

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN EN LA  
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE MISKIUNU - SANTO TOMAS  
PARA LA ELIMINACIÓN DE COLOR”**

Tesis presentada para optar al título profesional de

**INGENIERO QUÍMICO**

Presentado por:

Br. CAHUATA CORRALES, Rodrigo

Br. BORDA CHOQUE, Diego Fernando

**ASESORA:**

**Dr. Ing. MALDONADO FARFÁN, Amanda Rosa**

**Cusco 2021**

## **PRESENTACIÓN**

Señora Decana y distinguidos docentes de la Facultad de Ingeniería de Procesos de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

De conformidad con el Reglamento de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Química vigente a la fecha, se pone a vuestra consideración el trabajo de tesis intitulada: **“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE COLOR DEL AGUA TRATADA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE MISKIUNU - SANTO TOMAS”**, que previo dictamen favorable nos permitirá optar el título profesional de Ingeniero Químico.

Atentamente

Br. CAHUATA CORRALES, Rodrigo  
Br. BORDA CHOQUE, Diego Fernando

## TABLA DE CONTENIDO

### RESUMEN

.....i  
ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>2</b>
<b>1. GENERALIDADES</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	<b>3</b>
1.1.1. Problema general .....	3
1.1.2. Problemas específicos .....	3
<b>1.2. OBJETIVOS</b> .....	<b>4</b>
1.2.1. Objetivo general.....	4
1.2.2. Objetivos específicos .....	4
<b>1.3. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>5</b>
1.3.1. Justificación técnica .....	5
1.3.2. Justificación social .....	5
1.3.3. Justificación ambiental.....	6
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1. ANTECEDENTES</b> .....	<b>7</b>
<b>2.2. AGUA CRUDA</b> .....	<b>10</b>
<b>2.3. AGUA POTABLE</b> .....	<b>10</b>
<b>2.4. NORMATIVIDAD PERUANA</b> .....	<b>11</b>
<b>2.5. REGLAMENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO</b> .....	<b>11</b>
2.5.1. Color .....	11
2.5.2. Turbiedad .....	13
2.5.3. Ph .....	13
2.5.4. Sólidos totales disueltos.....	14
2.5.5. Materia orgánica .....	15
2.5.6. Coloides .....	16
<b>2.6. REGLAMENTO NACIONAL DE EDIFICACIONES</b> .....	<b>17</b>
2.6.1. Norma os. 010.....	17
2.6.2. Norma os. 020.....	17
<b>2.7. COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN</b> .....	<b>18</b>
<b>2.8. COAGULACIÓN</b> .....	<b>18</b>
2.8.1. Factores que influyen en la coagulación.....	21
2.8.2. Tipos de coagulación .....	22
2.8.3. Coagulantes.....	22
<b>2.9. FLOCULACIÓN</b> .....	<b>24</b>
2.9.1. Mecanismos de floculación.....	25
2.9.2. Factores que influyen en la floculación .....	25
2.9.3. Calidad del floc .....	26
<b>2.10. SISTEMA DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN</b> .....	<b>27</b>

2.10.1.	Equipo de dosificación de coagulante.....	27
2.10.2.	Equipo de mezcla rapida.....	28
2.10.3.	Equipo de mezcla lenta.....	29
<b>3.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>31</b>
3.1.	MUESTRA.....	31
3.2.	MATERIALES.....	31
3.3.	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE MISKIUNU.....	32
3.4.	EVALUACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LA PTAP MISKIUNU.....	38
3.5.	MUESTREO.....	39
3.6.	CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA MUESTRA.....	40
3.7.	PROCEDIMIENTO DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN.....	40
3.7.1.	Preparación de coagulantes - floculantes.....	40
3.7.2.	Pruebas pre - experimentales.....	41
3.7.3.	Proceso de coagulación - floculación.....	42
3.7.4.	Plan experimental.....	44
3.8.	PARÁMETROS DE TIPO DE COAGULANTE, DOSIS DE COAGULANTE Y AGITACIÓN LENTA.....	48
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>49</b>
4.1.	EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LA PTAP MISKIUNU.....	49
4.1.1.	Evaluación de las condiciones de captación y conducción.....	49
4.1.2.	Evaluación de las condiciones de tratamiento de agua.....	52
4.2.	CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA MUESTRA.....	58
4.3.	PROCESO DE COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN.....	59
4.3.1.	Calidad del floc.....	59
4.3.2.	Análisis de diseño experimental.....	62
4.3.3.	Efecto del tipo de coagulante, dosis de coagulante y velocidad de agitación lenta.....	63
4.3.4.	Comportamiento del ph.....	69
4.3.5.	Comportamiento de la turbiedad.....	70
4.3.6.	Análisis de varianza para la remoción de color (%).....	72
4.3.7.	Modelo para la remoción de color (%).....	73
4.4.	PARÁMETROS DE TIPO DE COAGULANTE, DOSIS DE COAGULANTE Y VELOCIDAD DE AGITACIÓN LENTA.....	74
4.4.1.	Caracterización de la muestra tratada.....	75
<b>5.</b>	<b>PROPUESTA DE UN SISTEMA DE COAGULACIÓN -FLOCULACIÓN....</b>	<b>76</b>
5.1	SISTEMA DE DOSIFICACIÓN.....	76
5.1.1.	Cálculo el consumo del pac.....	82
5.2.	DISEÑO DE LA ETAPA DE MEZCLA RAPIDA O COAGULACIÓN.....	84
5.3.	DISEÑO DE LA ETAPA DE MEZCLA LENTA O FLOCULACION.....	91
	CONCLUSIONES.....	97
	RECOMENDACIONES.....	98

<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>105</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>106</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXO D.....</b>	<b>112</b>
<b>ANEXO E.....</b>	<b>114</b>
<b>ANEXO F.....</b>	<b>116</b>
<b>ANEXO G.....</b>	<b>123</b>
<b>ANEXO H.....</b>	<b>124</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>125</b>
<b>ANEXO J.....</b>	<b>126</b>
<b>ANEXO K.....</b>	<b>127</b>
<b>ANEXO L.....</b>	<b>128</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b>	Neutralización de cargas y reducción del radio efectivo de los coloides.	18
<b>Figura 2.2</b>	Etapas del proceso de coagulación .....	20
<b>Figura 2.3</b>	Acción del uso de floculantes .....	24
<b>Figura 2.4</b>	Comparador para evaluar el tamaño del floc .....	27
<b>Figura 3.1</b>	Ubicación de la PTAP Miskiunu .....	33
<b>Figura 3.2</b>	Representación gráfica PTAP Miskiunu.....	34
<b>Figura 3.3</b>	Captación de agua - riachuelo Miskiunu .....	35
<b>Figura 3.4</b>	Cámara de distribución de caudales.....	35
<b>Figura 3.5</b>	Sedimentadores .....	36
<b>Figura 3.6</b>	Pre-filtros de flujo horizontal.....	36
<b>Figura 3.7</b>	Diagrama de flujo del proceso de potabilización de agua en la PTAP Miskiunu.....	38
<b>Figura 3.8</b>	Muestra obtenida para análisis experimental.....	39
<b>Figura 3.9</b>	Prueba preexperimental a diferentes dosis de coagulante y 50 rpm (Color inicial de 100 PCU) .....	41
<b>Figura 3.10</b>	Pasos seguidos en las experimentaciones.....	43
<b>Figura 4.1</b>	Monitoreo de color para el año 2020 a la salida del filtro lento .....	56
<b>Figura 4.2</b>	Monitoreo de turbiedad para el año 2020 a la salida del filtro lento .....	57
<b>Figura 4.3</b>	Diagrama de Pareto para remoción de color (%). .....	64
<b>Figura 4.4</b>	Grafica de efectos principales para remoción de color (%). .....	65
<b>Figura 4.5</b>	Gráfico de contorno (A) y superficie de respuesta (B) manteniendo constante la agitación lenta a 50 rpm.....	66
<b>Figura 4.6</b>	Gráfico de contorno (A) y superficie de respuesta (B) con la mezcla binaria PAC /FeCl <sub>3</sub> .....	67
<b>Figura 4.7</b>	Gráfico de contorno (A) y superficie de respuesta (B) manteniendo constante la dosis de coagulante a 40 rpm.....	68
<b>Figura 4.8</b>	Comportamiento del pH en el proceso experimental.....	70
<b>Figura 4.9</b>	Comportamiento de la turbiedad en el proceso experimental.....	71
<b>Figura 5.1</b>	Instalación del dosificador a la entrada de la PTAP Miskiunu .....	78
<b>Figura 5.2</b>	Diagrama para el cálculo de la presión a la entrada de la PTAP Miskiunu. ....	78
<b>Figura 5.3</b>	Vertedero triangular .....	90

<b>Figura 5.4</b>	Perfil de vertedero triangular y estructura hidráulica de mezcla rápida. ...	90
<b>Figura 5.5</b>	Floculador hidráulico de flujo horizontal .....	96
<b>Figura 5.6</b>	Floculador hidráulico vista lateral .....	96

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b>	Sustancias Húmicas productoras de color en el agua .....	15
<b>Tabla 2.2</b>	Índice de Willcomb para estimar la calidad del floc.....	26
<b>Tabla 2.3</b>	Tipos de Dosificación y sus características de operación, .....	28
<b>Tabla 2.4</b>	Clasificación de las unidades de mezcla rápida.....	29
<b>Tabla 3.1</b>	Lista de materiales. ....	31
<b>Tabla 3.2</b>	Coordenadas de ubicación de la PTAP Miskiunu.....	32
<b>Tabla 3.3</b>	Parámetros fisicoquímicos y métodos de ensayo.....	40
<b>Tabla 3.4</b>	Preparación de coagulantes.....	41
<b>Tabla 3.5</b>	Variables independientes y sus niveles de estudio .....	45
<b>Tabla 3.6</b>	Plan experimental para la remoción de color.....	46
<b>Tabla 4.1</b>	Dotación por número de habitantes .....	49
<b>Tabla 4.2</b>	Evaluación de la fuente, captación y conducción de la PTAP Miskiunu	51
<b>Tabla 4.3</b>	Evaluación del sistema de tratamiento de la PTAP Miskiunu.....	53
<b>Tabla 4.4</b>	Tipo de tratamiento del agua potable según criterios de diseño .....	58
<b>Tabla 4.5</b>	Caracterización fisicoquímica de las muestras .....	59
<b>Tabla 4.6</b>	Formación de flocs para cada coagulante .....	61
<b>Tabla 4.7</b>	Resultados del diseño experimental.....	62
<b>Tabla 4.8</b>	ANOVA del diseño experimental para la remoción de color (%) para un modelo lineal .....	72
<b>Tabla 4.9</b>	ANOVA del diseño experimental para la remoción de color (%) para un modelo cuadrático.....	73
<b>Tabla 4.10</b>	Parámetros que logran mayor remoción de color (%) .....	75
<b>Tabla 4.11</b>	Muestras de validación .....	75
<b>Tabla 5.1</b>	Ajuste de dosificación (%) y su respectiva concentración de PAC en ppm .....	83
<b>Tabla 5.2</b>	Datos técnicos del equipo agitador. ....	88
<b>Tabla 5.3</b>	Valores de coeficiente de arrastre $C_d$ de paletas en mezcladores. ....	95

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios y la vida

A nuestras familias por el apoyo incondicional que nos brindaron, muchas gracias por el apoyo para el cumplimiento de esta gran meta profesional.

