

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-
FLOCULACIÓN DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE AGUA
POTABLE “HUAYCO MACHAY”, UBICADA EN EL CANTÓN
CAYAMBE**

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-
FLOCULACIÓN**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO SUPERIOR
EN AGUA Y SANEAMIENTO AMBIENTAL**

ISAÍAS MATEO ACOSTA CHÁVEZ

isaias.acosta@epn.edu.ec

DIRECTOR: SANTIAGO STALIN GUERRA SALCEDO

santiago.guerra@epn.edu.ec

DMQ, agosto 2023

1. CERTIFICACIONES

Yo, Isaías Mateo Acosta Chávez, declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

MATEO ACOSTA
isaias.acosta@epn.edu.ec
acostamateo159@gmail.com

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Mateo Acosta, bajo mi supervisión.

SANTIAGO GUERRA
DIRECTOR
santiago.guerra@epn.edu.ec

2. DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmo que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Isaías Mateo Acosta Chávez

3. DEDICATORIA

Dedicado a mi Abuelita Emma, mi ángel y mi luz que me cuida y protege desde el cielo.

A mis amados padres, Mónica y Rodrigo, por su compañía incondicional, paciencia, consejos y guía durante mi vida estudiantil. Este trabajo es el resultado de años de esfuerzo, dedicación y perseverancia y nada de esto habría sido posible sin el apoyo de ustedes.

Dedicada a mi toda mi familia materna, quienes ayudaron y apoyaron a mis padres y a mí en los momentos más difíciles y complicados. Este logro no hubiera sido posible de no ser por la unión y el amor familiar presente entre nosotros.

A toda mi familia paterna que se encuentra en Ecuador y en el extranjero.

Finalmente, a las amistades leales y verdaderas que me acompañaron durante mi vida universitaria.

4. AGRADECIMIENTO

Agradecer en primer lugar a todos los docentes de la carrera de Agua y Saneamiento Ambiental de la Escuela de Formación de Tecnólogos por su conocimiento, experiencia y enseñanzas durante todos estos años de estudio, sobre todo a mi director de tesis, el Ing. Santiago Guerra, quien supo orientar, asesorar y ser paciente durante el desarrollo de este trabajo. Agradecer también a los Ingenieros del Centro de Investigación y Control Ambiental (CICAM) y a los Ingenieros del Laboratorio de Docencia de Ingeniería Ambiental (LDIA) por su apoyo y consejos dados.

Agradecer a los operarios que trabajan en la planta de producción de agua potable “Huayco Machay”, en especial al Tecnólogo Víctor Hugo Guaña y a la Ingeniera Sofia Imbaquingo, quienes dieron todas las facilidades y apertura para realizar la parte experimental de este trabajo.

Agradecer a mi familia materna y paterna por todo su amor, ánimos, apoyo y compañía cuando más lo necesitaba. Agradezco a la vida por darme a mi mamá y mi papá, Mónica y Rodrigo. Gracias por ser los mejores padres y espero que la vida me permita seguir compartiendo momentos con ustedes.

Finalmente, agradezco a Jorge, Anthony, Carolina y Jordan, quienes son las mejores personas que he conocido durante mi tiempo de vida universitaria y que me apoyaron y me alentaron a seguir adelante y no permitieron que me rinda en las instancias finales de mis estudios universitarios. Gracias por tantas anécdotas, enseñanzas y experiencias que compartimos juntos. Los y las llevaré en mi corazón siempre.

5. ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	CERTIFICACIONES.....	I
2.	DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
3.	DEDICATORIA.....	III
4.	AGRADECIMIENTO.....	IV
5.	ÍNDICE DE CONTENIDOS	V
6.	ÍNDICE DE TABLAS	VIII
7.	ÍNDICE DE FIGURAS	IX
8.	ÍNDICE DE ECUACIONES.....	X
9.	RESUMEN	XI
10.	ABSTRACT	XII
11.	DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	1
11.1	Objetivo general.....	1
11.2	Objetivos específicos	1
11.3	Alcance.....	1
11.4	Marco teórico.....	2
11.4.1	Antecedentes.....	2
11.4.2	Planta de tratamiento o producción de agua potable	3
11.4.3	Agua de consumo humano	4
11.4.4	Límite permitido	4
11.4.5	Coagulación-Floculación	4
11.4.5.1	Coagulación	5
11.4.5.2	Floculación	5
11.4.6	Prueba de jarras	5
11.4.6.1	Mezcla rápida y lenta.....	6
11.4.6.2	Tiempo de sedimentación.....	6
11.4.7	Flocs o flóculos.....	6
11.4.7.1	Índice de Wilcomb	7
11.4.8	Dosis óptima.....	7
11.4.9	Normativas	8
12.	METODOLOGÍA.....	9
12.1	Planta de producción de agua potable “Huayco Machay”	9
12.1.1	Ubicación.....	9

12.1.2	Funcionamiento	9
12.2	Caracterización del agua.....	12
12.2.1	Temperatura, conductividad y pH	12
12.2.2	Turbiedad	12
12.2.3	Color aparente.....	13
12.2.4	Alcalinidad	13
12.2.5	Sólidos sedimentables.....	15
12.2.6	Aluminio.....	15
12.2.7	Hierro Total.....	15
12.2.8	Hierro Ferroso	15
12.2.9	Sulfatos	16
12.3	Coagulación-Floculación	16
12.3.1	Prueba de jarras	16
12.3.1.1	Equipo de pruebas de jarras.....	17
12.3.2	Procedimientos para ensayo de prueba de jarras.....	18
12.3.2.1	Programación de modo de operación	18
12.3.2.2	Reactivos usados	19
12.3.2.2.1	Regulador de pH	20
12.3.2.2.2	Coagulantes	20
12.3.2.2.3	Floculantes	21
12.3.2.3	Mezcla rápida y lenta.....	21
12.3.2.4	Tiempo de sedimentación.....	21
12.3.2.5	Medición de parámetros en agua resultante de prueba de jarras.....	21
12.3.2.6	Criterio para determinación de dosis óptima	22
13.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
13.1	Caracterización efluente.....	23
13.2	Caracterización afluente.....	24
13.3	Prueba de jarras	27
13.4	Dosis óptimas.....	38
13.5	Validación de dosis óptimas	41
13.6	Análisis costo-beneficio	44
14.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
14.1	CONCLUSIONES.....	48
14.2	RECOMENDACIONES.....	49

15. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
16. ANEXOS.....	55
ANEXO I: Certificado de originalidad Turnitin	55
ANEXO II: Registro fotográfico de la PTAP “Huayco Machay”	57
ANEXO III: Medición de turbiedad	58
ANEXO IV: Espectrofotómetro HACH DR1900 y celdas de vidrio de 10 mL.....	59
ANEXO V: Medición de color aparente	59
ANEXO VI: Determinación de alcalinidad.....	60
ANEXO VII: Medición de temperatura, conductividad y pH	61
ANEXO VIII: Base Cono Imhoff y Cono Imhoff para medición de sólidos sedimentables	62
ANEXO IX: Medición de aluminio.....	62
ANEXO X: Medición de hierro total.....	63
ANEXO XI: Medición de hierro ferroso.....	64
ANEXO XII: Medición de sulfatos.....	65
ANEXO XIII: Regulador de pH sólido al 100% de pureza.....	65
ANEXO XIV: Agentes químicos coagulantes	66
ANEXO XV: Ayudante de floculación aniónico sólido al 100% de pureza (Agente químico floculante).....	66
ANEXO XVI: Precios Cloruro férrico sólido QUIMPAC 3900 y Sulfato de aluminio tipo B líquido QUIMPAC 1010 L	66
ANEXO XVII: Enlaces	67
ANEXO XVIII: Cálculos.....	68

6. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Índice de Wilcomb.....	7
Tabla 2. Formato para la toma de resultados de las pruebas de jarras.....	17
Tabla 3. Especificaciones Equipo de jarras QUIMIS Modelo Q305F6.....	18
Tabla 4. Agentes químicos usados durante los ensayos.....	19
Tabla 5. pH óptimo según el tipo de coagulante	20
Tabla 6. Caracterización del efluente producido por la PTAP “Huayco Machay”	23
Tabla 7. Caracterización del afluente entrante a la PTAP “Huayco Machay”	24
Tabla 8. Promedios de aluminio, hierro total, hierro ferroso y sulfatos	26
Tabla 9. Resultados pruebas 1 y 2.....	27
Tabla 10. Resultados pruebas 3 y 6.....	28
Tabla 11. Resultados prueba 4 y 5	29
Tabla 12. Resultados pruebas 7 y 8.....	31
Tabla 13. Resultados pruebas 9 y 10.....	32
Tabla 14. Resultados pruebas 11 y 12.....	34
Tabla 15. Resultados pruebas 13 y 14.....	36
Tabla 16. Dosis óptimas para agua cruda con baja turbiedad.....	39
Tabla 17. Dosis óptimas para agua cruda con alta turbiedad.....	40
Tabla 18. Posibles dosis óptimas para agua cruda con baja turbiedad	40
Tabla 19. Validación prueba 4	41
Tabla 20. Validación prueba 6	43
Tabla 21. Precios de los reactivos usados en las pruebas.....	44

7. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Planta de producción de agua potable “Huayco Machay”	9
Figura 2. Diagrama de flujo PTAP “Huayco Machay”	10
Figura 3. Dosificación de químicos	11
Figura 4. Floculador hidráulico de flujo vertical PTAP “Huayco Machay”	11
Figura 5. Equipo de jarras QUIMIS Modelo Q305F6	18
Figura 6. Costo por día de los agentes químicos usados en la PTAP	45
Figura 7. Costo por día del regulador de pH de las dosis óptimas	45
Figura 8. Costo por día de los coagulantes de las dosis óptimas	46
Figura 9. Costo por día de los floculantes de las dosis óptimas	47

8. ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Preparación de una solución a partir de otra	13
Ecuación 2. Alcalinidad a la fenolftaleína	14
Ecuación 3. Alcalinidad total	14
Ecuación 4. Porcentaje de remoción.....	22

9. RESUMEN

Actualmente al cantón Cayambe se dota de agua potable gracias al megaproyecto “Huayco Machay”. Éste incluye una planta de producción de agua potable (PTAP) que se ubica en el sector de Loma Larga en la parroquia Juan Montalvo y trata un caudal de 300 L/s aproximadamente. Uno de los principales problemas de esta planta es la calidad variable del agua cruda que ingresa diariamente a los módulos de operación, lo que ha ocasionado contratiempos en el proceso de coagulación-floculación, debido a que las dosificaciones de agentes químicos deben ser modificadas frecuentemente según la calidad del agua cruda que ingresa a la planta.

Frente a esta problemática se planteó la optimización del proceso de coagulación-floculación. Para esto, se caracterizó el afluente y se realizaron pruebas de jarras probando diferentes coagulantes y floculantes para determinar la dosis óptima con base en la calidad del agua que ingresa diariamente a la PTAP.

Los resultados fueron las dosis óptimas de los reactivos utilizados según la calidad del agua cruda, las eficiencias de remoción de contaminantes y un análisis de costo-beneficio.

Se concluyó que el PAC líquido al 30% de pureza como coagulante y el cloruro férrico sólido al 98% de pureza como floculante son los agentes químicos capaces de remover el 99.43% y 100% de turbiedad y color aparente, respectivamente, en aguas crudas con altas medidas de estos parámetros, mientras que el PAC sólido al 100% de pureza, PAC líquido al 30% de pureza y el cloruro férrico sólido al 98% de pureza usados como agentes coagulantes remueven entre 75.98% y 99.28% de turbiedad y entre 79.17% y 100% de color aparente en aguas crudas con bajas medidas de estos parámetros, por otro lado, la dosificación de 10 mg/L de Regulador de pH (RPH), 10 mg/L de Policloruro de Aluminio Tipo A y 0.05 mg/L de ADEFLOC-1000A tiene bajos costos por día y porcentajes de remoción mayores a 75%.

PALABRAS CLAVE: PTAP, coagulación, floculación, dosis óptima

10. ABSTRACT

Currently, the Cayambe canton is provided with drinking water thanks to the “Huayco Machay” megaproject. This includes a drinking water production plant (PTAP) that is located in the Loma Larga sector in the Juan Montalvo parish and treats a flow of approximately 300 L/s. One of the main problems of this plant is the variable quality of the raw water that enters the operating modules daily, which has caused setbacks in the coagulation-flocculation process, due to the fact that the dosages of chemical agents must be frequently modified according to the quality of raw water entering the plant.

Faced with this problem, the optimization of the coagulation-flocculation process was proposed. For this, the tributary was characterized and jar tests were carried out testing different coagulants and flocculants to determine the optimal dose based on the quality of the water that enters the PTAP daily.

The results were the optimal doses of the reagents used according to the quality of the raw water, the removal efficiencies of contaminants and a cost-benefit analysis.

It was concluded that the liquid PAC at 30% purity as a coagulant and the solid ferric chloride at 98% purity as a flocculant are the chemical agents capable of removing 99.43% and 100% of turbidity and apparent color, respectively, in raw waters with high measurements of these parameters, while solid PAC at 100% purity, liquid PAC at 30% purity and solid ferric chloride at 98% purity used as coagulants remove between 75.98% and 99.28% of turbidity and between 79.17 % and 100% of apparent color in raw water with low measurements of these parameters, while the dosage of 10 mg/L of pH Regulator (RPH), 10 mg/L of Type A Aluminum Polychloride and 0.05 mg/L of ADEFLOC-1000A has low costs per day and removal rates greater than 75%.

KEY WORDS: PTAP, coagulation, flocculation, optimal dose

11. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El presente componente se enfocó en la optimización del proceso de coagulación-floculación de la planta de producción de agua potable (PTAP) “Huayco Machay”, ubicada en el sector de Loma Larga en la parroquia Juan Montalvo, Cantón Cayambe.

Para lograr la optimización, se recogieron muestras de agua cruda de la PTAP y se midieron los parámetros más relevantes en el proceso de coagulación-floculación, los cuales fueron: turbiedad, pH, color aparente, alcalinidad, conductividad, temperatura y sólidos sedimentables. Una vez que se conocieron las características del agua, se realizó el ensayo de pruebas de jarras, donde se probó diferentes coagulantes y floculantes en distintas concentraciones para establecer la dosis óptima. Finalmente, se midieron los siguientes parámetros del agua resultante de la prueba de jarras: pH, turbiedad, color aparente, hierro total, hierro ferroso, sulfatos y aluminio. Los últimos 4 parámetros se los midió dependiendo del coagulante y/o floculante que se usaron durante el ensayo. Los resultados finales fueron la dosis óptima de los reactivos utilizados según la calidad del agua cruda, las eficiencias de remoción de contaminantes y un análisis de costo-beneficio.

11.1 Objetivo general

Optimizar el proceso de coagulación-floculación de la PTAP “Huayco Machay”, ubicada en el Cantón Cayambe.

11.2 Objetivos específicos

Recolectar muestras de agua cruda que ingresan a la PTAP y caracterizarlas.

Realizar el ensayo de prueba de jarras para determinar la dosis óptima de coagulante y floculante.

Caracterizar el agua resultante de la prueba de jarras y calcular las eficiencias de remoción.

Realizar un análisis de costo-beneficio.

11.3 Alcance

El presente componente se desarrolló en la Planta de Producción de Agua Potable “Huayco Machay”, ubicada en el Cantón Cayambe, al noreste de la provincia de Pichincha y se

enfocó principalmente en la optimización del proceso unitario de coagulación-floculación existente en la PTAP.

11.4 Marco teórico

11.4.1 Antecedentes

El 71% de la superficie terrestre se compone de agua, y apenas el 0.75% se considera agua dulce (Baque-Mite et al., 2016). En vista de esta situación, la Constitución del Ecuador y el Plan Nacional del Buen Vivir, establecen que se debe usar, aprovechar y cuidar el recurso hídrico.

Ecuador cuenta con ríos que recorren todo el territorio y son aprovechados para abastecer y satisfacer la demanda de consumo de las 24 provincias del territorio ecuatoriano. Según Baque-Mite et al. (2016), Ecuador cuenta con 22500 metros cúbicos de agua por habitante por año, sin embargo, las actividades antropogénicas contaminan las fuentes hídricas, lo que ha ocasionado el empeoramiento de la calidad del agua y con ello, la calidad de vida de los ecuatorianos.

El artículo 314 de la Constitución del Ecuador establece que el Estado Ecuatoriano tiene el deber y la obligación de proveer a la población ecuatoriana agua apta para consumo humano. Para lograr esto, el agua captada de las fuentes hídricas naturales superficiales o subterráneas, deben ser sometidas a una serie de procesos que aseguren la eliminación de contaminantes de índole físico, químico y microbiológico, asegurando la provisión de agua limpia y segura (Romero, 1999). Este proceso se lo realiza en plantas de tratamiento o producción de agua potable (PTAP).

Entre los principales contaminantes que elimina una PTAP son las partículas o materias suspendidas de origen orgánico o inorgánico que, debido a su tamaño, peso y/o densidad, pueden eliminarse solo por acción de la gravedad. Este fenómeno se denomina sedimentación (Zerbatto et al., 2009; Acosta, 2006). Dentro de la clasificación de las partículas suspendidas, están las partículas coloidales, las cuales se caracterizan por ser tan diminutas que no logran sedimentar y por estar rodeadas de cargas eléctricas en su estructura molecular, impidiendo que se junten y/o aglomeren entre ellas y formen partículas más pesadas que puedan eliminarse por sedimentación (Acosta, 2006).

Para remover estas partículas, se utilizan ayudantes químicos que neutralizan esta carga eléctrica, lo que permite que se aglomeren y puedan sedimentar. Este proceso lleva el nombre de coagulación-floculación. La remoción de estas partículas constituye una meta primordial de una PTAP, debido a que son causantes del color, turbiedad, mal sabor y olor en el agua, y también pueden ser un sustrato perfecto para la formación y crecimiento de microorganismos perjudiciales para la salud humana (Acosta, 2006; Zerbato et al., 2009).

Pichincha es una de las 24 provincias del Ecuador y cuenta con 8 cantones o prefecturas. Una de ellas es el Cantón Cayambe, que alberga una población de 85795 habitantes (Prefectura de Pichincha, 2017). De acuerdo con los informes N.-EMAPAAC-EP-CAP-2023-017-INF y N.-EMAPAAC-EP-CAP-2020-042-INF, Cayambe se abastece de agua de varias captaciones, sin embargo, se ha considerado que todas estas no son suficientes para abastecer a la población actual y futura. Bajo este contexto, la “Misión Agua y Saneamiento Ambiental” presentó en el año 2019 el Proyecto “Huayco Machay”, que contempla una captación de agua, conducción, planta de producción de agua potable (PTAP) y una red de distribución que suministre agua potable a la zona urbana de Cayambe y asegure la dotación del recurso hídrico para los próximos 30 años.

La PTAP se encuentra ubicada en el sector de Loma Larga en la Parroquia Juan Montalvo, trata un caudal de 300 L/s aproximadamente y cuenta con los siguientes procesos unitarios: sedimentación, filtración, desinfección con cloro y coagulación-floculación (GADIP Municipio de Cayambe, 2020). Actualmente la PTAP es manejada y operada por parte de la Jefatura de Calidad de Agua de la Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Saneamiento Ambiental y Aseo Cayambe (EMAPAAC-EP).

11.4.2 Planta de tratamiento o producción de agua potable

La purificación o potabilización del agua tiene como objetivo principal transformar agua cruda en agua potable, para luego distribuirla a una cierta población (Romero, 1999; Correa et al., 2017). La purificación del agua se realiza en plantas de tratamiento o producción de agua potable (PTAP), la cual recibe un caudal de agua cruda, llamado afluente, que atraviesa una serie de procesos unitarios que remueven uno o varios contaminantes, dando como resultado final un vertido líquido llamado efluente, que es el agua ya apta para consumo humano (TULSMA, 2017; Romero, 1999). Estas plantas se las construye con base en un caudal de diseño, en la población futura que tendrá la comunidad que recibirá el agua tratada y, sobre todo, la calidad del agua cruda (Romero, 1999).

Los procesos unitarios que se implementan en una PTAP dependen de la calidad del afluente a tratar. El tratamiento convencional que se encuentra en una PTAP engloba procesos de coagulación-floculación, sedimentación, filtración y desinfección (TULSMA, 2017). No obstante, a medida que la calidad del agua cruda sea más baja, su tratamiento será más complejo.

11.4.3 Agua de consumo humano

Es aquella que es utilizada para beber, destinada para la preparación de alimentos y otros usos domésticos. El agua se considera potable cuando cumple los límites permitidos de una serie de parámetros y/o componentes físicos, químicos y biológicos que aseguran su calidad, inocuidad y aceptabilidad para el consumo (TULSMA, 2017; INEN 1108, 2020).

