olor y sabor.

El equipo de prueba de jarras (ver Figura 4) contiene seis paletas para agitar el contenido de seis envases de 2 litros. Un envase actúa como un sistema de control, mientras que la condición de funcionamiento puede variar entre los restantes cinco contenedores. Un medidor de RPM en la parte superior central del dispositivo permite el control uniforme de la velocidad de mezclado en todos los contenedores. (Ver Figura 5).

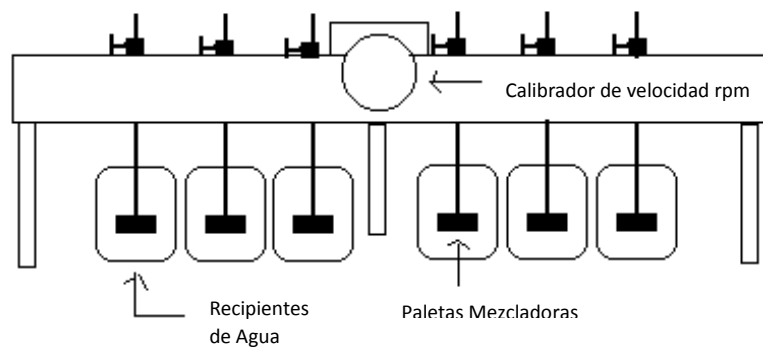
²⁰ ISA. *Ingeniería y servicios ambientales*. [En línea]. Disponible en: <http://www.isa.ec/index.php/va-viene/entry/prueba-de-jarras>

Figura 4. Equipo de prueba de jarras



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Esquema del dispositivo de prueba de jarras



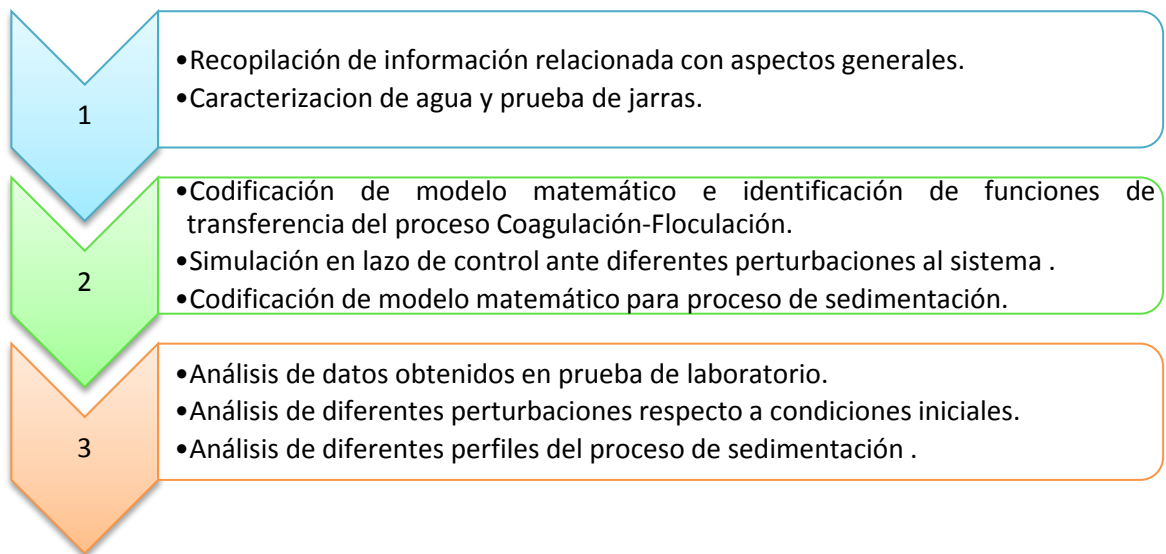
Fuente: Tratamiento de aguas residuales [13]

Las pruebas en jarras se utilizan para determinar las dosis más efectivas de coagulante para un agua específica durante el control de la coagulación y floculación en una planta de tratamiento, especialmente cuando la calidad del agua fluctúa rápidamente. Se puede utilizar también con objeto para determinar las velocidades de sedimentación para el diseño de tanques de sedimentación y conocer el potencial del agua cruda para la filtración directa.

3. METODOLOGIA

La metodología desarrollada para la realización de los ensayos en el laboratorio, se representó mediante el siguiente esquema, donde se muestran los tres elementos que lo componen:

- Una fase investigativa, en la cual se recopiló la información necesaria para comprender conceptos básicos, así mismo como el protocolo establecido para las pruebas a desarrollar
- Una fase de desarrollo del modelo matemático e identificación de las funciones de transferencia, así mismo, la simulación del proceso y la codificación del código
- Una fase de análisis de los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio, así como de los diferentes resultados de las simulaciones respectivas.



3.1. Procedimiento para prueba en jarras

La primera acción es la aplicación de la prueba de jarras, siguiendo el protocolo establecido a nivel laboratorio (anexo A), como se muestra a continuación se realizó la prueba utilizando un equipo de test de jarras de 6 puestos, relacionando dos ciclos de velocidad (ver figura 5).

Se efectuó la prueba utilizando un equipo de test de jarras de 6 puestos, relacionando dos ciclos de velocidad, con las siguientes especificaciones (ver tabla 4 y 5). El protocolo seguido para la aplicación de la prueba de jarras, se detalla en la figura 4.

Tabla 4. Especificaciones test de jarras.

RANGO SELECCIONABLE	VELOCIDAD
Rango bajo	0 - 25 rpm
Rango alto	0 – 335 rpm

*capacidad: 6 jarras de 2 litros c/u

Fuente: elaboración propia

Tabla 5. Requerimientos equipo test de jarras.

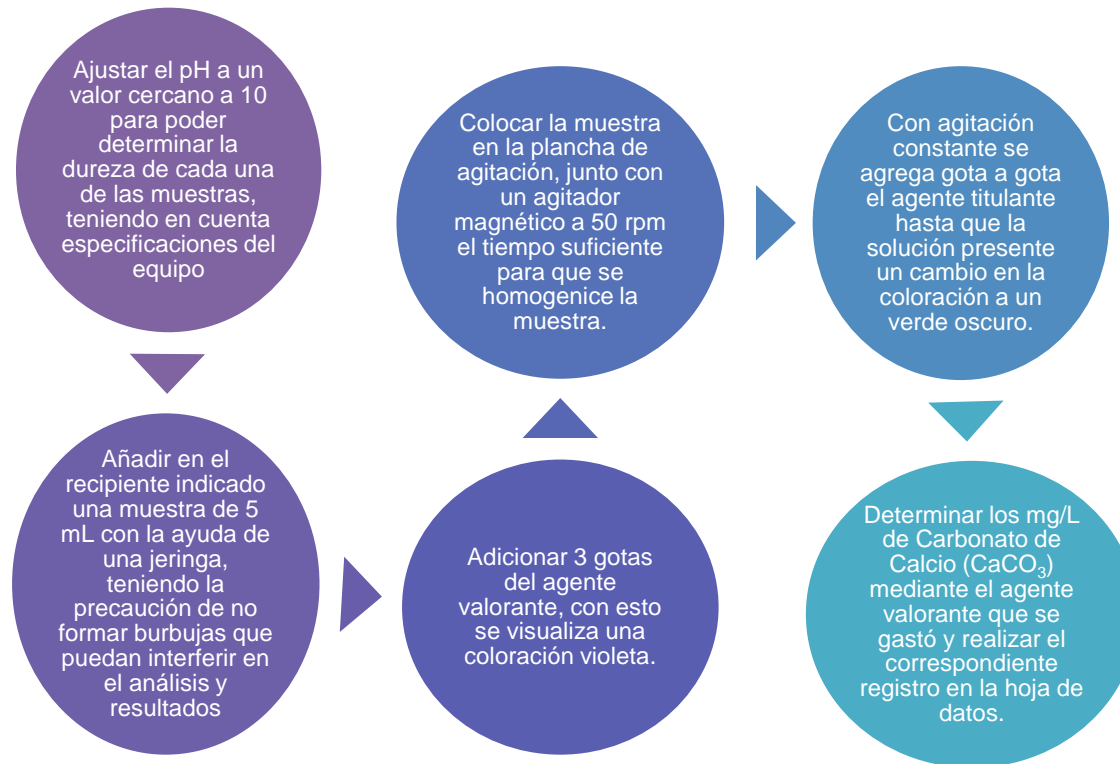
Potencial eléctrico	120 Volt
Corriente eléctrica	0,65 Amp
Frecuencia	50 – 60 Hz

Fuente: elaboración propia

3.2 Determinación Experimental para caracterizar el agua

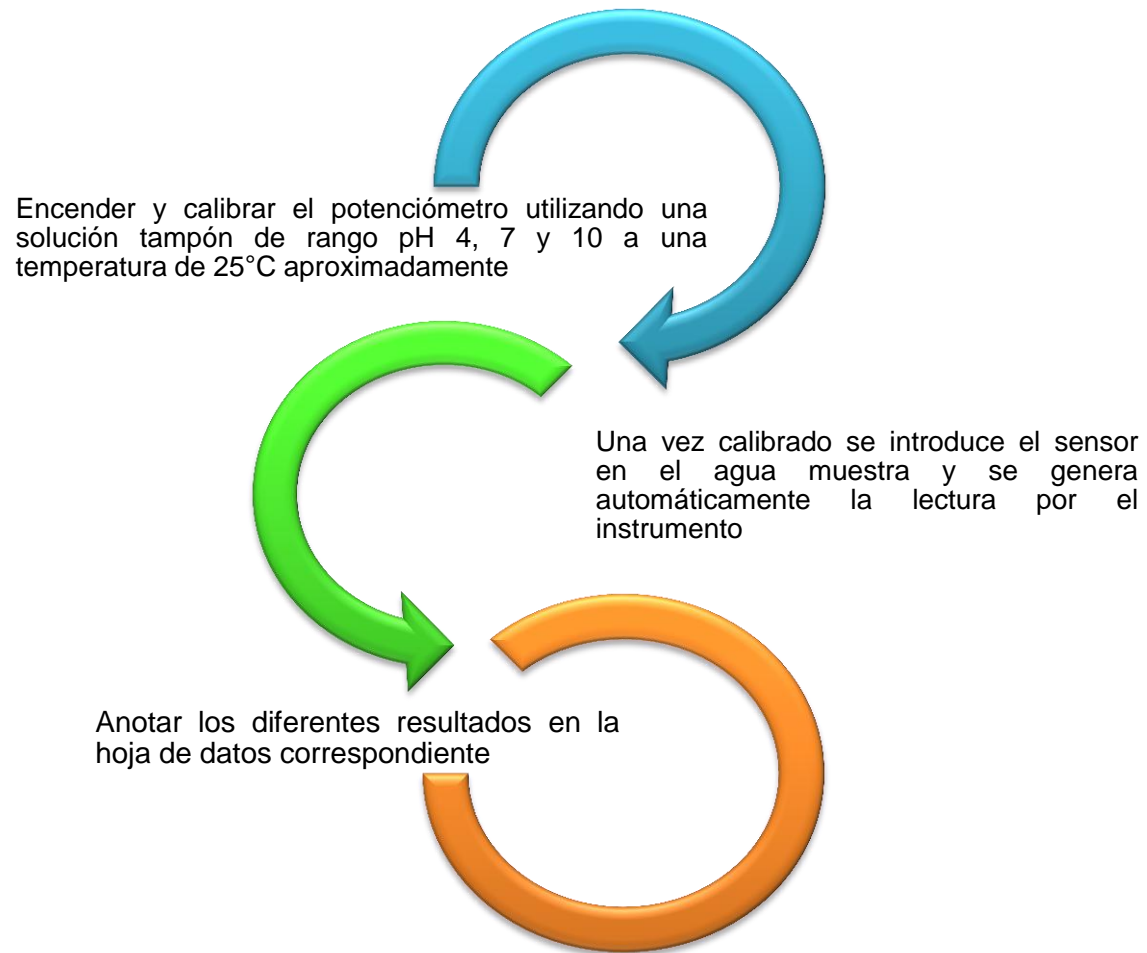
Se realizan pruebas establecidas para la determinación de la dureza (figura 6) y el pH (figura 7), teniendo en cuenta las consideraciones y preparación de la muestra para obtener datos confiables. Se utiliza un medidor de pH portátil STARTER 300 (anexo B) y un equipo de determinación de dureza (anexo C).

Figura 6. Protocolo determinación de dureza



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Protocolo determinación de pH



Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Prueba de jarras

Los resultados donde se determinan los valores adecuados de las pruebas de jarras son mostrados en las Tablas 6-9; los ensayos totales realizados se muestran en el Anexo J. En estas tablas se detallan los valores alcanzados en diferentes tiempos de la prueba, diferentes cantidades de sulfato de aluminio y diferentes velocidades de agitación.

Tabla 6. Condiciones iniciales prueba de jarras.

		TIEMPO INICIAL = 0 min	T= 25°C	V= 0rpm	
	MUESTRA	pH	Dureza	Turbidez (NTU)	KOH
			(mg/l CaCO ₃)		ADICIONADO*
					(ml)
PRUEBA N° 0	1	7,12	48,00	14,20	0,00
	2	7,03	50,00	19,20	0,00
	3	7,03	50,00	14,60	0,00
	4	7,04	53,00	19,00	0,00
	5	7,05	52,00	13,30	0,00
	6	7,05	50,00	13,00	0,00

* La adición de KOH se efectuó después de la medición del pH con el objetivo de neutralizar las muestras tomadas de cada jarra y obtener la dureza y turbiedad.

Fuente: elaboración propia.

La tabla 6 muestra los valores de pH, dureza y turbidez medidos para las muestras iniciales; con estos valores se calculan los promedios para cada propiedad los cuales se reportan la tabla 7. Según los valores promedio el agua del lago puede clasificarse como agua dura según la tabla 2 y con una turbidez alta que representa una calidad de agua no tan buena debido a la presencia de sedimentos procedentes de la erosión.

Tabla 7. Valor promedio de los parámetros iniciales para la prueba N°0.

TIEMPO = 0 min		T= 25°C	V= 0rpm	
PRUEBA N° 1	MUESTRA	pH	Dureza (mg/l CaCO3)	Turbidez (NTU)
	1	7,05	50,50	15,15

Fuente: elaboración propia

Después de un (1) minuto, de agregar el coagulante a cada jarra, los valores de las propiedades cambiaron respecto a los valores promedios (tabla 7); particularmente el pH disminuyó drásticamente, lo cual se debe a la liberación de iones hidrogeniones (H^+) causados por la disolución del coagulante, además, la clarificación del agua es pobre y puede solubilizarse el aluminio ocasionando problemas de altas variaciones en los valores de turbiedad, pH, dureza. Por lo anterior, una cantidad de KOH fue adicionado a cada muestra tomada de cada jarra, con el fin de neutralizar el pH y lograr la medición de la dureza y turbiedad.