A nuestra asesora Dr. Ing. Amanda Maldonado Farfán por sus consejos y observaciones que contribuyeron al desarrollo del presente trabajo de investigación.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Química por sus enseñanzas y formación brindadas a lo largo de nuestros años de estudio.

A la Empresa Municipal Prestadora de Servicios de Saneamiento de las Provincias Alto Andinas (EMPSSPAL S.A) por permitirnos desarrollar el presente trabajo de investigación en las instalaciones de la planta de tratamiento de agua potable Miskiunu.

Gracias a todas las personas que ayudaron directa e indirectamente en la realización de este trabajo de investigación.

Br. CAHUATA CORRALES, Rodrigo  
Br. BORDA CHOQUE, Diego Fernando



## DEDICATORIA

A Dios por brindarme la sabiduría, fortaleza necesaria para alcanzar esta gran meta.

A mis padres Rubén Cahuata Huahuaccapa y Cristina Corrales de Cahuata, por darme la vida, por darme amor infinito, por velar por mi bienestar durante mi niñez y juventud, por creer en mí y siempre tener una voz de aliento a lo largo de toda mi vida académica, por enseñarme la vida desde distintos escenarios que hacen de mí la persona que soy.

A mis hermanas(os), Jeanette, Melissa, Ramiro y Fernando por brindarme sus consejos, dándome fuerzas para seguir adelante con mis propósitos, por todas las vivencias a lo largo de nuestra vida estudiantil que siempre serán un bonito recuerdo.

Br. Rodrigo Cahuata Corrales

A Dios por haberme permitido llegar hasta aquí hoy, por darme bienestar, fortaleza y sabiduría para llevar a cabo mi objetivo.

A mi madre Pilar Choque Huillca por su amor, paciencia y esfuerzo que me permitió llegar a cumplir un objetivo más, por inculcar en mí el trabajo, perseverancia y constancia a pesar de las adversidades. A mi difunto padre Rubén Edgar Borda Titto por creer en mí cuando incursione la vida universitaria, por inculcarme el respeto, responsabilidad, honestidad por haber sido un claro ejemplo de superación y emprendimiento.

A mi pareja Yaneth Larissa Suri Quispe por su paciencia, comprensión y por todo el amor incondicional que me dio en los momentos más difíciles.

A mi querida hija Gianella Zisary Borda Suri por ese amor tierno y sincero que llenó mis días de felicidad.

Br. Diego Fernando Borda Choque

## RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el proceso de coagulación-floculación, como una alternativa para remover el color que presenta el agua suministrada por la Planta de Tratamiento de Agua Potable Miskiunu (PTAP Miskiunu) a la población de Santo Tomas.

De la evaluación de las condiciones de la PTAP se determinó que el caudal promedio de 4.28 L/s no satisface la demanda de agua para la población actual. Por otro lado la caracterización fisicoquímica dio como resultado que el color promedio excede 5.7 veces el límite máximo permisible establecido por el Ministerio de Salud, (2011). Por lo que el sistema de tratamiento no cumple con la Norma OS. 020, (2006) respecto al tipo de tratamiento.

Se realizaron 81 pruebas experimentales de coagulación – floculación, utilizando como variables el tipo coagulante – floculante (PAC y  $\text{FeCl}_3$ ), dosis de coagulante- floculante (30, 40 y 50 ppm) y velocidad de agitación lenta (40, 50 y 60 rpm) en base a un diseño factorial completo  $3^3$ .

Los resultados determinaron que solamente la dosis de coagulante y tipo de coagulante son variables significativas sobre la variable respuesta remoción de color (%).

Se alcanzó una remoción de color del 90 % utilizando PAC como coagulante-floculante a una dosis de 40 ppm y una velocidad de agitación lenta de 50 rpm.

Se diseñó un sistema de coagulación- floculación que consta de un dosificador hidráulico, un vertedero triangular y un floculador de flujo horizontal para ser implementados en la planta de tratamiento considerando los resultados obtenidos en la parte experimental, lo que constituye una alternativa para resolver el problema del agua tratada en la planta Miskiunu.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad el incremento de la población genera una mayor demanda de consumo de agua potable de calidad, por esta razón las plantas de tratamiento de agua, al margen de su tamaño y tecnología necesitan introducir cambios que mejoren su proceso para garantizar sistemas de agua potable inocuos y de calidad conforme a las legislaciones sanitarias nacionales e internacionales (Cogollo Flórez, 2011).

Una de las problemáticas que se presenta para el suministro de agua en zonas urbanas y rurales es el contenido de color en el agua, siendo una limitante para su consumo (Cerón Pérez, 2016). Esta coloración del agua se debe a la presencia de partículas de origen orgánico como ácidos húmicos y fúlvicos (Sillanpää, 2015), por lo que el proceso de clarificación del agua es importante dentro de una planta de tratamiento de agua potable.

Los procesos de coagulación y floculación son comúnmente empleados en plantas de tratamiento de agua (Cogollo Flórez, 2011). Siendo los coagulantes y floculantes más utilizados las sales de hierro y aluminio como el cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) y el policloruro de aluminio (PAC)(Andía Cárdenas, 2000).

El presente trabajo evaluó el proceso de coagulación -floculación para la eliminación de color del agua que trata la Planta de Tratamiento de Agua Potable Miskiunu (PTAP Miskiunu) del distrito de Santo Tomas. Se utilizó un equipo de agitación magnética con control de velocidad.

# **CAPÍTULO I**

## **GENERALIDADES**

### **1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Actualmente el tratamiento de agua en la PTAP Miskiunu presenta inconvenientes en el color del agua, esta coloración se encuentra en un rango de 30 - 60 UPC (Unidad de Platino Cobalto) suministrando agua por encima del límite máximo permisible de 15 UPC establecido por el Ministerio de Salud en el Reglamento de la Calidad de Agua para Consumo Humano (DS N°031-2010-SA), siendo el agua tratada por la PTAP Miskiunu muy juzgada por la población que la consume, sobre todo en épocas de lluvia, cuando la coloración reporta niveles de color de hasta 150 UPC.

La PTAP Miskiunu trata agua superficial y no cuenta en sus instalaciones con un proceso de coagulación – floculación para garantizar la calidad del agua potable con los requerimientos señalados en la norma sanitaria y contribuir en la mejora continua de la PTAP Miskiunu.

#### **1.1.1. PROBLEMA GENERAL**

¿Es posible eliminar el color del agua mediante el proceso de coagulación - floculación en la PTAP Miskiunu- Santo Tomas?

#### **1.1.2. PROBLEMAS ESPECIFICOS**

- ¿El proceso de tratamiento del agua para consumo humano en la PTAP Miskiunu, cumple con las etapas básicas establecidas en las Normas OS. 010 y OS. 020 del Reglamento Nacional de Edificaciones?
- ¿Las propiedades fisicoquímicas del agua tratada en la PTAP Miskiunu cumplen con la Norma de Calidad del Agua para Consumo Humano vigente?

- ¿Cuál es el efecto de la dosis de coagulante, tipo de coagulante y velocidad de agitación lenta en la remoción de color (%)?
- ¿Cuáles son los parámetros de dosis de coagulante, tipo de coagulante y velocidad de agitación lenta que logren mayor porcentaje de remoción de color y que cumplan con la norma sanitaria vigente?
- ¿Cuál sería la propuesta para el sistema de coagulación – floculación para la remoción de color en la PTAP Miskiunu?

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el proceso de coagulación – floculación para la eliminación de color del agua en la PTAP Miskiunu - Santo Tomas.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar si el proceso de tratamiento de agua en la PTAP Miskiunu cumple con las etapas básicas establecidas en las Normas OS. 010 y OS. 020 del Reglamento Nacional de Edificaciones.
- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del agua tratada en la PTAP Miskiunu para comprobar si cumplen con la Norma de Calidad de Agua para Consumo Humano.
- Evaluar el efecto de las variables: dosis de coagulante, tipo de coagulante y velocidad de agitación lenta para la remoción de color (%).
- Determinar los parámetros: dosis de coagulante, tipo de coagulante y velocidad de agitación lenta que logren mayor remoción de color y que cumplan con la norma de calidad de agua para consumo humano.

- Proponer un sistema de coagulación- floculación para la remoción de color en la PTAP Miskiunu.

### **1.3.JUSTIFICACIÓN**

#### **1.3.1. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA**

La mejora de las etapas de tratamiento de agua, así como el derecho de la población de contar con un suministro de agua de calidad es clave para garantizar la salud y bienestar de una población (Pacheco Ancco & Zapana Mamani, 2018). El presente trabajo se justifica en el hecho que desde su instalación la PTAP Miskiunu no ha experimentado innovación alguna para mejorar la calidad de agua suministrada a la población de Santo Tomas.

