

Improving hydraulic performance in a vertical flocculator at a water treatment plant with the implementation of inclined plates to reduce dead zones.

Francis Yampol Arana Gaitán.¹; Jeiner Paúl Alcántara Ramos ²; María Fernanda Cotrina Bringas³; Fernando Michel Briones Muñoz ⁴; Luis Vásquez Ramírez, Dr ⁵

Escuela Ingeniería Hidráulica Universidad Nacional de Cajamarca, Perú, faranag21_1@unc.edu.pe,
jalcantarar21_1@unc.edu.pe, mcotrinab21_1@unc.edu.pe, fbrionesm21_1@unc.edu.pe, lvasquez@unc.edu.pe

Abstract– T This research addresses the improvement of hydraulic performance in vertical flocculators used in drinking water treatment plants, based on the proposal of incorporating inclined plates to reduce dead zones and optimize floc formation. The study was conducted using the El Milagro treatment plant in Cajamarca, Peru, as a reference. Scaled physical models were constructed using similarity and geometric dynamics criteria. The methodological approach included dimensional analysis using Buckingham's π theorem, considering variables such as flow rate, retention time, viscosity, water density, and turbidity. Hydraulic conditions were also evaluated in different operating scenarios to identify the effect of geometry on the efficiency of the flocculation process. Thus, the research seeks to compare the performance of a conventional vertical flocculator with one modified with inclined plates, providing an analysis that identifies hydraulic advantages and serves as a basis for proposals for improvements in the design of water treatment units in similar contexts.

Keywords - Flocculator, Turbidity, Retention time

Mejoramiento del desempeño hidráulico en el floculador vertical de una planta de tratamiento de agua potable con la implementación de placas inclinadas para la reducción de zonas muertas.

Francis Yampol Arana Gaitán.¹; Jeiner Paúl Alcántara Ramos ²; María Fernanda Cotrina Bringas³; Fernando Michel Briones Muñoz ⁴; Luis Vásquez Ramírez, Dr ⁵
Escuela Ingeniería Hidráulica Universidad Nacional de Cajamarca, Perú, faranag21_1@unc.edu.pe, jalcantarar21_1@unc.edu.pe, mcotrinab21_1@unc.edu.pe, fbrionesm21_1@unc.edu.pe, lvasquez@unc.edu.pe

Resumen– La presente investigación aborda el mejoramiento del desempeño hidráulico en floculadores verticales utilizados en plantas de tratamiento de agua potable, a partir de la propuesta de incorporar placas inclinadas para reducir zonas muertas y optimizar la formación de flóculos. El estudio se desarrolló tomando como referencia la planta de tratamiento El Milagro, en Cajamarca, Perú, por lo cual se construyeron modelos físicos a escala bajo criterios de semejanza geométrica y dinámica. El enfoque metodológico aplicado incluyó el análisis dimensional mediante el teorema de Buckingham π , considerando variables como el caudal, el tiempo de retención, la viscosidad, la densidad del agua y la turbidez. Asimismo, se evaluaron las condiciones hidráulicas en distintos escenarios de operación, con el fin de identificar el efecto de la geometría sobre la eficiencia del proceso de floculación. De esta manera, la investigación busca comparar el funcionamiento de un floculador vertical convencional frente a uno modificado con placas inclinadas, aportando un análisis que permita identificar ventajas hidráulicas y servir de base para propuestas de mejora en el diseño de unidades de tratamiento de agua en contextos similares.

Palabras clave- Floculador, Turbidez, Tiempo de retención

I. INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de agua potable constituye un peldaño importante en el desarrollo de las regiones o países, mejorando la calidad de vida de los habitantes. Hoy en día, el tratamiento de agua potable a tomado presencia dentro de nuestra sociedad para mejorar la calidad del agua con un impacto positivo frente a los aspectos ambientales y sociales. En tal sentido, se requieren procesos para el tratamiento del agua donde la unidad floculadora juega un papel fundamental en el proceso de potabilización del agua. Es por ello, que la floculación según Melo y Herrera [1], destaca dos objetivos básicos, el primero acumular el floc permitiendo que las partículas ganen un peso específico mayor al del agua y el segundo el de compactar el floc para que la sedimentación y filtración sean más efectivas. Hay que destacar que los flóculos son partículas formadas a partir de la aplicación de coagulantes (Sulfato de aluminio) que reaccionan al estar en contacto con el agua generando fuerzas de atracción entre los coloides y el coagulante. De igual forma [2], menciona que su finalidad es proporcionar a la masa de agua coagulada una agitación lenta, aplicando velocidades decrecientes, promoviendo el crecimiento de los flóculos y su conservación, hasta su salida por la unidad. En ese sentido, los

principales factores a tener en cuenta para el diseño del floculador es el gradiente de velocidad, el tiempo de retención y el mecanismo usado para producir la agitación. Asimismo, Villegas y Letterman [3], mencionan que un floculador que realiza un proceso exitoso, cumple con dos parámetros básicos como lo son el tiempo de retención y el gradiente de velocidad, ya que estos dos parámetros aseguran una alta eficiencia en el trabajo que se realiza. Por un lado, según [4] menciona la variación de velocidad que existe entre el ingreso y salida del fluido en el floculador. Cuando mayor sea el gradiente la velocidad aumenta, lo cual puede ocasionar que no exista tiempo suficiente para que el coagulante haga efecto o que se rompan los flóculos formados. Sin embargo, cuando la velocidad de ingreso es similar a la de salida, provocada por un gradiente bajo se genera estancamiento de flocs. Por lo tanto, el gradiente de velocidad es el parámetro más utilizado para expresar la energía aplicada, valores elevados generan mayores pérdidas de energía. Por otro lado, según [5] abarca una manera de calcular el tiempo de retención mediante la prueba de trazadores, donde se coloca un líquido y se mide el tiempo que le toma a este recorrer un circuito. Los trazadores son sustancias que se introducen en un sistema con el fin de estudiar la evolución temporal - espacial de determinado proceso químico, físico, biológico o industrial.

Desde otro punto de vista, [6] nos hace mención que la presencia de partículas suspendidas en el agua se puede medir a través del parámetro denominado turbidez del agua. Su nivel es importante para razones físicas (turbiedad), ya que un valor alto puede ocasionar el rechazo de su uso por parte del consumidor. Además, funciona como un indicador de presencia de materia orgánica y microorganismos que requieren ser tratados por un proceso de desinfección. Para entender el origen [7], señala que está dado por partículas en suspensión denominadas coloides que son: arcillas, limo, tierra fina dividida, etc. Generalmente la eliminación de la turbiedad es un proceso complejo de realizar en una planta de tratamiento debido a que interviene de manera característica en los costos de producción, ya que se manipulan coagulantes, acondicionadores de pH, ayudantes de coagulación, etc. Por ende, [8] considera a la coagulación como el proceso más

importante dentro de la potabilización del agua debido a que remueve entre el 80 y 90% de las partículas coloidales y suspendidas. Es por ello, que radica la importancia del uso de sulfato de aluminio y otros elementos que están cargados positivamente remueven la carga negativa de estas partículas ocasionando su sedimentación. Por otro lado, [9] nos indica que los coloides son sólidos finamente divididos que no sedimentan por la simple acción de la gravedad, pero que pueden ser removidos del agua mediante coagulación, filtración o acción biológica. Además, Son sustancias responsables generalmente de la turbiedad y del color del agua, y su diámetro varía entre 1 – 100 nanómetros (nm).