Tabla 8. Valores medidos para los parámetros al minuto de prueba a 80rpm de agitación.

TIEMPO = 1 min		T= 25°C	V= 80rpm		
PRUEBA N° 1	MUESTRA	pH	Dureza	Turbidez (NTU)	KOH ADICIONADO* (ml)
			(mg/l CaCO3)		
	1	3,97	30,00	9,90	0,30
	2	3,82	39,00	10,50	0,60
	3	3,81	39,00	9,85	0,90
	4	3,74	41,00	14,50	1,20
	5	3,73	38,00	12,50	1,40
	6	3,69	39,00	12,40	1,40

* La adición de KOH se efectuó después de la medición del pH con el objetivo de neutralizar las muestras tomadas de cada jarra y obtener la dureza y turbiedad.

Fuente: elaboración propia.

Después de dieciséis (16) minutos de agitación continua a una velocidad de 40rpm, los valores de las propiedades presentan un cambio mínimo respecto a los valores de la tabla 8; lo cual se debe a la formación de flocs en cada jarra.

Tabla 9. Valores medidos para los parámetros en el minuto 16 de prueba a 40rpm de agitación.

		TIEMPO= 16 min	T= 25°C	V= 40rpm	
PRUEBA N° 6	MUESTRA	pH	Dureza (mg/l CaCO3)	Turbidez (NTU)	KOH ADICIONADO* (ml)
	1	4,06	42,00	4,72	0,40
	2	3,99	40,00	6,43	0,40
	3	3,92	44,00	11,50	0,40
	4	3,84	38,00	11,00	0,50
	5	3,83	44,00	9,18	0,60
	6	3,73	38,00	11,20	0,90

** La adición de KOH se efectuó después de la medición del pH con el objetivo de neutralizar las muestras tomadas de cada jarra y obtener la dureza y turbiedad.*

Fuente: elaboración propia.

La tabla 10, presenta los resultados de la última prueba sin agitación pasados veinte (20) minutos de la toma de muestras de cada jarra realizada al minuto dieciséis (16); se observa una constante en los valores de las propiedades debido a que se evidenció una precipitación de sólidos (flocs) y partículas mínimas de sulfato de aluminio que no se mezcló en su totalidad. El valor de pH obtenido para el valor óptimo de concentración de sulfato de aluminio es menor al requerido por la norma, se utiliza una solución de KOH para estabilizar el pH hasta el valor de equilibrio (pH:7) para cumplir con el requerimiento de la norma.

Tabla 10. Valores medidos para los parámetros pasados 20 min de reposo de la muestra.

		TIEMPO= 36 min	T= 25°C	V= 0rpm	
PRUEBA N° 7	MUESTRA	pH	Dureza (mg/l CaCO3)	Turbidez (NTU)	KOH ADICIONADO* (ml)
	1	4,07	38,00	3,04	0,30
	2	3,98	45,00	3,70	0,40
	3	3,90	40,00	5,41	0,40
	4	3,84	40,00	6,60	0,50
	5	3,82	42,00	6,61	0,60
	6	3,73	41,00	8,44	0,80

* La adición de KOH se efectuó después de la medición del pH con el objetivo de neutralizar las muestras tomadas de cada jarra y obtener la dureza y turbiedad.

Fuente: elaboración propia.

Se realiza una segunda toma de muestras y una prueba de jarras, para observar cómo afecta la velocidad de agitación al proceso de coagulación-floculación con el fin de obtener la velocidad de agitación más adecuada, lograr el mayor rendimiento y la velocidad de precipitación de partículas suspendidas.

La tabla 11 se muestra los valores de pH, dureza y turbidez medidos para las muestras iniciales; se evidencia una disminución de turbidez en comparación con los valores de la tabla 6, debido a que el agua tomada del lago se dejó reposar y se analizaron las muestras después de un tiempo. Estas muestras, presentan un pH en el rango óptimo, pero una turbidez elevada, lo que indica que se encuentran partículas suspendidas (arena) haciendo que el agua de la muestra se vuelva más caliente, y reduzca la concentración de oxígeno en el agua.

Tabla 11. Valores iniciales de los parámetros medidos para la muestra de agua del lago UIS utilizados para la prueba N°2.

		TIEMPO INICIAL = 0 min	T= 25°C	V= 0rpm	
PRUEBA N° 0	MUESTRA	pH	Dureza (mg/l CaCO ₃)	Turbidez (NTU)	KOH ADICIONADO* (ml)
	1	7,02	51	6,57	0
	2	7,02	55	10,5	0
	3	6,84	53	17,1	0
	4	7,15	52,5	12,4	0
	5	7,1	52	10,8	0
	6	7,03	55	14,6	0

* La adición de KOH se efectuó después de la medición del pH con el objetivo de neutralizar las muestras tomadas de cada jarra y obtener la dureza y turbiedad.

Fuente: elaboración propia.

Pasado un (1) minuto del inicio de la prueba inicial y aplicar el coagulante en cada jarra, los valores de las propiedades cambiaron respecto a los valores de la tabla 11. Específicamente el pH disminuyó drásticamente, lo cual se debe a que la clarificación del agua es pobre y puede causar la solubilización del aluminio originando problemas de variaciones en los valores de turbiedad y dureza. Por lo anterior, una cantidad de KOH fue adicionado a cada muestra tomada de cada jarra, con el fin de neutralizar el pH y lograr la medición de la dureza y turbiedad.

Tabla 12. Valores medidos para los parámetros en el min 1 de prueba a 80rpm de agitación.

		TIEMPO = 1 min	T= 25°C	V= 80rpm	
PRUEBA N° 1	MUESTRA	pH	Dureza (mg/l CaCO ₃)	Turbidez (NTU)	KOH ADICIONADO* (ml)
	1	4	43	5,08	0,25
	2	3,96	42	6,01	0,35
	3	3,83	43	7,65	0,5
	4	3,81	45	10,8	0,5

5	3,77	44	13,3	0,55
6	3,79	43	13,3	0,8

* La adición de KOH se efectuó después de la medición del pH con el objetivo de neutralizar las muestras tomadas de cada jarra y obtener la dureza y turbiedad.

Fuente: elaboración propia.

La tabla 13, se observa que los valores de las propiedades del agua analizadas, varían en una proporción mínima; al adicionar el sulfato de aluminio en una mayor cantidad, permitió el crecimiento de partículas coaguladas, de tal manera que los flocs formados son suficientemente grandes y pesados para llevarlos a una etapa de sedimentación.

Tabla 13. Valores medidos para los parámetros en el minuto 16 de prueba a 60rpm de agitación.

TIEMPO INICIAL = 16 min		T= 25°C	V= 60rpm		
MUESTRA	pH	Dureza	Turbidez (NTU)	KOH	
		(mg/l CaCO ₃)		ADICIONADO*	(ml)
PRUEBA N° 6	1	4,19	43	6,48	0,3
	2	4,07	39	9,47	0,3
	3	3,96	40	7,89	0,6
	4	3,9	43	10,3	0,6
	5	3,83	40	9,47	1
	6	3,79	38	8,11	0,7

* La adición de KOH se efectuó después de la medición del pH con el objetivo de neutralizar las muestras tomadas de cada jarra y obtener la dureza y turbiedad.

Fuente: elaboración propia.

La tabla 14, presenta los resultados de la última prueba sin agitación pasados veinte (20) minutos de la toma del último muestreo de cada jarra (tabla 16); se observó una precipitación de partículas sólidas. El valor de turbidez obtenido en la muestra 1, aunque está un poco alto, es un buen indicador para establecer la dosis adecuada; sin embargo, se utiliza una solución de KOH para estabilizar el

pH hasta el valor de equilibrio (pH:7) para cumplir con el requerimiento de la norma.

Tabla 14. Valores medidos para los parámetros pasados 20 min de reposo de la muestra.

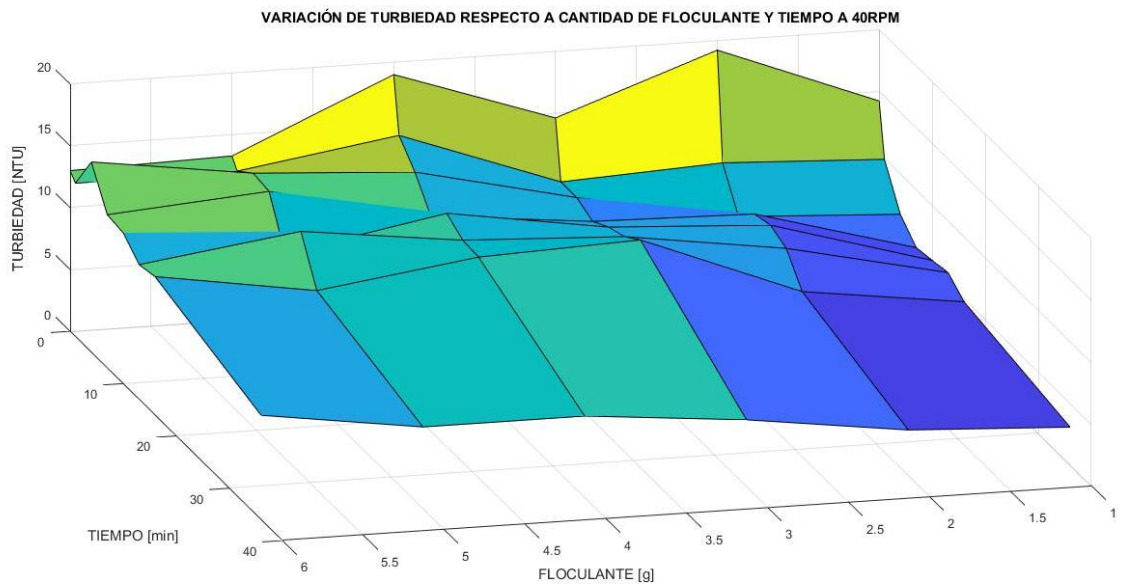
		TIEMPO INICIAL = 36 min	T= 25°C	V= 0rpm	
PRUEBA N° 7	MUESTRA	pH	Dureza (mg/l CaCO3)	Turbidez (NTU)	KOH ADICIONADO* (ml)
		1	4,19	40	4,28
	2	4,05	44	5,22	0,3
	3	3,94	38	7,01	0,6
	4	3,89	40	8,1	0,5
	5	3,83	38	6,89	0,7
	6	3,79	40	10,7	0,9

** La adición de KOH se efectuó después de la medición del pH con el objetivo de neutralizar las muestras tomadas de cada jarra y obtener la dureza y turbiedad.*

Fuente: elaboración propia.

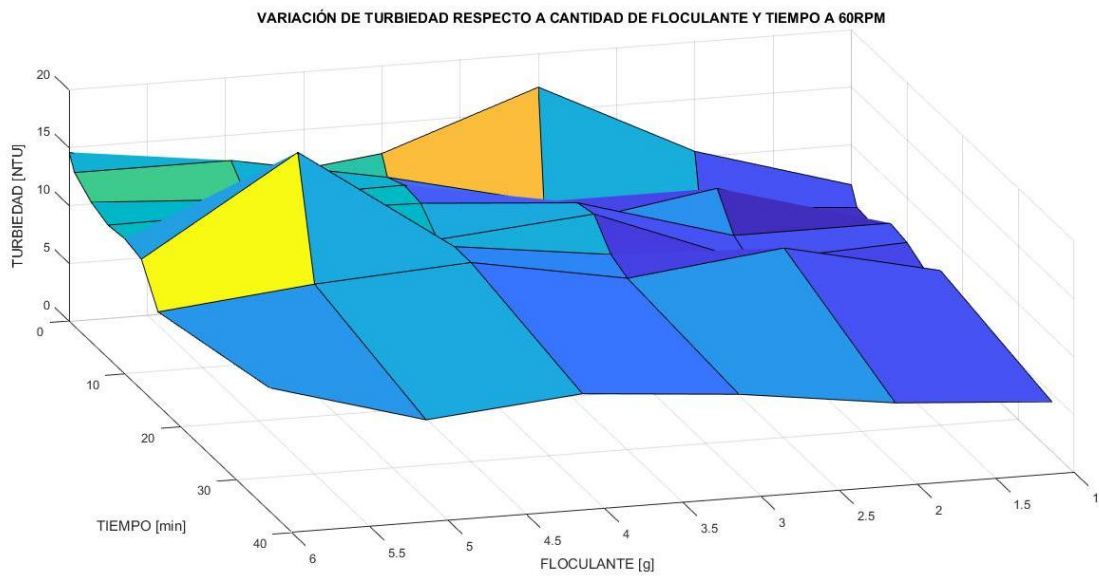
En las figuras 8, 9, 10, 11, 12, y 13 se presentan los resultados para la variación de las propiedades analizadas (dureza, pH y turbidez) con respecto al tiempo de agitación y la cantidad de coagulante. En las figuras se puede observar una variación decreciente en las propiedades mencionadas, desde el momento que se estabiliza la velocidad de agitación en ambas pruebas (40rpm y 60rpm) respecto a la velocidad de agitación de 80rpm que se utilizó para tomar los valores promedio (tabla 7), de tal manera que al transcurrir el tiempo los valores tienden a ser constantes y se determina que están en el rango adecuado cumpliendo la norma.