11.4.4 Límite permitido

Representa una concentración numérica, expresada comúnmente en miligramo por litro (mg/L), que indica la cantidad o presencia máxima de componentes físicos, químicos y biológicos que debe tener un cuerpo hídrico para que no represente un riesgo a la salud humana o al medio ambiente (TULSMA, 2017; INEN 1108, 2020).

11.4.5 Coagulación-Floculación

El agua cruda tiene un sin número de impurezas físicas, constituidas por sólidos suspendidos, disueltos y coloidales. Estos últimos son los causantes de la turbiedad y color que se puede apreciar a simple vista en los cuerpos hídricos (Correa et al., 2017). Para remover estas partículas se utilizan procesos físicos-químicos, como la coagulación-floculación.

Según Acosta (2006), Correa et al. (2017) y Restrepo (2009), este proceso logra remover:

- Turbiedad orgánica o inorgánica.
- Color real y aparente.
- Sustancias de sabor y olor.
- Bacterias y virus.
- Algas y plancton.

11.4.5.1 Coagulación

La coagulación utiliza químicos llamados coagulantes que neutralizan las cargas eléctricas que rodean la estructura molecular de las partículas coloidales. Los coagulantes más usados están compuestos por sales de aluminio, sales de hierro y polímeros (Restrepo, 2009; Rojas, 2009; Acosta, 2006). La selección del tipo de coagulante depende principalmente del pH del agua cruda (Rivas et al., 2017).

Esta operación se efectúa en dispositivos de mezcla, donde se da el contacto entre el afluente y el coagulante, dispersando todo el reactivo en el agua para crear una solución homogénea en el menor tiempo posible (Restrepo, 2009).

La coagulación, según Restrepo (2009), depende de los siguientes factores:

Características físico-químicas del agua.

Concentración del coagulante.

Intensidad, punto de aplicación y tiempo de mezcla.

Tipo de dispositivo de mezcla. Puede ser mecánico o hidráulico (Romero, 1999).

11.4.5.2 Floculación

La floculación ocurre inmediatamente después de que el reactivo coagulante se haya dispersado en todo el cuerpo de agua. Floculación se refiere a la formación de los flóculos, que son el resultado de la aglomeración o agrupación de partículas coloidales que se han desestabilizado eléctricamente gracias al coagulante (Restrepo, 2009), logrando que se junten y aumenten su tamaño para posteriormente sedimentar por su propio peso. Es necesario una agitación moderadamente lenta y, en ocasiones, el uso de floculantes o ayudantes de floculación que favorecen y ayudan a la formación de un flóculo pesado y grande (Acosta, 2006; Rivas et al., 2017).

11.4.6 Prueba de jarras

Restrepo (2009) define a esta prueba como el ensayo de laboratorio que simula a menor escala el proceso de coagulación-floculación con el objetivo de establecer dosis óptima de coagulante y floculante. La prueba de jarras utiliza un equipo electrónico que se compone de un juego de 6 jarras graduadas de 2 litros que permite probar diferentes concentraciones

de coagulante y floculante. Cada jarra tiene una paleta que se encarga de realizar la agitación rápida y lenta del coagulante y floculante, respectivamente, y cuenta con vasos colectores de muestras para analizar los parámetros del agua al finalizar la prueba (Acosta, 2006).

11.4.6.1 Mezcla rápida y lenta

La mezcla rápida es el momento de contacto que existe entre el agua y el coagulante, donde ocurre la interacción coloide-coagulante (Acosta, 2006). Esta mezcla genera una turbulencia, que puede ser provocada por medios hidráulicos o mecánicos, que dispersa rápida y efectivamente el reactivo en toda la masa de agua para crear una solución homogénea que desestabilice las cargas eléctricas de las partículas coloidales, para posteriormente dar paso a la floculación (Romero, 1999). La mezcla rápida depende de la clase del coagulante.

Acosta (2006) expone las siguientes velocidades y tiempos para la mezcla rápida: de 1 a 3 minutos dentro de un rango de velocidades de 30 rpm a 100 rpm para plantas que trabajen con mezcla rápida, mientras que, para plantas que no tienen bien definidos tiempos y velocidades en sus procesos, recomienda trabajar con un rango de velocidades de 40 rpm a 60 rpm durante un intervalo de tiempo de 15 segundos a 60 segundos.

La mezcla lenta está relacionada con el tipo de floculador que utiliza una PTAP y el tiempo óptimo de floculación, es decir, el tiempo adecuado para que se forme un flóculo grande y pesado, permitiendo eliminarlo fácilmente por sedimentación (Correa et al., 2017). Rivas et al. (2017), Acosta et al. (2006), Correa et al. (2017) y Zerbato et al. (2009) exponen que el tiempo óptimo mínimo de floculación está dentro del intervalo de 3 a 15 minutos y debe ser acompañado por una agitación lenta, es decir, con velocidades bajas (20 a 40 rpm).

11.4.6.2 Tiempo de sedimentación

El tiempo de sedimentación representa el tiempo destinado para que los flocs sedimentan al fondo de las jarras (Acosta, 2006). Se recomienda un tiempo de sedimentación de 30 minutos (Zerbato et al., 2009).

11.4.7 Flocs o flóculos

Son el resultado de la aglomeración de las partículas coloidales desestabilizadas eléctricamente, debido al uso de agentes químicos coagulantes y floculantes (Correa et al., 2017; Acosta, 2006), y que son capaces de sedimentar debido a que su peso es mayor que el peso específico del agua (9800 N/m³).

11.4.7.1 Índice de Wilcomb

Este índice permite caracterizar los flóculos formados durante la prueba de jarras (Acosta, 2006).

Tabla 1. Índice de Wilcomb

Número de índice	Descripción	Observación
0	No Visible	Ningún signo de aglomeración
2	Visible	Floc muy pequeño, casi imperceptible
4	Disperso	Floc bueno y uniformemente distribuido, sedimenta muy lentamente o no sedimenta
6	Claro	Floc bueno, relativamente grande y esponjoso, sedimenta con lentitud
8	Bueno	Floc bueno, sedimenta fácilmente pero no completamente, deja algo de turbiedad en el agua
10	Excelente	Floc muy bueno, se deposita totalmente dejando el agua cristalina

Fuente: (Correa et al., 2017; Acosta, 2006)

11.4.8 Dosis óptima

Tanto en prueba de jarras como en una PTAP, la dosis óptima representa las concentraciones idóneas en mg/L de coagulante, floculante y regulador de pH, en caso de usarse, que garantizan una alta eficiencia de remoción de coloides en el proceso de coagulación-floculación (Correa et al., 2017). Según Zerbato et al. (2009) los criterios para determinar la dosis óptima son las concentraciones usadas de agentes químicos y la turbiedad final medida al finalizar el tiempo de sedimentación.

No existe un método o una regla que permita saber con anterioridad cuales reactivos químicos y que dosificaciones se deben implementar para obtener los mejores resultados (Acosta, 2006). Por lo tanto, la dosis óptima se la obtiene efectuando la prueba de jarras, inclusive, se tiene que realizar varios ensayos probando diferentes reactivos químicos con

diferentes concentraciones. La dosis óptima que se obtiene a nivel laboratorio se la implementa a nivel de planta con el objetivo de que no solo de un efluente de calidad, si no que trate de reducir los costos de operación al mínimo posible.

11.4.9 Normativas

En Ecuador, la tabla 1 del anexo 1 del libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA): Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua establece los criterios de calidad de fuentes de agua para consumo humano y doméstico.

Mientras que las tablas 1 y B.1. de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108 Agua Para Consumo Humano. Requisitos., establece los requisitos físicos y químicos del agua para consumo humano y el rango de pH del agua para consumo humano, respectivamente.

12. METODOLOGÍA

12.1 Planta de producción de agua potable “Huayco Machay”

12.1.1 Ubicación

La planta de producción de agua potable (PTAP) “Huayco Machay” se localiza en la parroquia Juan Montalvo perteneciente a la ciudad de Cayambe, la cual se ubica al noreste de la provincia de Pichincha (GADIP Municipio de Cayambe, 2020).



Figura 1. Planta de producción de agua potable “Huayco Machay”

12.1.2 Funcionamiento

La PTAP recibe los caudales de los ríos Kinde Machay (135 L/s) y Huayco Machay (230 L/s), mismos que nacen de la ladera sur del Nevado Cayambe (Asociación de Municipalidades Ecuatorianas, 2019). De acuerdo con el Informe N.-EMAPAAC-EP-CAP-2023-017-INF, la PTAP se construyó en base a un caudal de diseño de 300 L/s y cuenta con 4 módulos de operación los cuales tratan un caudal de 75 L/s cada uno. Estos módulos cuentan con los siguientes procesos unitarios (GADIP Municipio de Cayambe, 2020):

Coagulación-floculación

Sedimentación

Filtración

Desinfección con cloro

La figura 2 presenta el diagrama de flujo de los procesos de la PTAP “Huayco Machay”. Estos procesos indican que la PTAP realiza un tratamiento de purificación convencional,

enfocado principalmente en remover color, turbiedad y microorganismos del agua cruda (Romero,1999).

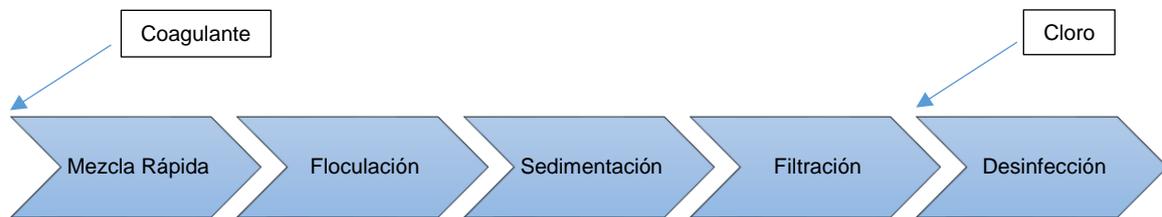


Figura 2. Diagrama de flujo PTAP “Huayco Machay”

El proceso de potabilización inicia con la entrada del afluente a la planta y luego se dirige por medio de tuberías de entrada a los 4 módulos de operación. Antes de ingresar a estos, el agua se oxigena mediante oxigenadores dinámicos que se ubican en estas tuberías.

Una vez dentro de los módulos, el agua llega a un tanque de quietamiento que se encarga de disipar la energía con que llega el agua y estabiliza el caudal, haciéndolo constante durante todo el proceso de potabilización. Posteriormente, el agua entra en contacto con los reactivos químicos coagulante, floculante y regulador de pH, mismos que se mezclan de forma hidráulica con el agua mediante una canaleta Parshall, la cual distribuye y homogeniza los químicos por toda la masa de agua. La PTAP usa un regulador o elevador de pH, policloruro de aluminio (PAC) como coagulante y un ayudante de floculación aniónico como floculante. Las fichas técnicas de los agentes químicos se encuentran en el Anexo XVII.

Como se observa en la figura 3, la tubería de color blanca dosifica el regulador de pH, la tubería amarilla dosifica el coagulante y la tubería anaranjada dosifica el floculante. Es importante mencionar que el coagulante se lo coloca justo en medio de la reducción de la canaleta Parshall, para que el reactivo se mezcle rápidamente con el agua aprovechando la turbulencia que se genera en esta reducción.



Figura 3. Dosificación de químicos

Una vez que el agua tiene contacto con los químicos, se dirige al floculador. El floculador genera una mezcla lenta que facilita e incrementa el contacto de las partículas coloidales desestabilizadas (Romero, 1999). La PTAP trabaja con un floculador hidráulico de flujo vertical, el cual está constituido por placas patentadas de PRFV-C para floculadores de la marca ADE-INTAL. El tiempo de estancia del agua en el floculador es de media hora, tiempo suficiente para la formación de los flóculos.

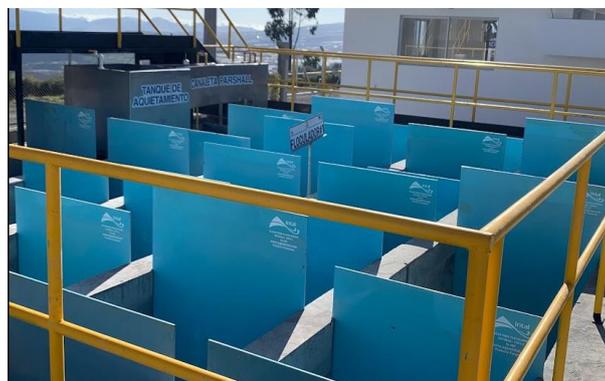


Figura 4. Floculador hidráulico de flujo vertical PTAP “Huayco Machay”

A continuación, el agua se dirige al sedimentador, donde decantan los flocs formados durante el proceso de coagulación-floculación. Posteriormente el agua pasa a un filtro de arena y grava que elimina algún residuo de flóculo que no logró sedimentar y clarifica un poco más el agua. Finalmente, se dirige a la sala de cloración donde se le añade hipoclorito de sodio, erradicando la presencia de patógenos perjudiciales a la salud humana. Finalmente, el agua tratada desemboca en los tanques de almacenamiento ubicados en la zona urbana de Cayambe, para luego ser distribuida a toda la población.

12.2 Caracterización del agua

El presente trabajo de titulación realizó una caracterización de los parámetros de turbiedad, color aparente, pH, alcalinidad, sólidos sedimentables, conductividad, temperatura, aluminio, hierro total y ferroso y sulfatos, siendo los más relevantes en el proceso de coagulación-floculación los cuatro primeros (Acosta, 2006; Zerbato et al., 2009).

12.2.1 Temperatura, conductividad y pH

Para esto, se usó el medidor multiparamétrico HORIBA U-52 que determina temperatura (°C), conductividad (mS/cm) y pH (unidades de pH), mediante los sensores de medición que posee. El pH se midió en el afluente, efluente y en el agua resultante de la prueba de jarras, mientras que la temperatura y conductividad se midió solo en el afluente y efluente. Para esto, se conectó el cable de la sonda con el monitor observando que la marca roja del cable y del monitor estén alineados. Luego, se presionó el botón "POWER" por 2 segundos para encender el equipo y lo primero que se realizó fue la calibración de los sensores del equipo usando una solución buffer multiparamétrica, siguiendo las indicaciones del instructivo de calibración del equipo. Esta calibración terminó una vez que en el monitor apareció el mensaje "Cal completo". Se retiró la sonda de la taza de calibración y se lavó con agua destilada. Se secó con toallas de papel y se colocó la tapa de protección. Finalmente, se presionó el botón "MEAS" para iniciar la medición.

Para la medición, se sumergió la sonda en la muestra y se esperó 35 segundos para que el multiparámetro se estabilice. Finalizado este tiempo, se presionó el botón "MEAS" para guardar las mediciones de los parámetros. Después de medir los parámetros de la muestra, se retiró la tapa protectora y se lavaron los sensores y la tapa con agua destilada. Posteriormente, se secaron con toallas de papel. Finalmente se colocó la tapa protectora ya seca en la sonda y se apagó el equipo presionando el botón "POWER".

12.2.2 Turbiedad

Se usó el turbidímetro de la marca HACH modelo 2100Q. Para esto, primero se realizó la calibración del equipo usando estándares de 10, 100 y 800 NTU. Una vez realizado esto, se procedió a medir la turbidez, para lo cual se trasvasaron 10 mL de muestra en celdas circulares de vidrio. Se secaron con una toalla de papel y se limpiaron con un paño de

microfibra en una sola dirección. Se insertaron en el turbidímetro y se realizó la medición. Los resultados se expresan en unidades nefelométricas (NTU).

12.2.3 Color aparente

Este parámetro se midió tomando alícuotas de 10 mL de afluente, efluente, y de agua resultante de la prueba de jarras. Se usó el espectrofotómetro modelo DR1900 de la marca HACH y el método "Method 8025 Color, True and Apparent (Platinum-Cobalt Standard Method)". Se utilizó el programa 120 Color con una longitud de onda de 455 nm para la medición de este parámetro y los resultados se expresan en unidades de platino cobalto (Pt-Co).

12.2.4 Alcalinidad

Para la determinación de la alcalinidad se efectuó una titulación ácido-base usando como agente titulante ácido sulfúrico (H_2SO_4) con una concentración de 0.02 N. Se usaron indicadores de fenolftaleína y anaranjado de metilo para determinar la presencia de carbonatos (alcalinidad a la fenolftaleína) y bicarbonatos (alcalinidad total), respectivamente. Para esto fue necesario 250 mL de una solución madre de concentración 2 N de H_2SO_4 a partir de ácido al 98% de pureza. En el anexo XVIII se presenta el cálculo realizado para determinar la cantidad de H_2SO_4 para preparar dicha solución. A partir de esta solución, se utilizó la ecuación 1 para preparar 100 mL de una solución diluida de H_2SO_4 de concentración 0.02 N. En el anexo XVIII se presenta el volumen de alícuota tomado de la solución madre para preparar 100 mL de una solución diluida de concentración 0.02 N de H_2SO_4 .

$$C1 * V1 = C2 * V2$$

Ecuación 1. Preparación de una solución a partir de otra

Donde:

C1 = Concentración solución madre

V1 = Volumen de alícuota a tomar de la solución madre (mL)

C2 = Concentración solución diluida

V2 = Volumen de solución diluida (mL)

En cuanto al proceso de titulación, se inició colocando la bureta en el soporte universal observando que quede completamente recta. Luego se aforó esta y para asegurar que todo el agente titulante este regado dentro del instrumento, se abrió abruptamente la llave de paso, permitiendo que el agente titulante llegue a la boca de la bureta, homogenizando por completo el instrumento y, además, eliminando las burbujas de aire que se forman en la boca del instrumento. Posteriormente, se transfirieron 100 mL de muestra de afluente a un matraz Erlenmeyer de 250 mL y 100 mL de muestra de efluente a otro matraz.

A la par, se colocaron 3 gotas de fenolftaleína y se agitaron los matraces. Si presentaban un color púrpura intenso, se tituló con H_2SO_4 0.02 N hasta un vire de color incoloro (transparente) y se anotó el volumen gastado de titulante. Si el color púrpura intenso no aparece, era un indicativo de que no hay carbonatos (CO_3^{-2}), por lo que se reportó con un valor de 0 a la alcalinidad a la fenolftaleína. Después se colocaron 3 gotas de anaranjado de metilo y se agitaron los matraces. Si presentaban un color amarillo, se tituló con H_2SO_4 0.02 N hasta un vire de color anaranjado intenso y se anotó el volumen gastado de titulante.

Se utilizaron las ecuaciones 2 y 3 para determinar los resultados de la alcalinidad, los cuales se expresan en mg/L de carbonato de calcio (CaCO_3).

$$\frac{A * N * 50000}{V_m}$$

Ecuación 2. Alcalinidad a la fenolftaleína

$$\frac{B * N * 50000}{V_m}$$

Ecuación 3. Alcalinidad total

Donde:

A = Cantidad gastada de H_2SO_4 hasta alcanzar el punto final de la fenolftaleína (mL)

B = Cantidad gastada de H_2SO_4 hasta alcanzar el punto final del anaranjado de metilo (mL)

N = Normalidad del titulante

V_m = Volumen de muestra (mL)

12.2.5 Sólidos sedimentables

Este parámetro se midió tomando alícuotas de 1 litro de afluente y efluente. Para determinar la cantidad de sólidos sedimentables se usó el cono Imhoff. Se trasvasó 1 litro de muestra, dejando sedimentar por una hora. Al minuto 45, con una varilla de agitación, se agitó lentamente la muestra de agua ubicada en la parte superior del cono con el fin de desprender sólidos que pudieron haberse quedado adheridos a las paredes del cono. Finalizada la hora, se midió la cantidad de sólidos que sedimentaron en el cono. Los resultados se expresaron en mL de sólidos sedimentados por litro de muestra.

12.2.6 Aluminio

Este parámetro se midió tomando una alícuota de 50 mL de agua resultante de la prueba de jarras. Se usó el espectrofotómetro modelo DR1900 de la marca HACH y el método "Method 8012 Aluminum (Aluminon Method)". Para la medición de este parámetro se utilizó el programa 10 Aluminum Alumin con una longitud de onda de 522 nm y el set de reactivos para la determinación de aluminio de la marca HACH, el cual incluye: reactivo en polvo para la determinación de aluminio (AluVer 3), sobres de ácido ascórbico en polvo y sobres de reactivo en polvo (Bleaching 3) (HACH, s. f.). Los resultados se expresan en unidades de mg/L de Al^{+3} .