Diversas investigaciones han sido realizadas frente al tratamiento del agua, destacando algunas investigaciones acerca del proceso de floculación en floculadores verticales, horizontales e incluso floculadores con propuestas innovadoras que mejoran su eficiencia. En tal sentido una primera investigación [10], expresa la teoría de coagulación definiéndola como un proceso de desestabilización química de las cargas eléctricas de partículas coloidales que se encuentran en suspensión, para favorecer su aglomeración; se produce al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado. En otras palabras, es el proceso por el cual se reducen las fuerzas repelentes existentes entre partículas coloidales para formar partículas mayores que precipiten. Los coagulantes químicos neutralizan las fuerzas que los mantienen separados para que estas sean atraídas y formen los flóculos. De igual modo [11], en su investigación evaluaron diversos procesos de tratamiento de aguas residuales para su reutilización en riego agrícola. En particular, analizaron la eficacia de la coagulación-floculación, filtración y ozonización en la remoción de contaminantes como turbidez, sólidos suspendidos totales, color y microorganismos patógenos. Los resultados mostraron que el uso de sulfato de aluminio como coagulante y la filtración con arena sílice, combinados con una dosis adecuada de ozono, fueron efectivos para alcanzar los estándares internacionales de calidad para el agua utilizada en riego. Por lo tanto, subraya la importancia de la ozonización en la eliminación de coliformes fecales y huevos de helmintos, lo que asegura que el agua tratada sea segura para la agricultura. Por su parte Álvarez Callupe y Díaz Urrutia [12], se centraron en evaluar el efecto de las variables hidráulicas en un floculador de placas perforadas, desarrollada en la Universidad Ricardo Palma (Perú). Se llevó a cabo un estudio experimental a escala piloto con un floculador de placas perforadas, en ello se analizaron los efectos del gradiente de velocidad (G) en el rango de 18 a 36 s⁻¹, el tiempo de retención hidráulico (TR) entre 12 y 24 minutos, así como las relaciones geométricas y el coeficiente de descarga del sistema. Se empleó como coagulante el sulfato de aluminio y agua sintética, la cual simula la fuente superficial con turbiedad de 25 NTU. Finalmente, los resultados indican que el floculador muestra un rendimiento destacable cuando opera bajo condiciones hidráulicas bien controladas con una eficiencia de remoción de turbidez superior

al 70 %, lo cual sustenta la viabilidad de esta tecnología para sistemas de tratamiento de agua compactos. En este contexto, [13] demuestra que pequeñas modificaciones en la geometría del floculador pueden mejorar significativamente su rendimiento. A través de algoritmos de optimización, se logró aumentar la eficiencia de remoción de partículas suspendidas en aguas con alta variabilidad en su calidad, en de zonas rurales. La optimización del diseño no solo mejora la coagulación y floculación, sino que también reduce los costos operativos, lo cual es crucial para plantas en áreas con recursos limitados. Este estudio subraya cómo la ingeniería aplicada al diseño de equipos puede transformar la eficiencia de un sistema de tratamiento. Una nueva investigación desarrollada por [14], muestra el estudio del floculador hidráulico de flujo vertical el cual aporta una perspectiva interesante al mostrarlo especialmente eficaz para tratar aguas con altos niveles de sólidos suspendidos. En este caso, el estudio indica que el diseño de flujo vertical permite una mejor distribución del fluido, lo que favorece la sedimentación de los sólidos y mejora la eficiencia de la floculación. Además, evidencia que este tipo de floculador ha demostrado ser particularmente útil en plantas de tratamiento de mayor capacidad, donde se procesan grandes volúmenes de agua. En tal sentido, la configuración de flujo vertical mejora la eficiencia operativa al reducir la huella espacial de las instalaciones y optimizar el proceso de floculación. En definitiva, se convierte en una opción viable para plantas en expansión o con limitaciones de espacio. Por otro lado, según el estudio realizado en la planta de tratamiento de agua potable "La Esperanza" [15], menciona que su floculador horizontal ha demostrado ser altamente eficiente en la remoción de turbidez, lo cual es clave para asegurar que el agua tratada cumpla con los estándares de calidad exigidos. Para este caso, el floculador de flujo horizontal ha mostrado una gran efectividad al distribuir de manera homogénea el agua durante el proceso de coagulación y floculación. Este tipo de floculador facilita la formación de flóculos más grandes y pesados que sedimentan rápidamente, mejorando la eficiencia del tratamiento. Los resultados refuerzan la importancia de un diseño adecuado en el proceso de floculación, ya que una correcta distribución del flujo puede hacer una gran diferencia en la calidad del agua tratada.

De igual manera, Romero Rojas [16], en su investigación acerca de floculadores hidráulicos de flujo horizontal, llevó a cabo un análisis exhaustivo de las pérdidas de energía dentro de estos sistemas, evaluando cómo el flujo de agua y los parámetros operativos influyen en la eficiencia del proceso de floculación. A través de pruebas experimentales, se compararon las pérdidas de energía observadas en el floculador con las predicciones realizadas mediante las ecuaciones de diseño, lo que permitió identificar discrepancias y optimizar las condiciones de operación. Este estudio es fundamental para mejorar el rendimiento de los floculadores en el tratamiento de agua potable, ya que proporciona perspectivas sobre cómo minimizar

las pérdidas energéticas y, por ende, incrementar la eficiencia global del proceso.

Por su parte [17], en su investigación afirma sobre la remoción de turbidez del agua del Canal El Progreso mediante la coagulación floculación con almidón de plátano y yuca, descubrieron que ambos almidones naturales, combinados con sulfato de aluminio, demostraron una alta eficacia para reducir la turbidez del agua. Los resultados mostraron una remoción máxima de turbidez del 99.75% al usar sulfato de aluminio y almidón de plátano, y del 99.50% al utilizar sulfato de aluminio con almidón de yuca. Esto evidenció que los almidones naturales son una alternativa efectiva y ambientalmente amigable para tratar aguas turbias, destacándose por su bajo costo y alta biodegradabilidad.

La investigación [18], realizó un estudio sobre el tratamiento de aguas residuales en el camal Conchucos, descubrieron que la electrocoagulación mostró una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes en comparación con el proceso de coagulación/floculación. Los resultados indicaron que la electrocoagulación logró reducir significativamente la demanda química de oxígeno (DQO) en las aguas residuales, alcanzando niveles que cumplieron con los valores máximos admisibles para el vertimiento en el sistema de alcantarillado. Esto demuestra que la electrocoagulación es una opción efectiva para el tratamiento de aguas residuales industriales en camales, contribuyendo a la mejora de la calidad del agua y el cumplimiento de las normativas ambientales.