Figura 8. Variación de Turbiedad respecto a cantidad de floculante y tiempo a 40rpm



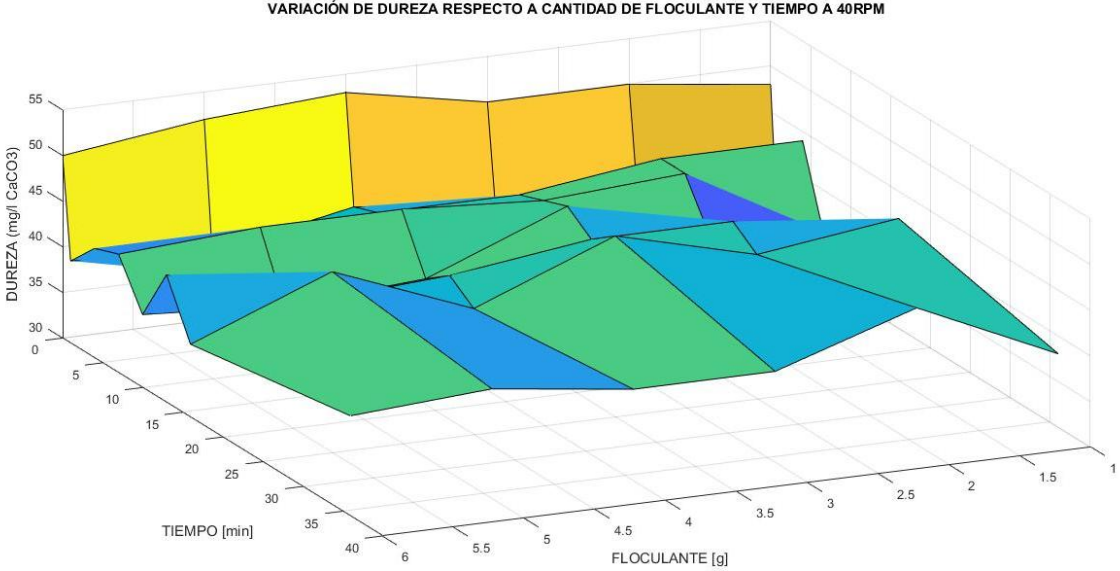
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Variación de Turbiedad respecto a cantidad de floculante y tiempo a 60rpm



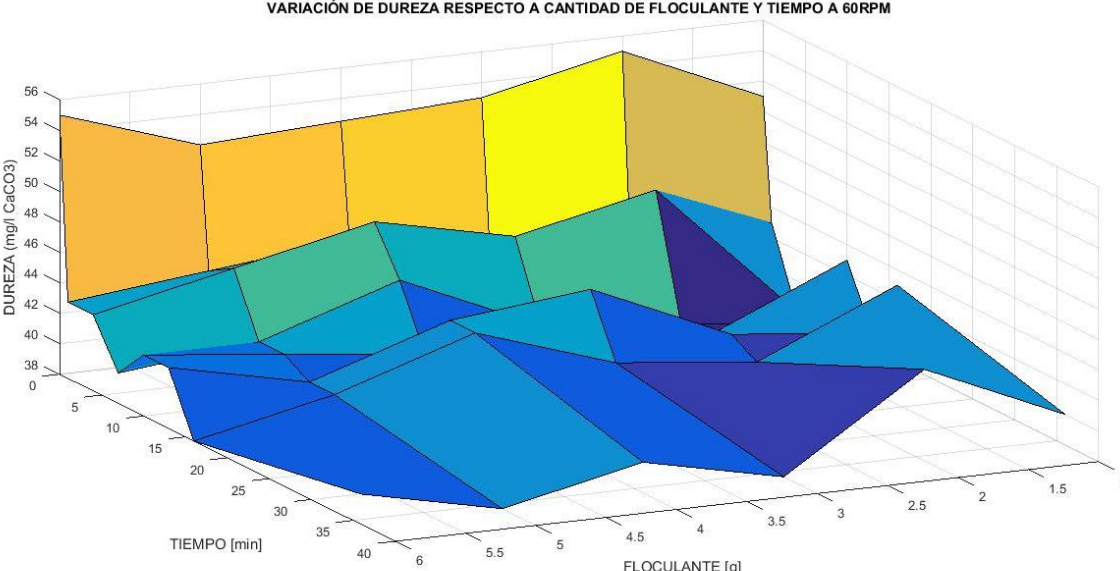
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Variación de Dureza respecto a cantidad de floculante y tiempo a 40rpm



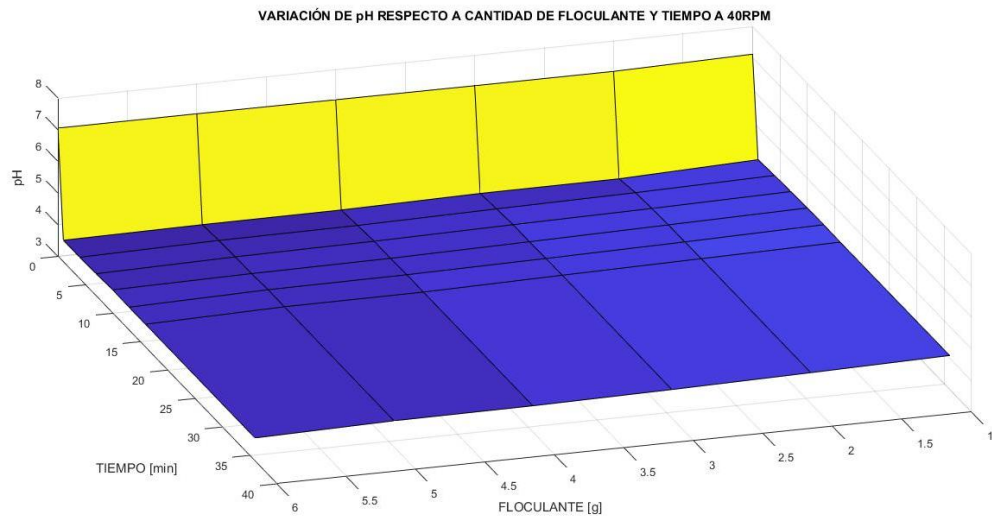
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Variación de Dureza respecto a cantidad de floculante y tiempo a 60rpm



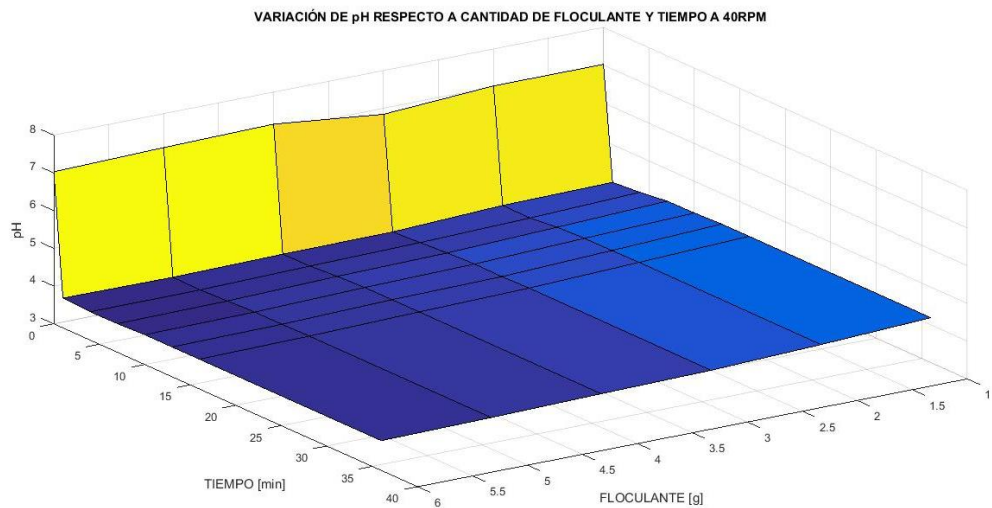
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Variación de pH respecto a cantidad de floculante y tiempo a 40rpm



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Variación de pH respecto a cantidad de floculante y tiempo a 60rpm



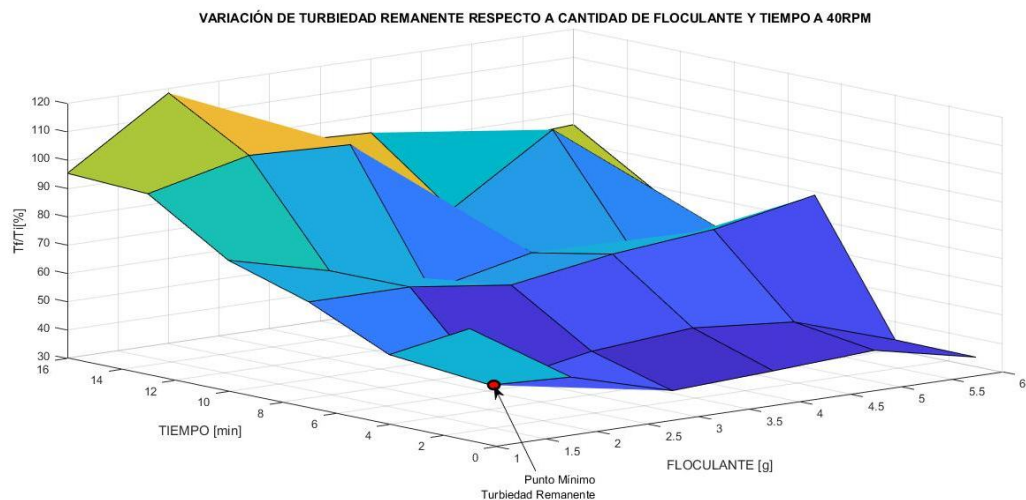
Fuente: elaboración propia.

La Figura 14 presenta el perfil de porcentaje de turbiedad remanente vs el tiempo para las diferentes jarras manteniendo la agitación a 40rpm. Según esta figura, la

turbiedad remanente para las jarras de 1, 2, 3 y 4 se mantiene aproximadamente constante con el tiempo; a estas jarras se adicionaron 1, 2, 3, y 4 g de sulfato de aluminio, respectivamente. Por otro lado, se observa, que para concentraciones de 5 y 6 g (jarras 5 y 6), la turbiedad remanente a los 13 minutos fue considerablemente inferior que la inicial; sin embargo, el porcentaje de turbiedad remanente final resulta ser superior al obtenido con las jarras 1, 2, 3, 4. La dosis optima bajo estas condiciones, será con 1 o 2 g de sulfato de aluminio (jarra 1 y 2) teniendo en cuenta el bajo porcentaje de turbiedad remanente, además, se observa que no existe mayor diferencia entre las dos pruebas.

Por otra parte, para realizar un análisis de la dosis adecuada de coagulante, se toma en cuenta la turbiedad remanente en función del tiempo; la turbiedad remanente se define como la turbiedad final (T_f) dividida entre la turbiedad inicial (T_i) por 100%. Inicialmente en las figuras 8 y 9 se consideran las dos velocidades de agitación, indicando en cada una de ellas la variación de la turbiedad remanente para cada una de las concentraciones de coagulante en función del tiempo.

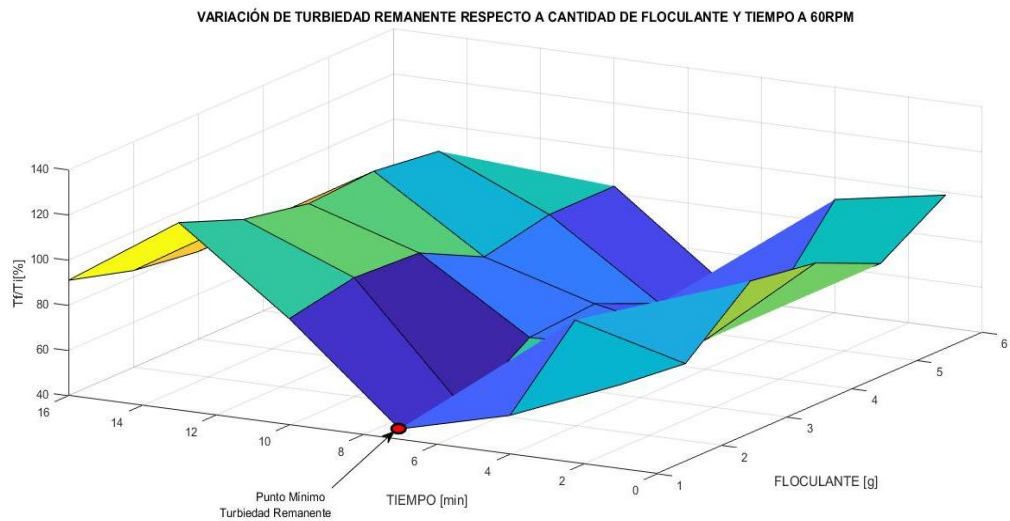
Figura 14. Porcentaje de turbiedad remanente vs. Cantidad de floculante y tiempo a 40 RPM



Fuente: elaboración propia.

Manteniendo constante la velocidad de agitación a 60rpm, como se observa en la Figura 15, la turbiedad remanente no cambia considerablemente con el tiempo de floculación en las muestras de las jarras 6, 5, 4. Se observa la mayor remoción en el experimento con la concentración de 3g (jarra 3), además, para este tiempo se presenta la menor dependencia de la turbiedad remanente respecto al tiempo de agitación. Así mismo, se puede observar que para concentración de 2g (jarra 2) presenta un aumento de la turbiedad remanente.

Figura 15. Porcentaje de turbiedad remanente vs. Cantidad de floculante y tiempo a 60 RPM



Fuente: elaboración propia.

En general se puede determinar un porcentaje de turbiedad de remoción menor en los experimentos con bajas concentraciones de coagulante, así mismo con baja velocidad de agitación, lo que corrobora los resultados analizados anteriormente del experimento en función de la concentración. Así mismo se puede observar que el tiempo óptimo de floculación está alrededor de los 4,06 minutos.

El análisis de cada una de las concentraciones para comparar los resultados con las velocidades de agitación utilizadas en el desarrollo de la prueba de jarras se

detallan el anexo K. A continuación, se observan las tablas 15 y 16 con los datos para la construcción de las gráficas anteriores.

Tabla 15. Prueba a 40 rpm, bajo diferentes concentraciones de sulfato de aluminio.

PRUEBAS A 40 RPM						
Tiempo	%Tf/Ti Jarra 1	%Tf/Ti Jarra 2	%Tf/Ti Jarra 3	%Tf/Ti Jarra 4	%Tf/Ti Jarra 5	%Tf/Ti Jarra 6
1	69,72	54,69	67,47	76,32	93,98	95,38
4	47,32	38,65	67,47	67,37	102,26	118,46
7	37,25	45,31	62,88	55,26	100,75	95,38
10	38,94	48,28	68,49	63,16	72,56	93,85
13	40,92	45,10	71,92	58,42	95,49	83,85
16	33,24	33,49	78,77	57,89	69,02	86,15

Fuente: elaboración propia

Tabla 16. Prueba a 60 rpm, bajo diferentes concentraciones de sulfato de aluminio.

PRUEBA A 60 RPM						
Tiempo	%Tf/Ti Jarra 1	%Tf/Ti Jarra 2	%Tf/Ti Jarra 3	%Tf/Ti Jarra 4	%Tf/Ti Jarra 5	%Tf/Ti Jarra 6
1	77,32	57,24	44,74	87,10	123,15	91,10
4	74,12	86,95	40,88	92,74	112,04	82,88
7	98,17	61,24	60,23	91,13	106,48	78,77
10	93,61	52,95	62,57	76,85	108,33	80,14
13	80,82	55,24	50,18	83,06	104,63	77,40
16	98,63	90,19	46,14	83,06	75,09	55,55

Fuente: elaboración propia

Se puede observar que la concentración óptima de coagulante coincide con el valor hallado en la prueba N°1 (tabla 8), siendo este valor de turbidez a la concentración indicada de coagulante, es permitido según la norma técnica colombiana NTC-ISO 5667-10, sin embargo, a 60rpm es más alto comparado con el valor alcanzado en la prueba N°1. Por tanto, se considerarán solo los valores medidos a una velocidad de agitación de 40rpm alcanzados en la prueba N°1, lo

cual demuestra que el sulfato de aluminio necesita bajas velocidades de agitación que aseguran una coagulación-floculación inhibiendo la ruptura de los flóculos permitiendo una mejor sedimentación y una menor turbidez en el agua tratada.