Hoy en día el acceso a tecnologías de tratamiento de agua es más accesible, por lo que la implementación del proceso de coagulación - floculación se adquiere fácilmente y a costos relativamente bajos.

#### **1.3.2. JUSTIFICACIÓN SOCIAL**

La presencia de color en el agua no solo es un problema estético sino más bien de salud, ya que la presencia de ácidos húmicos y fúlvicos en el proceso de desinfección pueden generar compuestos cancerígenos denominados trihalometanos (Yanza López et al., 2019).

El color del agua tratada de la PTAP Miskiunu genera incomodidad en los usuarios, quienes asumen que el agua no es apta para el consumo. Esta investigación busca calmar el malestar social que genera en los usuarios al consumir un agua con presencia de color, así mismo garantizar un agua potable de calidad para la población de Santo Tomas.

### **1.3.3. JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL**

Actualmente la PTAP Miskiunu no cumple con el Límite Máximo Permisible (LMP) de color en agua tratada. Este estudio contribuirá a la PTAP Miskiunu en la evaluación del proceso de coagulación- floculación para la remoción de color del agua y así cumplir con el LMP de color exigido por el Ministerio de Salud.

Los coagulantes utilizados son autorizados por la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA), este trabajo de investigación contribuirá a la correcta dosificación de coagulantes, de esta manera se evita residuos finales que afecten la salud de la población aguas abajo, así como también el impacto ambiental que pueda tener sobre el suelo, agua y aire.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ANTECEDENTES

(Yanza López et al., 2019); **EVALUACIÓN DE  $FeCl_3$  Y PAC PARA LA POTABILIZACIÓN DE AGUA CON ALTO CONTENIDO DE COLOR Y BAJA TURBIEDAD.** Se evaluó la acción del  $FeCl_3$  y PAC (Policloruro de Aluminio) para la potabilización de agua cruda con elevado color y baja turbiedad a escala laboratorio comparándose con las condiciones actuales de operación de la PTAP “Palacé” (Colombia) que utiliza únicamente PAC como agente coagulante. Se desarrollaron pruebas de jarras con  $FeCl_3$  como coagulante primario con 6 dosis desde 34 ppm hasta 47 ppm; PAC como coagulante primario con dosis desde 32 mg/L hasta 42 ppm y  $FeCl_3$  + PAC como ayudante de coagulación y floculación en un rango de 0,1 ppm a 0,6 ppm. Los parámetros usados en las pruebas de jarras fueron: tiempo de mezcla rápida de 1 min (300 rpm), tiempo de mezcla lenta de 23 min (39 rpm) y tiempo de sedimentación igual a 15 min. Este estudio logró la mayor eficiencia con el tratamiento combinado  $FeCl_3$  + PAC alcanzando un 86.9% en términos de eliminación de color y de 80.2% en la remoción de turbiedad. Se logró obtener parámetros dentro de la normativa colombiana vigente de LMP’s: color =15 UCV, turbiedad = 2 NTU, a excepción del pH = 6.5 – 9, que debió ser estabilizado antes de enviar el agua tratada.

(Cerón Pérez, 2016); **ESTUDIO PARA LA DETERMINACIÓN Y DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE COAGULANTES EN EL PROCESO DE CLARIFICACIÓN DE AGUAS CRUDAS EN LA POTABILIZACIÓN DE AGUAS DE LA EMPRESA EMPOOBANDO E.SP.** Se llevaron a cabo experimentos de pruebas de jarras con tres coagulantes: sulfato de aluminio ( $Al_2(SO_4)_3$ ), cloruro de hierro ( $FeCl_3$ ) y policloruro de aluminio (PAC) con el fin de determinar cuál de ellos presenta una mejor performance para la remoción de turbiedad y color



sin afectar el pH del agua. La dosis de coagulante se distribuyó en 5 niveles correspondientes a 10, 20, 30, 40 y 50 ppm. Para evaluar la dosis óptima de coagulantes se establecieron condiciones de gradientes y tiempos de agitación rápida (100 rpm durante 1 min), agitación lenta (40 rpm durante 20 min) y sedimentación de coágulos (20 min), las cuales permanecieron fijas en todos los ensayos. Los resultados demostraron que el PAC presenta una mejor eficiencia frente al sulfato de aluminio empleado actualmente en planta. Obteniendo una remoción de turbiedad del 90% y remoción de color del 92% a una dosis optima de 20 ppm. El pH exhibe un mejor comportamiento (7.2 - 7.5) puesto que el PAC actúa como buffer manteniéndolo casi invariable a diferencia de los otros coagulantes. Así como el uso de PAC redujo considerablemente los niveles de aluminio residual en comparación con el sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ).

(Pacheco Ancco & Zapana Mamani, 2018); **EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS EN EL PROCESO DE CLARIFICACIÓN DE AGUAS DE LA SUBCUENCA DEL RÍO YURA EN LA ZONA LA CALETA PARA LA POTABILIZACIÓN DE AGUAS DE LA JASS-VITOR.** La tesis consiste en la evaluación de los parámetros fisicoquímicos de la PTAP en el distrito de Vitor para la optimización del tratamiento de agua cruda. Se determinó la dosis óptima de coagulantes, velocidad de agitación, tiempo de agitación y el pH mediante prueba de jarras. Se hicieron pruebas a 10, 20, 30 y 40 ppm de sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), con una agitación rápida de 300 rpm en un tiempo de 10 s y 40 rpm para la agitación lenta con un tiempo de 15 min, considerando un tiempo de sedimentación de 10 min, pH inicial de 6.8, turbiedad inicial de 228 NTU. Se determinó la dosis óptima para el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  a 40 ppm con un resultado de 0.60 NTU de turbidez residual y pH de 6.61. En cuanto al  $\text{FeCl}_3$ , se hicieron también cuatro pruebas de 10, 20, 30 y 40 ppm de  $\text{FeCl}_3$ , con una agitación rápida de 300 rpm en un tiempo de 10 s para la mezcla rápida, y 40 rpm de agitación lenta durante un tiempo de

15 min con un tiempo de sedimentación de 10 min, pH inicial de 6.8, turbiedad inicial de 228 NTU. La dosis óptima es a 10 ppm con un resultado de 0.39 NTU y un pH de 7.5 de turbidez residual, siendo el  $\text{FeCl}_3$  el más eficaz a mayor turbiedad.

(Malakootian & Fatehizadeh, 2010); **REMOCIÓN DE COLOR DEL AGUA POR COAGULACIÓN / SODA CAUSTICA Y CAL.** El presente trabajo se realizó utilizando una prueba de jarras, cal y NaOH como agentes suavizantes para aumentar el pH del proceso, se prepararon aguas coloreadas sintéticamente con azul de metileno y negro eriocromo T con color inicial de 70,100,150 Pt-Co. Se evaluó la acción del cloruro de aluminio y cloruro férrico como coagulantes con 3 niveles de dosis correspondientes a 20,40,60 ppm. Inicialmente el agua sintética fue mezclada con el coagulante durante 90 s a 110 rpm, posteriormente en una primera etapa se agregó NaOH agitando lentamente a 30 rpm durante 5 min y se dejó sedimentar durante 30 min. En una segunda etapa se utilizó cal como agente suavizante a dosis de 0.1 a 12 g/L. El mayor porcentaje de eliminación de color fue del 75% con una dosis de 40 ppm tanto para el cloruro de aluminio y férrico, así como la mejor eficiencia de eliminación de color fue de 86.68% y 94% por 12 g/L de cal para azul de metileno y negro eriocromo.

(Restrepo Osorno, 2009); **EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACION – FLOCULACION DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE.** Se determinó el coagulante más eficaz para el agua utilizada en planta, se trabajó con sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) tipo B actualmente utilizada en planta, NALCO 8157, polisulfato de aluminio (PASS), policloruro de aluminio (PAC) y hidroxiclорuro de aluminio. Se realizan pruebas de jarras para todos los coagulantes. Los resultados demostraron que la mejor performance la obtienen el PASS y el PAC; empleando dosis de 40,42,44,46,48,50 ppm para el PASS y dosis de 20, 25,30 y 35 ppm para el PAC. La mezcla rápida se realizó durante 1 min

a 100 rpm, la mezcla lenta a distintos gradientes (120, 100, 80, 60, 40 y 20 s<sup>-1</sup>) y para cada uno de ellos se varía el tiempo (10, 20, 30, 40, 50 y 60 min) con un tiempo de sedimentación de 30 min. La dosis óptima para el PAC fue de 30 ppm obteniendo una remoción de turbiedad del 94 % y un pH final de 7.17, mientras que para el PASS la dosis óptima fue de 50 ppm que aporta una remoción de turbiedad del 95%. El PAC y el PASS mantienen casi invariable la alcalinidad, especialmente para las dosis que producen agua con turbiedad baja. Esto se debe a que el mecanismo de acción de los coagulantes polielectrolitos no involucra su reacción con la alcalinidad como sucede en el caso del alumbre.

## **2.2. AGUA CRUDA**

El Ministerio de Salud, (2011) señala que es el agua que no ha sido intervenida por la actividad del hombre, que se capta para el suministro sin haber sido sujeta ningún tratamiento. Las aguas crudas se clasifican según su fuente, así tenemos aguas superficiales (lagunas, riachuelos, ríos y glaciares), aguas subterráneas (pozos profundos y manantes) y aguas atmosféricas (lluvias) (Castrillon Bedoya & de Los Ángeles Giraldo, 2012). Sea cual fuera la fuente de agua, esta lleva consigo impurezas en suspensión e impurezas disueltas que le conceden al agua un apariencia turbia y/o coloreada (Rodríguez Salcedo, 2008).

## **2.3. AGUA POTABLE**

Se denomina agua potable a toda agua cruda que pasa por un tratamiento para que cumpla con la normatividad de calidad para el consumo humano (Castrillon Bedoya & de Los Ángeles Giraldo, 2012), el tratamiento que sigue incluye procesos físicos, químicos y biológicos que le otorgan inocuidad (Ministerio de Salud, 2011). El lugar donde se lleva a cabo el tratamiento es una planta de tratamiento de agua potable desde donde el agua se suministra a la población (Pacheco Ancco & Zapana Mamani, 2018).