Del mismo modo, [19] desarrolló la investigación en la planta de tratamiento de Bayas (Azogues, Ecuador) demuestra que la optimización geométrica de los floculadores helicoidales mediante el ajuste de diámetros y longitudes de tubería es determinante para la eficiencia del proceso. Los resultados indican que el sistema es altamente sensible a las variaciones de flujo, donde para un caudal bajo de 0.25 l/s se alcanza un tiempo de retención óptimo de 30 min (evitando la sedimentación interna en los tubos de PEAD), para un caudal de 2 l/s el tiempo se reduce drásticamente a 3.74 min, valor insuficiente para la acción del coagulante. En términos de eficiencia hidráulica, el modelo alcanzó un rendimiento máximo del 97.74% para un caudal de 0.75 l/s, seguido de un 95.83% (1 l/s), 88.37% (0.25 l/s), 81.52% (2 l/s) y un mínimo de 59.13% (0.5 l/s). En conclusión, esta configuración no solo mejora la separación sólido-líquido, sino que asegura la integridad del floc al reducir las pérdidas de presión entre el ingreso y la salida del sistema. Igualmente, [20] desarrolló el estudio en la planta de tratamiento de Bayas, donde demuestra que el uso de tuberías de PVC es una alternativa económica y compacta frente a las estructuras tradicionales, siendo el floculador horizontal más eficiente que el vertical según la modelación en WaterCAD. Para optimizar el sistema ante variaciones de flujo, se determinó que en la configuración horizontal el caudal de 0.25 l/s requiere la implementación de una tubería de 63 mm y 70 m de longitud, mientras que para 2 l/s es necesario extender la tubería de 110 mm en 53.3 m. Por otro lado, los floculadores

verticales presentaron deficiencias críticas, como presiones negativas en caudales de 1 y 2 l/s que impiden el flujo; para corregirlo, se propone descartar el uso de la tubería de 63 mm en caudales altos y realizar extensiones de 21.4 m (en 63 mm) para el caudal de 0.5 l/s y de 69.2 m (en 110 mm) para cubrir la demanda de 2 l/s, garantizando así el cumplimiento de los gradientes de velocidad y tiempos de retención normados. La investigación [21], realiza un análisis comparativo sobre la eficiencia de remoción de la turbidez entre un floculador de placas inclinadas y convencionales realizada en la Universidad Nacional Agraria, La Molina. Se implementó un sistema piloto de floculación con placas inclinadas de 60° para su comparación con un floculador convencional de cámara única. Los ensayos fueron realizados con agua de alta turbidez (300 NTU), donde se midió la formación de flóculos, consumo del coagulante y el tiempo de retención. De esta manera, los floculadores de placas inclinadas aumentaron la superficie de contacto y aceleraron la formación de flóculos estables, reduciendo el tiempo de retención necesario. Por ello, se alcanzó una eficiencia de remoción de turbidez del 95% en 15 minutos, frente al 90% en 25 minutos del sistema convencional, con una reducción del 12% en el uso de coagulante.

El proceso de tratamiento del agua potable en nuestros días es fundamental para garantizar el acceso a un recurso seguro y de calidad para la población. De esta manera, se plantea como objetivo evaluar la eficiencia entre un floculador vertical con la propuesta de un floculador con placas inclinadas. Para ello, se desarrollará el diseño de dos modelos físicos a escala (1:20) para la evaluación de la eficiencia del floculador vertical de la planta de tratamiento el Milagro con la propuesta establecida (Floculador con placas inclinadas), con ello se evitará la formación de zonas muertas en los cambios de dirección para la formación de flóculos. Por tal motivo, se podrá comparar la reducción de turbidez en el análisis respectivo de la eficiencia. A través de análisis dimensional (Teorema Pi de Buckingham), nos ayudara a correlacionarlas las variables establecidas frente al modelo desarrollado. Estas variables son el caudal, el tiempo de retención, la viscosidad dinámica, la densidad del fluido y la turbidez del agua (NTU) las cuales generaran valores pi para el análisis.

La importancia de nuestro modelo hidráulico basado en el uso de placas inclinadas radica en su capacidad para mejorar la formación de flóculos durante el recorrido del fluido, optimizando el tiempo de retención y reduciendo la turbidez. Este último es el parámetro esencial en el análisis de la calidad del agua según los límites máximos permisibles (LMP) y los estándares de calidad ambiental (ECA). Este modelo busca no solo cumplir con los requisitos técnicos para un tratamiento eficiente, sino también mejorar la calidad del agua que consume una gran parte de la población cajamarquina, garantizando un agua más limpia y segura. Al reducir la turbidez de manera más efectiva, el sistema contribuiría significativamente a la salud pública y al bienestar de la comunidad, asegurando un recurso hídrico adecuado y de calidad.

De manera general, los diseños de los floculadores forman parte esencial del proceso de tratamiento de agua potable, esta unidad floculadora ofrecen ventajas en plantas de mayor capacidad, especialmente cuando manejan volúmenes grandes de agua con alta concentración de sólidos. Los floculadores cuando se optimizan adecuadamente, pueden mejorar considerablemente la calidad del agua tratada, reducir los costos operativos y en última instancia, hacer que el proceso de tratamiento sea más sostenible y eficiente a largo plazo.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se centra en reducir las zonas muertas y mejorar el rendimiento hidráulico en los floculadores. A través de la mejora de las condiciones hidráulicas que influyen en la formación de flóculos, se producirá la reducción de la turbiedad en el agua desde la entrada a la salida de la unidad floculadora. La presente investigación es de tipo experimental, ya que se manipulan variables independientes que influyen directamente en las dependientes. En tal sentido, al realizar un modelo se requiere conocer todas las variables que influyen directamente y las condiciones en las que trabaja, para acercarnos a la realidad. De tal forma, el modelo escalado debe de cumplir obligatoriamente la semejanza geométrica, dinámica y cinemática para obtener datos consistentes. Se adopta un enfoque cuantitativo, ya que se recopilan y analizan datos numéricos para verificar si existe un porcentaje de reducción de zonas muertas en el floculador con placas inclinadas. Asimismo, el nivel de la investigación es correlacional pues pretende determinar a través del análisis dimensional, con el teorema de Pi, la relación existente entre las variables dependientes y las independientes. Incluso, el análisis dimensional juega un papel fundamental en la obtención de los resultados para correlacionar las variables y obtener una ecuación.

El funcionamiento de la unidad floculadora va a depender del caudal de ingreso, ya que este influye en el tiempo de retención para la formación de flocs. De esta manera, su ejecución se basó en trabajo de gabinete el cual busca analizar el comportamiento hidráulico de los floculadores, realizados a escala, en la reducción de la turbiedad. Se dosifico el coagulante (sulfato de aluminio), para ingresarla a la muestra inicial donde se producirá la mezcla rápida, para luego ingresar a la mezcla lenta. El floculador con placas inclinadas y floculador vertical tendrán un funcionamiento simultaneo para analizar el porcentaje de reducción de la turbidez. En vista de ello, las pruebas se realizaron con 4 muestras de agua con sedimentos y variando el caudal, con la finalidad de verificar el comportamiento y comparar la turbiedad del agua a través de las unidades nefelométricas (NTU).

El modelo contempla la inclinación de placas a 60° colocados en una unidad floculadora para analizar su eficiencia. De tal modo, se empleó fibra de acrílico para la construcción del modelo (floculador vertical y floculador con placas inclinadas) para brindar una mejor visualización en el comportamiento hidráulico. De igual modo, se empleó el coagulante de sulfato

de aluminio y el agua destilada como componentes en el tratamiento del agua. Incluso, se utilizó instrumentos de medición como el turbidímetro que ayudaran a registrar las unidades nefelométricas de las muestras de agua para cada floculador. Cabe destacar, que el turbidímetro fue el ente principal para el análisis y comparación de las muestras obtenidas de los floculadores.