Los resultados obtenidos en la prueba de jarras, se realizaron a escala laboratorio, sin embargo, para realizar el proceso de simulación en el software Matlab con la herramienta de simulación Simulink se escalaron a nivel industrial, utilizando como referencia datos encontrados en literatura y agrupándolos a la necesidad de clarificación del agua del lago de la UIS.

4.2. Etapa coagulación – floculación

La dosificación del sulfato de aluminio para lograr un pH adecuado se realiza por la parte superior del tanque de coagulación - floculación (TK1), como se muestra en la figura 17. Como parámetro básico de diseño para calcular el volumen del tanque se tomó el tiempo de residencia aproximado necesario para la coagulación – floculación, deducido a partir de los ensayos de laboratorio en la prueba de jarras, el cual es aproximadamente de 4,06 minutos. El volumen del tanque de coagulación se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V = t_R * Q \quad (23)$$

Siendo:

- t_R = tiempo de residencia en el tanque TK1 (h).
- Q = caudal de agua a tratar (m^3/h).

Realizando los cálculos:

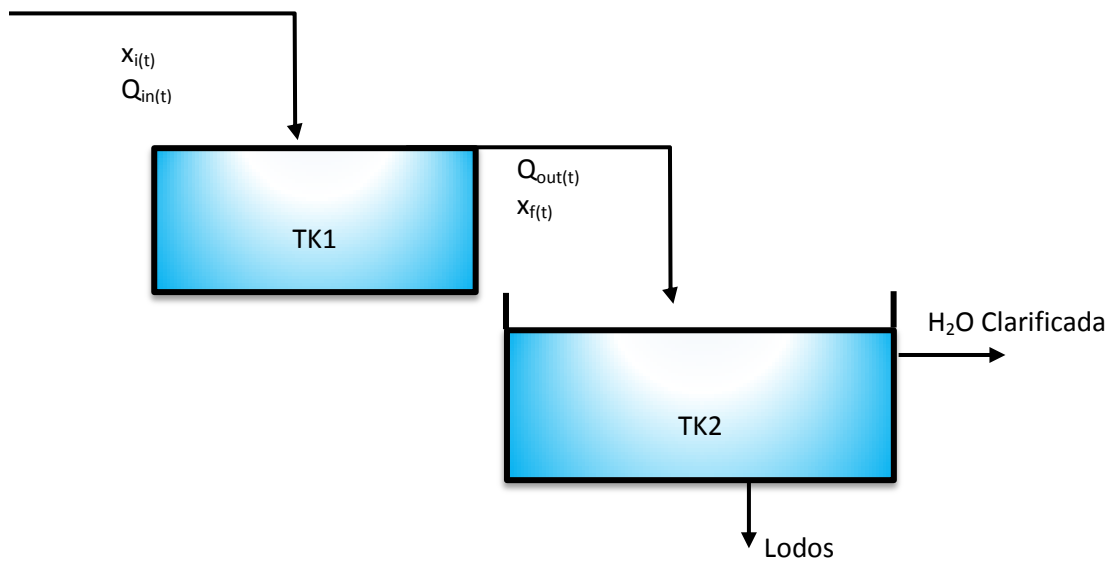
$$V = \frac{4.06min * 1h}{60min} * \frac{1666.8m^3}{1h} = 113m^3$$

El valor obtenido se sobredimensiona para evitar problemas derivados de la formación de vórtices en el líquido, para lo cual se considera que el agua debe

ocupar un 60% del volumen total. Por simplicidad, el tanque de coagulación será cilíndrico y se considerará que el diámetro es igual a su altura. Las dimensiones del tanque serán: Diámetro: 3 m, Altura: 3 m.

Una vez se ha realizado la mezcla del agua residual con el sulfato de aluminio en el tanque de coagulación – floculación, ésta se alimenta al tanque de sedimentación, como se puede observar en la figura 16:

Figura 16. Esquema del proceso coagulación (mezcla rápida) – floculación



Fuente: elaboración propia.

4.2.1 Linealización ecuación diferencial tanque de Coagulación-Floculación

$$\frac{dx_f}{dt} + x_{f(t)} \frac{q_{outf}}{v_f} + \frac{gd^2 A_t}{18\theta v_f} \left(\frac{\rho_s x_{f(t)} - x_{f(t)}^2 M - x_{f(t)} \rho_a}{x_{f(t)} M + \rho_a} \right) = x_{i(t)} \frac{q_{out}}{v_f} - \frac{2}{3} G_f \cdot d_f^3 \cdot N_T^2 \cdot \eta \cdot v_f$$

$q_{in(t)} = q_{out(t)}$ debido a que se considera que el vertimiento del TK1 es por rebose, hay mezcla perfecta y no hay cambios en la densidad.

$$\frac{dx_f(t)}{dt} = (x_{i(t)} - x_f(t)) \frac{q_{out(t)}}{v_f} - \frac{2}{3} G_f \cdot d_f^3 \cdot N_T^2 \cdot \eta - \frac{gd^2 A_t}{18\theta v_f} \left(\frac{x_f(t)(\rho_s - \rho_a) - x_f^2(t)M}{x_f(t)M - \rho_a} \right) \quad (\text{Ec. 1})$$

Se obtiene una ecuación no lineal, por lo cual, se aplicó método de series de Taylor para linealizar esta ecuación de primer orden y aplicar transformadas de L'place para obtener una función de transferencia que represente la dinámica del sistema en el tanque TK1, según lo descrito en el Anexo I.

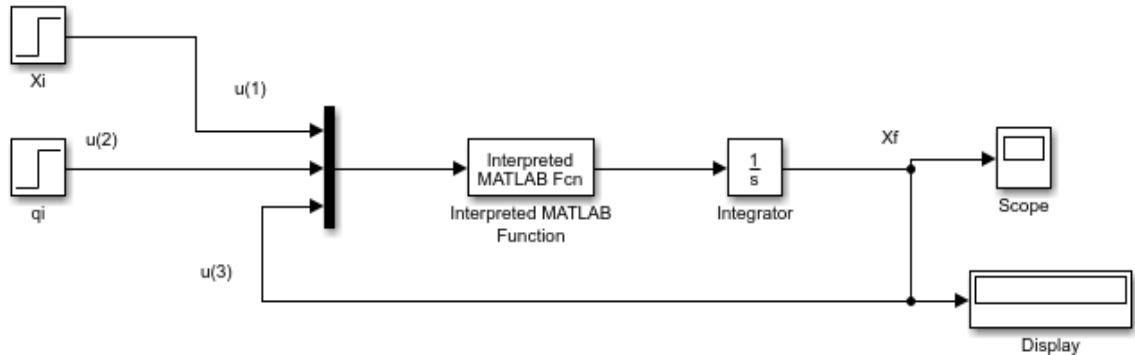
La solución de la ecuación 21 en estado estacionario conduce a que la concentración de coagulante disminuya a 13,84 g/m³, el cual es un valor de concentración de coagulante aceptado para agua de reúso²¹. Sin embargo, en el tanque de coagulación-floculación no se tiene la dimensión adecuada para alcanzar el estado estacionario y adicionalmente la sedimentación en este tanque detendría el tratamiento de agua para el retiro de los lodos. Por lo anterior, este tanque se considerará en agitación perfecta con lo cual el término de precipitación pericinética es omitido en la ecuación 21.

4.3 Simulación etapa de floculación

En la figura 17, se muestra la configuración computacional utilizada con la herramienta Simulink, para representar el proceso de floculación por medio de diagrama de bloques. "Interpreted MATLAB Function" es una función de Matlab personalizable, ya que tiene más control sobre las propiedades (tamaño / tipo de datos / alcance de datos) de todas las variables que se utilizaron, además se pueden crear parámetros ajustables en los bloques.

²¹ Wei Zhang, Zhihong Zou, Jun Sui. Numerical simulation of a horizontal sedimentation tank considering sludge recirculation. Journal of Environmental Sciences 2010, 22(10) 1534–1538.

Figura 17. Bloques de Simulink para simulación etapa de floculación

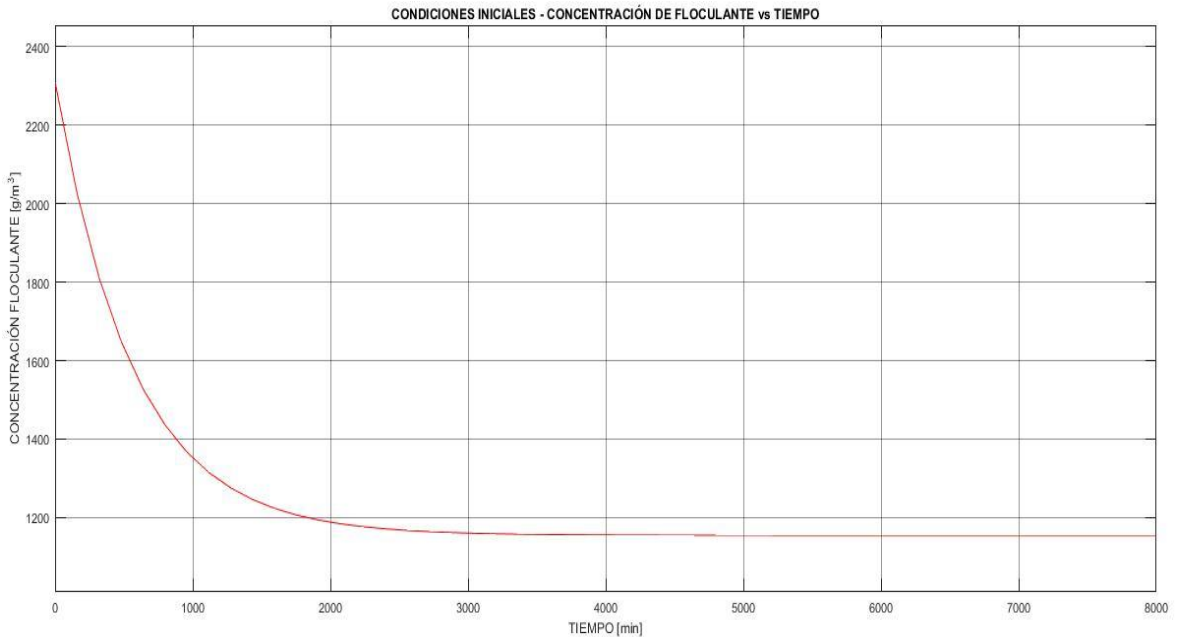


Fuente: elaboración propia.

El bloque “Interpreted MATLAB Function” fue más fácil de configurar ya que se tuvo una función existente (ecuación EC.1), y permitió usar el rango completo de MATLAB porque se usó el modelo estrictamente para simulación.

El bloque “Scope” presenta la entrada (q_i y X_i) con respecto al tiempo de simulación. El “Scope” permitió ajustar la cantidad de tiempo y el rango de valores de entrada que se muestran. Además, la señal que se tiene en cuenta para esta simulación es señal continua, ya que nos permite que el “Scope” produzca un diagrama punto a punto sobre la dinámica del proceso entre el tiempo de simulación vs concentración de coagulante a la salida del tanque TK1 (ver figura 18).

Figura 18. Respuesta de simulación etapa de floculación a condiciones iniciales



Fuente: elaboración propia.

4.3.1 Análisis de diferentes perturbaciones en condiciones iniciales: Se realizaron diferentes perturbaciones a la variable de entrada x_m en forma creciente y decreciente para analizar el comportamiento y determinar el valor de estabilización ante dichas perturbaciones, lo cual se puede observar la tabla 17. Al incrementar el porcentaje de perturbación, el nuevo valor en estado estacionario que toman estas variables se encuentra dentro de un rango de valores razonable teniendo en cuenta los límites deseados para cada caso y de acuerdo a la normatividad indicada.

En las figuras 19, se observa una disminución a la salida del tanque TK1 de la concentración de coagulante, al aplicar una perturbación del 20%, generando desestabilizar los coloides y produciendo una aglomeración de las partículas (flocs) de tal forma que se presente una precipitación mínima del coagulante.

Las pruebas desarrolladas en Simulink aplicando perturbaciones a la variable de entrada X_i , se presentan a continuación:

Tabla 17. Perturbaciones variando la concentración de coagulante (X_i).

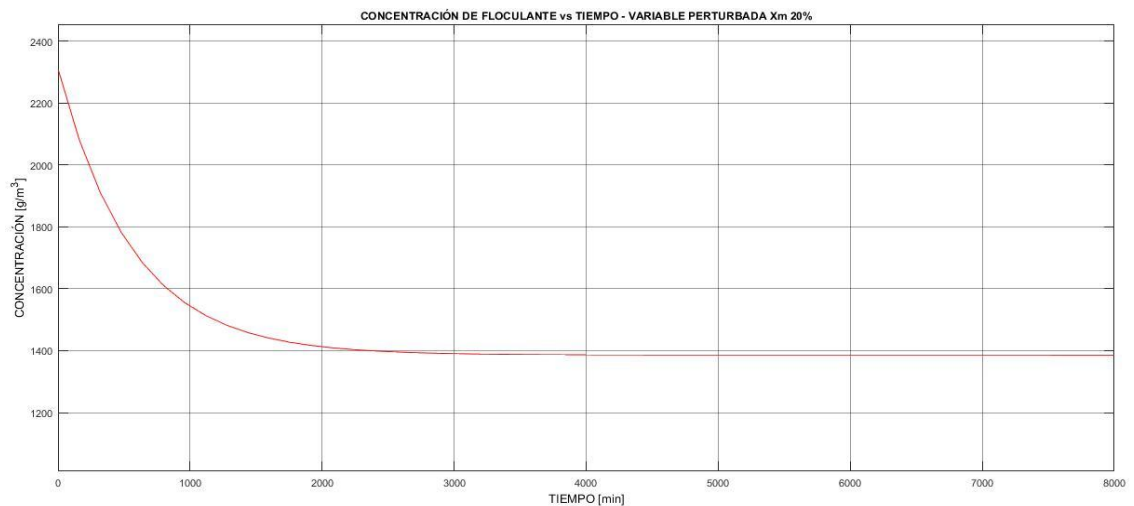
VARIABLE PERTURBADA	PORCENTAJE DE PERTURBACIÓN	VALOR FINAL X_i
X_i	5%	1212.5624
	10%	1270.3124
	20%	1385.8123
	-5%	1097.0625
	-10%	1039.3126
	-20%	923.8127

Fuente: elaboración propia

Las características del sistema de control observadas ante esta perturbación son:

- Tiempo que requiere para alcanzar el nuevo estado estacionario: 2835 [min]
- Ganancia del proceso (k): 925 [g/m³]
- Constante de tiempo (τ): 567 [min]

Figura 19. Respuesta en etapa de floculación ante perturbación del 20% de la variable X_m



Fuente: elaboración propia.