## **2.4. NORMATIVIDAD PERUANA**

Muchas poblaciones peruanas, principalmente poblaciones rurales se ven forzadas a beber de fuentes de agua con calidad desconocida, con el riesgo constante de contraer enfermedades principalmente en infantes y personas de la tercera edad. Por lo que la existencia de un documento oficial que reúna los requisitos físicos, químicos y bacteriológicos que deben cumplir las aguas de bebida para ser consideradas potables, es imperativo (Ministerio de Salud, 2011).

En el Perú, los parámetros de calidad de agua potable se rigen bajo las condiciones del “Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano” elaborado por DIGESA y aprobada en el Decreto Supremo N° 031-2010-SA.

## **2.5. REGLAMENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO**

El reglamento contiene 10 títulos y 81 artículos que establecen los límites máximos permisibles de parámetros microbiológicos, parasitológicos, organolépticos y químicos orgánicos e inorgánicos. Compromete a los gobiernos regionales para el cumplimiento de este reglamento. Así mismo incorpora a la DIGESA como autoridad sanitaria fiscalizadora (Ministerio de Salud, 2011).

En el título 9 del reglamento, nombrado “Requisitos de Calidad del Agua para Consumo Humano nombrado “Requisitos de Calidad del Agua para Consumo Humano” se establece los parámetros de control obligatorio que deben efectuar las plantas de tratamiento de agua potable (ANEXO A)

### **2.5.1. COLOR**

La presencia de color en el agua se manifiesta por su interacción con materia orgánica en curso de descomposición, taninos, ácido húmico y metales como el hierro y

el manganeso en disolución (Cerón Pérez, 2016). Estas sustancias tienen la característica de poseer partículas con carga negativa; la aplicación de un coagulante con carga positiva trivalente como el  $\text{Al}^{+3}$  y el  $\text{Fe}^{+3}$  logra su remoción (Castrillon Bedoya & de Los Ángeles Giraldo, 2012). Para una planta de tratamiento de agua potable es fundamental conocer el origen del color y la eficacia del tratamiento empleado para su remoción (Cerón Pérez, 2016).

Según la normativa establecida por el Ministerio de Salud, (2011) el límite máximo de color verdadero que se puede tolerar en el agua potable es de 15 UPC (unidades de platino-cobalto).

### COLOR VERDADERO

Para el análisis de color verdadero se remueve todo el material suspendido presente en la muestra mediante filtración o centrifugación eliminando de esta manera la turbiedad para que no sea reconocida como color (Norma Mexicana Análisis de agua, 2001).

### MÉTODO DE ANÁLISIS DE COLOR

Uno de los métodos más usados para medir color verdadero es el método de platino-cobalto o Método 2120C APHA et al., (2012), el cual se mide en un rango de longitud de onda de (380-470 nm) para tonalidades amarillas ajustándose perfectamente al perfil de aguas naturales producto de la coloración por sustancias orgánicas, húmicas y fúlvicos. Los resultados de medición se dan en unidades de platino-cobalto (UPC) donde 1 unidad colorea Pt-Co se relaciona con 1 mg/l de platino como ion cloro platinado (Osorio Trujillo & Martínez Cajigas, 2018).

### **2.5.2. TURBIEDAD**

El resultado de la dispersión o interrupción del haz de luz que atraviesa una muestra se denomina turbiedad (Castrillon Bedoya & de Los Ángeles Giraldo, 2012). Del mismo modo Romero Rojas, (2000) señala que en un agua turbia se encuentran partículas en suspensión como arcilla, plancton y materia orgánica. Siendo las aguas superficiales las que reportan mayores valores de turbiedad, indica también que es un parámetro que establece si los procesos de coagulación – floculación son efectivos o por el contrario deficientes para lograr una buena calidad de agua.

#### MÉTODO DE ANÁLISIS DE TURBIEDAD

La turbiedad de una muestra se determina en un turbidímetro, el método empleado es el nefelométrico cuyo principio es dar a conocer la cantidad de luz diseminada por la muestra problema (Castrillon Bedoya & de Los Ángeles Giraldo, 2012). El valor de turbiedad se incrementa a mayor cantidad de luz diseminada. La turbiedad se mide en unidades nefelométricas de turbidez (UNT).

### **2.5.3. pH**

Es la medida de la actividad química de los iones  $H^+$  en una solución, donde la medición se realiza a partir de la ecuación  $pH = - \log[H^+]$ .

El valor hallado de pH puede estar en un rango de 0 a 14; un pH de 7 indica neutralidad, valores por debajo de 7 marca acidez y valores por encima de 7 reflejan alcalinidad (Cava Suárez & Ramos Arévalo, 2016). El proceso de coagulación – floculación se ve influenciado por el pH, ya que las aguas con valores alcalinos o ácidos perjudican la constitución de precipitados producidos por la acción del coagulante (Arboleda Valencia, 2000).

El valor de pH se ve afectado según el tipo de coagulante utilizado y su concentración. Así cuando se utiliza  $\text{FeCl}_3$ , se desarrolla una hidrólisis que produce disminución de pH. Generalmente cada  $\text{Fe}^{+3}$  necesita  $3\text{OH}^-$  para pasar al estado de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Estos  $3\text{OH}^-$  provienen de los bicarbonatos, así mismo se liberan  $\text{H}^+$ . Por el contrario el uso de polímeros básicos de aluminio (PAC's) como coagulante produce poca variación del pH que no afecta en nada la desestabilización (Fiessinger et al., 1977).

#### **2.5.4. SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS**

Los sólidos totales disueltos son moléculas e iones que se encuentran diluidos en el agua, cuya concentración se debe a la presencia de minerales, gases producto de descomposición de materia orgánica, metales y compuestos químicos orgánicos que dan olor, color, sabor y eventualmente toxicidad al agua que los contiene (Jiménez Moleon, 2001).

Los factores que influyen en la disolución de las sales solubles son: superficie de contacto, longitud del trayecto recorrido, concentración de sales en la roca, tiempo de contacto, temperatura y presión (Báez Muñoz, 2009).

Estos sólidos incrementan la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica y al hecho de que esta propiedad pueda medirse con mayor facilidad y rapidez que la determinación gravimétrica directa, por lo que frecuentemente se toma la conductividad eléctrica del agua como una medida indirecta de su contenido en sólidos disueltos (Atenea, 2004).

## 2.5.5. MATERIA ORGÁNICA

La materia orgánica disuelta (MOD) es una compleja mezcla heterogénea de macromoléculas, cuyos principales componentes en las aguas dulces son sustancias húmicas, carbohidratos y aminoácidos (Steinberg & Münster, 1985).

La presencia de color en el agua es principalmente a causa de la interacción del agua con material orgánico en descomposición como pueden ser ramas, pajonales o componentes orgánicos del suelo. Independientemente de su origen, en su conjunto reciben el nombre de "Sustancias húmicas" caracterizados por poseer pesos moleculares entre 200 a 50000 g/mol (Gjessing et al., 2011). La Tabla 2.1 muestra las sustancias húmicas con sus propiedades.

Sharp et al., (2006) estudió la variación de concentración de materia orgánica durante las estaciones del año y su reactividad con los coagulantes. Así la materia orgánica contribuye a la demanda de coagulante para lograr un mejor proceso de coagulación.

**Tabla 2.1**

*Sustancias Húmicas productoras de color en el agua*

Sustancia	Proporción en el agua %	Solubilidad	Peso Molecular	Composición %		
				C	H	N
Ácido Fúlvico	58- 86	Soluble en álcali, no precipita en ácidos		54.8 -59.3	5.5 - 6.5	0.57 - 2.41
Ácido Húmico	3.8 - 16.2	Soluble en álcali, precipita con HCl, insoluble en alcohol	< 50000	39 - 51	4.5 - 4.8	2.4 - 11.8
Ácido Himatome-lánico	10.2 - 32.2	Soluble en álcali, precipita con HCl, insoluble en alcohol	800			
Carbón Húmico		Insoluble en álcali				

Nota: Tomado de "Studies of Organic in Natural Water" por Packham, (1964).



En adición Camargo Valero & Cruz Torres, (1999) indican que la materia orgánica en concentraciones elevadas de no ser removidas en la etapas previas a la desinfección, son propensas a formar trihalometanos con cloro libre, sustancias consideradas cancerígenas.

La concentración de materia orgánica en el agua se determina directamente con la medida del carbono orgánico total (COT) e indirectamente midiendo la capacidad reductora del carbono existente con la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Sin embargo, no es posible obtener un resultado exacto del tipo de compuestos que se encuentra en ella (Fuentes Rivas et al., 2015).

#### **2.5.6. COLOIDES**

Son materiales inertes o vivos (arcillas, hidróxidos metálicos, microorganismos, fibras, pulpas y proteínas) que se dividen en partículas polinucleares para constituir lo siguiente:

- Micelas o agregados de moléculas simples disueltas que comprenden la mayoría de los cuerpos de la química mineral.
- Micromoléculas complejas con un número elevado de átomos que engloban la mayoría de los cuerpos de la química orgánica.

En una dispersión acuosa, las partículas coloidales tienen una carga primaria positiva o negativa. Sin embargo, la mayoría de las partículas desarrollan una carga negativa, por lo que la carga es frecuentemente afectada por el pH y el contenido de la solución acuosa. Esta carga puede tener diferentes orígenes según las características del medio acuoso y el estado inicial de las partículas. Las partículas tienen una superficie

activa representada por los grupos hidroxilos o carboxilos, siendo el caso de las proteínas (Kettab, 1992).

## **2.6. REGLAMENTO NACIONAL DE EDIFICACIONES**

El presente reglamento tiene por objeto normar los criterios y requisitos mínimos para el diseño y ejecución de las habilitaciones urbanas y las edificaciones, permitiendo de esta manera una mejor ejecución de los planes urbanos. En su segundo título norma las habilitaciones urbanas y contiene las normas referidas a los tipos de habilitaciones, los componentes estructurales, las obras de saneamiento y las obras de suministro de energía y comunicaciones (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2006).