La investigación fue planteada en seis etapas, el cual se fundamenta en la neutralización de las partículas suspendidas del agua (impurezas) a través de iones con carga positiva (coagulantes).

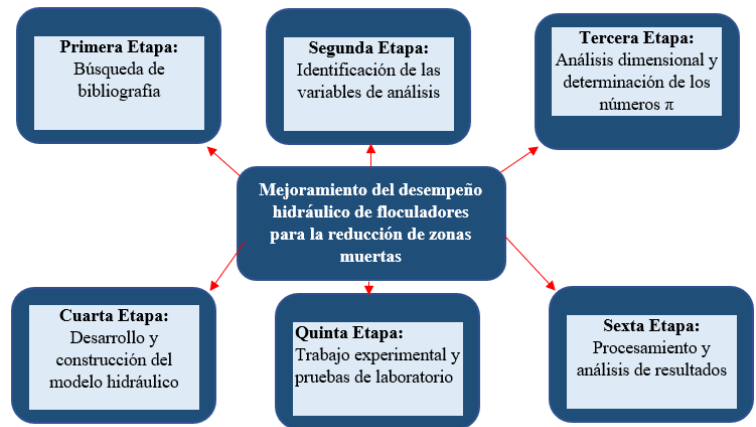


Fig. 1 Etapas del desarrollo de la investigación.

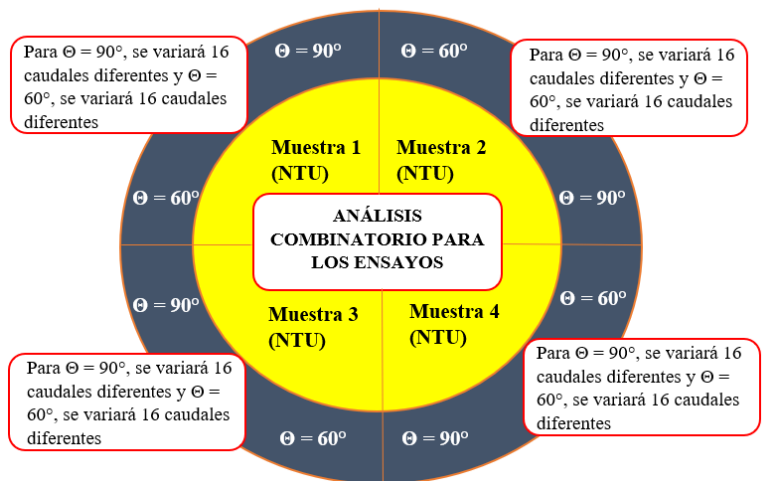


Fig. 2 Análisis combinatorio de las pruebas a realizar

Primera etapa: Búsqueda de bibliografía

En esta etapa se recopila y revisa información científica, técnica y normativa relacionada con el fenómeno hidráulico a estudiar. La bibliografía incluye libros, artículos, normas de diseño, investigaciones previas y experiencias de laboratorio, lo cual permite establecer un marco teórico sólido y conocer los avances existentes. Este proceso es fundamental para orientar el estudio, identificar vacíos de investigación y definir los criterios metodológicos adecuados.

Segunda etapa: Identificación de variables de análisis

A partir de la revisión bibliográfica, se procede a determinar las variables que intervienen en el problema. Estas pueden clasificarse en variables independientes (que se controlan en el estudio), dependientes (que resultan como respuesta del sistema) y de control (que permanecen constantes). En el caso de un modelo hidráulico, suelen incluirse parámetros geométricos, hidrodinámicos y físicos, tales como caudal, velocidad, pendiente, altura de flujo, fuerzas actuantes o características del material.

Tercera etapa: Análisis dimensional y determinación de los números π

Con las variables identificadas, se aplica el análisis dimensional mediante el teorema de Buckingham, a fin de obtener relaciones adimensionales que gobiernan el fenómeno. El resultado son los números π , que permiten establecer criterios de similitud entre el modelo y el prototipo. Esta etapa es clave para definir cómo se debe escalar el modelo y cuáles son los parámetros relevantes que deben mantenerse en correspondencia.

Cuarta etapa: Desarrollo y construcción del modelo hidráulico

Con los criterios de similitud definidos, se procede al diseño y construcción del modelo hidráulico, que puede ser físico (en laboratorio) o numérico (simulación computacional). En el caso de los modelos físicos, se consideran aspectos como la escala geométrica, los materiales a utilizar y la instrumentación requerida. El objetivo es que el modelo represente fielmente el comportamiento del prototipo las cuales están basadas en la similitud geométrica, cinemática y dinámica, teniendo en consideración las limitaciones técnicas y económicas.

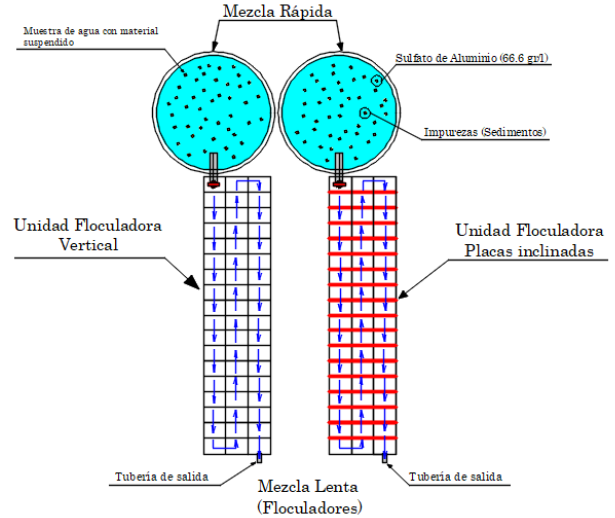


Fig. 3 Partes del modelo del floculador.

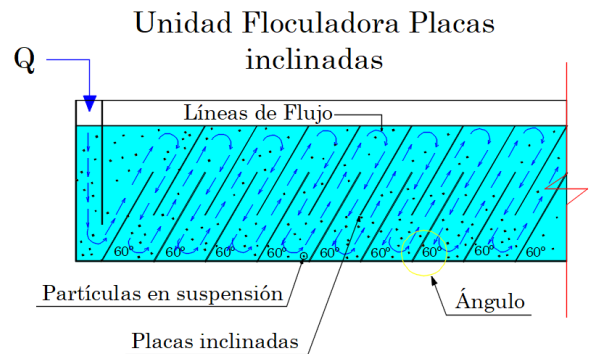


Fig. 4 Modelo del floculador de placas inclinadas ($\theta = 60^\circ$)

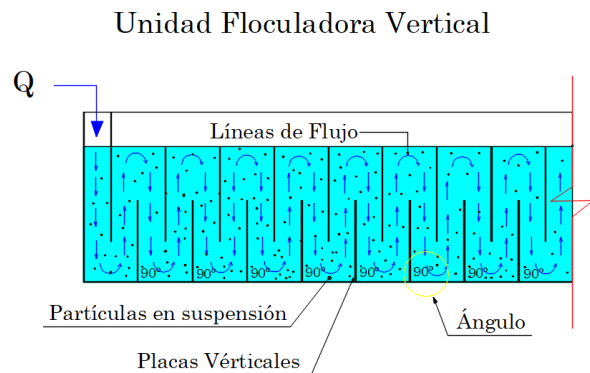


Fig. 5 Modelo del floculador de placas verticales ($\theta = 90^\circ$)

Quinta etapa: Trabajo experimental y pruebas de laboratorio

Una vez construido el modelo, se realizan los ensayos experimentales bajo diferentes condiciones de operación. En esta fase se registra la información de variables como las unidades nefelométricas (NTU) del líquido en estudio, tiempo de retención, velocidades, caudal, etc. Las pruebas permiten observar el comportamiento hidráulico en condiciones controladas y reproducibles, generando datos confiables para su posterior análisis.