4.3.2 Simulación tanque de sedimentación: Para la ejecución de la simulación en el tanque de sedimentación TK2, se tuvo en cuenta las siguientes condiciones límite necesarias para resolver la ecuación diferencial No 22 son:

- No hay flujo de sólidos suspendidos en las paredes laterales,
- Todas las partículas que llegan al fondo permanecen allí (sin resuspensión)
- No hay transferencia neta de sólidos suspendidos en toda la superficie, es decir, que los gradientes de concentración respecto a la dirección de la velocidad se expresan de la siguiente manera:

$$\frac{dc}{dx} = 0 \text{ Paredes verticales} \quad (23)$$

$$\frac{dc}{dy} = 0 \text{ Pared inferior} \quad (24)$$

$$v_s \frac{dc}{dy} = 0 \text{ Para la superficie} \quad (25)$$

$$C(x, y, 0) = 0 \quad t = 0$$

Además, las condiciones iniciales: $C(x, 0, t) = 0 \quad t > 0$

$$C(0, 0, t) = C_o \quad t > 0$$

Para resolver la ecuación 22, se transformó a un espacio discreto, el cual es el espacio operado por las computadoras, es decir, la ecuación se obtuvo a partir de las formas básicas de las diferencias finitas, tal como diferencias hacia adelante, hacia atrás, y central de las derivadas. Los subíndices i y j denotan los puntos en el espacio, en las direcciones X y Y , respectivamente.

Las ecuaciones, en forma de diferencias finitas se presentan así:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{C_{i,j}^{t+1} - C_{i,j}^t}{\Delta t}, \quad \frac{dc}{dx} = \frac{C_{i+1,j}^{t+1} - C_{i,j}^{t+1}}{\Delta x}, \quad \frac{dc}{dx} = \frac{C_{i+1,j}^{t+1} - C_{i,j}^{t+1}}{\Delta x}, \quad \frac{dc}{dy} = \frac{C_{i,j+1}^{t+1} - C_{i,j}^{t+1}}{\Delta y} \quad (26)$$

$$\frac{d^2c}{dx^2} = \frac{C_{i-1,j}^{t+1} - 2C_{i,j}^{t+1} + C_{i+1,j}^{t+1}}{\Delta x^2}, \quad \frac{d^2c}{dy^2} = \frac{C_{i,j-1}^{t+1} - 2C_{i,j}^{t+1} + C_{i,j+1}^{t+1}}{\Delta y^2} \quad (27)$$

Reemplazando cada uno de los términos en la ecuación No 20, obtenemos:

$$[C_{i,j}^{t+1} - C_{i,j}^t] + u \frac{\Delta t}{\Delta x} [C_{i+1,j}^{t+1} - C_{i,j}^{t+1}] = \Gamma \frac{\Delta t}{\Delta x^2} [C_{i-1,j}^{t+1} - 2C_{i,j}^{t+1} + C_{i+1,j}^{t+1}] + \Gamma \frac{\Delta t}{\Delta y^2} [C_{i,j-1}^{t+1} - 2C_{i,j}^{t+1} + C_{i,j+1}^{t+1}] + v_s \frac{\Delta t}{\Delta y} [C_{i,j+1}^{t+1} - C_{i,j}^{t+1}] \quad (28)$$

$$a = u \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad b = \Gamma \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad d = \Gamma \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \quad e = v_s \frac{\Delta t}{\Delta y}$$

$$[C_{i,j}^{t+1} - C_{i,j}^t] + a[C_{i+1,j}^{t+1} - C_{i,j}^{t+1}] = b[C_{i-1,j}^{t+1} - 2C_{i,j}^{t+1} + C_{i+1,j}^{t+1}] + d[C_{i,j-1}^{t+1} - 2C_{i,j}^{t+1} + C_{i,j+1}^{t+1}] + e[C_{i,j+1}^{t+1} - C_{i,j}^{t+1}] \quad (29)$$

$$C_{i,j}^{t+1} - C_{i,j}^t + aC_{i+1,j}^{t+1} - aC_{i,j}^{t+1} = bC_{i-1,j}^{t+1} - 2bC_{i,j}^{t+1} + bC_{i+1,j}^{t+1} + dC_{i,j-1}^{t+1} - 2dC_{i,j}^{t+1} + dC_{i,j+1}^{t+1} + eC_{i,j+1}^{t+1} - eC_{i,j}^{t+1} \quad (30)$$

$$(d + e)C_{i,j+1}^{t+1} + (b - a)C_{i+1,j}^{t+1} + (-a - 2b - 2d - e - 1)C_{i,j}^{t+1} + bC_{i-1,j}^{t+1} + dC_{i,j-1}^{t+1} = -C_{i,j}^t \quad (31)$$

$$\alpha = (d + e) \quad , \quad \omega = (b - a) \quad , \quad \theta = (-a - 2b - 2d - e - 1)$$

$$\alpha C_{i,j+1}^{t+1} + \omega C_{i+1,j}^{t+1} + \theta C_{i,j}^{t+1} + bC_{i-1,j}^{t+1} + dC_{i,j-1}^{t+1} = -C_{i,j}^t \quad (32)$$

Estas ecuaciones fueron obtenidas a partir de las formas básicas de las diferencias finitas, tal como diferencias hacia adelante, hacia atrás, y central de las derivadas. Los subíndices i y j denotan los puntos en el espacio, en las direcciones X y Y, respectivamente.

Se realizó una simulación variando la altura del tanque de sedimentación respecto a la variación de concentración de sólidos suspendidos. Se utilizó un código desarrollado en Excel para determinar las dimensiones del tanque rectangular de sedimentación, el cual lo proveyó el ingeniero Ricardo Oviedo adscrito a la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, en donde se ingresa el valor de flujo total de agua saliente del tanque TK1 con una tasa de sobre flujo de un (1) m³/min m² y un tiempo de retención de dos (2) minutos, aplicando estas

condiciones en el programa, las dimensiones obtenidas para el tanque de sedimentación fueron: altura 2m, ancho 2,6m y longitud 10,5m.

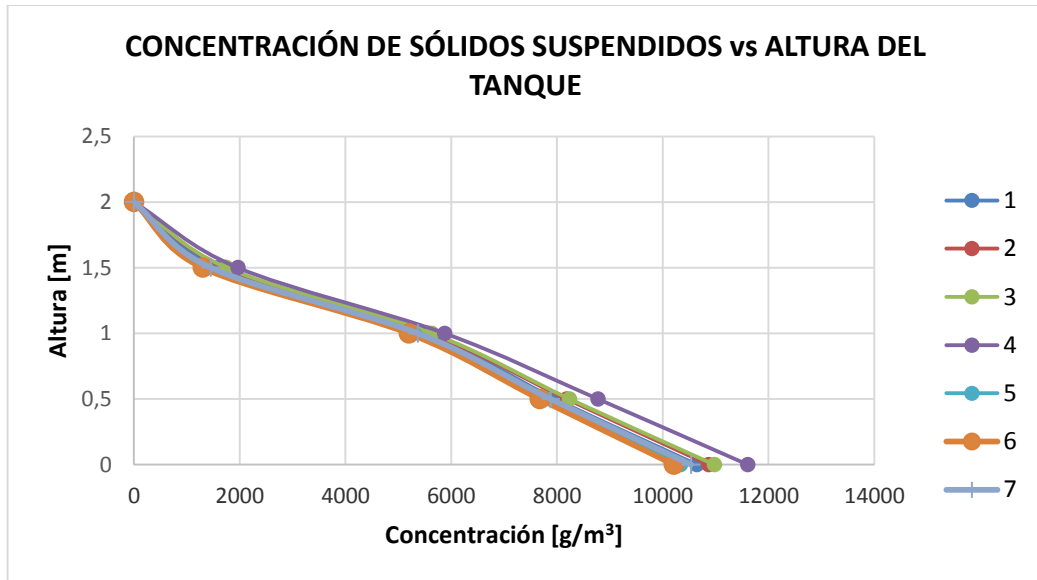
Se ejecutó el código diseñado en el software Matlab (ver anexo E), el cual por medio de método de diferencias finitas arrojó resultados que se distribuyeron en una matriz de datos en Excel (ver anexo G), tomando como referencia los primeros 7 cambios de concentración respecto a la variación de la altura (ver anexo H).

Se realizó la comparación de resultados mostrados en la figura 20 reportados por Wei Zhang y colaboradores²² (figura 21). Esta comparación sugiere que los perfiles de la concentración respecto a la altura del tanque, son similares, presentando cambios ascendentes de concentración en el fondo del tanque mientras la altura del mismo se reduce. Además, según los perfiles, una concentración más alta causa un mayor asentamiento de sólidos suspendidos y una mayor sedimentación, llevando a un aumento en la velocidad en la misma dirección de sólidos suspendidos. La concentración de entrada de coagulante fue de 2310 g/m^3 y la concentración de salida del tanque de sedimentación reportó el valor de $13,84 \text{ g/m}^3$, lo cual coincide con el análisis realizado en el tanque de coagulación-floculación suponiendo el término de floculación pericinetica.

Por otro lado, en la Figura 20, se puede observar la variación creciente de acumulación de sólidos suspendidos en el fondo del tanque según las etiquetas 1, 2, 3 y 4. Por otro lado, las etiquetas 5, 6 y 7 muestran una variación decreciente mínima debido a la precipitación acumulación de partículas en el fondo del tanque.

²² Wei Zhang, Zhihong Zou, Jun Sui. Op. cit., p. 41.

Figura 20. Concentración de sólidos suspendidos respecto a altura del tanque



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Perfiles obtenidos por los autores Wei Zhang, Zhihong Zou y Jun Sui en simulación de un sedimentador

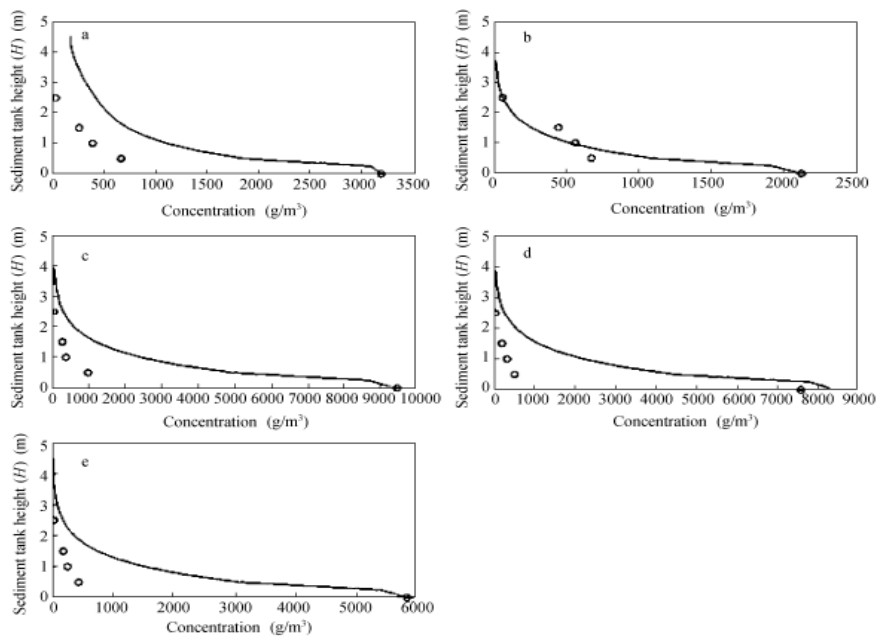


Fig. 4 Vertical concentration distribution curves of the five monitoring sections. When the suction dredge was 17 m away from the inlet, the point was 3.5 m (a), 12.5 m (b), 25 m (c), 37.5 m (d), and 46.5 m (e) away from the inlet. 0 in the Y-axis is the bottom of tank.

Fuente: Zhang, W., Zou Z., Suis, J. [14]

5. CONCLUSIONES

La prueba de jarras aplicada al agua del lago de la UIS utilizando sulfato de aluminio sin agitación indicó que la cantidad de coagulante adecuado para el proceso es de 1g de sulfato de aluminio, con el cual el agua tratada reportó un menor valor de turbidez, dureza y pH. Con agitación, para 40 rpm, la cantidad adecuada de coagulante resultó ser de 1g de sulfato de aluminio, con los valores mínimos de turbidez, dureza y pH para el agua tratada. Por su parte para 60 rpm la cantidad de coagulante adecuado es de 2g, obteniendo los valores mínimos de las propiedades anteriormente mencionadas del agua tratada.

El proceso de Coagulación-Floculación presentó un óptimo desempeño con el coagulante utilizado en el laboratorio, de acuerdo con lo consultado en fuentes bibliográficas, además, los resultados de la aplicación del modelo matemático reportado en la literatura para la etapa de floculación reportan un incremento del 20% en el flujo, lo que indica una disminución del 65,45% en la concentración de salida.

La simulación en el tanque de sedimentación, muestra variaciones pausadas con el tiempo en los siete (7) perfiles presentados de un 30% aproximadamente en la concentración de sólidos suspendidos en el fondo de acuerdo al volumen del tanque de sedimentación, estas tendencias obtenidas concuerdan con lo reportado en la literatura.

6. RECOMENDACIONES

- Codificar completamente el sistema con Simulink, con el fin de aplicar procesos de optimización a la etapa de Floculación – Sedimentación.
- Realizar pruebas a escala piloto, con el fin de obtener la cantidad de coagulante con mayor precisión y verificar los perfiles obtenidos en las simulaciones.

BIBLIOGRAFÍA

ASENSI, Enrique Javier. Estudio y modelización de la velocidad de sedimentación zonal y de la aceleración de los fangos activados. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 2015. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.

BARAJAS, Claudia L. & LEÓN, Andrea Juliana. Determinación de la dosis adecuada de sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) en el proceso de Coagulación - Floculación para el tratamiento de agua potable por medio del uso de una red neuronal artificial. Bogotá, 2015. Trabajo de grado (Ingeniería Ambiental). Universidad Santo Tomás. División de Ingenierías.

DELGADO, Claudia Viviana. Evaluación de parámetros físicos, químicos y biológicos de coagulantes naturales y químicos en 3 tipos de agua residual pre y post tratamiento. Bogotá, 2016. Trabajo de grado (Biología). Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ciencias Básicas.

DOMÍNGUEZ, María Fernanda. Optimización de la coagulación – floculación en la planta de tratamiento de agua potable de la sede recreacional Campoalegre – Cajasan. Bucaramanga, 2010. Trabajo de grado (Ingeniería Ambiental). Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingenierías y Administración.

GARCÍA, Víctor Jesús. Remoción de disruptores endócrinos y fármacos del agua residual del emisor central mediante un proceso de coagulación - floculación. México, 2011. Trabajo de grado (Ingeniería Ambiental). Universidad Autónoma de México. Instituto de Ingeniería.

GÁLVEZ, Antonia. Aplicabilidad de procesos de coagulación- floculación y de sistema de biopelícula en el tratamiento de lixiviados de vertederos de residuos urbanos. Granada, 2008. Tesis doctoral. Universidad de Granada. Departamento de Ingeniería Civil.