12.2.7 Hierro Total

Este parámetro se midió tomando una alícuota de 20 mL de agua resultante de la prueba de jarras. Se usó el espectrofotómetro modelo DR1900 de la marca HACH y el método "Method 8008 Iron, Total (USEPA FerroVer® Method)". Para la medición de este parámetro se utilizó el programa 265 Iron, FerroVer con una longitud de onda de 510 nm y un sobre del reactivo en polvo "FerroVer® Iron Reagent Powder Pillow". Los resultados se expresan en unidades de mg/L de Fe.

12.2.8 Hierro Ferroso

Este parámetro se midió tomando una alícuota de 35 mL de agua resultante de la prueba de jarras. Se usó el espectrofotómetro modelo DR1900 de la marca HACH y el método "Method 8146 Iron, Ferrous (1,10-Phenanthroline Method)". Para la medición de este parámetro se utilizó el programa 255 Iron, Ferrous con una longitud de onda de 510 nm y

un sobre del reactivo en polvo “Ferrous Iron Reagent Powder Pillow”. Los resultados se expresan en unidades de mg/L de Fe^{+2} .

12.2.9 Sulfatos

Este parámetro se midió tomando 20 mL de agua resultante de la prueba de jarras. Se usó el espectrofotómetro modelo DR1900 de la marca HACH y el método “Method 8051 Sulfate (USEPA SulfaVer 4 Method)”. Para la medición de este parámetro se utilizó el programa 680 Sulfate con una longitud de onda de 450 nm y un sobre del reactivo en polvo “SulfaVer 4 Reagent Powder Pillow”. Los resultados se expresan en unidades de mg/L de SO_4^{-2} .

12.3 Coagulación-Floculación

12.3.1 Prueba de jarras

Este ensayo se realizó en el laboratorio de la planta de producción de agua potable “Huayco Machay”, usando diferentes coagulantes y floculantes en distintas concentraciones para encontrar la dosis óptima según la calidad del agua cruda utilizada en cada prueba, a fin de trasladar los resultados obtenidos a las operaciones de planta (Zerbatto et al., 2009).

Para cada prueba de jarras se usó una muestra de agua cruda (afluente) distinta, por lo que, cada muestra tuvo una codificación de cuatro letras y un número, la cual se explica a continuación. El código se compone de la letra “A”, que hace alusión a que la muestra es un afluente y las letras “PHM”, las cuales son las iniciales de “Planta Huayco Machay”, mientras que el número representa el orden asignado a las muestras de agua cruda, yendo de un valor menor a uno mayor, considerando las fechas cuando se tomaron las muestras.

También las muestras de agua tratada (efluente) recibieron una codificación similar, la cual se explica a continuación. El código se compone de la letra “E”, que hace alusión a que la muestra es un efluente y las letras “PHM”, las cuales son las iniciales de “Planta Huayco Machay”, mientras que el número representa el orden asignado a las muestras de agua cruda, yendo de un valor menor a uno mayor, considerando las fechas cuando se tomaron las muestras.

La tabla 2 presenta el formato utilizado para la toma de resultados de las pruebas de jarras realizadas. Esta tabla especifica las condiciones iniciales del agua cruda de cada prueba,

los reactivos y dosificaciones usadas, el valor del índice de Wilcomb según la calidad del flóculo formado en cada jarra, los resultados finales de pH, color aparente y turbiedad y los porcentajes de remoción de los dos últimos parámetros y los resultados de las concentraciones remanentes de aluminio, hierro y sulfatos generadas al finalizar cada prueba, dependiendo de los agentes químicos usados en cada prueba.

Tabla 2. Formato para la toma de resultados de las pruebas de jarras

PRUEBA #						
Código muestra		Fecha de toma de muestra		Hora de toma de muestra		
pH Inicial		Color inicial (Pt-Co)		Turbiedad inicial (NTU)		
Coagulante			Floculante	Floculante aniónico		
NÚMERO DE JARRA						
REACTIVOS QUÍMICOS	1	2	3	4	5	6
Elevador de pH (mg/L)						
Coagulante (mg/L)						
Floculante (mg/L)						
Índice de Wilcomb						
pH final						
Color final (Pt-Co)						
Remoción de color (%)						
Turbiedad final (NTU)						
Remoción de turbiedad (%)						
Aluminio (mg/L Al ⁺³)						
Hierro Total (mg/L Fe)						
Hierro ferroso (mg/L Fe ⁺²)						
Sulfatos (mg/L SO ₄ ⁻²)						

Fuente: Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water D2035-08 de la American Society for Testing and Materials (ASTM).

12.3.1.1 Equipo de pruebas de jarras

El equipo usado para el ensayo de pruebas de jarras fue un JARTEST de la marca QUIMIS Modelo Q305F6 (Química Madrid, 2021). Este equipo es propiedad de la PTAP “Huayco Machay”. Según el manual de instrucciones del equipo de jarras QUIMIS Q305F6, otorgado por la EMAPAAC-EP, éste cuenta con los siguientes implementos e instrumentos: enchufe de salida, interruptor de encendido, panel de control de 4 botones, pantalla LED, tubos de ensayo para la adición de coagulante, floculante y regulador de pH, gradilla para tubos de ensayo, jarras graduadas de 2 litros, regla colectora de muestras y vasos colectores de muestras.



Figura 5. Equipo de jarras QUIMIS Modelo Q305F6

Tabla 3. Especificaciones Equipo de jarras QUIMIS Modelo Q305F6.

Modelo	Volts	Watts	Dim.Ext. (CxLxA) (cm)	Vasos recolectores	Tubos de ensayo
Q305F6	90-240	75	37x112x48	6	24

Fuente: (Manual de instrucciones del equipo de jarras QUIMIS Q305F6, s. f.)

12.3.2 Procedimientos para ensayo de prueba de jarras

Se usó el Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water D2035-08 de la American Society for Testing and Materials (ASTM) para ejecutar el ensayo de prueba de jarras. Es importante mencionar que se hicieron algunas modificaciones en las indicaciones dictadas en esta guía con el fin de emular las condiciones con la que trabaja la PTAP en el proceso de coagulación-floculación. Además, se usó el manual de instrucciones del equipo de jarras QUIMIS Q305F6 para configurar y programar el modo de operación requerido para el ensayo.

12.3.2.1 Programación de modo de operación

Según el manual de instrucciones del equipo de jarras QUIMIS Q305F6, cuenta con 4 modos de operación: continua, editar, secuencia y espera (stand by). Para los ensayos de jarras se utilizó dos modos de operación: editar y secuencia. El modo de operación “Editar” permite programar hasta cuatro series de tiempos y velocidades, que posteriormente se corren en el modo de operación “Secuencia”. Para las pruebas de jarras realizadas se programó una serie para la mezcla rápida y otra para la mezcla lenta.

Para programar las series se usaron los botones del panel de control del equipo. Se presionó el botón “SEL” para escoger el modo de operación “Editar” y luego se presionó el

botón “I” para seleccionar el modo. Una vez seleccionado el modo, aparecieron las opciones “Entrar” o “Salir”. Se presionó el botón “I” para entrar y poder programar la velocidad y el tiempo. Se presionó la tecla “SEL” para navegar entre dígitos y el botón “Δ” para incrementar el dígito seleccionado. Al pasar por todos los dígitos de izquierda a derecha apareció el mensaje “¿ACEITAR DADOS?”. A continuación, aparecieron las opciones “Continuar” o “Terminar” y se presionó la tecla “I” para programar otra serie siguiendo los pasos mencionados anteriormente. Una vez programadas ambas series, se presionó el botón “O” para terminar y volver al menú principal. El equipo por defecto guarda las series para correrlas en el modo “Secuencia” y vuelve automáticamente al menú principal.

Con las series listas, se escogió el modo de operación “Secuencia” presionando el botón “SEL” y luego se presionó el botón “I” para seleccionar el modo. Enseguida, el equipo enseñó el mensaje “MODO: ESP” y se presionó el botón “I” para iniciar el modo de operación. Las paletas de cada jarra comenzaron a girar a las velocidades y tiempos programados.

12.3.2.2 Reactivos usados

Se utilizó una gama de diferentes coagulantes y floculantes en distintas concentraciones para encontrar la dosis óptima según la calidad del agua cruda utilizada en cada prueba, a fin de trasladar los resultados obtenidos a las operaciones de planta y cumplir los requisitos físicos y químicos del agua para consumo humano estipulados en las tablas 1 y B.1 de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108. La tabla 4 presenta los agentes químicos usados durante los ensayos.

Tabla 4. Agentes químicos usados durante los ensayos

REGULADORES DE PH	COAGULANTES	FLOCULANTES
Elevador de pH sólido al 100% de pureza*	Policloruro de aluminio (PAC) sólido al 100% de pureza*	Floculante aniónico sólido al 100 % de pureza*
	Cloruro férrico (FeCl ₃) sólido al 98% de pureza	
	Policloruro de aluminio (PAC) líquido al 30% de pureza	
	Sulfato de aluminio [Al ₂ (SO ₄) ₃] líquido al 8% de pureza	

* Agentes químicos que usa la PTAP actualmente

12.3.2.2.1 Regulador de pH

El pH y la alcalinidad guardan una estrecha relación entre ellos y son parámetros que se deben controlar en los procesos de coagulación-floculación, debido a que cada tipo de coagulante trabaja efectivamente dentro de una zona de pH óptima. (Restrepo, 2009). Usualmente la zona óptima está dentro del rango de 5.0 a 6.5 unidades de pH (Romero, 2009), mientras que Zerbato et al. (2009) estable que la alcalinidad debe superar los 28 mg/L de CaCO_3 para una correcta coagulación.

Tabla 5. pH óptimo según el tipo de coagulante

COAGULANTE	pH
Sulfato de aluminio o alumbre	4 - 7
Sulfato ferroso	Mayor a 8.5
Sulfato ferroso y cloro	3.5 – 6.5 y mayor a 8.5
Cloruro férrico	3.5 – 6.5 y mayor a 8.5
Sulfato férrico	3.5 – 7 y mayor a 9

Fuente: (Romero, 2009)

Bajo este contexto, se preparó y utilizó una solución madre de concentración de 10000 mg/L del elevador de pH sólido al 100% de pureza para los ensayos de prueba de jarras, la cual se diluyó en seis diferentes concentraciones usando la ecuación 1 dependiendo de la calidad del agua cruda usada en cada prueba, con el objetivo de tener una alcalinidad superior a los 28 mg/L de CaCO_3 y elevar el pH hasta alcanzar el rango óptimo de 5.0 a 6.5 unidades de pH.

12.3.2.2.2 Coagulantes

La PTAP “Huayco Machay” usa policloruro de aluminio (PAC) sólido al 100% de pureza como agente coagulante, por lo cual, se implementó en los ensayos de prueba de jarras dos sales de aluminio distintas y una sal de hierro, ofreciendo de este modo alternativas efectivas que puedan sustituir al coagulante que actualmente usa la PTAP. Para los ensayos realizados se prepararon soluciones madre de concentración de 10000 mg/L de PAC sólido al 100% de pureza, PAC líquido al 30% de pureza, sulfato de aluminio líquido al 8% de pureza y cloruro férrico sólido al 98% de pureza. Estas soluciones madre se diluyeron en seis diferentes concentraciones usando la ecuación 1 dependiendo de la calidad del agua cruda usada en cada ensayo.

12.3.2.2.3 Floculantes

La PTAP “Huayco Machay” utiliza un ayudante de floculación aniónico, el cual es un polielectrolito que requiere de una dosis óptima relativamente baja para ayudar al proceso de formación del floc y que no contamine el agua resultante del proceso. Por lo tanto, se utilizó durante las pruebas de jarras como principal agente químico floculante al ayudante de floculación aniónico utilizado por la PTAP “Huayco Machay” y también se probó a los agentes químicos coagulantes como floculantes, con el objetivo de determinar la eficacia de estos como posibles ayudantes de floculación.

Para los ensayos realizados de prueba de jarras se prepararon soluciones madre de concentración de 100 mg/L del ayudante de floculación aniónico y de los agentes químicos coagulantes. Estas soluciones madre se diluyeron en seis diferentes concentraciones usando la ecuación 1 dependiendo de la calidad del agua cruda usada en cada ensayo.

12.3.2.3 Mezcla rápida y lenta

En los dos primeros ensayos, la velocidad de mezcla rápida y lenta fueron de 150 y 30 revoluciones por minuto (rpm) durante 1 minuto y 20 minutos, respectivamente, mientras que en las demás pruebas de jarras la velocidad de mezcla rápida y lenta fueron de 300 y 40 revoluciones por minuto (rpm) durante 1 minuto y 20 minutos, respectivamente, debido a que los encargados de planta informaron que usan estas velocidades y tiempos para realizar sus ensayos a nivel laboratorio y a nivel de planta.

12.3.2.4 Tiempo de sedimentación

El tiempo de sedimentación fue de 20 minutos, e inició en el momento que se detuvieron y retiraron las paletas de cada jarra, procurando no afectar a los flocs formados. Al finalizar el tiempo de sedimentación, se tomaron alícuotas de agua resultante en los vasos colectores de muestras de cada jarra.

12.3.2.5 Medición de parámetros en agua resultante de prueba de jarras

Con las alícuotas de agua resultante de las pruebas de jarras se midió turbiedad, color aparente y pH con los equipos y métodos mencionados con anterioridad. Además, se midieron posibles concentraciones remanentes de aluminio, hierro y sulfatos que se

podieron generar al finalizar cada prueba, dependiendo de los agentes químicos usados en cada ensayo.

12.3.2.6 Criterio para determinación de dosis óptima

Se consideró que una dosis es óptima cuando se obtiene una turbiedad final baja y que cumpla con el límite permitido de la tabla 1 de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108.

A pesar de que la turbiedad es el parámetro más importante para establecer la dosis óptima, se tomó en cuenta también al color aparente final y el pH final como parámetros relevantes para establecer la dosis óptima, los cuales también deben cumplir sus límites permitidos en la Norma mencionada anteriormente. Adicionalmente, se consideró que los porcentajes de remoción de turbiedad y color aparente deben ser mayores o iguales a 75% para ser tomadas en cuenta como posibles dosis óptimas. El porcentaje de remoción para ambos parámetros se calcularon usando la ecuación 4.

$$\% \text{ Remoción} = \frac{C_o - C_e}{C_o} * 100$$

Ecuación 4. Porcentaje de remoción

Donde:

C_o = Concentración inicial del contaminante

C_e = Concentración final del contaminante

13. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

13.1 Caracterización efluente

La tabla 6 presenta los resultados de la caracterización del efluente, realizada durante la semana del 13 de junio al 19 de junio del 2023, los cuales corresponden a los parámetros del agua saliente de los filtros de la PTAP “Huayco Machay”.

La caracterización del efluente refleja los resultados de las mediciones de los parámetros de alcalinidad, conductividad, temperatura, sólidos sedimentables, color aparente, turbiedad y pH (Anexo XVII), sin embargo, la tabla 6 sólo presenta los resultados de los tres últimos parámetros, debido a que estos se encuentran en las tablas 1 y B.1. de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108.

Tabla 6. Caracterización del efluente producido por la PTAP “Huayco Machay”

RESULTADOS DE CALIDAD DEL EFLUENTE							
Fecha	Lugar	Código muestra	Parámetro	Resultado	Límite permitido INEN 1108	Unidades	Criterio de Resultados
Jun-14	Salida Filtro PTAP “Huayco Machay”	EPHM1	Color Aparente	0	15	Pt-Co	Cumple
Jun-16		EPHM2		84			No Cumple
Jun-17		EPHM3		34			No Cumple
Jun-18		EPHM4		0			Cumple
Jun-19		EPHM5		<0			Cumple
Jun-14	Salida Filtro PTAP “Huayco Machay”	EPHM1	Turbiedad	0.23	5	NTU	Cumple
Jun-16		EPHM2		65.30			No Cumple
Jun-17		EPHM3		2.35			Cumple
Jun-18		EPHM4		0.76			Cumple
Jun-19		EPHM5		2.20			Cumple
Jun-14	Salida Filtro PTAP “Huayco Machay”	EPHM1	pH	6.89	6.5 - 8	Unidades de pH	Cumple
Jun-16		EPHM2		5.62			No Cumple
Jun-17		EPHM3		5.56			No Cumple
Jun-18		EPHM4		6.15			No Cumple
Jun-19		EPHM5		5.84			No Cumple

Como se puede observar, existen valores de color aparente, turbiedad y pH que están por debajo del límite permitido para cada parámetro, pero también hay valores que sobrepasan los límites estipulados.

Los resultados de color aparente y turbiedad de las muestras EPHM1, EPHM4 y EPHM5 cumplen con los límites permitidos de la tabla 1 de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108. Sin embargo, las muestras EPHM3 y EPHM2 no guardan conformidad con los límites. La muestra EPHM3 solo cumple con el límite permitido de turbiedad, pero el valor

de color aparente sobrepasa el límite de 15 Pt-Co estipulado en la INEN 1108, mientras que la muestra EPHM2 no guarda conformidad con ninguno de los límites, superando por mucho a los valores permitidos de 15 Pt-Co y 5 NTU para color aparente y turbiedad, respectivamente.

Con respecto al pH, solo el resultado de la muestra EPHM1 está dentro del rango de 6.5 a 8.0 unidades de pH, que es el rango de pH que debe tener el agua para consumo humano estipulado en la tabla B.1. de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108. Sin embargo, la Norma dicta que este parámetro es de control operativo, por lo que el pH no se lo considera como un requisito obligatorio para considerar al agua como apta para el consumo humano, no obstante, su valor no debe ser lejano del pH óptimo (pH = 7).

13.2 Caracterización afluente

La tabla 7 presenta los resultados de la caracterización del afluente realizada durante la semana del 13 de junio al 19 de junio del 2023, los cuales corresponden a los parámetros del agua entrante a la PTAP “Huayco Machay”.

La caracterización del afluente refleja los resultados de las mediciones de los parámetros de conductividad, temperatura, sólidos sedimentables, color aparente, pH, turbiedad y alcalinidad (Anexo XVII), sin embargo, la tabla 7 sólo presenta los resultados de los cuatro últimos parámetros, debido a que estos, a excepción de la alcalinidad, se encuentran en la tabla 1 del anexo 1 del libro VI del TULSMA y son los parámetros más relevantes dentro del proceso de coagulación-floculación.

Tabla 7. Caracterización del afluente entrante a la PTAP “Huayco Machay”

RESULTADOS DE CALIDAD DEL AFLUENTE							
Fecha	Lugar	Código muestra	Parámetro	Resultado	Criterio de calidad TULSMA	Unidades	Criterio de Resultados
Jun-13	PTAP “Huayco Machay”	APHM1	Color aparente	0	75	Pt-Co	Cumple
Jun-14		APHM2		0			Cumple
Jun-14		APHM3		>500			No Cumple
Jun-15		APHM4		72			Cumple
Jun-15		APHM5		174			No Cumple
Jun-16		APHM6		>500			No Cumple
Jun-17		APHM7		150			No Cumple
Jun-18		APHM8		48			Cumple
Jun-19		APHM9		119			No Cumple
Jun-13		APHM1		5.87			No Cumple
Jun-14		APHM2		6.30			Cumple

Jun-14	PTAP "Huayco Machay"	APHM3	pH	6.64	6 - 9	Unidades de pH	Cumple
Jun-15		APHM4		7.30			Cumple
Jun-15		APHM5		5			No Cumple
Jun-16		APHM6		4.42			No Cumple
Jun-17		APHM7		5.70			No Cumple
Jun-18		APHM8		4.53			No Cumple
Jun-19		APHM9		5.24			No Cumple
Jun-13	PTAP "Huayco Machay"	APHM1	Turbiedad	7.30	100	NTU	Cumple
Jun-14		APHM2		9.08			Cumple
Jun-14		APHM3		153			No Cumple
Jun-15		APHM4		18			Cumple
Jun-15		APHM5		17.50			Cumple
Jun-16		APHM6		139			No Cumple
Jun-17		APHM7		23.20			Cumple
Jun-18		APHM8		12.20			Cumple
Jun-19		APHM9		16.40			Cumple
Jun-13	PTAP "Huayco Machay"	APHM1	Alcalinidad	16	N/A	mg/L CaCO ₃	-
Jun-14		APHM2		19			-
Jun-14		APHM3		27			-
Jun-15		APHM4		16			-
Jun-15		APHM5		15			-
Jun-16		APHM6		8			-
Jun-17		APHM7		17			-
Jun-18		APHM8		18			-
Jun-19		APHM9		16			-

Como se puede observar, existen valores de color aparente, turbiedad y pH que están por debajo del criterio de calidad para cada parámetro, pero también hay valores que sobrepasan los criterios estipulados, a excepción de la alcalinidad, la cual no tiene un criterio de calidad en la tabla 1 del anexo 1 del libro VI del TULSMA, pero es un parámetro de relevancia en el proceso de coagulación-floculación.