Sexta etapa: Procesamiento y análisis de resultados

En esta etapa se llevó a cabo la organización, tratamiento y análisis de los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio y simulación. Los valores registrados de caudal y tiempo fueron procesados aplicando las relaciones matemáticas establecidas previamente, teniendo en cuenta principalmente la ecuación de continuidad. El procesamiento consistió en la comparación de la eficiencia hidráulica entre un floculador vertical con placas inclinadas y otro con placas horizontales, a fin de determinar cuál de los dos diseños presenta un mejor desempeño en la formación y decantación de flóculos. La formulación teórica para esta investigación inicia a partir del teorema de Buckingham π , que constituye la base para reducir las variables dimensionales a un conjunto de relaciones adimensionales.

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n) \quad (1)$$

Donde, se debe conocer que π_1 es la variable dependiente, y $(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n)$ las variables independientes. Con base en este análisis, la construcción de los modelos físicos se sustentó en la teoría de similitudes. En primer lugar, se aplicó la similitud geométrica, dimensionando las medidas del floculador a una escala de 1:20 respecto al prototipo real.

$$L_m = \frac{L_p}{\lambda} \quad (2)$$

Donde, se debe conocer que L_m es la longitud del modelo, L_p es la longitud del prototipo y λ es la escala. Posteriormente, para la escala del caudal se recurrió a la similitud dinámica bajo el criterio del número de Reynolds, dado que este parámetro permitió mantener la correspondencia entre el régimen de flujo del modelo y el del floculador real.

$$Q_m = \frac{Q_p}{\lambda} \quad (3)$$

Donde, se debe conocer que Q_m es el caudal del modelo, Q_p es el caudal prototipo y λ es la escala.

Una vez definido el caudal del modelo a partir de la similitud de Reynolds, también se aplicará el mismo criterio para hallar nuestro tiempo de retención de nuestro modelo

$$T_{rm} = \frac{T_{rp}}{\lambda^2} \quad (4)$$

Donde, se debe conocer que T_{rm} es el tiempo de retención del modelo, T_{rp} es el tiempo de retención del prototipo y λ es la escala.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La zona de estudio se encuentra ubicada en Cajamarca, Perú, tomando como referencia la planta de tratamiento El Milagro, que capta agua del río Grande y Porcón, la cual opera con un caudal de diseño de 150 l/s. Este valor fue considerado como base para el análisis experimental, a fin de garantizar que las condiciones del modelo físico mantuvieran coherencia con el prototipo real. En este marco, se parte del floculador existente en la PTAP, diseñado con placas verticales convencionales, cuya eficiencia puede verse limitada por la formación de zonas muertas y una menor homogeneidad en el proceso de floculación. Como propuesta de mejora, la presente investigación plantea la implementación de un floculador con placas verticales inclinadas, con el objetivo de incrementar la eficiencia hidráulica y optimizar la retención de partículas. De esta manera, el análisis experimental busca comparar ambos sistemas, el convencional y el modificado. La finalidad es demostrar los beneficios de la propuesta y aportar un diseño optimizado que pueda ser replicado en plantas de tratamiento similares de la región.

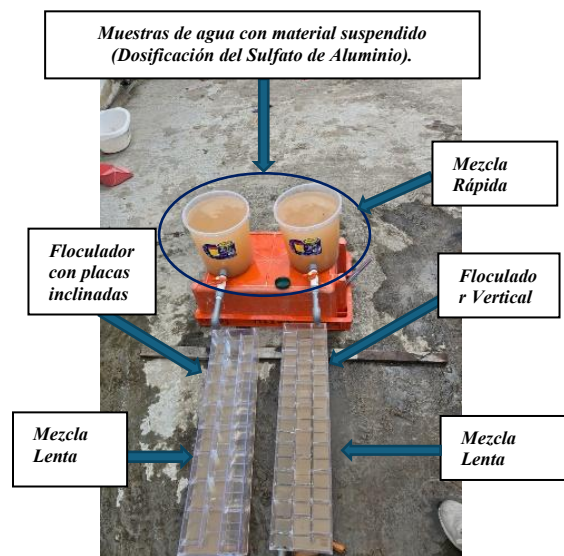


Fig. 6 Modelo físico del floculador de la planta de tratamiento el milagro, escala 1:20

Como es posible visualizar en la Fig. 6, se observa a lado derecho el modelo del floculador con placas verticales y al lado izquierdo el floculador con placas inclinadas. Ambos fueron

analizados en funcionamiento simultaneo con la finalidad de determinar porcentaje de reducción de la turbiedad del agua al recorrer todo el sistema en ambos floculadores. Se pone en evidencia que, al aplicar el sulfato de aluminio, inicialmente para la mezcla rápida y su posterior mezcla lenta (comparticiones del floculador), reacciona con las impurezas presentes en el agua influyendo en la minimización de la turbidez. Cabe resaltar, la actuación del sulfato de aluminio desestabiliza las partículas coloidales haciendo que están sedimenten y formen los flóculos.

En ese sentido, se tuvo como referencia el caudal de ingreso de la planta de tratamiento de agua potable de 150 l/s para ser escalado por la semejanza de Reynols. La cual, estableció un rango de caudales entre 0.039 l/s y 0.186 l/s para realizar el trabajo experimental, donde se varió el caudal de ingreso para cuatro muestras diferentes y registrar la turbidez para cada una de ellas.

Las variables en juego para el modelamiento fueron el caudal, el tiempo de retención, ángulo del floculador, viscosidad dinámica, densidad de la muestra de agua y las unidades nefelométricas como variable principal para el análisis de la reducción de la turbidez.

TABLA I
VARIABLES DE ANÁLISIS PARA EL MODELO
DESARROLLADO

Variables	Símbolo	Unidad	Dimensión	M	L	T
Unidades Nefelométricas	NTU	Adimensional	1	0	0	0
Angulo de inclinación	θ	Adimensional	1	0	0	0
Caudal	Q	m3/s	L^3T^{-1}	0	3	-1
Viscosidad dinámica	u	kg/m*s	$ML^{-1}T^{-1}$	1	-1	-1
Densidad del fluido	ρ	kg/m3	ML^{-3}	1	-3	0
Tiempo de retención	t r	t	T	0	0	1

En la tabla I, se muestra las variables para realizar el análisis dimensional aplicando el teorema de Buckingham π , donde se obtubo 2 parámetros adimensionales que estaran en juego para la correlación de todas las variables influyentes en el modelo realizado y obtener una gráfica. Es decir, existen dos variables adimensionales, las unidades nefelométricas y el ángulo de inclinación, el cual influye en la obtención de los valor pi.