GÓMEZ, Néstor Alejandro. Remoción de materia orgánica por coagulación – floculación. Manizales, 2005. Trabajo de grado (Ingeniería Química). Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Química.

GRUPO ESTUDIANTIL INTERDISCIPLINARIO AMBIENTAL UIS. [En línea]. Disponible en: https://grupoambientaluis.es.tl/UIS-ANTI_AMBIENTAL.htm

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Gestión

Ambiental. Calidad de Agua. Muestreo. Muestreo de Aguas Residuales. Bogotá: ICONTEC, 2003. (NTC-ISO-5667-10).

MAÑUNGA, Tatiana. Evaluación del desempeño de un sistema de lodos activados en la modalidad de estabilización por contacto sin clarificación primaria tratando agua residual doméstica. Santiago de Cali, 2012. Trabajo de grado (Ingeniería Sanitaria y Ambiental). Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente.

MARTINEZ, Fabiola. Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional. Ciudad Real, 2007. Trabajo de grado de Doctorado (Ingeniería Química). Universidad de Castilla – La Mancha. Facultad de Ciencias Químicas.

MARTINEZ, Sergio A. & RODRIGUEZ, Miriam G. Tratamiento de aguas residuales con MATLAB. Reverté S.A., 2005. p. 100. ISBN: 968-6708-57-X.

MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Reglamento Técnico de

MORALES, Eduardo Andrés. Estudio experimental y modelización de los parámetros biocinéticos en la evaluación de un reactor de lodos activos de una planta de tratamiento alimentaria. Guayaquil, 2013. Trabajo de grado (Ingeniería Química). Escuela Superior Politécnica del Litoral.

NAVAS, Estefanía. Calidad de aguas: usos y aprovechamiento. ICB. S.L. 2017. ISBN: 978-84-9021-484-8

RIGOLA, Miguel. Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales. Marcombo S.A., 1989. p.51. ISBN: 84-267-0740-8

RODRIGUEZ, Carlos Francisco. Uso y control del proceso de coagulación en plantas de tratamiento de agua potable. 2008. Trabajo de grado. Universidad de Sucre. Facultad de Ingeniería.

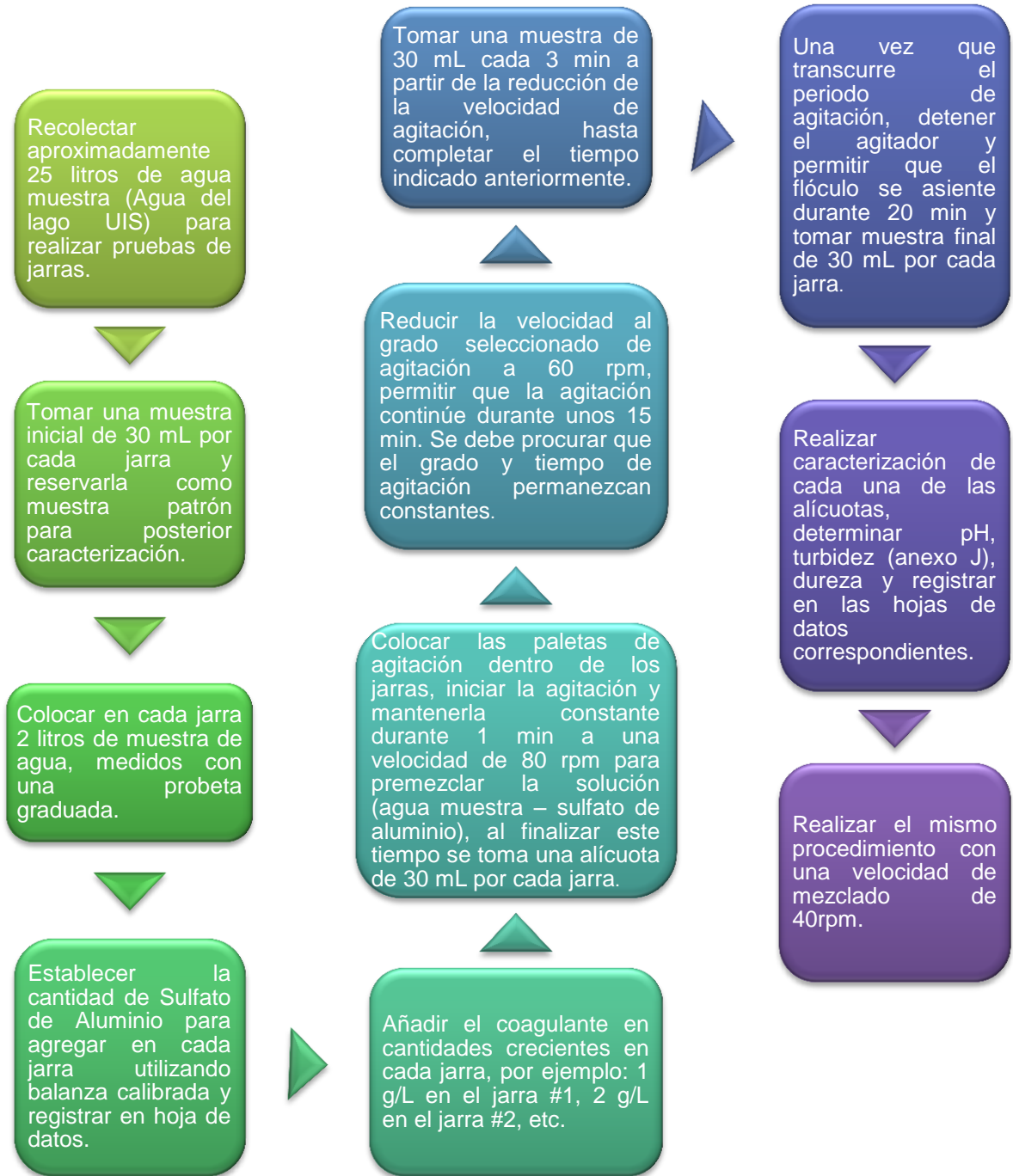
SANS, Ramón. Ingeniería Ambiental: contaminación y tratamientos. Marcombo S.A., 1989. p.98. ISBN: 84-267-0742-4 Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2000. Título A-12 Definiciones. 2012. 110 p.

WEBER, Walter J. Control de la calidad del agua, procesos fisicoquímicos. Reverté, S.A., 2003. p.144. ISBN: 84-291-7522-9

ZERBATTO, Mariel Guadalupe. Coagulación optimizada en el tratamiento de potabilización de agua: Su efecto sobre la remoción de enteroparásitos. Santa Fe, 2012. Tesis de Magister (Salud Ambiental). Universidad Nacional del Litoral. Facultad de Bioquímica y Ciencias Biológicas.

ANEXOS

ANEXO A. Protocolo aplicación prueba de jarras



Fuente: elaboración propia

ANEXO B. pH-metro (sensor utilizado en el método electroquímico)



Specifications

Model	ST400D*	ST300*	ST300C*	ST300D*
Measurement Range	0.0 to 200.0% 0.00 to 20.0 mg/L(ppm) 0 to 50 °C	0.00 to 14.00 pH -1999 to 1999 mV 0 °C to 100 °C	0.0 µS/cm to 199.9 mS/cm 0.1 mg/l to 199.9 g/l (TDS) 0 °C to 100 °C	0.0 to 199.9%; 200 to 400% 0.00 to 19.99; 20.0 to 45.0 mg/L 0.00 to 19.99; 20.0 to 45.0 ppm 0 to 50 °C
Measurement Resolution	0.1% 0.01 mg/L(ppm) 0.1 °C	0.01 pH 1 mV 0.1 °C	Automatic Range 0.1 °C	0.1%; 1% 0.1 mg/L; 1mg/L 0.01 ppm; 0.1 ppm 0.1 °C
Barometric Range	50.0 to 115.0 kPa	NA	NA	375 to 825 mmHg 500 to 1100 mbar 500 to 1100 hPa
Barometric Resolution	0.1 kPa	NA	NA	1 mmHg 1 mbar 1 hPa
Error Limits	± 0.2 mg/L (<8 mg/L), ± 0.3 mg/L (8 to 20 mg/L); ± 0.3 °C ± 1.5 kPa	± 0.01 pH ± 1 mV ± 0.5 °C	± 0.5 % of the Measured Value ± 0.3 °C	± 1%; ± 0.3 °C
Calibration	1 or 2 points	3 Points 4 Predefined Buffer Group	1 Point 4 Predefined Standards	1 or 2 Points 100% and 0%
Memory	99 Measurements Last Calibration Data	30 Measurements Last Calibration Data	30 Measurements Last Calibration Data	30 Measurements Last Calibration Data
Power Supply	4 x AAA (LR03) Batteries, 12 hrs	4 AAA > 500 Operating Hours	4 AAA > 250 Operating Hours	4 AAA > 250 Operating Hours
Size/Weight	Approximately 90 W × 150 D × 35 H mm / 0.16 kg (Without Batteries)	Approximately 90 W × 150 D × 35 H mm / 0.18 kg (Without Batteries)	Approximately 90 W × 150 D × 35 H mm / 0.16 kg (Without Batteries)	Approximately 90 W × 150 D × 35 H mm / 0.18 kg (Without Batteries)
Display	Liquid Crystal	Liquid Crystal	Liquid Crystal	Liquid Crystal
Input	Mini-DIN	BNC, Impedance > 10e+12 Ω Cinch, NTC 30 kΩ	Mini-DIN	BNC, Cinch, NTC 30 kΩ
Temperature Compensation	ATC	ATC & MTC	ATC, Linear: 0.00 %/°C...10.00 %/°C Reference Temperature: 20 & 25 °C	ATC & MTC
Salinity Compensation	0.0 to 40.0 ppt	NA	NA	0.0 to 50.0 ppt
IP Protection	IP54	IP54	IP54	IP54
Housing	ABS	ABS	ABS	ABS

ANEXO C. Kit para la determinación de dureza



Manual de Instrucciones

HI 3842 Test Kit de Dureza Rango Alto



Estimado Cliente,
Gracias por elegir un Producto Hanna.
Sírvase leer las instrucciones detenidamente antes de utilizar el Kit de Análisis Químico para, de este modo, tener la información necesaria para el correcto uso del mismo. Si necesita más información técnica, no dude en contactar nuestra dirección de correo electr.: sat@hannaspain.com.
Desembale el kit y examínelo minuciosamente para asegurarse de que no ha sufrido daños durante el transporte. Si hay algún desperfecto, notifíquelo inmediatamente a su Distribuidor o al Servicio de Atención al Cliente de Hanna más cercano.

- Cada kit va equipado con:
- HI 3842-0 Reactivo Dureza HR, 1 botella con dosificador (30 mL);
 - 1 vaso de plástico calibrado (50 mL).

Nota: Todo elemento defectuoso ha de ser devuelto en su embalaje original.

ISTR3842 VERSION
4/09/11 12/00

ESPECIFICACIONES

Rango	400 a 3000 mg/L (ppm) CaCO ₃
Incremento Mínimo	100 mg/L (ppm) CaCO ₃
Método Análisis	titración por recuento de gotas
Cantidad Muestra	25 mL
Número de Tests	50 (de media)
Dimensiones Estuche	115x105x80 mm
Peso embarque	120 g

TRANSCENDENCIA Y USO

Históricamente, la dureza del agua fue definida por la capacidad del agua de precipitar jabón. Mas tarde se averiguó que las especies iónicas en el agua, causantes de la precipitación, eran principalmente calcio y magnesio. Actualmente, por lo tanto, la dureza del agua es en realidad una medición cuantitativa de estos iones en el agua de la muestra.

REACCION QUIMICA

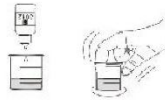
El Test Kit de Hanna determina la dureza total del agua vía un método titramétrico. El calcio y el magnesio forman un complejo con EDTA y el punto final de reacción lo indica el cambio de color del indicador de rojo a azul.

INSTRUCCIONES

- LEA LAS INSTRUCCIONES ANTES DE USAR EL TEST KIT
- Retire la tapa del vaso de plástico. Enjuague con la muestra de agua, y llénelo con la muestra de agua hasta la marca de 25 mL.



- Añada gotas de reactivo HI 3840-0 hasta que cambie el color de rosa a azul, mientras hace girar el vaso tras



cada gota y contando las gotas necesarias para obtener el cambio de color.

- Use la Tabla de Conversión o calcule la Dureza:
 $\# \text{ de GOTAS} \cdot 100 = \text{ppm CaCO}_3$
 $1 \text{ ppm} = 1 \text{ mg/L} = 0.1 \text{ f} = 0.0556 \text{ D} = 0.07 \text{ E}$

NOTA: ppm es miligramos CaCO₃ por Litro
 °F : Grados Franceses
 °D : Grados Alemanes
 °E : Grados Ingleses

No mantenga la botella de reactivo a plena luz del sol.

REFERENCIAS

Adaptación de la E.P.A. método recomendado 130.2

SALUD Y SEGURIDAD

Los productos químicos contenidos en este Test Kit son seguros en términos domésticos normales. Lea la Hoja Informativa de Salud y Seguridad antes de efectuar el test.

TABLA 1 DUREZA DEL AGUA

- Gotas:
- 1 blanda
 - 2 media
 - 3 dura
 - 4 muy dura

Para medir: Dureza Rango Bajo use Test Kit HI 3840
 Dureza Rango Medio use Test Kit HI 3841

TABLA 2 DATOS DE CONVERSION

Gts	PPM	°F	°D	°E
3	300	30	16.7	11
4	400	40	22.2	15
5	500	50	27.8	19
6	600	60	33.3	23
7	700	70	38.9	27
8	800	80	44.4	31
9	900	90	50.0	35
10	1000	100	55.6	39
11	1100	110	61.1	43
12	1200	120	66.7	47
13	1300	130	72.2	51
14	1400	140	77.8	55
15	1500	150	83.3	59
16	1600	160	88.9	63
17	1700	170	94.4	67
18	1800	180	100.0	71
19	1900	190	105.6	75
20	2000	200	111.1	79
21	2100	210	116.7	83
22	2200	220	122.2	87
23	2300	230	127.8	91
24	2400	240	133.3	95
25	2500	250	138.9	99
26	2600	260	144.4	103
27	2700	270	150.0	107
28	2800	280	155.6	111
29	2900	290	161.1	115
30	3000	300	166.7	119

ANEXO D. Turbidímetro para la determinación de turbidez



ESPECIFICACIONES:

Accesorios: LZV804.99.00001 Módulo alimentación

LZV813.99.00001 Módulo alimentación + USB

2971304 Pilas NiMH, AA, pk/4

4397500 Kit desgasificación

4397510 Kit filtración-desgasificación

2464105 Set de Gelex (Standard secundarios)

Alcance del suministro: Instrumento, maletín de transporte, 4 pilas alcalinas AA, 6 cubetas, kits viales sellados STABLCAL, aceite de silicona, paño lubricante, manual.