Los resultados de color aparente y turbiedad de las muestras APHM1, APHM2, APHM4, y APHM8 cumplen con los criterios de calidad de la tabla 1 del anexo 1 del libro VI del TULSMA. Sin embargo, las muestras APHM3, APHM5, APHM6, APHM7 y APHM9 no guardan conformidad con los criterios de calidad. Las muestras APHM5, APHM7 y APHM9 solo cumplen con el valor permitido de turbiedad, pero el valor de color aparente sobrepasa el criterio de 75 Pt-Co estipulado en la tabla 1 del anexo 1 del libro VI del TULSMA, mientras que las muestras APHM3 y APHM6 no guardan conformidad con ninguno de los criterios, superando por mucho a los valores permitidos de 75 Pt-Co y 100 NTU para color aparente y turbiedad, respectivamente.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se ve que la calidad del agua cruda que ingresa a la PTAP es muy variable en sus características debido a las condiciones climáticas que existen en la captación "Huayco Machay". Ejemplo de esto, tenemos valores de turbiedad

y color aparente muy bajos como los de la muestra APHM1, y valores muy altos como los de la muestra APHM3, evidenciando presencia de materia en suspensión, por lo que es necesario un tratamiento convencional, en el cual se usen agentes químicos coagulantes y floculantes para remover las materias suspendidas presentes en el agua, enfocado principalmente en la remoción de partículas coloidales.

Con respecto al pH y a la alcalinidad, solo las muestras APHM2, APHM3 y APHM4 tienen valores que están dentro del rango de 6 a 9 unidades de pH, el cual es el rango de pH estipulado en la tabla 1 del anexo 1 del libro VI del TULSMA, mientras que las demás muestras tienen valores de pH inferiores a 6. Con respecto a la alcalinidad, ninguna muestra sobrepasa los 28 mg/L CaCO₃, el cual es el valor mínimo que debe contener el agua para que se dé una correcta coagulación (Zerbatto et al., 2009). En vista de que los resultados de ambos parámetros en casi todas las muestras son desfavorables para que exista una buena formación de flóculos, es necesario la implementación de un regulador o elevador de pH para crear las condiciones idóneas para que suceda una adecuada coagulación y floculación.

Adicionalmente, la tabla 8 presenta los promedios de concentraciones de aluminio, hierro total, hierro ferroso y sulfatos presentes en el agua cruda de la captación “Huayco Machay” desde agosto del año 2015 hasta junio del año 2023. Estos promedios se calcularon gracias a los resultados de informes de análisis de calidad del agua cruda de la captación “Huayco Machay” efectuados por el Laboratorio de Control de Calidad de Agua Público-Comunitario del Cantón Cayambe y por laboratorios externos. Dichos informes se los puede encontrar en el anexo XVII.

Tabla 8. Promedios de aluminio, hierro total, hierro ferroso y sulfatos

Parámetro	Promedio	Criterio de calidad TULSMA	Unidades
Aluminio	0.100	-	mg/L Al ⁺³
Hierro Total	0.28	1	mg/L Fe
Hierro ferroso	0.01	-	mg/L Fe ⁺²
Sulfatos	8.49	500	mg/L SO ₄ ⁻²

Se puede observar que los promedios de hierro total y sulfatos están por debajo de los criterios de calidad de cada parámetro, sin embargo, el aluminio y hierro ferroso no cuentan con un criterio de calidad o con un límite permitido en ninguna de las normativas usadas en este trabajo de titulación.

13.3 Prueba de jarras

Las tablas 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15 presentan los resultados de las 14 pruebas de jarras realizadas. Es muy importante señalar que las muestras usadas en cada prueba fueron distintas, por ende, sus condiciones iniciales son diferentes entre sí, por lo que los resultados de cada prueba y su discusión no tienen una relación directa con las demás pruebas. La discusión de los resultados de las tablas explica las razones de porque se escogieron las dosis óptimas en cada prueba, basándose en los resultados finales y porcentajes de remoción de cada prueba.

Tabla 9. Resultados pruebas 1 y 2

PRUEBA 1						
Código muestra	APHM1	Fecha de toma de muestra	Jun-13		Hora de toma de muestra	16h00
pH Inicial	5.87	Color inicial (Pt-Co)	0		Turbiedad inicial (NTU)	7.30
Coagulante	PAC al 100%		Floculante		Floculante aniónico	
NÚMERO DE JARRA						
REACTIVOS QUÍMICOS	1	2	3	4	5	6
Elevador de pH (mg/L)	0	0	0	0	0	0
Coagulante (mg/L)	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Floculante (mg/L)	3	7.5	15	22.5	30	45
Índice de Wilcomb	0	0	0	0	0	0
pH final	4.27	4.26	4.34	4.25	4.21	4.04
Turbiedad final (NTU)	7.73	7.62	7.60	7.90	7.56	7.15
Remoción de turbiedad (%)	-5.89	-4.38	-4.11	-8.22	-3.56	2.05
PRUEBA 2						
Código muestra	APHM1	Fecha de toma de muestra	Jun-13		Hora de toma de muestra	16h00
pH Inicial	5.87	Color inicial (Pt-Co)	0		Turbiedad inicial (NTU)	7.30
Coagulante	PAC al 30%		Floculante		FeCl ₃ al 98%	
NÚMERO DE JARRA						
REACTIVOS QUÍMICOS	1	2	3	4	5	6
Elevador de pH (mg/L)	0	0	0	0	0	0
Coagulante (mg/L)	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Floculante (mg/L)	5	12.5	25	37.5	50	75
Índice de Wilcomb	0	0	0	0	0	0
pH final	4.39	4.40	4.40	4.40	4.39	4.37
Turbiedad final (NTU)	6.73	6.64	6.92	7.12	7.23	7.28
Remoción de turbiedad (%)	7.81	9.04	5.21	2.47	0.96	0.27

Las pruebas 1 y 2 se realizaron con la muestra APHM1 y se usaron PAC sólido al 100% de pureza y PAC líquido al 30% de pureza como coagulantes, respectivamente, y floculante aniónico sólido al 100% de pureza y cloruro férrico al 98% de pureza como floculantes, respectivamente y en ninguna de las pruebas se utilizó el regulador de pH. Las

dosificaciones usadas de coagulante fueron de 1000 mg/L para la prueba 1 y de 2000 mg/L para la prueba 2, mientras que las dosificaciones del floculante se variaron en cada jarra en ambas pruebas. Bajo estas condiciones, los porcentajes de remoción de turbiedad de las jarras 1, 2, 3, 4 y 5 de la prueba 1 fueron negativos, indicando que no hubo formación ni decantación de flocs, exceptuando la jarra 6, la cual tuvo un porcentaje de remoción de turbiedad de 2.05%, mientras que los porcentajes de remoción de turbiedad de las 6 jarras de la prueba 2 fueron entre 0.27% y 9.04%. Los porcentajes de remoción de turbiedad de la prueba 2 son muy bajos, pero levemente mejores que los de la prueba 1, debido a que se usó concentraciones más altas de coagulante y floculante. A pesar de esto, no se obtuvo ninguna dosis óptima de estas pruebas debido a los bajos porcentajes de remoción de turbiedad, e incluso, las dosificaciones empleadas en la prueba 1 empeoraron las condiciones iniciales del agua cruda, por lo que es necesario aplicar dosis más bajas de coagulante y posiblemente también de floculante.

Tabla 10. Resultados pruebas 3 y 6

PRUEBA 3						
Código muestra	APHM3	Fecha de toma de muestra	Jun-14	Hora de toma de muestra	19h00	
pH Inicial	6.64	Color inicial (Pt-Co)	>500	Turbiedad inicial (NTU)	153	
Coagulante	PAC al 100%		Floculante	Floculante aniónico		
NÚMERO DE JARRA						
REACTIVOS QUÍMICOS	1	2	3	4	5	6
Elevador de pH (mg/L)	10	10	10	15	15	15
Coagulante (mg/L)	10	15	20	10	15	20
Floculante (mg/L)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Índice de Wilcomb	4	4	4	6	4	4
pH final	5.91	5.92	5.76	5.86	5.69	5.69
Turbiedad final (NTU)	76.30	89.70	87.10	71.40	78.90	83.40
Remoción de turbiedad (%)	50.13	41.37	43.07	53.33	48.43	45.49
Aluminio (mg/L Al ⁺³)	0.659	-	-	0.390	-	-
PRUEBA 6						
Código muestra	APHM3	Fecha de toma de muestra	Jun-14	Hora de toma de muestra	19h00	
pH Inicial	6.64	Color inicial (Pt-Co)	>500	Turbiedad inicial (NTU)	153	
Coagulante	PAC al 30%		Floculante	FeCl ₃ al 98%		
NÚMERO DE JARRA						
REACTIVOS QUÍMICOS	1	2	3	4	5	6
Elevador de pH (mg/L)	10	10	10	15	15	15
Coagulante (mg/L)	10	15	20	10	15	20
Floculante (mg/L)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Índice de Wilcomb	6	8	10	6	8	10
pH final	7.60	7.65	7.51	7.60	7.89	7.45
Color final (Pt-Co)	3	0	0	37	0	0
Remoción de color (%)	99.40	100	100	92.60	100	100
Turbiedad final (NTU)	5.88	2.20	0.87	10.30	3.03	1.39

Continuación **Tabla 10.** Resultados pruebas 3 y 6

Remoción de turbiedad (%)	96.16	98.56	99.43	93.27	98.02	99.09
Hierro Total (mg/L Fe)	-0.02	-0.01	0.07	0.29	0.02	0.01
Hierro ferroso (mg/L Fe⁺²)	-	-	0.00	-	-	-

Las pruebas 3 y 6 se realizaron con la muestra APHM3, con la novedad de que se empezó a utilizar el regulador de pH sólido al 100% de pureza. Se usaron PAC sólido al 100% de pureza y PAC líquido al 30% de pureza como coagulantes, respectivamente, y floculante aniónico sólido al 100% de pureza y cloruro férrico sólido al 98% de pureza como floculantes, respectivamente. En ambas pruebas, las dosificaciones usadas de regulador de pH fueron de 10 mg/L y 15 mg/L, de coagulante fueron de 10 mg/L a 20 mg/L, mientras que las concentraciones de floculante usadas para las pruebas 3 y 6 fueron de 0.05 mg/L y de 0.10 mg/L, respectivamente. Bajo estas condiciones, los porcentajes de remoción de turbiedad de las 6 jarras de la prueba 3 fueron entre 41.37% y 53.33%, indicando que hubo una regular remoción de turbiedad, mientras que los porcentajes de remoción de color aparente y turbiedad de las 6 jarras de la prueba 6 fueron entre 92.60% y 100% y 93.27% y 99.43%, respectivamente, los cuales son muy altos y mucho mejores que los de la prueba 3. Por lo tanto, los resultados de las jarras de la prueba 3 no son las idóneas para ser consideradas como dosis óptimas, mientras que, la jarra 3 de la prueba 6 se considera como la dosis óptima de esta prueba, debido a sus altos porcentajes de remoción y cumplen con los límites permitidos de color aparente y turbiedad de la tabla 1 de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108 y el pH está dentro del rango de pH estipulado en la tabla B.1. de la Norma mencionada anteriormente, además de que los resultados de hierro total y hierro ferroso están por debajo de los promedios calculados presentados en la tabla 7.

En ambas pruebas se evidencia el efecto positivo de la aplicación del regulador de pH para lograr una adecuada coagulación y floculación, además de que se necesitan dosis relativamente bajas de coagulantes para tener medianos y altos porcentajes de remoción. La dosificación de 0.10 mg/L del cloruro férrico sólido al 98% de pureza resultó ser muy eficiente para la formación de buenos flocs, por lo que este reactivo resultó ser un gran floculante y se presenta como posible sustituto al floculante que utilizan en la PTAP actualmente.

Tabla 11. Resultados prueba 4 y 5

PRUEBA 4					
Código muestra	APHM4	Fecha de toma de muestra	Jun-15	Hora de toma de muestra	05h00

Continuación **Tabla 11.** Resultados prueba 4 y 5

pH Inicial	7.30	Color inicial (Pt-Co)	72	Turbiedad inicial (NTU)	18	
Coagulante	PAC al 100%		Floculante	Floculante aniónico		
NÚMERO DE JARRA						
REACTIVOS QUÍMICOS	1	2	3	4	5	6
Elevador de pH (mg/L)	10	15	20	25	30	35
Coagulante (mg/L)	15	20	25	30	35	40
Floculante (mg/L)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Índice de Wilcomb	4	8	6	6	8	6
pH final	7.15	7.24	7.34	7.39	7.41	7.39
Color final (Pt-Co)	40	0	0	19	0	19
Remoción de color (%)	44.44	100	100	73.61	100	73.61
Turbiedad final (NTU)	3.40	0.46	0.94	0.56	0.31	0.55
Remoción de turbiedad (%)	81.11	97.44	94.78	96.89	98.28	96.94
Aluminio (mg/L Al ⁺³)	-	0.396	-	-	0.263	-
PRUEBA 5						
Código muestra	APHM5	Fecha de toma de muestra	Jun-15	Hora de toma de muestra	10h45	
pH Inicial	5	Color inicial (Pt-Co)	174	Turbiedad inicial (NTU)	17.50	
Coagulante	PAC al 100%		Floculante	Floculante aniónico		
NÚMERO DE JARRA						
REACTIVOS QUÍMICOS	1	2	3	4	5	6
Elevador de pH (mg/L)	5	10	15	20	25	55
Coagulante (mg/L)	5	10	15	20	25	30
Floculante (mg/L)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Índice de Wilcomb	6	6	8	8	8	6
pH final	7.83	7.89	7.97	8.09	8.20	8.30
Color final (Pt-Co)	0	0	0	0	0	1
Remoción de color (%)	100	100	100	100	100	99.43
Turbiedad final (NTU)	5.46	3.24	2.44	2.62	2.74	6.04
Remoción de turbiedad (%)	68.80	81.49	86.06	85.03	84.34	65.49

Las pruebas 4 y 5 se realizaron con las muestras APHM4 y APHM5, respectivamente. En ambas pruebas se utilizó el regulador de pH sólido al 100% de pureza, el PAC sólido al 100% de pureza como coagulante y se usó el floculante aniónico sólido al 100% de pureza como floculante. Las dosificaciones de regulador de pH usadas en la prueba 4 fueron de 10 mg/L a 35 mg/L y para la prueba 5 fueron de 5 mg/L a 25 mg/L y en la jarra 6 se usó una dosificación de 55 mg/L. Las dosificaciones de coagulante usadas en la prueba 4 fueron de 15 mg/L hasta 40 mg/L y para la prueba 5 fueron de 5 mg/L a 30 mg/L. En ambas pruebas, las dosificaciones del floculante fueron de 0.10 mg/L.

Bajo estas condiciones, los porcentajes de remoción de color aparente y turbiedad de las 6 jarras de la prueba 4 fueron entre 44.44% y 100% y 81.11% y 98.28%, respectivamente, los cuales son muy altos, a excepción del porcentaje de remoción de color aparente de la jarra 1, el cual fue de 44.44%, mientras que los porcentajes de remoción de color aparente

y turbiedad de las 6 jarras de la prueba 5 fueron entre 99.43% y 100% y 65.49% y 86.06%, respectivamente, los cuales son altos, a excepción de los porcentajes de remoción de turbiedad de las jarras 1 y 6, los cuales fueron de 68.80% y 65.49%, respectivamente. En vista de esto, la jarra 5 de la prueba 4 se considera como la dosis óptima de esta prueba, mientras que la jarra 3 de la prueba 5 se considera como la dosis óptima de esta prueba. Ambas dosis tienen altos porcentajes de remoción y cumplen con los límites permitidos de color aparente y turbiedad de la tabla 1 de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108 y el pH está dentro del rango de pH estipulado en la tabla B.1. de la Norma mencionada anteriormente. Además, los resultados de las jarras 4 y 5 de la prueba 5 se presentan también como posibles dosis óptimas debido a sus altos porcentajes de remoción de impurezas y que cumplen con límites permitidos de color aparente y turbiedad de la tabla 1 de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108, sin embargo, los pH finales de estas jarras sobrepasan por poco el límite superior del rango de pH estipulado en la tabla B.1. de la Norma mencionada anteriormente, teniendo resultados de pH de 8.09 y 8.20, respectivamente, por lo que las dosificaciones de regulador de pH no deben ser tan elevadas.

En ambas pruebas se confirma nuevamente el efecto positivo de la aplicación del regulador de pH para lograr una adecuada coagulación y floculación, pero, se debe dosificar máximo 15 mg/L o 20 mg/L para que el pH no sobrepase el límite superior del rango de pH estipulado en la Norma. Se confirma nuevamente en esta prueba que la dosificación idónea de los ayudantes de floculación es de 0.10 mg/L, independiente de que se use cloruro férrico sólido al 98% de pureza o floculante aniónico sólido al 100% de pureza. Se evidenció que se necesitan dosis relativamente bajas de PAC sólido al 100% de pureza para tener altos porcentajes de remoción, pero estas dosificaciones deben ser similares a las dosificaciones del regulador de pH.

Tabla 12. Resultados pruebas 7 y 8

PRUEBA 7						
Código muestra	APHM6	Fecha de toma de muestra	Jun-16	Hora de toma de muestra	01h00	
pH Inicial	4.42	Color inicial (Pt-Co)	>500	Turbiedad inicial (NTU)	139	
Coagulante	Al ₂ (SO ₄) ₃ al 8%		Floculante	FeCl ₃ al 98%		
NÚMERO DE JARRA						
REACTIVOS QUÍMICOS	1	2	3	4	5	6
Elevador de pH (mg/L)	15	15	15	10	10	10
Coagulante (mg/L)	20	25	30	20	25	30
Floculante (mg/L)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Índice de Wilcomb	0	0	0	0	0	0

Continuación **Tabla 12.** Resultados pruebas 7 y 8

Color final (Pt-Co)	>500	>500	>500	>500	>500	>500
Remoción de color (%)	0	0	0	0	0	0
Turbiedad final (NTU)	118	110	111	113	117	116
Remoción de turbiedad (%)	15.11	20.86	20.14	18.71	15.83	16.55
PRUEBA 8						
Código muestra	APHM6	Fecha de toma de muestra	Jun-16	Hora de toma de muestra	01h00	
pH Inicial	4.42	Color inicial (Pt-Co)	>500	Turbiedad inicial (NTU)	139	
Coagulante	Al ₂ (SO ₄) ₃ al 8%		Floculante	FeCl ₃ al 98%		
NÚMERO DE JARRA						
REACTIVOS QUÍMICOS	1	2	3	4	5	6
Elevador de pH (mg/L)	5	5	5	0	0	0
Coagulante (mg/L)	5	10	15	5	10	15
Floculante (mg/L)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Índice de Wilcomb	0	0	0	0	0	0
pH final	5.58	5.01	4.91	5.20	5.03	5
Color final (Pt-Co)	>500	>500	>500	>500	484	470
Remoción de color (%)	0	0	0	0	3.20	6
Turbiedad final (NTU)	95.80	96.10	100	92.20	112	90
Remoción de turbiedad (%)	31.08	30.86	28.06	33.67	19.42	35.25
Aluminio (mg/L Al ⁺³)	-	-	-	-	-	0.382
Hierro Total (mg/L Fe)	0.33	0.14	0.02	0.07	-0.01	0.11
Sulfatos (mg/L SO ₄ ⁻²)	-	10	-	-	-	15

Las pruebas 7 y 8 se realizaron con la muestra APHM6. En estas pruebas se utilizó el regulador de pH sólido al 100% de pureza con dosificaciones de 10 mg/L a 15 mg/L y 0 mg/L y 5 mg/L, respectivamente, se usó sulfato de aluminio líquido al 8% de pureza como coagulante con dosificaciones de 20 mg/L a 30 mg/L y 5 mg/L a 15 mg/L, respectivamente, y se usó cloruro férrico sólido al 98% de pureza como floculante con dosificaciones de 0.10 mg/L y 0.05 mg/L, respectivamente. Bajo estas condiciones, los porcentajes de remoción de turbiedad de las pruebas 7 y 8 fueron entre 15.11% y 20.86% y entre 19.42% y 35.25%, mientras que los porcentajes de remoción de color aparente para ambas pruebas fue de 0%, por lo que ningún resultado de las jarras de ambas pruebas se consideran como dosis óptimas, debido a sus bajos porcentajes de remoción y porque no cumplen con los límites permitidos de color aparente y turbiedad de la tabla 1 de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108, ni con el pH estipulado en la tabla B.1. en la Norma mencionada anteriormente.