Los ensayos para el modelo físico fueron desarrollados variando los caudales en un rango de 0.039 l/s y 0.186 l/s, basados en el caudal de referencia de la plata de tratamiento, con un valor de 150 l/s, en la escala de 1:20. Se analizaron cuatro muestras de agua, con un total de 128 ensayos experimentales registrados del modelos físico. Con ello se podra encontrar el porcentaje de reducción de turbidez y la eficiencia de cada unidad floculadora, frente al análisis del comportamiento hidráulico en cada floculador.

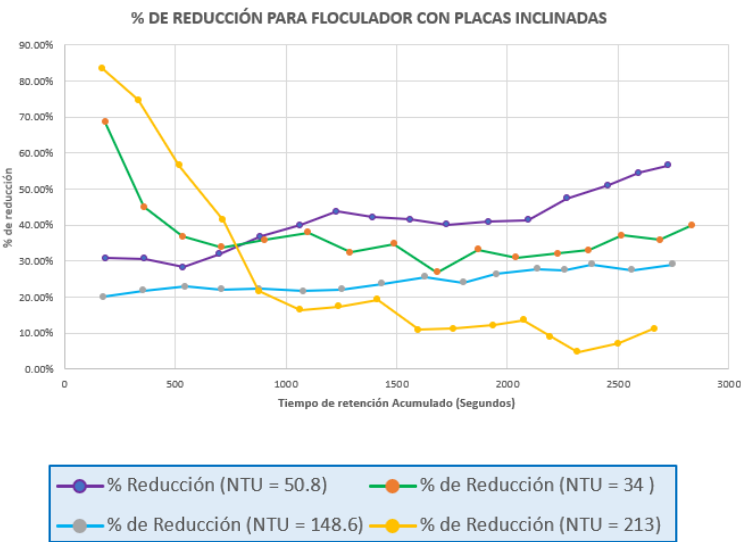


Fig. 7 Gráfica del porcentaje de reducción con respecto del tiempo acumulado para floculador con placas inclinadas.

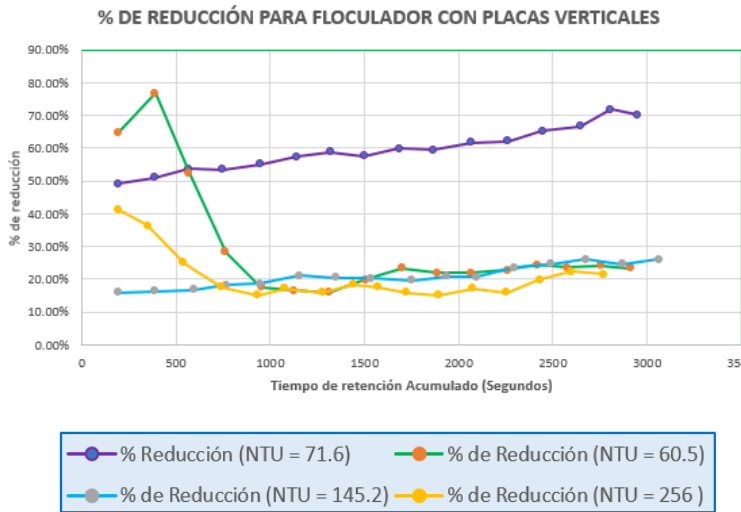


Fig. 8 Gráfica del porcentaje de reducción con respecto del tiempo acumulado para floculador vertical.

En la Fig. 7 y la Fig. 8. Los resultados generados indican que existe porcentaje de reducción para cada una de las unidades floculadoras. En la primera muestra, la turbiedad inicial en el floculador con placas inclinadas fue de 50.8 NTU y 71.6 NTU para el floculador vertical, existio un porcentaje de reducción del 41.032 % y el 59.427 %, respectivamente. El cual indica que para esta primera prueba el floculador vertical tubo resultados significativos. Para la segunda muestra, la turbiedad inicial fue de 34 NTU para el floculador con placas inclinadas y 60.5 NTU para el floculador vertical, existio un porcentaje de reducción del 37.166 % y el 29.101 %, respectivamente. El cual muestra que el floculador con placas inclinadas tuvo buenos resultados.

Para la tercera muestra, la turbiedad inicial fue de 213 NTU para el floculador con placas inclinadas y 256 NTU para el floculador vertical, existió un porcentaje de reducción del 25.120 % y el 20.588 %, respectivamente. Finalmente, la cuarta muestra se registro una turbiedad inicial fue de 148.6 NTU para el floculador con placas inclinadas y 145.2 NTU para el floculador vertical, existió un porcentaje de reducción del 23.241 % y el 19.390 %, respectivamente. En las dos ultimas muestras presentadas, se obtuvo que el floculador con placas inclinadas tuvo buenos resultados. En conclusión, la configuración hidráulica del floculador con placas, reduce la turbiedad del agua a comparación del floculador vertical. Sin embargo, de las cuatro muestras de agua analizadas solo en tres se evidencia el aumento de su eficiencia en un 8.07%, 4.53% y 3.85% respectivamente, lo cual es inferior al 50%. De esta manera podemos validar la hipótesis planteada, la reducción de zonas muertas y la disminución de turbidez del agua en un floculador con placas inclinadas.

TABLA II

PORCENTAJES DE EFICIENCIAS PARA FLOCULADOR VERTICAL CON EL FLOCULADOR CON PLACAS INCLINADAS

TABLA RESUMEN DE DATOS REGISTRADOS					
Floculador		NTU (Inicial)	NTU (Promedio final)	% Reducción	Floculador Eficiente
Placas inclinadas	MUESTRA 1	50.8	29.96	41.03%	Vertical
Vertical		71.6	29.05	59.43%	
Placas inclinadas	MUESTRA 2	34	21.36	37.17%	Placas Inclinadas
Vertical		60.5	42.89	29.10%	
Placas inclinadas	MUESTRA 3	213	159.49	25.12%	Placas Inclinadas
Vertical		256	203.29	20.59%	
Placas inclinadas	MUESTRA 4	148.6	114.06	23.24%	Placas inclinadas
Vertical		145.2	117.05	19.39%	

En la tabla II, se observa el análisis respectivo para cada muestra de análisis dependiendo si es un floculador vertical o un floculador con placas inclinadas. En ese sentido, se pudo demostrar que el floculador con placas inclinadas ha evidenciado resultados óptimos, ya que se presenta un porcentaje de aumento en la eficiencia del floculador vertical. Además, se puede observar que para la muestra 1, el floculador vertical tiene mayor eficiencia a diferencia de las muestras 2, 3 y 4, para el floculador de placas inclinadas.

En relacion a los resultados obtenidos, se puede notar que el sistema con placas inclinadas mostro un mejor comportamiento en tres de las cuatro pruebas, aunque la diferencia de eficiencia no fue tan marcada como se esperaba en un inicio. Por ello, Melo y Herrera señala [1], que la principal funcion de la unidad floculadora es permitir que las particulas se agrupen de manera estable, lo cual se ve favorecido cuando se logra reducir la presencia de zonas muertas. En nuestro caso, la geometría inclinada genero un flujo mas uniforme, sin embargo, el efecto positivo no fue tan alto en todos los escenarios, lo cual deja

abierta la posibilidad de que el angulo de inclinacion empleado no haya sido el optimo.