### **2.6.1. NORMA OS. 010**

La Norma OS.010 perteneciente a las obras de saneamiento, tiene por objetivo fijar las condiciones para la elaboración de los proyectos de captación y conducción de agua para consumo humano. Esta norma fija los requisitos mínimos a lo que deben sujetarse los diseños de captación y conducción de agua para consumo humano en localidades mayores de 2000 habitantes (Norma OS. 010, 2006).

### **2.6.2. NORMA OS. 020**

La Norma OS. 020 perteneciente a las obras de saneamiento, tiene por objetivo establecer criterios básicos de diseño para el desarrollo de proyectos de planta de tratamiento de agua potable para consumo humano. EL objetivo del tratamiento es la remoción de los contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos del agua hasta cumplir con los límites establecidos en las normas nacionales de calidad de agua (Norma OS. 020, 2006).

## 2.7.COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN

Es el proceso por el cual las partículas dispersas en el agua se conglutinan formando masas de mayor tamaño y peso, también denominadas flocs (Arboleda Valencia, 2000). El proceso en mención se usa para:

- Remover la turbiedad (orgánica e inorgánica).
- Remover el color (aparente y verdadero)
- Eliminar bacterias, virus y organismos patógenos.
- Remoción de micro algas.

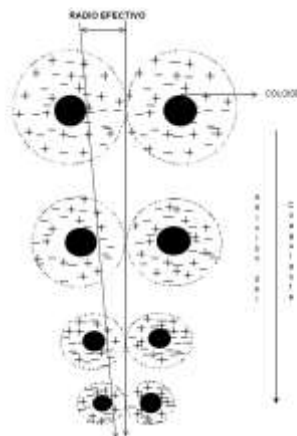
El proceso de coagulación y floculación acelera la remoción de partículas en suspensión o en solución que podrían durar días e incluso años en sedimentar con procesos simples (Pérez Parra, 1981).

## 2.8. COAGULACIÓN

Es un proceso que se da en una fracción de segundos al momento de agregar un coagulante, generando una desestabilización de las cargas superficiales que mantiene separados a los coloides (Arboleda Valencia, 2000), como se muestra en la Figura 2.1.

**Figura 2.1**

*Neutralización de cargas y reducción del radio efectivo de los coloides.*



Nota: La reducción de la nube de iones o el radio efectivo se da con la adición de un coagulante. Adaptado de Tratamiento de Agua, Coagulación y Floculación (p. 6) por Andía Cárdenas, (2000), Sedapal.

La desestabilización de los coloides se da por los siguientes mecanismos fisicoquímicos:

1. COMPRESIÓN DE LA DOBLE CAPA:

Los coloides presentan una capa difusa que al interactuar entre si generan fuerzas de repulsión o potencial Z, disminuyendo sus fuerzas de atracción o Fuerzas de Van Der Walls (Andía Cárdenas, 2000). Esta fuerza de repulsión disminuye o se neutralizan de forma rápida cuando la concentración de iones de coagulante aumenta, generando una compresión de las capas (Pérez Parra, 1981).

2. ADSORCIÓN Y NEUTRALIZACIÓN DE CARGAS:

Los coloides presentan cargas superficiales de naturaleza negativa el cual adsorbe en su superficie a iones polinucleares de carga positiva neutralizando el potencial Z a valores casi nulas (Pérez Parra, 1981)

3. ATRAPAMIENTO DE PARTICULAS DENTRO DE UN PRECIPITADO

Los flocs están formados por moléculas de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  o de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  quienes atrapan a los coloides neutralizados para formar flocs de mayor tamaño y peso (Andía Cárdenas, 2000).

Márquez Canosa et al., (1994) indica que el proceso de coagulación comprende de diferentes etapas o fases las cuales son:

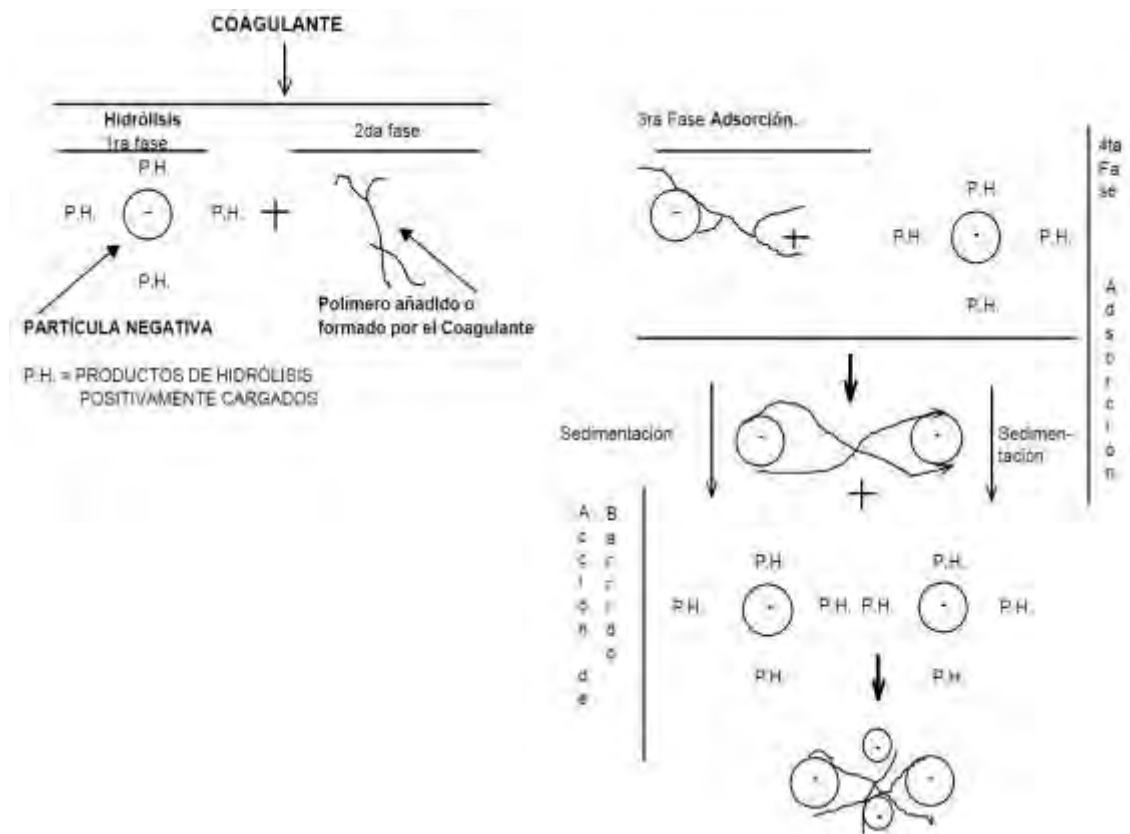
- 1ra Fase: Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas en suspensión.
- 2da Fase: Precipitación y formación de componentes químicos que se polimerizan.
- 3ra Fase: Adsorción de las cadenas poliméricas en la superficie de los coloides.

- 4ta Fase: Adsorción mutua entre los coloides.
- 5ta Fase: Acción de barrido.

En la Figura 2.2 se aprecia las fases del proceso de coagulación que se dan al momento de agregar el coagulante y hacer una mezcla rápida y homogénea.

**Figura 2.2**

*Etapas del proceso de coagulación*



Nota: Adaptado de Tratamiento de Agua, Coagulación y Floculación (p. 22), por Andía Cárdenas, (2000). Sedapal.

Al momento de agregar el coagulante al agua se genera compuestos hidrolizados con carga positiva que neutralizan las partículas coloidales (Lorenzo Acosta, 2006). También se forman hidróxidos coloidales insolubles en agua que absorben a las partículas coloidales formando flocs de mayor tamaño acelerando su precipitación (Pérez de la Cruz & Urrea Mallebrera, 2011).

## **2.8.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COAGULACIÓN**

### pH DEL AGUA

Una de las variables más importantes en el proceso de coagulación viene a ser el pH, la alcalinidad y la naturaleza de los iones que generan un rango de pH óptimo en la que la coagulación pueda ocurrir de forma rápida, Andía Cárdenas, (2000). Indica también que cada coagulante trabaja mejor en un rango determinado de pH, en caso de sales de aluminio la coagulación se da en un rango de 6.5 a 8.0 de pH y para sales de hierro es de 5.5 a 8.5.

### DOSIS DE COAGULANTE

Para una mejor aplicación de coagulantes, se realizan ensayos en equipos de prueba de jarras donde se determinará el tipo y cantidad a usar (Aguilar Cruz & Yupanqui Cruz, 2018), esto para evitar los siguientes problemas:

- a. Bajas dosis de coagulante no neutralizan por completo el coloide por consecuencia la formación de micro flóculos es casi nulo.
- b. Alta dosis de coagulante produce reestabilización de los coloides.

### MEZCLA RÁPIDA

Tiene por objetivo dispersar de forma rápida el coagulante en todo el volumen de agua, para desestabilizar completamente la carga de las partículas coloidales, neutralizándolas y generando aglomeración en corto tiempo (Lorenzo Acosta, 2006).

El grado de agitación durante la adición del coagulante determina si la coagulación es completa, la agitación debe ser constante e intensa en todo el volumen de agua (Andía Cárdenas, 2000).

## **2.8.2. TIPOS DE COAGULACIÓN**

### COAGULACIÓN POR ADSORCIÓN

Se da cuando la concentración coloidal es muy alta (aguas de alta turbiedad), por lo que los coloides absorben a los productos insolubles de los coagulantes formando flocs de forma rápida (Andía Cárdenas, 2000).

### COAGULACIÓN POR BARRIDO

Se da cuando la concentración coloidal es muy baja (aguas de baja turbiedad) por tal motivo los productos insolubles de los coagulantes atrapan a las partículas coloidales por sobre saturación generando flocs de forma lenta (Andía Cárdenas, 2000).