Tabla 13. Resultados pruebas 9 y 10

PRUEBA 9					
Código muestra	APHM7	Fecha de toma de muestra	Jun-17	Hora de toma de muestra	11h00
pH Inicial	5.70	Color inicial (Pt-Co)	150	Turbiedad inicial (NTU)	23.20
Coagulante	Al ₂ (SO ₄) ₃ al 8%		Floculante	Floculante aniónico	

Continuación **Tabla 13.** Resultados pruebas 9 y 10

	NÚMERO DE JARRA					
REACTIVOS QUÍMICOS	1	2	3	4	5	6
Elevador de pH (mg/L)	10	10	10	15	15	15
Coagulante (mg/L)	10	15	20	10	15	20
Floculante (mg/L)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Índice de Wilcomb	2	0	0	8	0	0
pH final	5.64	5.11	4.98	5.96	5.47	4.98
Color final (Pt-Co)	108	173	130	40	165	131
Remoción de color (%)	28	-15.33	13.33	73.33	-10	12.67
Turbiedad final (NTU)	17.10	19.50	19.40	2.31	19.10	19.80
Remoción de turbiedad (%)	26.29	15.95	16.38	90.04	17.67	14.66
Aluminio (mg/L Al ⁺³)	-	-	-	0.227	-	-
Sulfatos (mg/L SO ₄ ⁻²)	-	-	-	16	-	-
PRUEBA 10						
Código muestra	APHM7	Fecha de toma de muestra	Jun-17	Hora de toma de muestra	11h00	
pH Inicial	5.70	Color inicial (Pt-Co)	150	Turbiedad inicial (NTU)	23.20	
Coagulante	Al ₂ (SO ₄) ₃ al 8%		Floculante	Floculante aniónico		
	NÚMERO DE JARRA					
REACTIVOS QUÍMICOS	1	2	3	4	5	6
Elevador de pH (mg/L)	5	10	15	20	25	30
Coagulante (mg/L)	5	10	15	5	10	15
Floculante (mg/L)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Índice de Wilcomb	4	4	4	0	10	6
pH final	6.06	5.77	5.89	6.65	6.29	6.27
Color final (Pt-Co)	95	169	132	190	0	81
Remoción de color (%)	36.67	-12.67	12	-26.67	100	46
Turbiedad final (NTU)	18.30	17.50	19.20	21.40	0.69	7.42
Remoción de turbiedad (%)	21.12	24.57	17.24	7.76	97.03	68.02
Aluminio (mg/L Al ⁺³)	-	-	-	-	0.136	0.230
Sulfatos (mg/L SO ₄ ⁻²)	-	-	-	-	37	26

Las pruebas 9 y 10 se realizaron con la muestra APM7. En estas pruebas se utilizó el regulador de pH sólido al 100% de pureza con dosificaciones de 10 mg/L y 15 mg/L y 5 mg/L a 30 mg/L, respectivamente, se usó sulfato de aluminio líquido al 8% de pureza como coagulante con dosificaciones de 10 mg/L a 20 mg/L y de 5 mg/L a 15 mg/L, respectivamente, y se usó floculante aniónico sólido al 100% de pureza como floculante con dosificaciones de 0.10 mg/L y 0.05 mg/L, respectivamente. Bajo estas condiciones, los porcentajes de remoción de turbiedad de las pruebas 9 y 10 fueron entre 14.66% y 90.04% y entre 7.76% y 97.03%, respectivamente, mientras que los porcentajes de remoción de color aparente de las pruebas 9 y 10 fueron entre -15.33% y 73.33% y entre -26.67% y 100%. Como se observa en los resultados de las jarras 1, 2, 3, 5 y 6 de la prueba 9 se tienen porcentajes de remoción de color aparente muy bajos e incluso negativos, como es el caso de las jarras 2 y 5, indicando que hubo una nula remoción de color aparente, mientras que los porcentajes de remoción de turbiedad son también muy bajos. Solo la

jarra 4 tiene altos porcentajes de remoción de estos dos parámetros, sin embargo, solo el resultado de turbiedad cumple con el límite permitido de la tabla 1 de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108, mientras que el color aparente sobrepasa el límite permitido, y el pH esta fuera del rango de pH para agua de consumo humano estipulado en la tabla B.1. de la Norma mencionada anteriormente, además de que los resultados de aluminio y sulfatos están por encima de los promedios presentados en la tabla 8. En vista de esto, los resultados de las jarras de la prueba 9 no son los adecuados para ser consideradas como dosis óptimas. Con respecto a la prueba 10, los resultados de las jarras 1, 2, 3, 4 y 6 tienen porcentajes de remoción de color aparente muy bajos e incluso negativos, como es el caso de la jarra 2 y 4, indicando que hubo una nula remoción de color aparente, mientras que los porcentajes de remoción de turbiedad son también muy bajos, sobre todo en la jarra 4. Solo la jarra 5 tiene altos porcentajes de remoción de estos dos parámetros y cumple con los límites permitidos de color aparente y turbiedad de la tabla 1 de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108, sin embargo, el pH final de esta jarra esta levemente por debajo del límite inferior del rango de pH estipulado en la tabla B.1. de la Norma mencionada anteriormente, teniendo un resultado de pH de 6.29. En vista de esto, si se utiliza las mismas dosificaciones de coagulante y floculante usadas en la jarra 5 de la prueba 10 y si se incrementa ligeramente la dosificación del regulador de pH, esta jarra se consideraría como la dosis óptima de la prueba 10.

A pesar de usar el regulador de pH en ambas pruebas, los resultados de pH finales no lograron llegar a cumplir por lo menos con el límite inferior del rango de pH estipulado en la tabla B.1. de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108. El sulfato de aluminio solo tuvo buenos resultados en la jarra 5 de la prueba 10, por lo que este reactivo químico usado como coagulante no es recomendable para el proceso de coagulación-floculación de la PTAP “Huayco Machay”. Con respecto al floculante, el floculante aniónico resultó ser un gran ayudante de floculación en dosificaciones de 0.05 mg/L.

Tabla 14. Resultados pruebas 11 y 12

PRUEBA 11						
Código muestra	APHM8	Fecha de toma de muestra	Jun-18		Hora de toma de muestra	06h30
pH Inicial	4.53	Color inicial (Pt-Co)	48		Turbiedad inicial (NTU)	12.20
Coagulante	FeCl ₃ al 98%		Floculante	Floculante aniónico		
NÚMERO DE JARRA						
REACTIVOS QUÍMICOS	1	2	3	4	5	6
Elevador de pH (mg/L)	5	5	5	10	10	10
Coagulante (mg/L)	5	10	15	5	10	15

Continuación **Tabla 14.** Resultados pruebas 11 y 12

Floculante (mg/L)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Índice de Wilcomb	4	6	2	2	6	8
pH final	6.37	6.20	6.22	6.91	6.54	6.52
Color final (Pt-Co)	0	0	117	81	0	0
Remoción de color (%)	100	100	-143.75	-68.75	100	100
Turbiedad final (NTU)	6.08	4.10	12.50	11.70	4.06	1.90
Remoción de turbiedad (%)	50.16	66.39	-2.46	4.10	66.72	84.43
Hierro Total (mg/L Fe)	0.86	0.53	-	-	0.45	0.52
Hierro ferroso (mg/L Fe ⁺²)	-	-	-	-	-	-0.01
PRUEBA 12						
Código muestra	APHM8	Fecha de toma de muestra	Jun-18	Hora de toma de muestra	06h30	
pH Inicial	4.53	Color inicial (Pt-Co)	48	Turbiedad inicial (NTU)	12.20	
Coagulante	FeCl ₃ al 98%	Floculante	Floculante aniónico			
NÚMERO DE JARRA						
REACTIVOS QUÍMICOS	1	2	3	4	5	6
Elevador de pH (mg/L)	5	5	5	0	0	0
Coagulante (mg/L)	10	15	20	10	15	20
Floculante (mg/L)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Índice de Wilcomb	8	0	0	0	0	0
pH final	5.59	5.20	4.54	5.15	4.30	4.14
Color final (Pt-Co)	<0	106	133	120	98	130
Remoción de color (%)	>100	-120.83	-177.08	-150	-104.17	-170.83
Turbiedad final (NTU)	0.97	11.90	10.80	10.30	10.40	10.30
Remoción de turbiedad (%)	92.05	2.46	11.48	15.57	14.75	15.57
Hierro Total (mg/L Fe)	0.73	-	-	-	-	-
Hierro ferroso (mg/L Fe ⁺²)	-0.01	-	-	-	-	-

Las pruebas 11 y 12 se realizaron con la muestra APHM8 y se utilizó el regulador de pH sólido al 100% de pureza con dosificaciones de 5 mg/L y 10 mg/L y 0 mg/L y 5 mg/L, respectivamente, se usó cloruro férrico sólido al 98% de pureza como coagulante con dosificaciones de 5 mg/L a 15 mg/L y de 10 mg/L a 20 mg/L, respectivamente, y se usó floculante aniónico sólido al 100% de pureza como floculante con dosificaciones de 0.05 mg/L y 0.10 mg/L, respectivamente. Bajo estas condiciones, los porcentajes de remoción de turbiedad de las pruebas 11 y 12 fueron entre -2.46% y 84.43% y entre 2.46% y 92.05%, respectivamente, mientras que los porcentajes de remoción de color aparente fueron entre -143.75% y 100% y entre -177.08% y mayor a 100%.

Con respecto a la prueba 11, se considera a la jarra 6 como la dosis óptima de esta prueba debido a que es la única con altos porcentajes de remoción de turbiedad y color aparente y cumple con los límites permitidos de estos parámetros de la tabla 1 de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108 y posee un pH final que está dentro del rango de pH para agua de consumo humano estipulado en la tabla B.1. de la Norma mencionada anteriormente.

Con respecto a la prueba 12, la jarra 1 se considera como posible dosis óptima debido a que es la única con altos porcentajes de remoción de color aparente y turbiedad y cumple con los límites permitidos de la tabla 1 de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108, sin embargo, el pH final de esta jarra no logra llegar al límite inferior de rango de pH para agua de consumo humano estipulado en la tabla B.1. de la Norma mencionada anteriormente, teniendo un resultado de pH de 5.59. Tomando en cuenta este último factor y siendo esta jarra la única con altos porcentajes de remoción, si se utiliza las mismas dosificaciones de coagulante y floculante usadas en la jarra 1 de la prueba 12 y si se incrementa ligeramente la dosificación del regulador de pH, esta jarra se consideraría como la dosis óptima de la prueba 12.

Se observó en ambas pruebas que el elevador de pH ocasionó una buena coagulación y floculación solo en las jarras 6 y 1 de las pruebas 11 y 12, respectivamente, a pesar de que se usaron bajas dosis de regulador de pH, no obstante, el pH final de la jarra 1 de la prueba 12 estuvo muy por debajo del límite inferior del rango de pH estipulado en la tabla B.1. de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108. Se evidenció que el cloruro férrico actúa de manera efectiva como coagulante cuando la dosificación usada es similar a la dosificación del regulador de pH. Por el lado del floculante, se confirma nuevamente que el floculante aniónico resultó ser un gran ayudante de floculación en dosificaciones de 0.05 mg/L y 0.10 mg/L para aguas con bajas lecturas de turbiedad y color aparente.

Tabla 15. Resultados pruebas 13 y 14

PRUEBA 13						
Código muestra	APHM8	Fecha de toma de muestra	Jun-18		Hora de toma de muestra	06h30
pH Inicial	4.53	Color inicial (Pt-Co)	48		Turbiedad inicial (NTU)	12.20
Coagulante	PAC al 30%		Floculante	Floculante aniónico		
	NÚMERO DE JARRA					
REACTIVOS QUÍMICOS	1	2	3	4	5	6
Elevador de pH (mg/L)	5	10	15	5	10	15
Coagulante (mg/L)	5	10	15	20	25	30
Floculante (mg/L)	0.05	0.05	0.05	0.10	0.10	0.10
Índice de Wilcomb	4	6	6	0	8	8
pH final	6.85	6.99	6.71	6.23	6.29	6.28
Color final (Pt-Co)	31	10	12	59	2	5
Remoción de color (%)	35.42	79.17	75	-22.92	95.83	89.58
Turbiedad final (NTU)	6.68	2.82	3.99	9.01	1.31	1.83
Remoción de turbiedad (%)	45.25	76.89	67.30	26.15	89.26	85
Aluminio (mg/L Al⁺³)	-	0.215	0.219	-	0.087	0.103
PRUEBA 14						
Código muestra	APHM9	Fecha de toma de muestra	Jun-19		Hora de toma de muestra	02h30

Continuación **Tabla 15.** Resultados pruebas 13 y 14

pH Inicial	5.24	Color inicial (Pt-Co)	119		Turbiedad inicial (NTU)	16.40
Coagulante	PAC al 30%		Floculante		Floculante aniónico	
	NÚMERO DE JARRA					
REACTIVOS QUÍMICOS	1	2	3	4	5	6
Elevador de pH (mg/L)	5	10	15	20	25	30
Coagulante (mg/L)	15	20	25	15	20	25
Floculante (mg/L)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Índice de Wilcomb	2	8	6	6	6	6
pH final	7.49	7.63	7.80	8.05	7.88	7.55
Color final (Pt-Co)	102	12	32	25	21	39
Remoción de color (%)	14.29	89.92	73.11	78.99	82.35	67.23
Turbiedad final (NTU)	16.30	3.94	5.16	5.17	5.91	6.49
Remoción de turbiedad (%)	0.61	75.98	68.54	68.48	63.96	60.43
Aluminio (mg/L Al⁺³)	-	-0.001	0.120	0.347	-	-

Las pruebas 13 y 14 se realizaron con las muestras APHM8 y APHM9, respectivamente. Se utilizó el regulador de pH sólido al 100% de pureza con dosificaciones de 5 mg/L a 15 mg/L y 5 mg/L a 30 mg/L, respectivamente, se usó PAC líquido al 30% de pureza como coagulante con dosificaciones de 5 mg/L a 30 mg/L y de 15 mg/L a 25 mg/L, respectivamente, y se usó floculante aniónico sólido al 100% de pureza como floculante con dosificaciones de 0.05 mg/L y 0.10 mg/L, respectivamente. Usando estas dosificaciones, los porcentajes de remoción de color aparente de las pruebas 13 y 14 fueron entre -22.92% y 95.83% y entre 14.29% y 89.92%, respectivamente, mientras que los porcentajes de remoción de turbiedad de las pruebas 13 y 14 fueron entre 26.15% y 89.26% y entre 0.61% y 75.98%, respectivamente.

Con respecto a la prueba 13, las jarras 2, 3, 5 y 6 tienen altos porcentajes de remoción de color aparente, siendo el mayor el de la jarra 5, que cuenta con 95.83%, mientras que los porcentajes de remoción de turbiedad de las jarras 2, 5 y 6 son relativamente altos, siendo el mayor el de la jarra 5, que cuenta con 89.26%. Por lo tanto, la jarra 2 se considera la dosis óptima debido sus altos porcentajes de remoción de turbiedad y color aparente y cumplen con los límites permitidos de estos parámetros de la tabla 1 de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108 y posee un pH final que está dentro del rango de pH para agua de consumo humano estipulado en la tabla B.1. de la Norma mencionada anteriormente, a pesar de que la concentración final de aluminio sobrepasa levemente el promedio calculado en la tabla 8. Por otro lado, los resultados de las jarras 5 y 6 de la prueba 13 reflejan que también podrían ser dosis óptimas si se logra corregir los pH finales de estas jarras, los cuales fueron 6.29 y 6.28, respectivamente. Estos resultados de pH están levemente por debajo del límite inferior del rango de pH estipulado en la tabla B.1. de la Norma Técnica

Ecuatoriana INEN 1108, por lo que, si se utilizan las mismas dosificaciones de coagulante y floculante usadas en las jarras 5 y 6 y si se incrementa ligeramente las dosificaciones del regulador de pH, una de estas jarras podría llegar a ser la dosis óptima de la prueba 13, sustituyendo a la jarra 2. Es importante indicar que los porcentajes de remoción de las jarras 5 y 6 son más altas que de la jarra 2 y las concentraciones finales de aluminio de estas jarras son mucho más bajas que de la jarra 2.

Con respecto a la prueba 14, las jarras 2, 4, y 5 tienen altos porcentajes de remoción de color aparente, siendo el mayor el de la jarra 2, que cuenta con 89.92%, mientras que el porcentaje de remoción de turbiedad de la jarra 2 es la más alta de todas las jarras la cual es de 75.98%. Por lo tanto, la jarra 2 es la dosis óptima de la prueba 14 debido a sus altos porcentajes de remoción y porque cumple con los límites permitidos de color aparente y turbiedad de la tabla 1 de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108 y el pH final de esta jarra se encuentra dentro del rango de pH estipulado en la tabla B.1. de la Norma mencionada anteriormente.

A pesar de haber usado una muestra de agua cruda diferente en cada prueba, las condiciones iniciales de ambas muestras son similares, por lo que la dosificación de 10 mg/L de regulador pH fue la adecuada para que se dé una correcta coagulación y logró colocar el pH dentro del rango estipulado en la tabla B.1.. Las dosificaciones de 10 mg/L y 20 mg/L del PAC líquido al 30% de pureza fueron las idóneas para que la jarra 2 de las pruebas 13 y 14 obtuvieran porcentajes de remoción de turbiedad muy similares. Finalmente, la dosificación de 0.10 mg/L del floculante logró remover más color aparente que usando la dosificación de 0.05 mg/L.

13.4 Dosis óptimas

Las tablas 16 y 17 presentan las dosis óptimas para aguas crudas con bajas y altas medidas de turbiedad y color aparente, respectivamente. Estas dosis óptimas logran cumplir los límites permitidos de turbiedad y color aparente de la tabla 1 de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108 y los pH finales de estas dosis se encuentran dentro del rango de pH estipulado en la tabla B.1. de la Norma mencionada anteriormente y tienen porcentajes de remoción de turbiedad y color aparente mayores a 75%.

La tabla 18 presenta posibles dosis óptimas para aguas crudas con bajas medidas de turbiedad y color aparente. Estas dosis óptimas logran cumplir los límites permitidos de

turbiedad y color aparente de la tabla 1 de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108 y tienen altos porcentajes de remoción de turbiedad y color aparente, sin embargo, los pH finales de estas dosis no se encuentran dentro del rango de pH estipulado en la tabla B.1. de la Norma mencionada anteriormente.

Tabla 16. Dosis óptimas para agua cruda con baja turbiedad

DOSIS ÓPTIMAS PARA AGUA CRUDA CON BAJA TURBIEDAD								
CONDICIONES DEL AGUA CRUDA								
Rango de turbiedad (NTU)	12.20 – 23.20		Rango de color aparente (Pt-Co)	48 – 174		Rango de pH	4.53 - 7.30	
Número de prueba	Número de jarra	Dosis Elevador de pH (mg/L)	Coagulante	Dosis (mg/L)	Floculante	Dosis (mg/L)	Remoción de turbiedad (%)	Remoción de color aparente (%)
4	5	30	PAC 100%	35	Floculante aniónico	0.10	98.28	100
11	6	10	FeCl ₃	15	Floculante aniónico	0.05	84.43	100
5	3	15	PAC 100%	15	Floculante aniónico	0.10	86.06	100
13	2	10	PAC 30%	10	Floculante aniónico	0.05	76.89	79.17
14	2	10	PAC 30%	20	Floculante aniónico	0.10	75.98	89.92

Como se observa, se obtuvieron altos porcentajes de remoción en aguas crudas con bajos contenidos de turbiedad y color aparente, dosificando un promedio de 15 mg/L de regulador de pH, un promedio de 19 mg/L de coagulantes y un promedio de 0.08 mg/L de floculante aniónico como floculante. Las dosis óptimas obtenidas usaron 3 diferentes coagulantes, los cuales fueron: PAC sólido al 100% de pureza, PAC líquido al 30% de pureza y cloruro férrico sólido al 98% de pureza y se dosificaron promedios de 25 mg/L, 15 mg/L y 15 mg/L, respectivamente, mientras que el floculante usado fue el mismo para todas las dosis, al igual que el regulador de pH.

En vista de que los promedios de los coagulantes usados son cercanos al promedio general de 19 mg/L, estos coagulantes resultan ser adecuados para el proceso de coagulación-floculación de la PTAP “Huayco Machay”.

Con respecto al regulador de pH y el floculante, la dosificación promedio de 15 mg/L de regulador permitió a los coagulantes usados desestabilizar y aglomerar eficientemente a los coloides del agua cruda usada en cada prueba, mientras que la dosificación promedio de 0.08 mg/L del floculante permitió una buena formación de flocs.