Comparando con lo descrito por Villegas y Letterman [3], quienes destacan que el tiempo de retención y el gradiente de velocidad son los parámetros que definen la eficiencia de un floculador, se aprecia que las placas inclinadas modifican directamente esos factores. Esto se reflejó en que, pese a turbiedades iniciales muy distintas (por ejemplo, 34 NTU y 213 NTU), el floculador inclinado logro porcentajes de reducción superiores al convencional en la mayoría de casos. No obstante, tal como menciona [4], un gradiente de velocidad demasiado bajo puede limitar la formación de flóculos, mientras que uno muy alto podría romperlos. Esto explica porque en la primera prueba el sistema vertical alcanzo un resultado más favorable que el inclinado.

De manera similar, Álvarez Callupe y Díaz Urrutia [12] encontraron que pequeñas modificaciones en la geometría de los floculadores, en su caso placas perforadas, generan mejoras significativas en la reducción de turbidez. Aunque la tendencia de nuestro estudio coincide con esa observación, los porcentajes de mejora fueron menores. Cabe suponer que esto se debe tanto a la variabilidad en la turbiedad inicial como al tipo de agua ensayada, pues en investigaciones como la de [21] con placas inclinadas a 60°, se reportaron eficiencias mayores al 90%, mientras que en el estudio la máxima reducción no paso el 50%. Estas diferencias muestran que las condiciones hidráulicas y operación son determinantes. Además, el ángulo de inclinación debería ser analizado más a detalle en futuros ensayos.

Por otro lado, según lo planteado por Romero Rojas [16], los floculadores hidráulicos presentan ventajas frente a los mecánicos por su bajo costo y menor perdida de energía, siendo una alternativa más viable en plantas pequeñas o rurales. Bajo esa misma línea, la propuesta de placas inclinadas mantiene esas ventajas, dado que no requiere energía adicional para su funcionamiento y aun así presenta mejoras, aunque moderadas. Esto coincide también con lo señalado por [18], quienes resaltan que los sistemas simples, de bajo mantenimiento y confiables son los más adecuados para comunidades que no cuentan con recursos elevados.

En definitiva, los resultados permiten reafirmar lo mencionado por [13], que indica que una optimización geométrica en el diseño puede mejorar la eficiencia global del proceso, así como reducir los costos operativos en el largo plazo. Aunque la mejora observada en este estudio fue de apenas entre 3 % y 8%, trasladada a una planta real con un caudal de 150 l/s, podría representar una disminución considerable de solidos suspendidos y, en consecuencia, una carga menor en las etapas de sedimentación y filtración. Por ello, aun cuando el incremento en eficiencia no sea muy elevado, la propuesta constituye un avance técnico aplicable y replicable en otras plantas de la región.

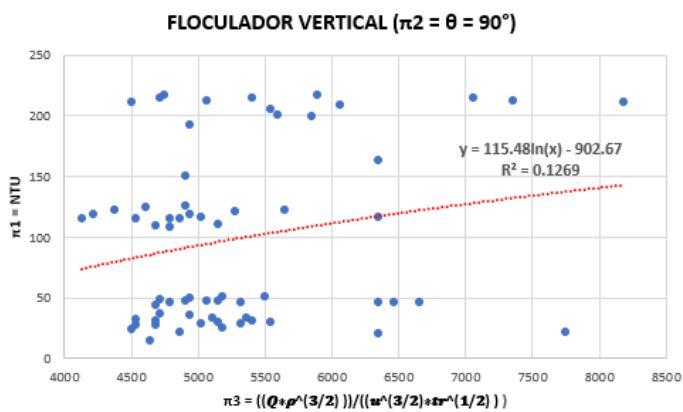


Fig. 9 Gráfica de floculador vertical con los parámetros adimensionales.

En la Fig. 9 se muestra la gráfica de los parámetros adimensionales correlacionados a partir del análisis dimensional. Por un lado, en el eje de las ordenadas se encuentra el parámetro, $\pi_3 = (Q * \rho^3) / (u^3 * tr^1)$, donde (Q) representa al caudal, (ρ) representa la densidad del agua, (u) representa a la viscosidad dinámica y (tr) es el valor del tiempo de retención. Por otro lado, en el eje de las abscisas se encuentra, $\pi_1 = NTU$ y finalmente el $\pi_2 = 90^\circ$, el cual por ser constante para cada prueba se considera dentro de la gráfica. Se puede observar que el (R^2) es de 0.1269 indicando una correlación baja.

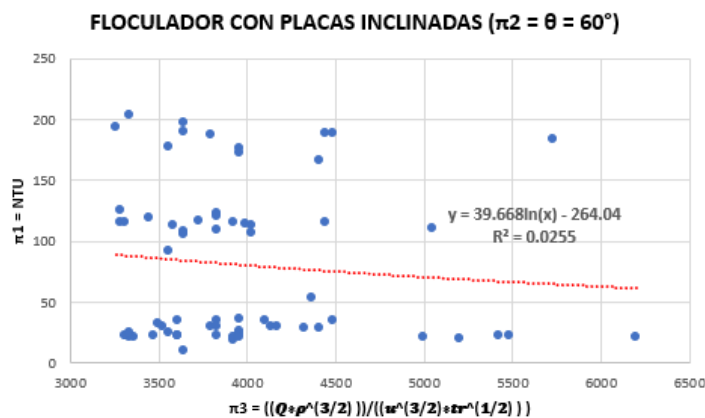


Fig. 10 Gráfica del floculador con placas inclinadas con los parámetros adimensionales.

En la Fig. 10 se muestra la gráfica de los parámetros adimensionales correlacionados a partir del análisis dimensional. Se tiene el en las ordenadas el parámetro, $\pi_3 = (Q * \rho^3) / (u^3 * tr^1)$, donde (Q) representa al caudal, (ρ) representa la densidad del agua, (u) representa a la viscosidad dinámica y (tr) es el valor del tiempo de retención. Por otro lado, en el eje de las abscisas se encuentra, $\pi_1 = NTU$ y finalmente el $\pi_2 = 60^\circ$, el cual por ser constante para cada prueba se considera dentro de la gráfica. Se puede observar que el (R^2) es de 0.0255 indicando una correlación baja.

Se aplicó regresión lineal, donde los resultados muestran que tanto el modelo lineal múltiple como el modelo potencial múltiple presentan una capacidad muy limitada para explicar la variabilidad de la variable dependiente. En ambos casos, los coeficientes de determinación (R^2) son menores al 3%, lo que indica la existencia de baja correlación en el modelo desarrollado.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de este trabajo permitió evaluar y comparar el comportamiento de dos tipos de floculadores, el primero con placas verticales que existe en la planta y una propuesta de mejora que consistió en modificar las placas a una disposición inclinada. Durante las pruebas realizadas se pudo observar que ambos modelos lograron reducir la turbidez inicial, aunque con resultados distintos dependiendo de cada muestra. En el caso de la muestra 1 el floculador de placas verticales mostró una mejor eficiencia con valores cercanos al 59 %, mientras que en las demás muestras se evidenció un mejor comportamiento del floculador con placas inclinadas, lo que indica que la inclinación favorece en cierta manera la retención de partículas y la circulación del agua dentro del sistema.