## **2.8.3. COAGULANTES**

Son compuestos químicos que en disolución se encuentran con carga positiva. Fernandez Alba et al., (2006) Indica que habitualmente se utiliza sales con cationes de alta relación carga/masa como el  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Al}^{3+}$ . Así mismo recientes investigaciones desarrollan nuevas alternativas como los coagulantes inorgánicos poliméricos tales como el cloruro de polihierro (PFC) y cloruro de polialuminio (PAC) (Yanza López et al., 2019).

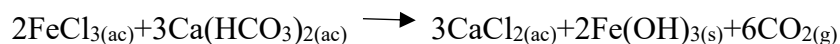
Cerón Pérez, (2016) describe los compuestos de cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) y policloruro de aluminio (PAC):

### CLORURO FERRICO

Mayormente se encuentra en presentaciones acuosas de 40-45% de  $\text{FeCl}_3$  y muy pocas veces en forma sólida como ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). la aplicación del cloruro férrico como coagulante actúa sobre los bicarbonatos hasta formar hidróxido

férrico precipitado donde predominan los siguientes iones:  $\text{Fe}^{3+}$ ;  $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ ;  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ ;  $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$ ;  $\text{Fe}(\text{OH})_3^-$ ;  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$  y  $\text{Fe}(\text{OH})_6^{3-}$ .

La reacción general es:



El rango óptimo de pH de trabajo es de 4 – 11 sin peligro de redisolución del hidróxido precipitado a pH alto

### POLICLORURO DE ALUMINIO

Es un coagulante inorgánico líquido con fórmula empírica  $\text{Al}_n(\text{OH})_m\text{Cl}_{(3n-m)} \cdot \text{H}_2\text{O}$ , indicado principalmente para remover materia coloreada y coloidal en suspensión. Se utiliza en plantas potabilizadoras de agua y plantas de tratamiento de efluentes líquidos industriales, como reemplazo de sulfato de aluminio, cloruro férrico y otras sales inorgánicas.

La reacción de hidrólisis de un PAC se da por etapas. Dependiendo de las condiciones del proceso, se forman los siguientes productos intermedios:

- Dímeros:  $[\text{Al}_2(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_8]^{4+}$
- Complejos de poli hidroxilo:  $[\text{Al}_8(\text{OH})_{20}]$ ,  $[\text{Al}_8(\text{OH})_{22}]^{2+}$ ,  $[\text{Al}_8(\text{OH})_{24}]$ ,  $[\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{7+}$ ,  $[\text{Al}_{14}(\text{OH})_{38}]^{8+}$ ,  $[\text{Al}_{30}\text{Cl}_9(\text{OH})_{81}(\text{H}_2\text{O})_{38}]^{5+}$
- Compuestos complejos:  $[\text{Al}_8(\text{OH})_{20}(\text{H}_2\text{O})_{10}]\text{Cl}_4$
- Partículas y agregados en la forma original del PAC.

La ventaja del PAC es que no necesita reguladores de pH y ayudantes de coagulación (pp. 43-46).



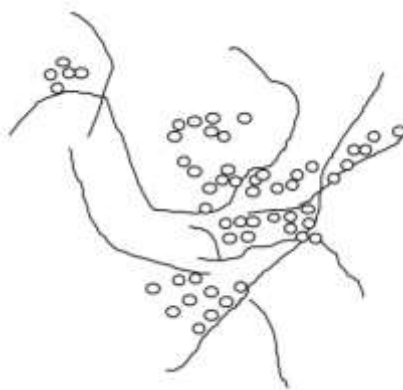
## 2.9. FLOCULACIÓN

Es el proceso que precede a la coagulación cuyo objetivo principal es aglomerar las partículas desestabilizadas (microflóculos) formando masas de mayor tamaño y peso (Restrepo Osorno, 2009). Esto ocurre mediante una agitación de moderada velocidad (agitación lenta) ya que una agitación intensa podría ocasionar ruptura de flocs desfavoreciendo la floculación (Andía Cárdenas, 2000).

En algunos casos los aglomerados formados no son lo suficientemente grandes para sedimentar fácilmente (Andía Cárdenas, 2000), por lo cual es necesario el empleo de floculantes o ayudantes de floculación para generar enlaces entre partículas individuales reuniéndolos en forma de red y crear aglomerados sedimentables (Díaz Claros, 2016) como se muestra en la Figura 2.3.

### Figura 2.3

*Acción del uso de floculantes*



Nota: floculante tiende un puente entre las partículas coloidales aglomeradas para formar flóculos más grandes fácilmente sedimentables. Adaptado de Tratamiento de Agua, Coagulación y Floculación (p. 29) por Andía Cárdenas, (2000). Sedapal.

### **2.9.1. MECANISMOS DE FLOCULACIÓN**

La formación de flocs de mayor tamaño se debe a la oportunidad de unirse entre ellos por medio de sucesivas colisiones que generen una efectiva adherencia (Restrepo Osorno, 2009).

Díaz Claros, (2016) indica que intervienen, en forma secuencial, tres mecanismos de transporte:

#### FLOCULACIÓN PERICINÉTICA O BROWNIANA

Esta producido por el movimiento natural de las moléculas del agua y esta inducida por la energía térmica, este movimiento es conocido como el movimiento browniano.

#### FLOCULACIÓN ORTOCINÉTICA

Se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, el que es inducido por una energía exterior a la masa de agua y que puede ser de origen mecánico o hidráulico. Después que el agua es coagulada es necesario que se produzca la aglomeración de los microflóculos; para que esto suceda se produce primero la floculación pericinética luego se produce la floculación ortocinética.

#### SEDIMENTACIÓN DIFERENCIAL

Se debe a las partículas grandes, que, al precipitarse, colisionan con las más pequeñas, que van descendiendo lentamente y ambas se aglomeran (p. 24).

### **2.9.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FLOCULACIÓN**

#### CONCENTRACIÓN Y NATURALEZA DE LAS PARTÍCULAS

La formación del flocs es directamente proporcional al tamaño y concentración de partículas en el agua (Restrepo Osorno, 2009).

### TIEMPO RETENCIÓN

El tiempo de retención o tiempo que dura la agitación lenta es directamente proporcional a la formación de flocs de mayor tamaño (Restrepo Osorno, 2009).

### AGITACIÓN LENTA

Para evitar la ruptura de flocs se debe considerar un máximo de gradiente que favorezca la aglomeración de las partículas (Restrepo Osorno, 2009).

## **2.9.3. CALIDAD DEL FLOC**

La formación de los flocs se evalúa según el llamado “índice de Willcomb” el cual asigna un valor cualitativo para poder calificar la formación más consistente y rápida de sedimentar de los flocs según la Tabla 2.2 (Kettab, 1992).

**Tabla 2.2**

*Índice de Willcomb para estimar la calidad del floc*

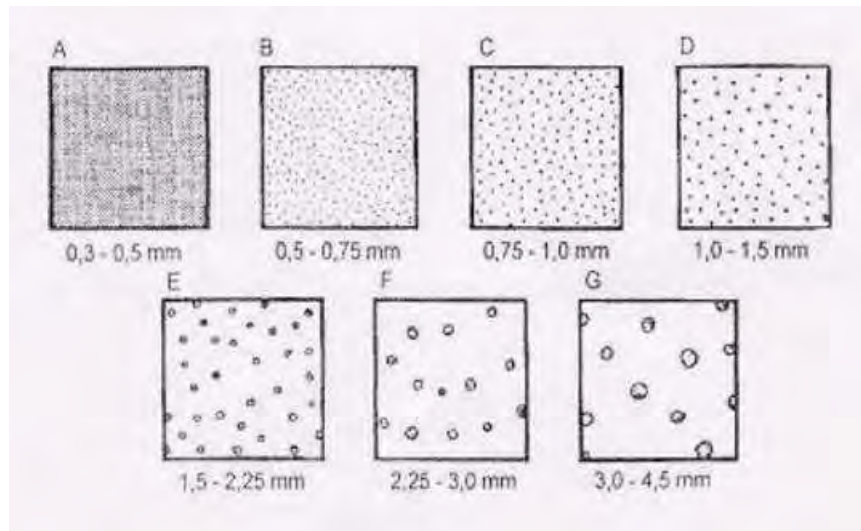
<b>Índice</b>	<b>Descripción del Índice de Willcomb</b>
0	<b>Flóculo coloidal:</b> sin ninguna señal de aglutinación.
2	<b>Visible:</b> Flóculo muy pequeño, casi imperceptible.
4	<b>Disperso:</b> Flóculo bien formado, pero uniformemente distribuido (sedimenta muy lento).
6	<b>Claro:</b> Flóculo de tamaño relativamente grande, pero que precipita con lentitud.
8	<b>Bueno:</b> Floculó que se deposita fácil, pero no completamente.
10	<b>Excelente:</b> Flóculo que se deposita completamente, dejando el agua cristalina.

Nota : Tomado de “Traitement Des Eaux” por Kettab, (1992).

El tamaño de flocs se determina en mm y se toma como referencia el comparador desarrollado por el Water Research Institute, (2000), el cual se muestra en la Figura 2.4.

#### **Figura 2.4**

*Comparador para evaluar el tamaño del floc*



Nota : Tomado de “Comparador para evaluar el tamaño de flóculos” por Water Research Institute, (2000).

## **2.10. SISTEMA DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN**

El sistema de coagulación y floculación se conforma de los siguientes equipos.

- Equipo de dosificación de reactivos
- Equipo de mezcla rápida
- Equipo de mezcla lenta

### **2.10.1. EQUIPO DE DOSIFICACIÓN DE COAGULANTE**

Andía Cárdenas, (2000) explica que las reacciones del coagulante con el agua a dosificar se dan de manera eficiente, si se cumplen con las siguientes condiciones:

- El sistema de dosificación debe proporcionar un caudal constante y fácilmente regulable según el caudal de agua

- La dosis de coagulante que se adicione al agua es de forma constante y uniforme en la unidad de mezcla rápida, de este modo el coagulante sea completamente dispersado y mezclado con el agua.
- El equipo dosificador debe estar debidamente calibrado mediante pruebas de aforamiento.