Tabla 17. Dosis óptimas para agua cruda con alta turbiedad

DOSIS ÓPTIMA PARA AGUA CRUDA CON ALTA TURBIEDAD								
CONDICIONES DEL AGUA CRUDA								
Turbiedad (NTU)	153		Color aparente (Pt-Co)	>500		pH	6.64	
Número de prueba	Número de jarra	Dosis Elevador de pH (mg/L)	Coagulante	Dosis (mg/L)	Floculante	Dosis (mg/L)	Remoción de turbiedad (%)	Remoción de color aparente (%)
6	3	10	PAC 30%	20	FeCl ₃	0.10	99.43	100

Como se observa en la tabla, se obtuvieron altos porcentajes de remoción en aguas crudas con altos contenidos de turbiedad y color aparente aplicando dosificaciones de regulador de pH, coagulante y floculante de 10 mg/L, 20 mg/L y 0.10 mg/L, respectivamente, usando como coagulante y floculante al PAC líquido al 30% de pureza y cloruro férrico sólido al 98% de pureza, respectivamente.

Tabla 18. Posibles dosis óptimas para agua cruda con baja turbiedad

POSIBLES DOSIS ÓPTIMAS PARA AGUA CRUDA CON BAJA TURBIEDAD								
CONDICIONES DEL AGUA CRUDA								
Rango de turbiedad (NTU)	12.20 – 23.20		Rango de color aparente (Pt-Co)	48 – 150		Rango de pH	4.53 – 5.70	
Número de prueba	Número de jarra	Dosis Elevador de pH (mg/L)	Coagulante	Dosis (mg/L)	Floculante	Dosis (mg/L)	Remoción de turbiedad (%)	Remoción de color aparente (%)
10	5	25	Al ₂ (SO ₄) ₃	10	Floculante aniónico	0.05	97.03	100
12	1	5	FeCl ₃	10	Floculante aniónico	0.10	92.05	104.17
13	5	10	PAC 30%	25	Floculante aniónico	0.10	89.26	95.83
5	4	20	PAC 100%	20	Floculante aniónico	0.10	85.03	100
13	6	15	PAC 30%	30	Floculante aniónico	0.10	85	89.58
5	5	25	PAC 100%	25	Floculante aniónico	0.10	84.34	100
11	2	5	FeCl ₃	10	Floculante aniónico	0.05	66.39	100

Estas dosis se las catalogó como posibles dosis óptimas para aguas crudas con bajos niveles de turbiedad y color aparente debido a que los pH finales no se encuentran dentro del rango de pH estipulado en la tabla B.1. de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108.

Estas dosis se obtuvieron dosificando un promedio de 15 mg/L de regulador de pH, un promedio de 26 mg/L de coagulantes y un promedio de 0.086 mg/L de floculante aniónico

como floculante. Estas posibles dosis óptimas usaron 4 diferentes coagulantes, los cuales fueron: sulfato de aluminio líquido al 8% de pureza, PAC sólido al 100% de pureza, PAC líquido al 30% de pureza y cloruro férrico sólido al 98% de pureza y se dosificaron promedios de 10 mg/L, 22.5 mg/L, 27.5 mg/L y 10 mg/L, respectivamente, mientras que el floculante usado fue el mismo para todas las dosis, al igual que el regulador de pH.

En vista de que los promedios del PAC sólido al 100% de pureza y PAC líquido al 30% de pureza son los más cercanos al promedio general de 26 mg/L, estos coagulantes resultan ser adecuados para el proceso de coagulación-floculación de la PTAP “Huayco Machay”. Con respecto al floculante, la dosificación promedio de 0.086 mg/L permitió una buena formación de flocs.

Con respecto al regulador de pH, las dosificaciones usadas de regulador permitieron a los coagulantes desestabilizar y aglomerar eficientemente a los coloides del agua cruda usada en cada prueba, sin embargo, se deben modificar ligeramente las dosificaciones del elevador de pH para que el pH final logre estar dentro del rango de pH estipulado en la tabla B.1. de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108. Al hacer esto y manteniendo las mismas dosificaciones de coagulante y floculante, estas dosis pueden llegar a ser mejores que las presentadas en la tabla 16.

13.5 Validación de dosis óptimas

Para validar los resultados de las dosis óptimas obtenidas, las tablas 19 y 20 presentan los resultados de las repeticiones de las pruebas 4 y 6, las cuales poseen las dosis óptimas con mayor porcentaje de remoción de turbiedad y color aparente y cumplen con los límites permitidos de las tablas 1 y B.1. de la Norma Técnica Ecuatoriana 1108. Estas repeticiones se hicieron bajo las mismas condiciones de las pruebas 4 y 6, las cuales se encuentran en las tablas 11 y 10, respectivamente, con la única diferencia de que en las repeticiones se midió las concentraciones iniciales de aluminio, hierro total y sulfatos en el agua cruda.

Tabla 19. Validación prueba 4

VALIDACIÓN PRUEBA 4					
pH Inicial	6.79	Color inicial (Pt-Co)	47	Turbiedad inicial (NTU)	6.71
[Aluminio inicial] (mg/L Al ⁺³)	0.128	[Hierro Total inicial] (mg/L Fe)	0.04	[Sulfato inicial] (mg/L SO ₄ ⁻²)	7
Coagulante	PAC al 100%		Floculante	Floculante aniónico	
NÚMERO DE JARRA					

Continuación **Tabla 19.** Validación prueba 4

REACTIVOS QUÍMICOS	1	2	3	4	5	6
Elevador de pH (mg/L)	10	15	20	25	30	35
Coagulante (mg/L)	15	20	25	30	35	40
Floculante (mg/L)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Índice de Wilcomb	8	8	8	8	10	10
pH final	5.66	5.71	5.69	5.84	6.38	7.09
Color final (Pt-Co)	7	5	4	1	11	2
Remoción de color (%)	85.11	89.36	91.49	97.87	76.60	95.74
Turbiedad final (NTU)	1.96	1.90	1.49	1.16	0.94	0.94
Remoción de turbiedad (%)	70.79	71.68	77.79	82.71	85.99	85.99

Inicialmente, la prueba 4 usó una muestra de agua cruda con bajos niveles de turbiedad y color aparente, obteniendo altos niveles de remoción de estos contaminantes en la jarra 5 al dosificar 30 mg/L de regulador de pH, 35 mg/L de PAC sólido al 100% de pureza como coagulante y 0.10 mg/L de floculante aniónico sólido al 100% de pureza como floculante (Tabla 11). La repetición de la prueba 4 usó igualmente un agua cruda con bajos niveles de turbiedad y color aparente y se usaron los mismos agentes químicos y las mismas dosificaciones de estos en la repetición de esta prueba.

Los resultados de los porcentajes de remoción de turbiedad y color aparente de la repetición de la prueba fueron altos en las jarras 3, 4, 5 y 6, siendo mayores a 75%, y cumplen con los límites permitidos de la tabla 1 de la Norma Técnica Ecuatoriana 1108, sin embargo, solo el pH final de la jarra 6 está dentro el rango de pH de la tabla B.1. de la Norma mencionada anteriormente y la jarra 5 está muy por debajo del límite inferior del rango de pH de la tabla B.1. En comparación con la prueba 4, los porcentajes de remoción de color aparente de la repetición fueron mayores en todas las jarras mientras que los de turbiedad bajaron un poco, pero se mantienen mayores a 75%, sobre todo en las jarras 3, 4, 5 y 6. Por lo tanto, la repetición de esta prueba validó que las dosificaciones de 30 mg/L y 35 mg/L de regulador de pH son las adecuadas para cumplir el rango de pH de la tabla B.1., y que las dosificaciones de 0.10 mg/L de floculante aniónico sólido al 100% de pureza son las idóneas para formar un floc grande y pesado. Con referencia a la dosificación del coagulante, la repetición validó que la dosificación de 35 mg/L logra remover gran cantidad de impurezas, sin embargo, también quedó demostrado que se pueden tener mayores porcentajes de remoción usando dosificaciones menores, como se evidencia en los resultados de las jarras 3 y 4, las cuales usan 25 mg/L y 30 mg/L, respectivamente.

Tabla 20. Validación prueba 6

VALIDACIÓN PRUEBA 6						
pH Inicial	5.78	Color inicial (Pt-Co)	44	Turbiedad inicial (NTU)	6.91	
[Aluminio inicial] (mg/L Al ⁺³)	0.007	[Hierro Total inicial] (mg/L Fe)	0.03	[Sulfato inicial] (mg/L SO ₄ ⁻²)	27	
Coagulante	PAC al 30%		Floculante	FeCl ₃ al 98%		
	NÚMERO DE JARRA					
REACTIVOS QUÍMICOS	1	2	3	4	5	6
Elevador de pH (mg/L)	10	10	10	15	15	15
Coagulante (mg/L)	10	15	20	10	15	20
Floculante (mg/L)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Índice de Wilcomb	8	8	8	8	10	10
pH final	5.80	6.08	5.78	6.28	6.36	6.66
Color final (Pt-Co)	14	7	-3	0	0	6
Remoción de color (%)	68.18	84.09	106.82	100	100	86.36
Turbiedad final (NTU)	2.91	1.64	1.50	2.55	2.45	2.76
Remoción de turbiedad (%)	57.89	76.27	78.29	63.10	64.54	60.06

Inicialmente, la prueba 6 usó una muestra de agua cruda con altos niveles de turbiedad y color aparente, obteniendo altos niveles de remoción de estos contaminantes en la jarra 3 al dosificar 10 mg/L de regulador de pH, 20 mg/L de PAC líquido al 30% de pureza como coagulante y 0.10 mg/L de cloruro férrico sólido al 98% de pureza como floculante (Tabla 10). Sin embargo, la repetición de la prueba 6 usó un agua cruda con bajos niveles de turbiedad y color aparente, pero se usaron los mismos agentes químicos y las mismas dosificaciones de estos en la repetición de esta prueba.

Los resultados de los porcentajes de remoción de turbiedad y color aparente de la repetición de la prueba fueron altos solo en las jarras 2 y 3, siendo mayores a 75%, y cumplen con los límites permitidos de la tabla 1 de la Norma Técnica Ecuatoriana 1108, pero los pH finales de estas jarras no están dentro del rango de pH de la tabla B.1. de la Norma mencionada anteriormente y los porcentajes de remoción de turbiedad y color aparente no fueron tan altos como los de la prueba 6 inicial (Tabla 10). Por lo tanto, la repetición de esta prueba validó que las dosificaciones de 10 mg/L de regulador de pH, 20 mg/L de PAC líquido al 30% de pureza como coagulante y 0.10 mg/L de cloruro férrico sólido al 98% de pureza como floculante producen altos porcentajes de remoción en aguas crudas con altos y bajos niveles de turbiedad y color aparente, pero estas dosificaciones y la combinación de PAC líquido al 30% de pureza como coagulante y de cloruro férrico sólido al 98% de pureza como floculante es más efectiva para aguas crudas con altos niveles de turbiedad y color aparente que en aguas crudas con bajos niveles de estos parámetros.

13.6 Análisis costo-beneficio

El análisis de costo-beneficio requiere de tres factores: el caudal de agua entrante a la PTAP, las dosificaciones usadas de agentes químicos y los precios de estos por kilogramo. La tabla 21 especifica los precios por kilogramo de los reactivos químicos que usa la PTAP “Huayco Machay” y también, de aquellos que se usaron en las 14 pruebas de jarras realizadas en la semana del 13 de junio al 19 de junio del 2023.

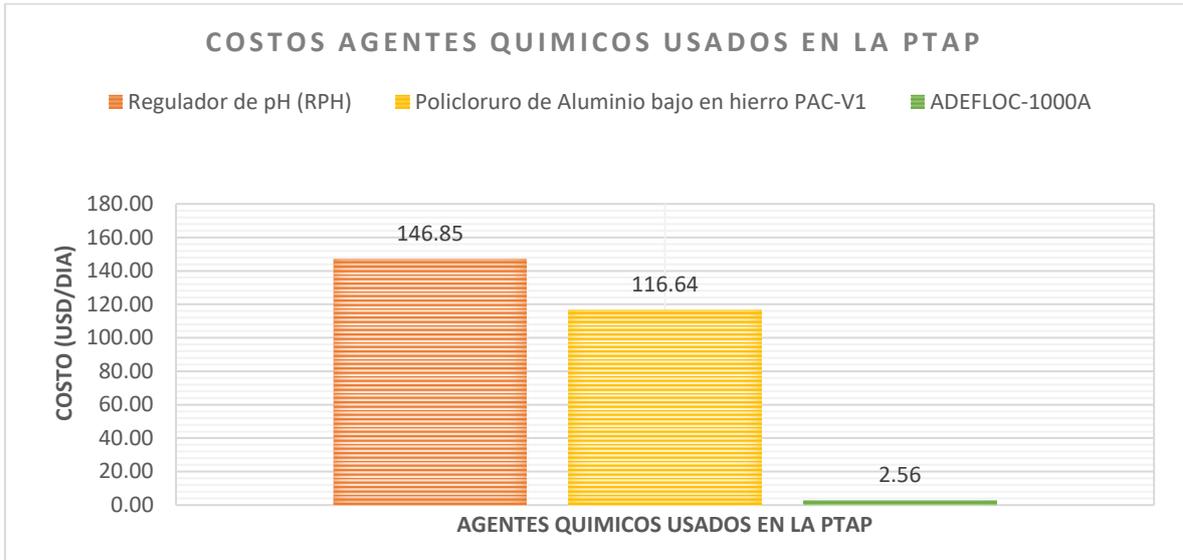
Tabla 21. Precios de los reactivos usados en las pruebas.

EMPRESA	NOMBRE COMERCIAL DEL PRODUCTO	PRESENTACIÓN	PRECIO/KG (USD)
ADE Cía. Ltda.	Regulador de pH (RPH)*	Sacos de 25 Kg	1.259
ADE Cía. Ltda.	Policloruro de Aluminio bajo en hierro PAC-V1*	Sacos de 25 Kg	0.750
ADE Cía. Ltda.	ADEFLOC-1000A*	Sacos de 25 Kg	4.116
-	Policloruro de Aluminio Tipo A	Sacos de 25 Kg	1.060
QUIMPAC	Cloruro férrico sólido QUIMPAC 3900	Sacos de 25 Kg	1.467
QUIMPAC	Sulfato de aluminio tipo B líquido QUIMPAC 1010 L	Tambores plásticos de 200 Kg	0.448

* Agentes químicos que usa la PTAP actualmente

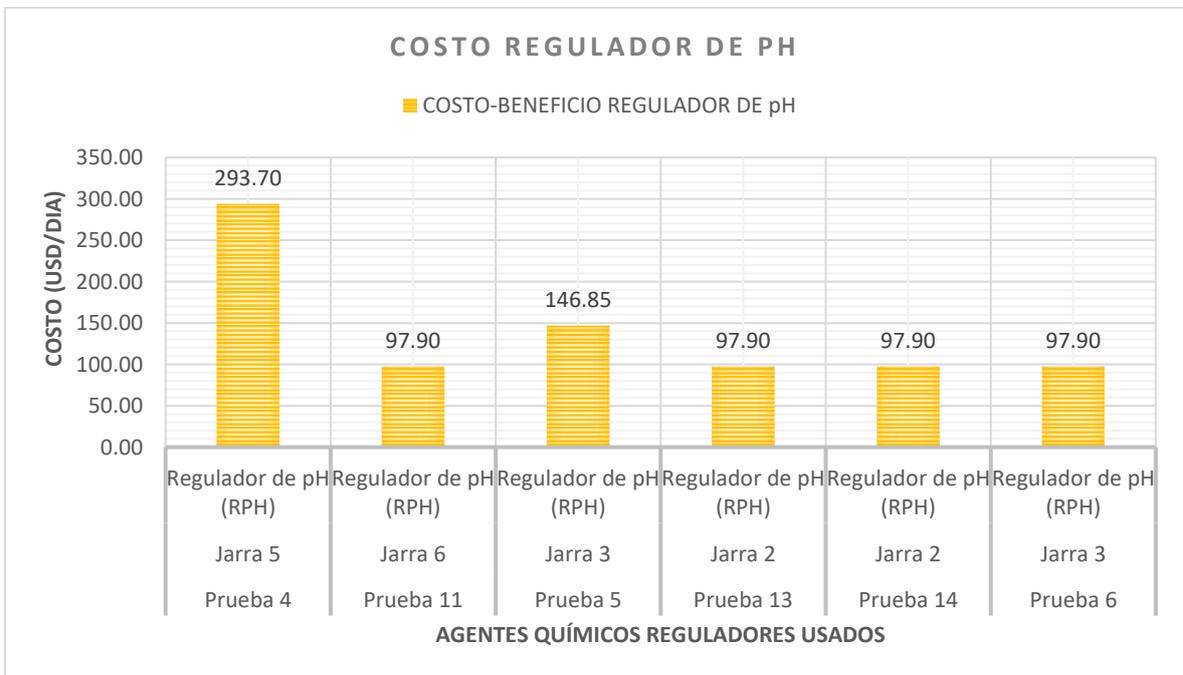
Primero se realizó el análisis de costo por día de los reactivos químicos que usa la PTAP en su proceso de coagulación-floculación. Se usó el dato del caudal de agua entrante a la planta del mes de junio, el cual fue de 90 L/s, los precios por kilogramo de los agentes químicos que usan la PTAP en su proceso de coagulación-floculación y los promedios mensuales de dosificaciones de agentes químicos, los cuales son: 15 mg/L de elevador de pH sólido al 100% de pureza [Regulador de pH (RPH)], 20 mg/L de coagulante, el cual es PAC sólido al 100% de pureza (Policloruro de Aluminio bajo en hierro PAC-V1) y 0.08 mg/L de floculante, el cual es el floculante aniónico sólido de 100% de pureza (ADEFLOC-1000A).

Figura 6. Costo por día de los agentes químicos usados en la PTAP



Una vez conocido el costo por día de los reactivos químicos que usa la PTAP en su proceso de coagulación-floculación, se realizó el mismo análisis usando los precios por kilogramo de los agentes químicos de la tabla 21 y el dato de caudal de entrada a la PTAP, pero ahora, las dosificaciones usadas corresponden a las concentraciones de los agentes químicos de las dosis óptimas de las tablas 16 y 17.

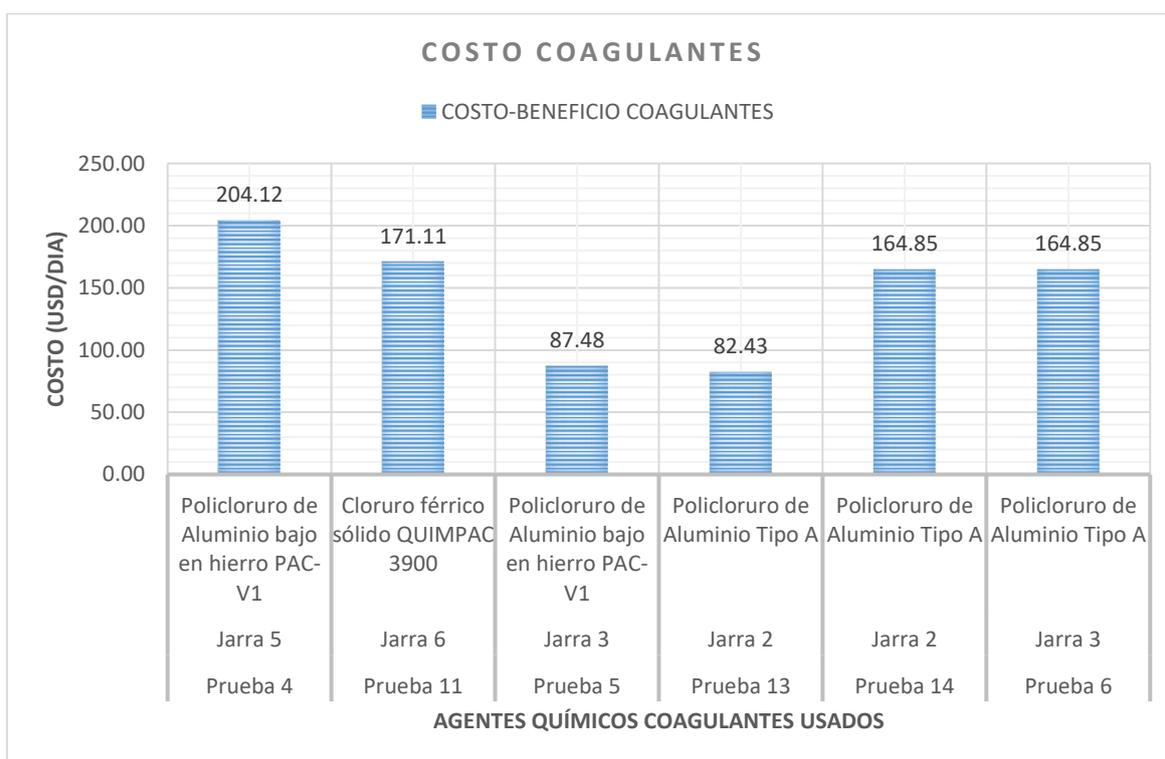
Figura 7. Costo por día del regulador de pH de las dosis óptimas



La figura 7 detalla los resultados de costo por día del regulador de pH sólido al 100% de pureza [Regulador de pH (RPH)]. Se observa que en todas las dosis se usó el mismo

regulador, el cual es el que usa actualmente la PTAP. Los costos por día de la jarra 6 de la prueba 11, de la jarra 2 de la prueba 13, de la jarra 2 de la prueba 14 y de la jarra 3 de la prueba 6 son menores al promedio mensual de 146.85 USD/día. El resultado de la jarra 5 de la prueba 4 es mayor al promedio mensual, mientras que la jarra 3 de la prueba 5 es igual al promedio mensual. Tomando en cuenta que se usó el mismo reactivo en todas las pruebas, los costos por día de este reactivo varían según las dosificaciones usadas en base a las características del agua cruda, sobre todo el pH inicial.