Altura: 3.0 in

Caudal de muestra: 15 mL

Certificaciones: CE certified

Certificaciones de conformidad: CE/RoHS/WEEE

Compatibilidad de cubetas: 25 mm x 60 mm redonda (de vidrio de borosilicato, con tapa roscada)

Condiciones de almacenamiento: -40 °C - 60 °C

Conexión a red: 100 - 240 VAC, 50/60 Hz (con módulos opcionales de alimentación o USB + alimentación)

Dimensiones (A x A x P): 77 mm x 107 mm x 229 mm

Exactitud: ± 2 % de la lectura más luz difusa

Fuente de alimentación: Baterías (ver Pilas/baterías requeridas) o alimentación opcional

Fuente de luz: Lámpara de Tungsteno

Garantía: 2 años

Humedad operativa máx.: 90 %

Idiomas del manual: inglés, francés, alemán, italiano, español, portugués (BR), portugués (PT), búlgaro, chino, checo, danés, holandés, finés, griego, húngaro, japonés, coreano, polaco, rumano, ruso, esloveno, sueco, turco

Interfaz: Optional USB

Interfaz de usuario: inglés, francés, alemán, italiano, español, portugués (br), portugués (pt), búlgaro, chino, checo, danés, holandés, finés, griego, húngaro, japonés, coreano, polaco, rumano, ruso, esloveno, sueco, turco

Luz difusa: $< 0,02$ NTU

Marca: Hach

Método de medición: Determinación turbidimétrica en RATIO, entre la señal de luz dispersa nefelométrica (90°) y la señal de luz dispersa transmitida.

Modo de medición: Normal (presionar para obtener el resultado), Promedio Señal, Muestras de rápida sedimentación

Normativa: Método EPA 180.1

Peso: 0.53 kg sin pilas

Pilas/baterías requeridas: 4 AA

Promedio de la señal: Seleccionable on/off

Protección de la carcasa (IP): IP67

Rango de medición: 0 - 1000

Rango de medición (2): NTU

Rango de temperatura de operación: 0 - 50 °C

Registro de datos: 500 registros

Repetibilidad: ± 0.003 FNU $\pm 0,5\%$ de la lectura

(0 a 2 FNU)

Requisitos de alimentación (Hz): 50/60 Hz

Requisitos de alimentación (voltaje): 100 - 240 V CA

Requisitos de muestra: 15 mL (0,5 oz)

Tamaño de pantalla: 240 x 160 pixels

Tiempo de respuesta: 6 s en el modo normal de lectura

Tipo de pantalla: Gráfico LCD

Unidades: NTU

ANEXO E. Código en Software Matlab descripción proceso de sedimentación

%Perfil de sedimentación%

clc

clear

Cn=13.6; %concentración superficie del tanque%

Ce=0; %concentración pared lateral derecha del tanque%

Co=0; %concentración pared lateral izquierda del tanque%

Cs=0; %concentración fondo del tanque%

Ct=0; %concentración inicial en el tanque%

%Definir la dimensión de la matriz%

n=100; %nodos a lo largo del tanque%

m=10; %nodos a lo alto del tanque%

tam=n*m;

A=zeros(tam,tam);

B=zeros(tam,1);

l=2.6; %longitud del tanque%

h=2; %altura del tanque%

dt=60; %delta de tiempo%

dx=l/n; %delta de x%

dy=h/m; %delta de y%

u=0.011; %velocidad en dirección x, $U=Q/A$ %

vs=8.7/60; %velocidad de sedimentación (usar valor promedio)%

g=1; %constante gamma, coeficiente de difusión%

a=u*dt/dx;

```
b=g*dt/(dx^2);  
d=g*dt/(dy^2);  
e=vs*dt/dy;  
aa=d+e;  
w=b-a;  
tt=-a-(2*b)-(2*d)-e-1;
```

```
%Llenado de la matriz%
```

```
for i=1:1:tam  
    A(i,i)=tt;  
end
```

```
i=1;  
for j=2:1:tam  
    A(i,j)=w;  
    i=i+1;  
end
```

```
j=1;  
for i=2:1:tam  
    A(i,j)=b;  
    j=j+1;  
end
```

```
i=1;  
for j=n+1:1:tam  
    A(i,j)=aa;  
    i=i+1;  
end
```

```

j=1;
for i=n+1:1:tam
    A(i,j)=d;
    j=j+1;
end

i=n;
for j=n+1:n:tam
    A(i,j)=0;
    i=i+n;
end

j=n;
for i=n+1:n:tam
    A(i,j)=0;
    j=j+n;
end

%Vector solución%
B(1)=-Ct-(b*Co)-(d*Cn);
for i=2:1:n-1
    B(i)=-Ct-(d*Cn);
end
B(n)=-Ct-(w*Ce)-(d*Cn);

for i=n+1:1:tam-n
    B(i)=-Ct;
end

for i=2*n:n:tam-n

```

```

    B(i)=-Ct-(w*Ce);
end

B(tam)=-Ct-(aa*Cs)-(w*Ce);
ii=(n*(m-1))+1;
B(ii)=-Ct-(aa*Cs)-(b*Co);
for i=ii+1:1:tam-1
    B(i)=-Ct-(aa*Cs);
end

%Perfil de concentración%
sol=A\B;

Cprom(1)=sum(sol(1:1:n))/n;
for k=1:1:m-1
    Cprom(k+1)=sum(sol(k*n+1:1:(k+1)*n))/n;
end

disp('La concentración promedio a lo largo del tanque es:')
disp(Cprom);

sol1=sol(1:1:n);
sol2=sol(2*n+1:1:3*n);
sol3=sol(4*n+1:1:5*n);
sol4=sol(6*n+1:1:7*n);

x=1:1:n;
plot(x,sol1,'y');
hold on
plot(x,sol2,'r');

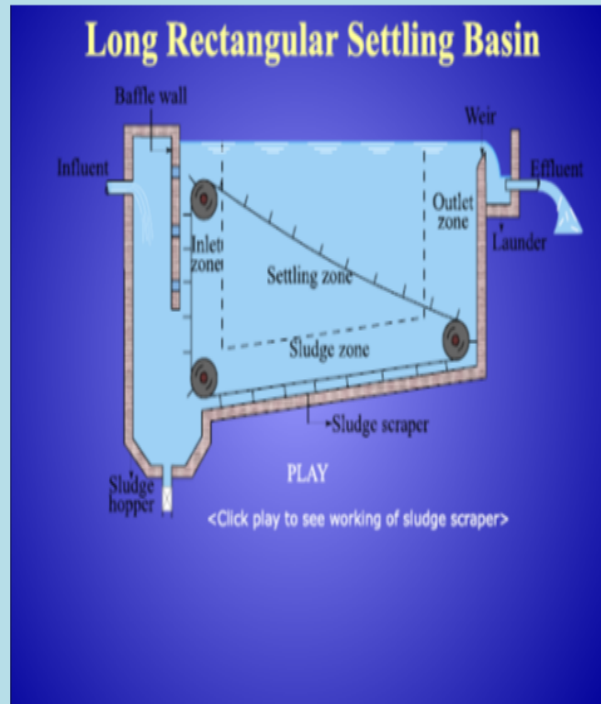
```

```
hold on
plot(x,sol3,'g');
hold on
plot(x,sol4,'b');
hold on

title ('COMPOSICIÓN PROMEDIO');
xlabel('eje x');
ylabel('eje y');
legend ('SOLUCIÓN1','SOLUCIÓN2','SOLUCIÓN3','SOLUCIÓN4');
grid;
```

ANEXO F. Diseño en Excel de tanque de sedimentación

Diseño de un tanque rectangular de sedimentación



		Calculado	Recomendado
No. Tanques		1	Al menos 2 tanques
Flujo Total	Total flow	205,0 m ³ /min	
Flujo/tanque		27,8 m ³ /min	
Tasa de sobreflujo	Overflow rate	1 m ³ /(min m ²)	20 a 40 m ³ /(día m ²)
Área superficial	Surface area	27,78 m ²	
Tiempo de retención	Detention time	2 min	4 a 8 min
Volumen	Volume	55,6 m ³	
Profundidad Tanque	Depth	2,0 m	2,1 a 4,8 m
Ancho	Width	2,6 m	3 a 15 m
Longitud	Length	10,5 m	12 a 60 m
Área seccional	Cross-sectional area	205,00 m ²	
Velocidad de flujo	Flow through velocity	0,000 m/min	< 0,15 m/min
Carga	Weir loading	185 m ³ /(día m)	185 a 250 m ³ /(día m)
Longitud pared	Weir length	0,15 m	
Pendiente del fondo	Slop of bottom		> 1 %
Baffle de entrada	Influent baffle		

Nota: Números en rojo significa datos a introducir

Fuente: <http://www.nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT-KANPUR/wasteWater/Lecture%206.htm>

ANEXO H. Datos resumidos simulación de sedimentación

ALTURA TANQUE	DELTA DE LA LONGITUD DEL TANQUE					PROMEDIO
2	9,5	0	0	0	0	1,9
1,5	3407,336	3032,5102	64,927	0	0	1300,95464
1	7718,8804	7482,7729	7279,2937	3508,2173	0	5197,83286
0,5	10381,0667	10381,0667	10102,698	7501,8819	0	7673,34267
0	10381,0667	10381,0667	10102,698	10102,698	10102,698	10214,04549

Fuente: elaboración propia

ALTURA TANQUE	DELTA DE LA LONGITUD DEL TANQUE					PROMEDIO
2	11,2	0	0	0	0	2,24
1,5	3641,813	3478,0998	162,97117	0	0	1456,576794
1	7872,1197	7682,2009	7601,228	3706,662	0	5372,44212
0,5	10594,227	10594,227	10500,177	7726,90998	0	7883,108588
0	10594,227	10594,227	10500,177	10500,1772	10500,1772	10537,79747

Fuente: elaboración propia

ALTURA TANQUE	DELTA DE LA LONGITUD DEL TANQUE					PROMEDIO
2	16,8	0	0	0	0	3,36
1,5	4190,219	4077,1034	468,008	31,103	0	1753,28668
1	8162,439	8027,3308	7986,014	3998,73	0	5634,90276
0,5	11027,6239	11027,6239	10942,8107	8207,98	0	8241,2077
0	11027,6239	11027,6239	10942,8107	10942,8107	10942,8107	10976,73598

Fuente: elaboración propia

ALTURA TANQUE	DELTA DE LA LONGITUD DEL TANQUE					PROMEDIO
2	20	0	0	0	0	4
1,5	4732,25	4358,384	649,183	95,27	0	1967,0174
1	8722,4294	8490,1302	8186,734	3998,73	0	5879,60472
0,5	11997,7302	11997,7302	11349,229	8531,92	0	8775,32188
0	11997,7302	11997,7302	11349,229	11349,229	11349,229	11608,62948

ALTURA TANQUE	DELTA DE LA LONGITUD DEL TANQUE					PROMEDIO
2	10,6	0	0	0	0	2,12
1,5	3526,77296	3129,6682	97,003677	0	0	1350,688968
1	7809,35067	7599,0008	7364,99201	3670,88301	0	5288,845297
0,5	10492,1388	10492,1388	10234,6423	7618,7289	0	7767,529761
0	10492,1388	10492,1388	10234,6423	10234,6423	10234,6423	10337,6409

Fuente: elaboración propia

ALTURA TANQUE	DELTA DE LA LONGITUD DEL TANQUE					PROMEDIO
2	9,5	0	0	0	0	1,9
1,5	3407,336	3032,5102	64,927	0	0	1300,95464
1	7718,8804	7482,7729	7279,2937	3508,2173	0	5197,83286
0,5	10381,0667	10381,0667	10102,698	7501,8819	0	7673,34267
0	10381,0667	10381,0667	10102,698	10102,698	10102,698	10214,04549

Fuente: elaboración propia

ALTURA TANQUE	DELTA DE LA LONGITUD DEL TANQUE					PROMEDIO
2	11,2	0	0	0	0	2,24
1,5	3641,813	3478,0998	162,97117	0	0	1456,576794
1	7872,1197	7682,2009	7601,228	3706,662	0	5372,44212
0,5	10594,2279	10594,2279	10500,1772	7726,90998	0	7883,108588
0	10594,2279	10594,2279	10500,1772	10500,1772	10500,1772	10537,79747

Fuente: elaboración propia

ANEXO I. Linealización ecuación de balance en TK1

ECUACIÓN 1:

$$\frac{dx_f(t)}{dt} = (x_{i(t)} - x_{f(t)}) \frac{q_{out(t)}}{v_f} - \frac{2}{3} G_f \cdot d_f^3 \cdot N_T^2 \cdot \eta - \frac{gd^2 A_t}{18\vartheta v_f} \left(\frac{x_{f(t)}(\rho_s - \rho_a) - x_{f(t)}^2 M}{x_{f(t)} M - \rho_a} \right) \quad EC. 1$$

$$\frac{dx_f(t)}{dt} = x_{i(t)} a_1 + q_{out(t)} a_2 + x_{f(t)} a_3$$

$$a_1 = \left. \frac{dq}{dx_m} \right|_{(ee)} = \frac{q_{out(ee)}}{V_f} \qquad a_2 = \left. \frac{dq}{dq_{out}} \right|_{(ee)} = \frac{x_{i(ee)} - x_{f(ee)}}{V_f}$$

$$a_3 = \left. \frac{dq}{dq_{out}} \right|_{(ee)} = - \left(\frac{q_{out(ee)}}{v_f} \right) - \frac{gd^2 A_t}{18\vartheta v_f} \left(\frac{-x_{f(ee)}^2 M^2 - 2Mx_{f(ee)} + \rho_a(\rho_s - \rho_a)}{(x_{f(ee)} M + \rho_a)^2} \right)$$

Hallamos el valor de $x_{f(ee)}$ en estado estacionario a partir de la ecuación diferencial 1 en estado estable y así reemplazar para poder hallar las constantes de linealización.