Los tipos de dosificadores pueden operar con producto seco y en solución como es el caso para el PAC y FeCl<sub>3</sub>. La Tabla 2.3 muestra los tipos de dosificadores en solución que utilizan las plantas potabilizadoras de agua.

**Tabla 2.3**

*Tipos de Dosificación y sus características de operación,*

<b>Tipo de dosificación</b>	<b>Características de operación</b>
Dosificación manual	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dosificación excesiva o sub-dosificación permanente</li> <li>• Sitios de trabajo sucios y peligroso</li> <li>• Riesgos de contacto con los productos concentrados</li> </ul>
Dosificación tipo Venturi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grandes variaciones de dosificación según la viscosidad, la temperatura, la presión y el caudal</li> <li>• Regulación y calibración delicadas</li> <li>• Sensibilidad a la presión de la red de agua</li> </ul>
Dosificación Eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efecto pulsante: inyecta sin homogeneización.</li> <li>• Necesita un control de caudal para obtener la proporcionalidad de la dosificación en el agua.</li> <li>• Sensibilidad a la presión de la red de agua, calibración necesaria.</li> </ul>

Fuente: Adaptado del Manual de utilización Dosatron por Dosatron International S.A.S, (2016).

### **2.10.2. EQUIPO DE MEZCLA RAPIDA**

El equipo debe generar una intensidad de agitación al agua para dispersar el coagulante. La gradiente de velocidad y el tiempo en que se da la agitación evalúan si la mezcla es completa, las unidades normalmente utilizadas para producir la mezcla rápida

se clasifican de acuerdo al tipo de energía utilizada como se muestra en la Tabla 2.4 (Vargas, 2004).

**Tabla 2.4**

*Clasificación de las unidades de mezcla rápida.*

<b>Tipo de energía</b>		<b>Equipo</b>
Mecánicos	Retro mezclador en línea	
Hidráulicos	Resalto Hidráulico	Canal Parshall
		Canal de fondo inclinado
		Vertedero rectangular
	En línea	Difusores
		Inyectores
		Estáticos
	Caídas	Orificios
		Vertederos triangulares
	Contracciones	Medidor Venturi
		Reducciones
		Orificios ahogados
Velocidad o cambio de flujo	Línea de bombeo	
	Codos	

Nota: Adaptado de Tratamiento de Agua para Consumo Humano - Plantas de Filtración Lenta por Vargas, (2004).

Para conseguir un resalto estable el Numero de Froude para canales con cambio de pendiente como vertedores rectangulares y triangulares debe estar entre 4.5 y 9 (Vargas, 2004).

### **2.10.3. EQUIPO DE MEZCLA LENTA**

Su principal función es dar una agitación lenta al agua permitiendo la acumulación de floc, los principales factores para el diseño de un floculador es el gradiente de velocidad, tiempo de retención y el mecanismo por el cual se produce la agitación. Los floculadores se clasifican según la energía de agitación y el sentido del flujo (Vargas, 2004). Por lo que tenemos lo siguiente:

- Floculadores mecánicos: son equipos que necesitan energía eléctrica para producir agitación y estas a su vez se clasifican según su flujo en rotatorios y reciprocantes.
- Floculadores Hidráulicos: son equipos que utilizan la energía hidráulica para producir agitación y que según el flujo se clasifican en horizontales y verticales.

En el título II del Reglamento Nacional de Edificaciones, Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, (2006), indica que “Los parámetros óptimos de diseño de la unidad como gradiente de velocidad y tiempo de retención deberán seleccionarse mediante simulación en el equipo de prueba de jarras”(p.19).

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

La parte experimental del presente trabajo se llevó a cabo en el laboratorio de análisis fisicoquímico del agua de la PTAP Miskiunu que pertenece a la Empresa Municipal Prestadora de Servicios de Saneamiento de las Provincias Alto Andinas S.A. (EMPSSAPAL S.A.), ubicado en el distrito de Santo Tomas, provincia de Chumbivilcas de la región del Cusco.

La investigación es de enfoque cuantitativo, de tipo aplicado, de alcance explicativo y de diseño experimental.

#### 3.1. MUESTRA

La muestra estuvo constituida por el agua de salida del proceso de filtración lenta, antes de la etapa de desinfección en la PTAP Miskiunu.

#### 3.2. MATERIALES

Los materiales que se utilizaron en la investigación fueron proporcionados por EMSSAPAL S.A. En la Tabla 3.1 se mencionan los materiales que fueron utilizados.

**Tabla 3.1**

*Lista de materiales.*

<b>Tipo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Características</b>	<b>Cantidad</b>
Equipos	Agitador Magnético	Marca CAT; modelo M5.	1
	Filtración al vacío	Consta de embudos de filtración magnética, rampa para embudos y bomba generadora de vacío	1
Instrumentos	Turbidímetro	Marca Hach, modelo 2100Q.	1
	Colorímetro	Marca HANNA, modelo HI 96727.	1
	pH metro	Marca HANNA, modelo HI 98100.	1
	Cronometro	Digital	1
Materiales	Vaso de precipitados	De vidrio boro silicato con un volumen de 500 ml.	3



	Pipeta	Material de vidrio clase B	1
	Propipeta	Utensilio de goma con tres salidas, usada especialmente para transferir líquidos de todo tipo.	1
	Fiola de 1000 ml	Material de vidrio clase A	2
	Fiola de 100 ml	Material de vidrio clase A.	2
	Filtros	De membrana de nitrato de celulosa con un tamaño de poros de 0.45 micras y un diámetro de 47 mm.	50
	Bidón de polietileno	Capacidad de 12 litros, de material de polietileno de alta densidad.	1
Reactivos	Cloruro Férrico (FeCl <sub>3</sub> )	Al 40 %, densidad de 1.42.	100 ml
	Policloruro de Aluminio (PAC)	Con densidad de 1.33, pH de 2.63 a 25°C	100 ml
	Agua destilada	Producida en el laboratorio de la PTAP Miskiunu	6 L

Fuente: Elaboración Propia

### 3.3. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE MISKIUNU

La PTAP Miskiunu se encuentra ubicada en el sector de Qenqo en el distrito de Santo Tomas (ver Tabla 3.2 y Figura 3.1). Tiene el propósito de abastecer agua potable a la zona norte del distrito de Santo Tomas y cuenta con una población atendida aproximadamente de 4500 habitantes. Actualmente se encuentra administrada por la empresa EMPSSAPAL S.A.

**Tabla 3.2**

*Coordenadas de ubicación de la PTAP Miskiunu*

Ubicación	Coordenadas geográficas
Sur	14°27'29.0"
Este	72°03'51.8"
Altitud	3,752.210 m.s.n.m

Nota: Adaptado de [Santo Tomas – Chumbivilcas], de Google, s.f., Todos los derechos reservados 2021 por Google. Adaptado con permiso del autor.

### Figura 3.1

*Ubicación de la PTAP Miskiunu*



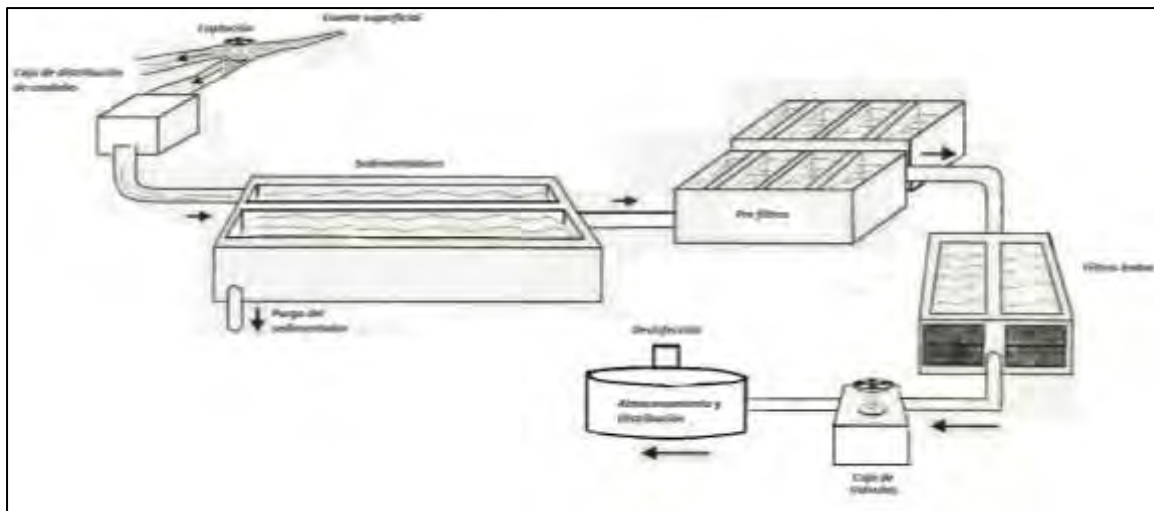
Nota: Adaptado de [Santo Tomas – Chumbivilcas], de Google, s.f., [https://earth.google.com/web/search/santo+tomas.+chumbivilcas/@-14.45804604,-72.06470035,3796.40195584a,259.15059265d,35y,304.85588172h,0t,0r/data=CijIlgokCZ-syEazOCzAEeEN6RI6lyzAGW5KvkT4xFHAITIP\\_iel0FHA](https://earth.google.com/web/search/santo+tomas.+chumbivilcas/@-14.45804604,-72.06470035,3796.40195584a,259.15059265d,35y,304.85588172h,0t,0r/data=CijIlgokCZ-syEazOCzAEeEN6RI6lyzAGW5KvkT4xFHAITIP_iel0FHA). Todos los derechos reservados 2021 por Google.

Adaptado con permiso del autor.

La planta cuenta con un sistema de tratamiento por gravedad conformada por una batería de 02 sedimentadores, 02 prefiltros de flujo horizontal, 02 filtros lentos, un sistema de desinfección a goteo y un reservorio de almacenamiento como se muestra en la Figura 3.2.

**Figura 3.2**

*Representación gráfica PTAP Miskiunu*



Nota: Tomado de Manual de Operación y Mantenimiento de la PTAP Miskiunu (EMPSSAPAL S.A, 2016).