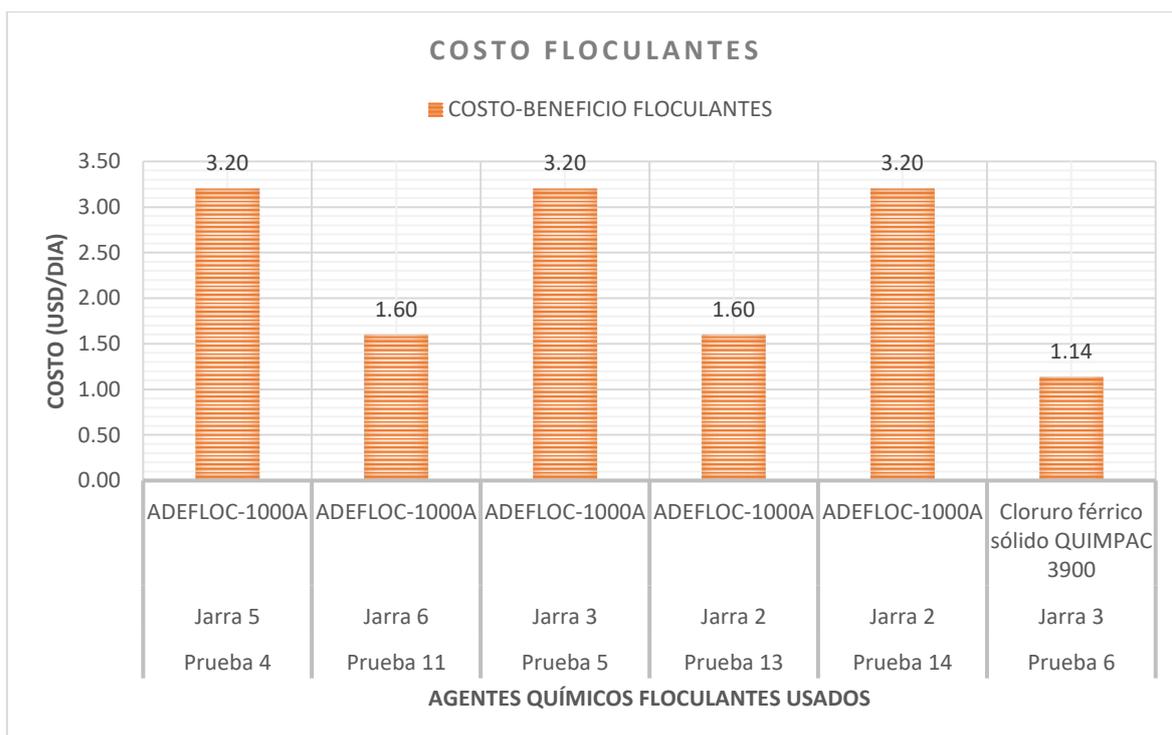
Figura 8. Costo por día de los coagulantes de las dosis óptimas



La figura 8 detalla los resultados de costo por día del PAC sólido al 100% de pureza (Policloruro de Aluminio bajo en hierro PAC-V1), del PAC líquido al 30% de pureza (Policloruro de Aluminio Tipo A) y del cloruro férrico sólido al 98% de pureza (Cloruro férrico sólido QUIMPAC 3900). Se observa que 3 dosis usan Policloruro de Aluminio Tipo A, 2 dosis usan Policloruro de Aluminio bajo en hierro PAC-V1, el cual es el coagulante que usa actualmente la PTAP, y 1 dosis usa Cloruro férrico sólido QUIMPAC 3900. Se observa que el costo por día de la jarra 2 de la prueba 13 es menor al promedio mensual de 116.64 USD/día, mientras que la jarra 2 de la prueba 14 y de la jarra 3 de la prueba 6 son mayores al promedio mensual. Estas dosis usaron Policloruro de Aluminio Tipo A. El costo por día de la jarra 3 de la prueba 5 es menor al promedio mensual y la jarra 5 de la prueba 4 es mayor al promedio mensual. Estas dosis utilizaron Policloruro de Aluminio bajo en hierro

PAC-V1. La jarra 6 de la prueba 11 usó Cloruro férrico sólido QUIMPAC 3900 y su costo por día fue mayor que el promedio mensual. Se observó que por lo menos un coagulante superó el promedio mensual y que la mayoría de las dosis tienen altos costos por día que el promedio mensual, debido a las dosificaciones usadas dependiendo de la calidad del agua cruda.

Figura 9. Costo por día de los floculantes de las dosis óptimas



La figura 9 detalla los resultados de costo por día del floculante aniónico sólido al 100% de pureza (ADEFLOC-1000A) y del cloruro férrico sólido al 98% de pureza (Cloruro férrico sólido QUIMPAC 3900). Se observa que 5 dosis usaron ADEFLOC-1000, el cual es el floculante que usa actualmente la PTAP, y una dosis usa Cloruro férrico sólido QUIMPAC 3900. Los costos por día de la jarra 5 de la prueba 4, de la jarra 3 de la prueba 5 y de la jarra 2 de la prueba 14 son mayores al promedio mensual de 2.56 USD/día, mientras que los resultados de la jarra 6 de la prueba 11 y de la jarra 2 de la prueba 13 son menores al promedio mensual. Todas estas dosis usaron ADEFLOC-1000A. Solamente la jarra 3 de la prueba 6 usó Cloruro férrico sólido QUIMPAC 3900 y su costo por día fue menor que el promedio mensual. Por lo tanto, los costos diarios del ADEFLOC-1000A no se alejan demasiado del promedio mensual de 2.56 USD/día, pero el costo por día del Cloruro férrico sólido QUIMPAC 3900 fue mucho menor al promedio mensual del floculante que se usa actualmente en la PTAP.

14. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

14.1 CONCLUSIONES

- El efluente entregado por la PTAP “Huayco Machay” satisface los requisitos físicos-químicos de las tablas 1 y B.1. de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108, siempre y cuando se maneje eficazmente los procesos unitarios de potabilización de la PTAP, según las condiciones del agua cruda a tratar.
- La calidad del agua cruda proveniente de la captación “Huayco Machay” es variable en turbiedad y color aparente, por lo que es necesario la adición de coagulantes y floculantes para remover las partículas coloidales, para lograr satisfacer los criterios de calidad de la tabla 1 del anexo 1 del libro VI del TULSMA.
- El ayudante de floculación aniónico y el cloruro férrico resultaron ser eficientes floculantes en dosificaciones de 0.05 mg/L y 0.10 mg/L para aguas crudas con bajas y altas medidas iniciales de turbiedad y color aparente.
- El PAC líquido al 30% de pureza como coagulante y el cloruro férrico sólido al 98% de pureza como floculante son los agentes químicos capaces de remover el 99.43% y 100% de turbiedad y color aparente, respectivamente, de aguas crudas con altas medidas de estos parámetros.
- Se obtuvieron eficiencias de remoción de turbiedad entre 75.98% y 99.28% y de color aparente entre 79.17% y 100% usando PAC sólido al 100% de pureza, PAC líquido al 30% de pureza y cloruro férrico sólido al 98% de pureza como agentes coagulantes en aguas crudas con bajas medidas de turbiedad y color aparente.
- El promedio de dosificación de regulador de pH utilizado en la PTAP mensualmente resultó ser igual al promedio obtenido calculado en base a las dosificaciones usadas para obtener las dosis óptimas presentadas en las tablas 16 y 17, siendo entre 10 mg/L y 20 mg/L las dosificaciones idóneas para tener una correcta coagulación en aguas crudas con bajos y altos contenidos de turbiedad y color aparente.
- El sulfato de aluminio resultó ineficiente como coagulante, debido a que en casi todas las pruebas que se usó este reactivo no generó flocs que puedan sedimentarse con facilidad, por lo que se obtuvo bajos porcentajes de remoción de impurezas utilizando este reactivo, además de que deja

concentraciones remanentes de aluminio y sulfatos muy altos, las cuales resultan ser nocivas para la salud de los consumidores.

- El costo por día del regulador de pH que usa actualmente la PTAP [Regulador de pH (RPH)] puede ser mayor, igual o menor al promedio mensual según su necesidad de uso.
- El Policloruro de Aluminio bajo en hierro PAC-V1 y Policloruro de Aluminio Tipo A como agentes coagulantes, tienen bajos costos por día y altos porcentajes de remoción con dosificaciones de 10 mg/L y 15 mg/L.
- El ayudante de floculación que usa actualmente la PTAP “Huayco Machay” (ADEFLOC-1000A) tiene un alto y bajo costo por día usando las dosificaciones de 0.10 mg/L y 0.05 mg/L, respectivamente, y el Cloruro férrico sólido QUIMPAC 3900 tiene un menor costo por día y altos porcentajes de remoción usando las mismas dosificaciones.
- Con la dosificación de 10 mg/L de Regulador de pH (RPH), 10 mg/L de Policloruro de Aluminio Tipo A y 0.05 mg/L de ADEFLOC-1000A, se obtienen bajos costos por día y porcentajes de remoción mayores a 75%.

14.2 RECOMENDACIONES

- Al realizar la descripción y valoración de la efectividad de los agentes químicos, siempre se debe utilizar los reglamentos y normas técnicas nacionales, para así determinar la calidad e inocuidad del agua.
- Al evaluar el proceso de coagulación-floculación con los distintos agentes químicos, se recomienda tomar en cuenta los resultados de turbiedad y color aparente y sus porcentajes de remoción, el pH final y las dosificaciones de químicos empleadas para escoger la dosis óptima
- Dependiendo de las características de los agentes químicos, se recomienda el uso de equipo de protección personal para evitar cualquier tipo de accidente.
- Dependiendo de los agentes químicos que se usen en las pruebas de jarras, se sugiere medir las concentraciones iniciales de aluminio, hierro y sulfatos en el agua cruda que se vaya a usar en los ensayos de prueba de jarras, permitiendo compararlos con las concentraciones finales generadas al finalizar los ensayos.

- Para realizar un buen análisis de costo-beneficio, se recomienda trabajar con los datos de caudal actualizados y los precios de los agentes químicos deben ser los más actuales del mercado o empresa que los distribuya.

15. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asociación de Municipalidades Ecuatorianas. (Enero 11, 2019). *Agua segura para Cayambe con el proyecto "Huayco Machay"*. <https://ame.gob.ec/2019/01/11/agua-segura-cayambe-proyecto-huayco-machay/>
- Química Madrid. (2021). *Aparato de JAR TEST 6 pruebas microprocesado con aplicadores modelo Q305F6*. <https://www.quimicamadrid.cl/producto/aparato-de-jar-test-6-pruebas-microprocesado-con-aplicadores/>
- Prefectura de Pichincha. (Agosto, 2017). *Cantón Cayambe*. <https://www.pichincha.gob.ec/la-institucion/106-cayambe?layout=edit>
- GADIP Municipio de Cayambe. (Febrero 11, 2020). *Huayco Machay, un sueño en marcha*. <https://municipiocayambe.gob.ec/huayco-machay-un-sueno-en-marcha/>
- HACH. (s. f.). *Set de reactivos para la determinación de aluminio, sobres de reactivo en polvo, de 0,008 a 0,800 mg/l de Al*. <https://latam.hach.com/set-de-reactivos-para-la-determinacion-de-aluminio-sobres-de-reactivo-en-polvo-de-0-008-a-0-800-mg-l-de-al/product-details?id=54617149973>
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2008). *Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water D2035–08*. <https://vdocuments.mx/coagulation-flocculation-jar-test-of-water-astm-d2035.html?page=4>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (Marzo, 2017). *Anexo 1 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA): Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua*. Pág. 262-279. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/TULSMA.pdf>
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. Norma Técnica Ecuatoriana. (2020). *NTE INEN 1108 Agua Para Consumo Humano. Requisitos. Sexta Revisión*. <https://docplayer.es/228762074-Nte-inen-1108-sexta-revision.html>
- Baque-Mite, R., Simba, L., González, B., Suatunce, P., Diaz, E. & Cadme, L. (Septiembre, 2016). *Calidad del agua destinada al consumo humano en un cantón de Ecuador / Quality of water intended for human consumption in a canton of Ecuador*. Revista Científica UNEMI, Vol. 9, No. 20, Pág. 109-117. <https://ojs.unemi.edu.ec/index.php/cienciaunemi/article/view/357/309>
- Zerbatto, M., Carrera, E., Eliggi, M., Modini, L., Vaira, S., Nosedá, J. & Abramovich, B. (Noviembre, 2009). *Cloruro Férrico para la coagulación optimizada y remoción de enteroparásitos en agua*. Revista científica arbitrada de los comités de Aguas,

- Energía y Medioambiente del Grupo Montevideo AUGM DOMUS, Vol. 1, Pág. 18-26. <https://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/view/73/40>
- Correa, R., Mestre, R., Baldiris, I., Sánchez, J. & Martínez, C. (Agosto, 2017). *Determinación de la dosis óptima de policloruro de aluminio en una PTAP del Pacífico colombiano*. Revista Científica Multidisciplinaria IPSA Scientia, Vol. 2, Pág. 31-37. <https://latinjournal.org/index.php/ipsa/article/view/916/692>
- Acosta, Y. (2006). *Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación*. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar Cuba (ICIDCA). Vol. 40, No. 2, Pág. 10-17. La Habana, Cuba. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120664002.pdf>
- Restrepo, H. (2009). *Evaluación del Proceso de Coagulación – Floculación de una Planta de Tratamiento de Agua Potable*. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Facultad de Minas. https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/2561/15372239_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Romero, J. (2009). *Calidad Del Agua. 3era Edición*. Escuela Colombiana de Ingeniería. Universidad de Colombia. Scribd. <https://es.scribd.com/document/394434222/Calidad-Del-Agua-3ra-Edicion-Jairo-Romero>
- Romero, J. (1999). *Potabilización del Agua. 3era Edición*. Escuela Colombiana de Ingeniería. Universidad de Colombia. <https://es.scribd.com/document/274737765/Romero-Rojas-Jairo-Alberto-Potabilizacion-Del-Agua>
- Rivas, S., Ménes, G. & Rómulo, A. (Agosto, 2017). *Tratamiento por coagulación-floculación a efluente de la Empresa del Níquel Comandante Ernesto Che Guevara*. Artículo Original RTQ, Vol. 37, No.2, Santiago de Cuba, Cuba. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852017000200002
- Escuela Politécnica Nacional. Escuela de Formación de Tecnólogos. (2022). *Laboratorio de caracterización del agua. Guía de laboratorio para estudiantes. Práctica No.1: determinación de color real y aparente en distintos tipos de aguas*. Carrera de Tecnología en Agua y Saneamiento Ambiental.
- HACH. (Octubre, 2014). *Method 8025. Color, True and Apparent (Platinum-Cobalt Standard Method)*. Edition 10. <https://www.hach.com/assetsref/55591>
- Escuela Politécnica Nacional. Escuela de Formación de Tecnólogos. (2022). *Laboratorio de caracterización del agua. Guía de laboratorio para estudiantes. Práctica No.3:*

determinación alcalinidad y acidez en el agua. Carrera de Tecnología en Agua y Saneamiento Ambiental.

Laboratorio de Calidad Ambiental FCAM – UNASAM. (s. f.). *Instructivo de calibración del multiparámetro HORIBA U-50. Código: IM-006. Versión: 01.*
https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/protocols/INSTRUCTIVO_DE_CALIBRACION_DEL_MULTIPARAMETRO_HORIBA_U_-_50.pdf

Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Saneamiento Ambiental y Aseo Cayambe (EMAPAAC-EP). (s. f.). *MANUAL DE INSTRUCCIONES DEL EQUIPO DE JARRAS QUIMIS Q305F6.*

HACH. (Enero, 2014). *Method 8008. Iron, Total (USEPA FerroVer® Method).* Edition 9.
<https://co.hach.com/asset-get.download.jsa?id=7639983724>

HACH. (Enero, 2018). *Method 8012. Aluminum (Aluminon Method).* Edition 11.
<https://www.hach.com/asset-get.download.jsa?id=7639983675>

HACH. (Octubre, 2019). *Method 8051. Sulfate (USEPA SulfaVer 4 Method).* Edition 11.
<https://ca.hach.com/asset-get.download.jsa?id=7639983901>

HACH. (Agosto, 2019). *Method 8146. Iron, Ferrous (1,10-Phenanthroline Method).* Edition 11.
<https://www.hach.com/asset-get.download-en.jsa?id=7639983720>

Escuela Politécnica Nacional. Escuela de Formación de Tecnólogos. (2021). *Procedimiento de análisis In-Situ.* Carrera de Tecnología en Agua y Saneamiento Ambiental.

Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. (s. f.). *Práctica de calidad del agua. Práctica Po. 14: determinación de sólidos en aguas.* Carrera de Ingeniería Ambiental.

Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Saneamiento Ambiental y Aseo Cayambe (EMAPAAC-EP). (Marzo, 2023). *Informe N.-EMAPAAC-EP-CAP-2023-017-INF.*

Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Saneamiento Ambiental y Aseo Cayambe (EMAPAAC-EP). (Septiembre, 2020). *Informe N.-EMAPAAC-EP-CAP-2020-042-INF.*

Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Saneamiento Ambiental y Aseo Cayambe (EMAPAAC-EP). Laboratorio de Control de Calidad de Agua Público-Comunitario del Cantón Cayambe. (Junio, 2023). *Reporte de análisis de calidad del agua Junio 2023.*
<https://emapaac.gob.ec/docs-transparencia/2023/Reporte%20de%20An%C3%A1lisis%20de%20Calidad%20de%20Agua%20Junio%202023-signed-3.pdf>

Adquimpac. (s. f.). *P-R-O-D-U-C-T-O-S – Quimpac*. <https://www.quimpac.com.ec/p-r-o-d-u-c-t-o-s/>

16. ANEXOS

ANEXO I: Certificado de originalidad Turnitin



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS
CAMPUS POLITÉCNICO "ING. JOSÉ RUBÉN ORELLANA"

CERTIFICADO DE ORIGINALIDAD

Quito, 22 de agosto de 2023

De mi consideración:

Yo, Santiago Stalin Guerra Salcedo, en calidad de Director del Trabajo de Integración Curricular titulado "Optimización del proceso de coagulación - floculación de la Planta de Producción de Agua Potable Huayco Machay, ubicada en el Cantón Cayambe" elaborado por el estudiante Isaías Mateo Acosta Chávez de la carrera en RRA20 Tecnología Superior en Agua y Saneamiento Ambiental, certifico que he empleado la herramienta Turnitin para la revisión de originalidad del documento escrito secciones: resumen, abstract, introducción, metodología, discusión y resultados, conclusiones y recomendaciones, producto del Trabajo de Integración Curricular indicado.

El documento escrito tiene un índice de similitud del 12%.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, pudiendo el interesado hacer uso del presente documento para los trámites de titulación.

NOTA: Se adjunta el informe generado por la herramienta Turnitin.