En conclusión, los niveles de eficiencia obtenidos aumentan en pequeña escala, el máximo alcanzado fue de 8.07 % en la mejor condición. Por ello, el ensayo permitió comprobar que la propuesta tiene fundamento y que la inclinación de las placas aporta beneficios frente al diseño convencional y en la reducción de zonas muertas. Estos resultados también muestran que la eficiencia puede variar bastante en función de las características del agua, ya que en algunos casos la reducción de turbidez fue baja pese a contar con las mismas condiciones de operación. A partir de estos resultados se considera que el modelo de placas inclinadas representa una alternativa interesante para mejorar el funcionamiento de los floculadores y reducir las zonas muertas. Sin embargo, todavía necesita ser optimizado, por ello es necesario continuar con más pruebas, quizá ajustando el ángulo de inclinación o el espaciamiento entre placas, para poder alcanzar rendimientos más altos y estables. Además, resultaría útil realizar ensayos adicionales con otras características de agua, evaluando no solo la turbidez sino también sólidos suspendidos, color y otros parámetros de calidad. Finalmente, llevar esta propuesta a una escala piloto en la propia planta podría ayudar a verificar de manera más realista si la modificación es aplicable en condiciones de operación continua. Sin embargo, la construcción de floculadores mejoran el tratamiento del agua, pero si se quiere la construcción de un floculador con placas inclinadas aumentaría el costo en la construcción, ya que estas placas tienen una inclinación de 60° y es mas difícil trabajarlo. Sabemos que existe un pequeño porcentaje de aumento en su eficiencia, pero es mas

conveniente la construcción de un floculador vertical por el costo de construcción, la facilidad de construcción y la manera en como va a funcionar. Tan solo la investigación nos demostro que existe aumento de eficiencia de 8.07%, 4.53 % y 3.85%, el cual es bajo y por lo tanto construir un floculador con placas inclinadas demandaria tiempo y dinero.

En definitiva, la propuesta con placas inclinadas muestra que pequeñas modificaciones en el diseño pueden tener un impacto positivo, aunque modesto, en la eficiencia del tratamiento. Aun así, el hecho de obtener una mejora constante en varias de las pruebas ya justifica seguir explorando esta alternativa, sobre todo en contextos donde se busca optimizar procesos sin incrementar el consumo de energía. Finalmente, se considera que mas alla de los porcentajes obtenidos, el estudio demuestra la importancia de investigar soluciones simples y adaptadas a la realidad de cada planta. La experiencia ganada durante el trabajo permite abrir camino para futuros ensayos dejando en claro que aun los cambios pequeños pueden sumar en la calidad del agua para la poblacion.

REFERENCIAS

- [1] Melo, A., & Herrera, J. (2016). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA PILOTO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE EN EL LABORATORIO DE LA UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA. 2016: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.
- [2] HERNANDEZ, M., & RONDON, J. (2018). *Diseño y experimentación de un floculador hidráulico piloto en piedra 1*. NARIÑO - COLOMBIA: UNIVERSIDAD DE NARIÑO.
- [3] Villegas, R., & Letterman, R. (1976). Optimizing flocculator power input. Journal of the Environmental Engineering Division. ASCE.
- [4] Domínguez, A., Rivera Huerta, M., & Piña Soberanis, M. (2008). INCIDENCIA DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD EN LA EFICIENCIA DE LA ELECTROCOAGULACIÓN PARA REMOVER ARSÉNICO EN UN REACTOR A FLUJO PISTÓN. CARACAS - VENEZUELA: INCI.
- [5] Deleón Castro, M., Hernández Martínez, M., & Rivas, J. (2016). "Interpretación cuantitativa de prueba de trazadores en un campo geotérmico de alta entalpía en México. EL SALVADOR - EL SALVADOR: UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.
- [6] SÁNCHEZ DEL CASTILLO, M. (2016). Fragmentación de impactos megaurbanos y umbrales hídricos. Veracruz - México: DIAZ, F.
- [7] Marcó L, Azario R, Metzler C. La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay. Rev. Sanid. Ambient. 2004;82:72-82.
- [8] Vargas M, Romero L. Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en Costa Rica. Rev. Tecnol. en Marcha. 2006;19:37-41.
- [9] ARBOLEDA VALENIA, J. Teoría y práctica de la purificación del agua. 3ª ed. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana, 2000. ISBN 978-958-41-0015-3.
- [10] ANDÍA CARDENAS, Y. Tratamiento de agua coagulación y floculación. [en línea] 2000, [fecha de consulta: 20 abril 2019]. Disponible en: http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154
- [11] Veliz, E., Fernández, L. A., Bataller, M., López, A., Ledea, O., & Padrón, S. (2016). Coagulación-floculación, filtración y ozonización de agua residual para reutilización en riego agrícola. Tecnología y Ciencias del Agua, 8(1), 17-34. ISSN 0187-8336.
- [12] Álvarez Callupe, X. N., & Díaz Urrutia, G. (2022). Efecto de las variables hidráulicas en un floculador de placas perforadas [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional de la Universidad Ricardo Palma.
- [13] Cubides, L. E. L., Vargas, A. K. N., & Vallejos, D. A. N. (2019). OPTIMIZACIÓN GEOMÉTRICA DE UN FLOCULADOR HIDRÁULICO HORIZONTAL PARA POTABILIZACIÓN DE AGUAS VEREDALES. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*.
- [14] Bernala, R. G., Tinoco, F. I., Castillo, J. J. P., & Trujillo, J. C. Estudio del Floculador Hidráulico de Flujo Vertical para la Planta de Tratamiento de Agua de Vista Bella.
- [15] MARTINEZ, D. K. A. (2015). EVALUACIÓN DEL FLOCULADOR EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE" LA ESPERANZA" QUE ABASTECE A LOS CANTONES MACHALA, PASAJE Y EL GUABO, PROVINCIA DE EL ORO.
- [16] Romero Rojas, J. (2006). Análisis de un floculador hidráulico de flujo horizontal. Revista De La Escuela Colombiana De Ingeniería, vol. 16, p. 9-16. Disponible en: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/2235>
- [17] Prieto Abad, L., & Sampertegui, W. S. (2021). Eficiencia de remoción de turbidez del agua del canal El Progreso mediante coagulación-floculación del almidón de plátano y yuca, Jaén, 2019 [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Jaén].
- [18] Miyashiro Aguirre, R., & Romero, J. M. (2022). *Estudio comparativo de los tratamientos de electrocoagulación y coagulación/floculación para la remoción de contaminantes de aguas residuales del camal Conchucos, Lima, 2021* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria La Molina].
- [19] Coello Miranda, R. F., & Orellana Salinas, G. E. (2023). Análisis numérico para la determinación de la eficiencia hidráulica de floculadores tubulares de geometría helicoidal.
- [20] González Jarrín, P. E., & Gutiérrez Terreros, J. C. (2022). Análisis numérico para la determinación de eficiencias hidráulicas en diferentes configuraciones geométricas de floculadores tubulares como una tecnología potencial sostenible para la provisión de agua potable en comunidades en desarrollo.
- [21] Hoyos Delgado, G. (2022). Ensayo de Coagulación-Floculación con Extracto de Opuntia Macbridei Britton & Rose para mejorar la calidad de las aguas.