$$x_{i(ee)} \frac{q_{out(ee)}}{v_f} - x_{f(ee)} \frac{q_{out(ee)}}{v_f} - \frac{2}{3} G_f \cdot d_f^3 \cdot N_T^2 \cdot \eta - \frac{gd^2 A_t}{18\vartheta v_f} \left(\frac{x_{f(ee)}(\rho_s - \rho_a) - x_{f(ee)}^2 M}{x_{f(ee)} M - \rho_a} \right) = 0$$

$$x_{i(ee)} * q_{out(ee)} - x_{f(ee)} * q_{out(ee)} - \frac{2}{3} G_f \cdot d_f^3 \cdot N_T^2 \cdot \eta \cdot v_f - \frac{gd^2 A_t}{18\vartheta} \left(\frac{x_{f(ee)}(\rho_s - \rho_a) - x_{f(ee)}^2 M}{x_{f(ee)} M - \rho_a} \right) = 0$$

$$x_{i(ee)} \cdot q_{out(ee)} - x_{f(ee)} \cdot q_{out(ee)} - \varphi - \beta \left(\frac{x_{f(ee)}(\rho_s - \rho_a) - x_{f(ee)}^2 M}{x_{f(ee)} M - \rho_a} \right) = 0$$

$$-x_{i(ee)} q_{out(ee)} + \varphi = -x_{f(ee)} \cdot q_{out(ee)} - \beta \left(\frac{x_{f(ee)}(\rho_s - \rho_a)}{x_{f(ee)} M - \rho_a} \right) + \beta \left(\frac{x_{f(ee)}^2 M}{x_{f(ee)} M - \rho_a} \right) = 0$$

$$\begin{aligned} (-x_{i(ee)} \cdot q_{out(ee)} + \varphi) \cdot (x_{f(ee)} \cdot M - \rho_a) &= -x_{f(ee)}^2 \cdot q_{out(ee)} \cdot M + x_{f(ee)} \cdot q_{out(ee)} \cdot \rho_a - \\ \beta \cdot x_{f(ee)} \cdot (\rho_s - \rho_a) - \beta \cdot x_{f(ee)}^2 \cdot M \end{aligned}$$

$$-x_{i(ee)} \cdot q_{out(ee)} \cdot x_{f(ee)} \cdot M + \varphi \cdot x_{f(ee)} \cdot M + x_{i(ee)} \cdot q_{out(ee)} \cdot \rho_a - \varphi \cdot \rho_a =$$

$$-x_{f(ee)}^2 \cdot q_{out(ee)} \cdot M + x_{f(ee)} \cdot q_{out(ee)} \cdot \rho_a - \beta \cdot x_{f(ee)} \cdot (\rho_s - \rho_a) - \beta \cdot x_{f(ee)}^2 \cdot M$$

$$x_{f(ee)}^2 \cdot (q_{out(ee)} \cdot M - \beta \cdot M) - x_{f(ee)} (q_{out(ee)} \cdot \rho_a - \beta \cdot (\rho_s - \rho_a)) - (\varphi - x_{i(ee)} \cdot q_{out(ee)}) \rho_a = 0$$

$$(q_{out(ee)} \cdot M - \beta \cdot M) = A \quad C = (\varphi - x_{i(ee)} \cdot q_{out(ee)}) \rho_a$$

$$(q_{out(ee)} \cdot \rho_a - \beta \cdot (\rho_s - \rho_a)) = B$$

Para obtener el valor de la concentración en estado estable $x_{f(ee)}$, se desarrolla la ecuación cuadrática enmarcada.

RESOLVIENDO:

Después de linealizar la ecuación diferencial 1, procedemos a transformar en variables de desviación la ecuación y resolver:

$$\frac{dx_{f(t)}^D}{dt} = x_{i(t)}^D a_1 + q_{out(t)}^D a_2 + x_{f(t)}^D a_3$$

$$-\frac{1}{a_3} \frac{dx_{f(t)}^D}{dt} + x_{f(t)}^D = -\frac{a_1}{a_3} x_{i(t)}^D - \frac{a_2}{a_3} q_{out(t)}^D$$

Luego se aplica transformada de la L'place y de esta manera se puede encontrar la función de transferencia que represente el modelo de floculación.

$$x_{f(s)} = \frac{k_1}{\tau s + 1} x_{i(s)} - \frac{k_2}{\tau s + 1} q_{out(s)} \quad \text{Función de Transferencia Proceso de Floculación en TK1.}$$

ANEXO J. Resultados prueba de jarras No 1 y No2

A continuación, se presentan los resultados de la prueba de jarras No1

Valores medidos para los parámetros al minuto 4 de prueba a 40rpm de agitación.

PRUEBA N° 2	TIEMPO= 4 min		T= 25°C	V= 40rpm	
	MUESTRA	pH	Dureza (mg/l CaCO3)	Turbidez (NTU)	KOH ADICIONADO (ml)
	1	4,01	44,00	6,72	0,20
	2	3,92	44,00	7,42	0,70
	3	3,86	42,00	9,85	0,50
	4	3,79	42,00	12,80	0,80
	5	3,77	37,00	13,60	0,90
	6	3,69	42,00	15,40	0,80

Fuente: elaboración propia

Valores medidos para los parámetros a los 7 min de prueba a 40rpm de agitación.

PRUEBA N° 3	TIEMPO= 7 min		T= 25°C	V= 40rpm	
	MUESTRA	pH	Dureza (mg/l CaCO3)	Turbidez (NTU)	KOH ADICIONADO (ml)
	1	4,04	34,00	5,29	0,30
	2	3,96	44,00	8,90	0,40
	3	3,90	43,00	9,19	0,40
	4	3,83	44,00	10,50	0,70
	5	3,79	44,00	13,40	0,90
	6	3,71	43,00	12,40	0,90

Fuente: elaboración propia

Valores medidos para los parámetros a los 10 minutos de prueba a 40rpm de agitación.

		TIEMPO= 10 min	T= 25°C	V= 40rpm		
		MUESTRA	pH	Dureza (mg/l CaCO ₃)	Turbidez (NTU)	KOH ADICIONADO (ml)
PRUEBA N° 4	1	4,06	36,00	5,53	0,20	
	2	3,98	39,00	9,27	0,30	
	3	3,90	44,00	10,00	0,50	
	4	3,83	38,00	12,00	0,60	
	5	3,80	37,00	9,65	0,70	
	6	3,74	38,00	12,20	0,90	

Fuente: elaboración propia

Valores medidos para los parámetros a los 13 minutos de prueba a 40rpm de agitación.

		TIEMPO= 13 min	T= 25°C	V= 40rpm		
		MUESTRA	pH	Dureza (mg/l CaCO ₃)	Turbidez (NTU)	KOH ADICIONADO (ml)
PRUEBA N° 5	1	4,07	39,00	5,81	0,40	
	2	3,98	42,00	8,66	0,30	
	3	3,91	42,00	10,50	0,40	
	4	3,85	40,00	11,10	0,60	
	5	3,83	39,00	12,70	0,60	
	6	3,73	44,00	10,90	0,90	

Fuente: elaboración propia

A continuación, se presentan los resultados de la prueba de jarras No2

Valores medidos para los parámetros en el minuto 4 de prueba a 60rpm de agitación.

		TIEMPO = 4 min	T= 25°C	V= 60rpm	
PRUEBA N° 2	MUESTRA	pH	Dureza (mg/l CaCO3)	Turbidez (NTU)	KOH ADICIONADO (ml)
	1	4,06	38	4,87	0,3
	2	3,95	47	9,13	0,3
	3	3,87	45	6,99	0,5
	4	3,82	47	11,5	0,7
	5	3,76	45	11,3	0,9
	6	3,75	43	12,1	0,8

Fuente: elaboración propia

Valores medidos para los parámetros en el minuto 7 de prueba a 60rpm de agitación.

		TIEMPO = 7 min	T= 25°C	V= 60rpm	
PRUEBA N° 3	MUESTRA	pH	Dureza (mg/l CaCO3)	Turbidez (NTU)	KOH ADICIONADO (ml)
	1	4,15	38	6,45	0,2
	2	4,03	39	6,43	0,2
	3	3,92	40	10,3	0,38
	4	3,87	44	11,3	0,45
	5	3,79	41	11,6	0,45
	6	3,76	40	11,5	0,65

Fuente: elaboración propia

Valores medidos para los parámetros en el minuto 10 de prueba a 60rpm de agitación.

		TIEMPO= 10 min	T= 25°C	V= 60rpm	
	MUESTRA	pH	Dureza	Turbidez	KOH
			(mg/l CaCO ₃)	(NTU)	ADICIONADO (ml)
PRUEBA N° 4	1	4,16	43	6,15	0,15
	2	4,06	39	5,56	0,2
	3	3,95	41	10,7	0,5
	4	3,9	40	9,53	0,7
	5	3,82	41	9,75	0,7
	6	3,79	42	11,7	0,8

Fuente: elaboración propia

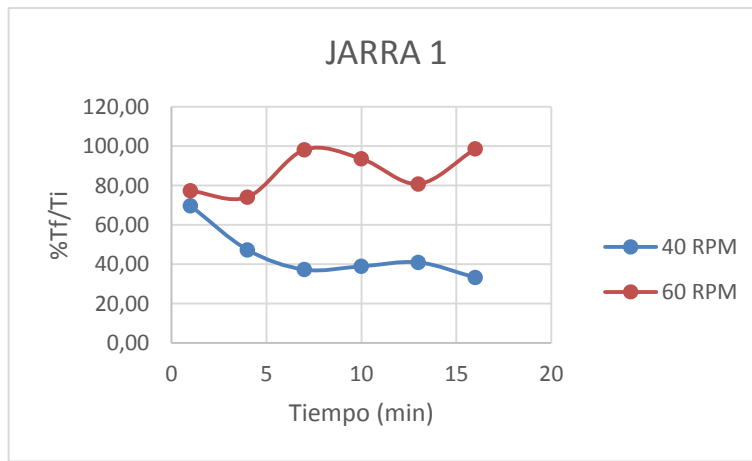
Valores medidos para los parámetros en el minuto 13 de prueba a 60rpm de agitación.

		TIEMPO= 13 min	T= 25°C	V= 60rpm	
	MUESTRA	pH	Dureza	Turbidez	KOH
			(mg/l CaCO ₃)	(NTU)	ADICIONADO (ml)
PRUEBA N° 5	1	4,19	39	5,31	0,2
	2	4,06	40	5,8	0,7
	3	3,94	44	8,58	1
	4	3,9	43	10,3	0,8
	5	3,82	40	19,5	0,8
	6	3,79	42	11,3	0,8

Fuente: elaboración propia

ANEXO K. Variación de porcentaje de turbiedad remanente vs. Tiempo de floculación en cada jarra

A continuación, se realiza un análisis de cada una de las concentraciones y se comparan los resultados con las dos velocidades de agitación a las cuales se hicieron las pruebas, como se presenta a continuación:



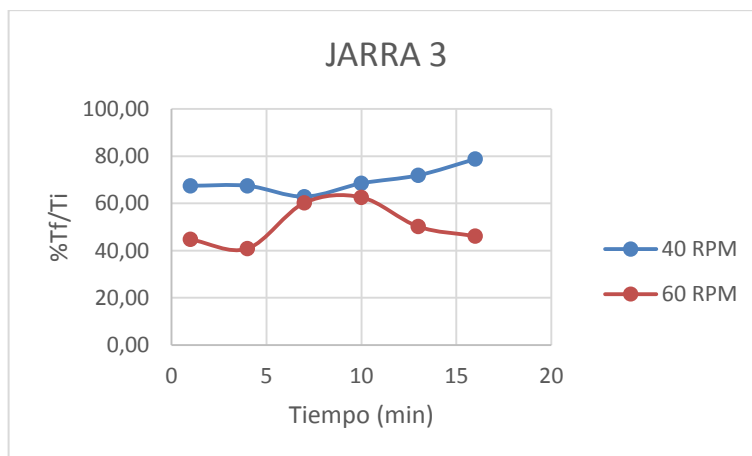
Fuente: elaboración propia

En la figura 14, se analiza la jarra N° 1 con una concentración de 1 g de sulfato de aluminio, comparando las dos velocidades, mostrando una diferencia significativa en el cambio de velocidad de agitación, siendo más eficiente para este caso una baja velocidad de agitación.



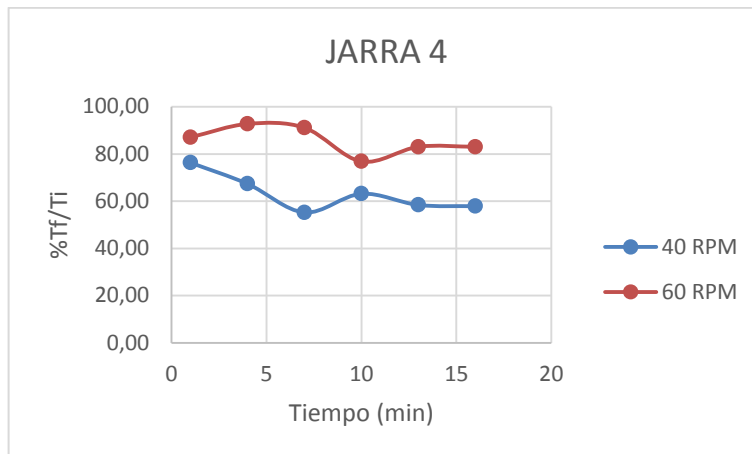
Fuente: elaboración propia

En la figura 15, se observa que el experimento con una concentración de 2 g se comporta de manera constante a través del tiempo de floculación, los resultados permiten afirmar que el agua flocula más fácilmente a bajas velocidades con esta concentración.



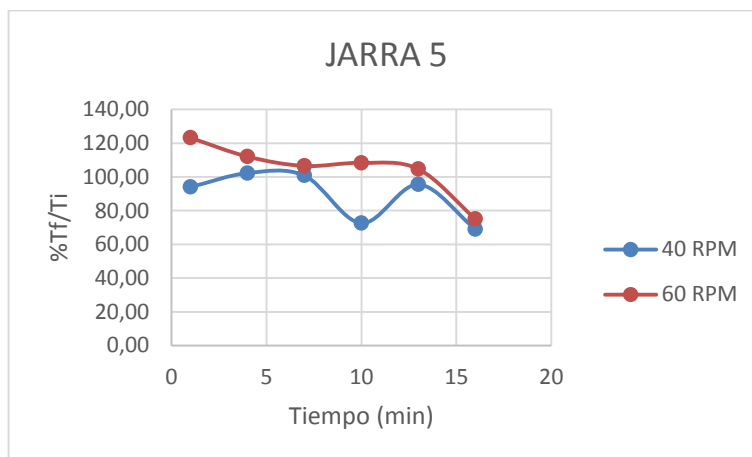
Fuente: elaboración propia

A diferencia de las figuras 14 y 15, en la figura 16, se observa que el agua flocula de forma constante a bajas velocidades de agitación, bajo esta concentración resulta más eficiente operar con una velocidad de agitación mayor.



Fuente: elaboración propia

En la figura 17, se observa el aumento de turbiedad con ambas velocidades de agitación, siendo más eficiente para el proceso una velocidad baja.



Fuente: elaboración propia

En la figura 18, se observa una disminución de la turbiedad remanente a velocidades de agitación bajas, así mismo se puede extraer de la figura que el tiempo óptimo bajo esta concentración de coagulante es a los 10 y 16 minutos.



Fuente: elaboración propia

Para el experimento de 6 g (jarra 6) se puede observar en la figura 19, una disminución de la turbiedad remanente a una velocidad de agitación mayor.