Atentamente,



Santiago Guerra Salcedo
Docente
ESFOT

Formato Trabajo UIC ASA (2023-A) (Presentado 22 de agosto)

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%	10%	4%	2%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

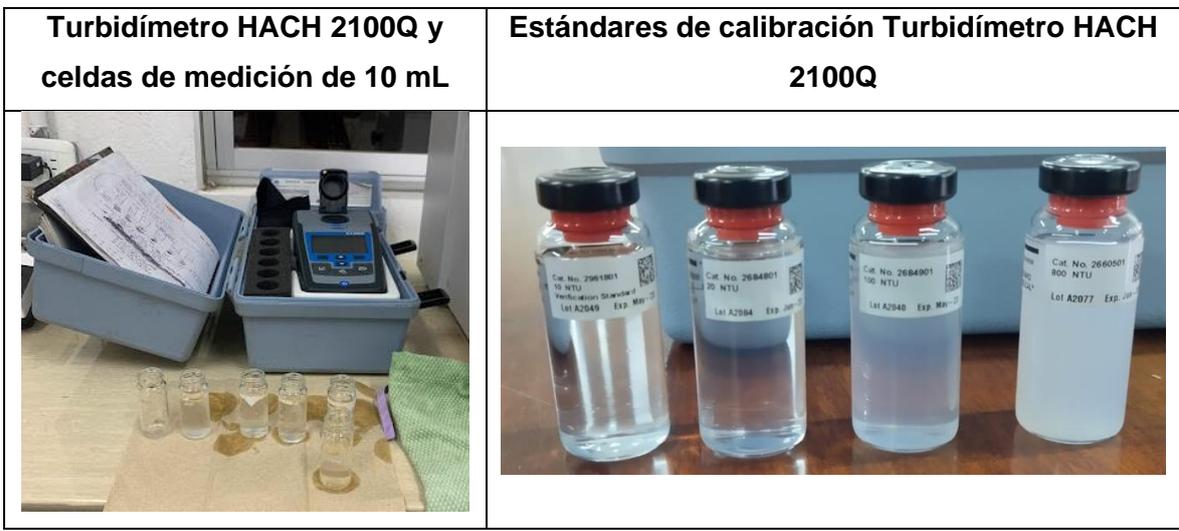
1	Amilcar Bernardino Racancoj Alonzo. "Eficiencia de la semilla de durazno Prunus pérsica S "Salcajá" como coagulante natural", Agua, Saneamiento & Ambiente, 2022 Publicación	1%
2	repositorio.utc.edu.ec Fuente de Internet	1%
3	core.ac.uk Fuente de Internet	1%
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
5	docplayer.com.br Fuente de Internet	<1%
6	Submitted to Escuela Politecnica Nacional Trabajo del estudiante	<1%
7	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.uti.edu.ec Fuente de Internet	<1%

ANEXO II: Registro fotográfico de la PTAP “Huayco Machay”

<p>Mezclador mecánico de agitación rápida (Tanque de mezcla)</p>	<p>Oxigenador Dinámico</p>
	
<p>Tanque de aquietamiento y canaleta Parshall</p>	<p>Sala de preparación y dosificación de químicos</p>
	
<p>Placa para floculador de flujo vertical ADE-INTAL</p>	<p>Sedimentador PTAP “Huayco Machay”</p>
	



ANEXO III: Medición de turbiedad



Medición de turbiedad en unidades nefelométrías (NTU)



ANEXO IV: Espectrofotómetro HACH DR1900 y celdas de vidrio de 10 mL



ANEXO V: Medición de color aparente

Celda de muestra y de blanco para medición de color aparente	Enceramiento programa 120 Color, 455 nm para medición de color aparente
 Two glass cuvettes are shown side-by-side on a wooden surface. The left cuvette is labeled '330' and the right one is labeled '712'. Both contain clear liquids.	 A close-up photograph of the HACH DR1900 spectrophotometer. The digital display shows '0 units'. The device is blue and grey with a control panel below the screen.

Medición de color aparente en unidades de platino cobalto (Pt-Co)



ANEXO VI: Determinación de alcalinidad

Agente titulante e indicadores para determinación de alcalinidad



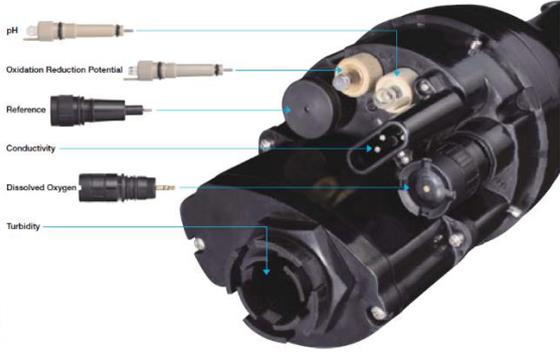
Bureta aforada y soporte universal



Muestra en punto de vire del anaranjado de metilo



ANEXO VII: Medición de temperatura, conductividad y pH

Multiparámetro HORIBA U-52	Sensores de medición del multiparámetro HORIBA U-52																
																	
<p>Solución buffer de pH 4.01 a 25°C y tazas de calibración para calibración del Multiparámetro HORIBA U-52</p>	<p>Calibración del multiparámetro HORIBA U-52</p>																
																	
<p>Medición de temperatura, conductividad y pH usando el multiparámetro</p>																	
 <table border="1" data-bbox="411 1720 639 1854"> <thead> <tr> <th colspan="2">HORIBA</th> </tr> <tr> <th colspan="2">MEDIDA ÚNICA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>13.62 °C</td> <td>7.53 mg/L DO</td> </tr> <tr> <td>6.52 pH</td> <td>101.2 % DO</td> </tr> <tr> <td>-2 mV</td> <td>0.046 % TDS</td> </tr> <tr> <td>304 ORPmV</td> <td>0.003 % SAL</td> </tr> <tr> <td>0.071 mS/cm</td> <td>0.0 ct</td> </tr> <tr> <td>9.2 NTU</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	HORIBA		MEDIDA ÚNICA		13.62 °C	7.53 mg/L DO	6.52 pH	101.2 % DO	-2 mV	0.046 % TDS	304 ORPmV	0.003 % SAL	0.071 mS/cm	0.0 ct	9.2 NTU		
HORIBA																	
MEDIDA ÚNICA																	
13.62 °C	7.53 mg/L DO																
6.52 pH	101.2 % DO																
-2 mV	0.046 % TDS																
304 ORPmV	0.003 % SAL																
0.071 mS/cm	0.0 ct																
9.2 NTU																	

ANEXO VIII: Base Cono Imhoff y Cono Imhoff para medición de sólidos sedimentables



ANEXO IX: Medición de aluminio

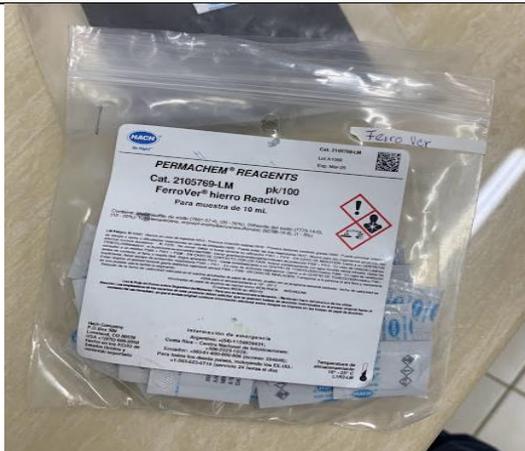
<p>Set de reactivos para la determinación de aluminio</p>	<p>Probeta con 50 mL de muestra para determinación de aluminio</p>
<p>Celda de muestra y de blanco para determinación de aluminio</p>	<p>Enceramiento programa 10 Aluminum Alumin para medición de aluminio</p>

**Medición de aluminio en unidades de
mg/L Al³⁺**



ANEXO X: Medición de hierro total

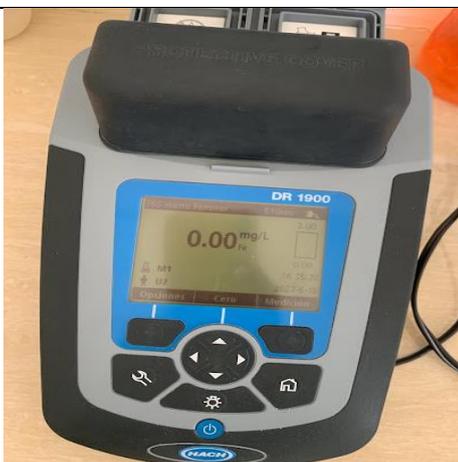
**Reactivo en polvo “FerroVer® Iron
Reagent Powder Pillow”**



**Celda de muestra y de blanco para
determinación de hierro total**



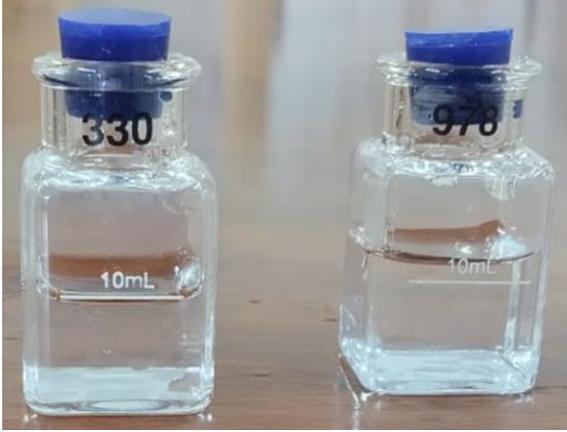
**Enceramiento programa 265 Iron,
FerroVer para medición de hierro total**



**Medición de hierro total en unidades de
mg/L Fe**



ANEXO XI: Medición de hierro ferroso

<p style="text-align: center;">Reactivo en polvo “Ferrous Iron Reagent Powder Pillow”</p>	<p style="text-align: center;">Probeta con 25 mL de muestra para determinación de hierro ferroso</p>
	
<p style="text-align: center;">Celda de muestra y de blanco para determinación de hierro ferroso</p>	<p style="text-align: center;">Enceramiento programa 255 Iron, Ferrous para medición de hierro ferroso</p>
	
<p style="text-align: center;">Medición de hierro ferroso en unidades de mg/L Fe⁺²</p>	

ANEXO XII: Medición de sulfatos

Reactivo en polvo “SulfaVer 4 Reagent Powder Pillow”	Celda de muestra y de blanco para determinación de sulfatos
	
Enceramiento programa 680 Sulfate para medición de sulfatos	Medición de sulfatos en unidades de mg/L SO₄⁻²
	

ANEXO XIII: Regulador de pH sólido al 100% de pureza



ANEXO XIV: Agentes químicos coagulantes



ANEXO XV: Ayudante de floculación aniónico sólido al 100% de pureza (Agente químico floculante)



ANEXO XVI: Precios Cloruro férrico sólido QUIMPAC 3900 y Sulfato de aluminio tipo B líquido QUIMPAC 1010 L



Paul Palomino <ppalomino@quimpac.com.ec>

Para: ISAIAS MATEO ACOSTA CHAVEZ



Lun 14/8/2023 13:35

Muy buenas tardes estimado Isaias,

Para el sulfato B líquido en tambor, su precio es de \$0.40 ctvs + IVA el kilo el tambor viene en tambores de 200kg

El cloruro férrico 3900 su presentación es en sacos de 25 kg, su precio es de \$1.31 dólares + IVA el kilo.

Los precios no incluyen costos de envío, sería para retiro en la ciudad de Quito en nuestras instalaciones.

Saludos cordiales,
Paul P.



ANEXO XVII: Enlaces

Memoria técnica

[Memoria Técnica.docx](#)

Fichas técnicas de los reactivos usados actualmente en la PTAP “Huayco Machay”

https://epnecuador-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/isaias_acosta_epn_edu_ec/Etje-B9WQ_5BojFylhAB57YB-o6633cvXdpmfMXRf5UJBBA?e=xrKbGB

Tabla completa de resultados de la caracterización del afluente y efluente efectuada durante la semana del 13 de junio al 19 de junio del 2023

https://epnecuador-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/isaias_acosta_epn_edu_ec/EfU-U26gRyhDg_BUS80ZukkBWrm3oZp-j6VIJxgeVzKo8A?e=scqSZm

Tabla completa de resultados de las 14 pruebas de jarras efectuadas durante la semana del 13 de junio al 19 de junio del 2023

https://epnecuador-my.sharepoint.com/:x:/g/personal/isaias_acosta_epn_edu_ec/ET7agsNQz_hOrEYYMxLN_X4YBjbBGqzIBI39f0m52XUN9zQ?e=Wzebyl

Gráficas de barras de resultados de turbiedad, color aparente y pH y gráficas de porcentajes de remoción de turbiedad y color aparente de las 14 pruebas de jarras efectuadas durante la semana del 13 de junio al 19 de junio del 2023

https://epnecuador-my.sharepoint.com/:x:/g/personal/isaias_acosta_epn_edu_ec/EW-j_n5CZcRDvDRJqbTI3CYBzXmwwQmGEqpvvINHYR_7Mq?e=6KvEax

Informes de análisis de calidad del agua cruda de la captación “Huayco Machay”

https://epnecuador-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/isaias_acosta_epn_edu_ec/EvNkTLm1Y31NoVRBzfxnZ_UsBq7eZAgsfIH_ySfoUwzwWQQ?e=eGb7t2

ANEXO XVIII: Cálculos

Cálculo de preparación de 250 mL de una solución de concentración 2 N de

H₂SO₄ al 98% de pureza

$$250 \text{ mL} * \frac{1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4}{1000 \text{ mL}} * \frac{98 \text{ g H}_2\text{SO}_4}{1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4} * \frac{1 \text{ mL puro H}_2\text{SO}_4}{1.83 \text{ g H}_2\text{SO}_4} * \frac{100 \text{ mL impuros H}_2\text{SO}_4}{98 \text{ mL puros H}_2\text{SO}_4} = 13.66 \text{ mL impuros H}_2\text{SO}_4$$

Cálculo de preparación de 100 mL de una solución de H₂SO₄ de concentración 0.02 N a partir de una solución de concentración 2 N de

H₂SO₄ al 98% de pureza con ecuación 1

$$C1 * V1 = C2 * V2$$

$$2 \text{ N} * V1 = 0.02 \text{ N} * 100 \text{ mL}$$

$$V1 = \frac{0.02 \text{ N} * 100 \text{ mL}}{2 \text{ N}}$$

$$V1 = 1 \text{ mL}$$

Ejemplo de cálculo de alcalinidad total de la muestra APHM1 con ecuación 3

$$\text{Alcalinidad total} = \frac{B * N * 50000}{V_m}$$

$$\text{Alcalinidad total} = \frac{1.60 \text{ mL} * 0.02 \text{ N} * 50000}{100 \text{ mL}}$$

$$\text{Alcalinidad total} = 16 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ CaCO}_3$$

Cálculo de preparación de 250 mL de solución madre de 10000 mg/L de regulador de pH sólido al 100% de pureza

$$0.25 \text{ L} * \frac{10000 \text{ mg Elevador}}{1 \text{ L}} * \frac{1 \text{ g puro Elevador}}{1000 \text{ mg Elevador}} * \frac{100 \text{ g impuros Elevador}}{100 \text{ g puros Elevador}} = 2.5 \text{ g impuros Elevador}$$

Cálculo de preparación de soluciones madre de agentes químicos coagulantes para pruebas 1 y 2

Preparación de 2 L de solución madre de 1000 mg/L de policloruro de aluminio sólido al

100% de pureza para la prueba 1

$$2 \text{ L} * \frac{1000 \text{ mg PAC}}{1 \text{ L}} * \frac{1 \text{ g puro PAC}}{1000 \text{ mg PAC}} * \frac{100 \text{ g impuros PAC}}{100 \text{ g puros PAC}} = 2 \text{ g impuros PAC}$$

Preparación de 100 mL de solución madre de 40000 mg/L de policloruro de aluminio

líquido al 30% de pureza para la prueba 2

$$100 \text{ mL} * \frac{40000 \text{ mg PAC}}{1000 \text{ mL}} * \frac{1 \text{ g PAC}}{1000 \text{ mg PAC}} * \frac{1 \text{ mL puro PAC}}{1.36 \text{ g PAC}} * \frac{100 \text{ mL impuros PAC}}{30 \text{ mL puros PAC}} = 9.80 \text{ mL impuros PAC}$$

**Cálculo de preparación de soluciones madre de agentes químicos
coagulantes para prueba 3 hasta 14**

Preparación de 100 mL de solución madre de 10000 mg/L de policloruro de aluminio
sólido al 100% de pureza

$$100 \text{ mL} * \frac{10000 \text{ mg PAC}}{1000 \text{ mL}} * \frac{1 \text{ g puro PAC}}{1000 \text{ mg PAC}} * \frac{100 \text{ g impuros PAC}}{100 \text{ g puros PAC}} = 1 \text{ g impuros PAC}$$

Preparación de 100 mL de solución madre de 10000 mg/L de cloruro férrico sólido al 98%
de pureza

$$100 \text{ mL} * \frac{10000 \text{ mg FeCl}_3}{1000 \text{ mL}} * \frac{1 \text{ g puro FeCl}_3}{1000 \text{ mg FeCl}_3} * \frac{100 \text{ g impuros FeCl}_3}{98 \text{ g puros FeCl}_3} = 1.0204 \text{ g impuros FeCl}_3$$

Preparación de 100 mL de solución madre de 10000 mg/L de policloruro de aluminio
líquido al 30% de pureza

$$100 \text{ mL} * \frac{10000 \text{ mg PAC}}{1000 \text{ mL}} * \frac{1 \text{ g PAC}}{1000 \text{ mg PAC}} * \frac{1 \text{ mL puro PAC}}{1.36 \text{ g PAC}} * \frac{100 \text{ mL impuros PAC}}{30 \text{ mL puros PAC}} = 2.45 \text{ mL impuros PAC}$$

Preparación de 100 mL de solución madre de 10000 mg/L de sulfato de aluminio líquido
al 8% de pureza

$$100 \text{ mL} * \frac{10000 \text{ mg Al}_2(\text{SO}_4)_3}{1000 \text{ mL}} * \frac{1 \text{ g Al}_2(\text{SO}_4)_3}{1000 \text{ mg Al}_2(\text{SO}_4)_3} * \frac{1 \text{ mL puro Al}_2(\text{SO}_4)_3}{2.67 \text{ g Al}_2(\text{SO}_4)_3} * \frac{100 \text{ mL impuros Al}_2(\text{SO}_4)_3}{8 \text{ mL puros Al}_2(\text{SO}_4)_3} = 4.68 \text{ mL impuros Al}_2(\text{SO}_4)_3$$

**Cálculo de preparación de soluciones madre de agentes químicos
floculantes para pruebas 1 y 2**

Preparación de 100 mL de solución madre de 3000 mg/L de floculante aniónico sólido al
100% de pureza para la prueba 1

$$100 \text{ mL} * \frac{3000 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} * \frac{1 \text{ g puro}}{1000 \text{ mg}} * \frac{100 \text{ g impuros}}{100 \text{ g puros}} = 0.3 \text{ g impuros floculante aniónico}$$

Preparación de 100 mL de solución madre de 5000 mg/L de cloruro férrico sólido al 98%
de pureza para la prueba 2

$$100 \text{ mL} * \frac{5000 \text{ mg FeCl}_3}{1000 \text{ mL}} * \frac{1 \text{ g puro FeCl}_3}{1000 \text{ mg FeCl}_3} * \frac{100 \text{ g impuros FeCl}_3}{98 \text{ g puros FeCl}_3} = 0.5102 \text{ g impuros FeCl}_3$$

**Cálculo de preparación de soluciones madre de agentes químicos
floculantes para prueba 3 hasta 14**

Preparación de 1 L de solución madre de 100 mg/L de floculante aniónico sólido al 100%
de pureza

$$1 \text{ L} * \frac{100 \text{ mg}}{1 \text{ L}} * \frac{1 \text{ g puro}}{1000 \text{ mg}} * \frac{100 \text{ g impuros}}{100 \text{ g puros}} = 0.1 \text{ g impuros floculante}$$

Preparación de 100 mL de solución madre de 100 mg/L de cloruro férrico sólido al 98%
de pureza

$$100 \text{ mL} * \frac{100 \text{ mg FeCl}_3}{1000 \text{ mL}} * \frac{1 \text{ g puro FeCl}_3}{1000 \text{ mg FeCl}_3} * \frac{100 \text{ g impuros FeCl}_3}{98 \text{ g puros FeCl}_3} = 0.0102 \text{ g impuros FeCl}_3$$

**Cálculo del costo diario del Regulador de pH (RPH) usando el caudal de
entrada a la PTAP del mes de junio (90 L/s) y la dosificación promedio
mensual de 15 mg/L**

$$\frac{90 \text{ L}}{\text{s}} * \frac{15 \text{ mg}}{\text{L}} * \frac{1.259 \text{ USD}}{\text{Kg}} * \frac{1 \text{ Kg}}{1000000 \text{ mg}} * \frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ día}} = 146.85 \frac{\text{USD}}{\text{día}}$$