De acuerdo con el Manual de operación y mantenimiento EMPSSAPAL S.A, (2016) la planta de tratamiento consta de las siguientes etapas:

CAPTACIÓN: Se ubica a 10 Km al este del distrito de Santo Tomas a una cota 4333 m.s.n.m. En temporada de lluvias registra un caudal promedio de 9 L/s (octubre - marzo) y en época de estiaje (abril - setiembre) de 1.5 L/s. Los caudales aforados de este sistema hacen un promedio anual total de 6.5 L/s siendo lo suficiente para garantizar el adecuado funcionamiento del sistema. En la Figura 3.3 se muestra la estructura de captación.

### **Figura 3.3**

*Captación de agua - riachuelo Miskiunu*



Fuente: Elaboración propia

SEDIMENTACIÓN: El agua captada llega a los sedimentadores donde las partículas en suspensión de mayor tamaño precipitan al fondo de la estructura por acción de la gravedad. La distribución del agua se realiza mediante una cámara de distribución de caudales (ver Figura 3.4) en dirección a los 2 sedimentadores paralelos inclinados (ver Figura 3.5) cuyo valor máximo permisible operacional de turbiedad es de hasta 50 UNT.

### **Figura 3.4**

*Cámara de distribución de caudales*



Fuente: Elaboración propia

### **Figura 3.5**

#### *Sedimentadores*

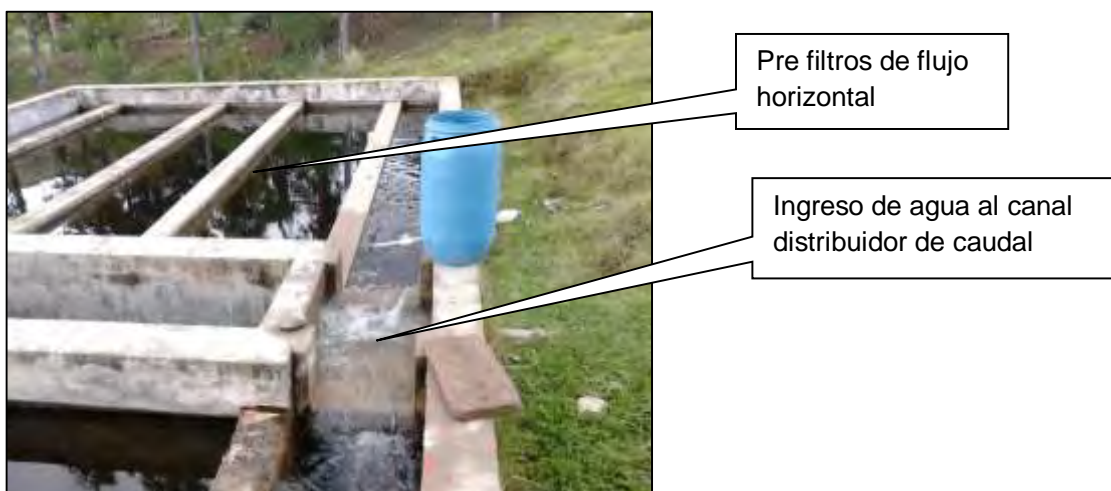


Fuente: Elaboración propia

PRE-FILTRACIÓN: Luego de la etapa de sedimentación el agua pasa a la etapa de prefiltración donde se retiene partículas suspendidas por adherencia disminuyendo la turbiedad existente en el agua sedimentada. La planta cuenta con 2 prefiltros paralelos de flujo horizontal, el agua que ingresa es distribuida por un canal de distribución de caudal como se muestra en la Figura 3.6 El valor máximo permisible operacional de turbiedad a la entrada del prefiltros es de 50 NTU.

### **Figura 3.6**

#### *Pre-filtros de flujo horizontal*



Fuente: Elaboración propia

FILTRO LENTO: El agua pre filtrada se colecta por una canaleta para luego pasar a la etapa de filtración donde se retiene partículas suspendidas que se adhieren al lecho filtrante esta operación se realiza mediante un filtro lento de arena cuarcífera con un tamaño efectivo de 0.2mm a 0.3mm y un coeficiente de uniformidad menor a 3. La planta cuenta con 2 filtros lentos. El valor máximo permisible operacional de turbiedad es de 20 NTU teniendo como resultado agua filtrada menor a 5 NTU.

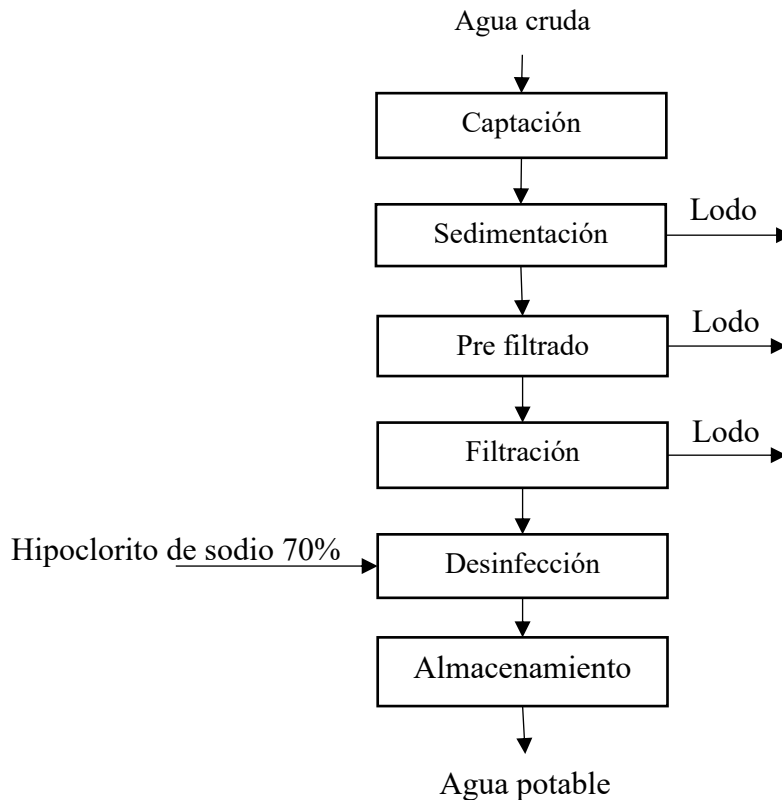
DESINFECCIÓN: Esta etapa busca la eliminación de los elementos patógenos, se realiza mediante un sistema a goteo y usando como desinfectante hipoclorito de sodio al 70% el cual se prepara según la demanda de cloro requerida por el agua y se dosifica en una cámara de contacto, para posteriormente almacenar el agua desinfectada.

ALMACENAMIENTO: El almacenamiento del agua desinfectada se realiza en el Reservorio de Miskiunu, es una estructura hidráulica con una capacidad de 450m<sup>3</sup> donde se concluye el proceso de desinfección por el tiempo de residencia que tiene el agua, de aquí se manda agua potable a la red de distribución en la población.

En la Figura 3.7 se muestra el diagrama de flujo de la planta para la potabilización de agua.

**Figura 3.7**

*Diagrama de flujo del proceso de potabilización de agua en la PTAP Miskiunu*



Fuente: Elaboración propia

### **3.4. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LA PTAP MISKIUNU**

La evaluación consistió en verificar si la PTAP Miskiunu cumple con las etapas básicas de tratamiento para agua potable que establece el Reglamento Nacional de Edificaciones del Ministerio de Vivienda (DS N°011-2006-VIVIENDA), para lo cual se ejecutó los siguientes pasos.

1. Se identificó las condiciones de captación y conducción de la PTAP Miskiunu consultando el manual de operación y mantenimiento de la planta, evaluando de esta manera su conformidad o no conformidad respecto a la Norma OS.10

2. Se identificó las condiciones de las diferentes etapas del tratamiento de la PTAP Miskiunu consultando el manual de operación y mantenimiento de la planta, evaluando de esta manera su conformidad o no conformidad respecto a la Norma OS.20
3. Se realizó monitoreos de turbiedad y color del agua que trata la PTAP Miskiunu durante el año 2020.
4. Finalmente, según sugiere la Norma OS.20 respecto a los tipos de tratamiento. Se estableció el proceso de coagulación – floculación como alternativa para remover el color del agua.

### 3.5. MUESTREO

El muestreo se realizó en temporada de lluvia donde hay mayor incremento de color en el agua. Se tomó 3 muestras simples y puntuales con un volumen de 12 litros. En la Figura 3.8 se visualiza la muestra tomada.

#### Figura 3.8

*Muestra obtenida para análisis experimental*



Fuente: Elaboración propia



### 3.6. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA MUESTRA

La caracterización de la muestra consistió en medir los parámetros de color, turbiedad y pH para cada muestra. En adición para la muestra más representativa, vale decir la muestra con mayor contenido de color; se caracterizó sólidos disueltos, alcalinidad y materia orgánica antes y después del proceso de coagulación – floculación.

Los métodos utilizados para la determinación de dichos parámetros se resumen en la Tabla 3.3 los cuales están basados en standard methods for the examination of the water and wastewater (SMEWW) y association of water and wastewater analytical (AWWA).

**Tabla 3.3**

*Parámetros físicoquímicos y métodos de ensayo*

<b>Parámetro</b>	<b>Método de ensayo</b>
▪ Color	Método SMEWW colorímetro platino cobalto
▪ Turbiedad	Método SMEWW 2013- B Nefelométrico
▪ pH	Método EPA 150.1 pH Electrométrico

Fuente: Elaboración propia

### 3.7. PROCEDIMIENTO DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN

#### 3.7.1. PREPARACIÓN DE COAGULANTES - FLOCULANTES

Se preparó una solución madre al 10% y luego se realizó una disolución al 1% la cual se utilizó para las diferentes pruebas como se muestra en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4***Preparación de coagulantes*

<b>Reactivo</b>	<b>Densidad</b>	<b>Concentración de solución madre</b>	<b>Concentración de disolución</b>
Cloruro férrico (FeCl <sub>3</sub> )	1.42	10%	1%
Policloruro de aluminio (PAC)	1.33	10%	1%

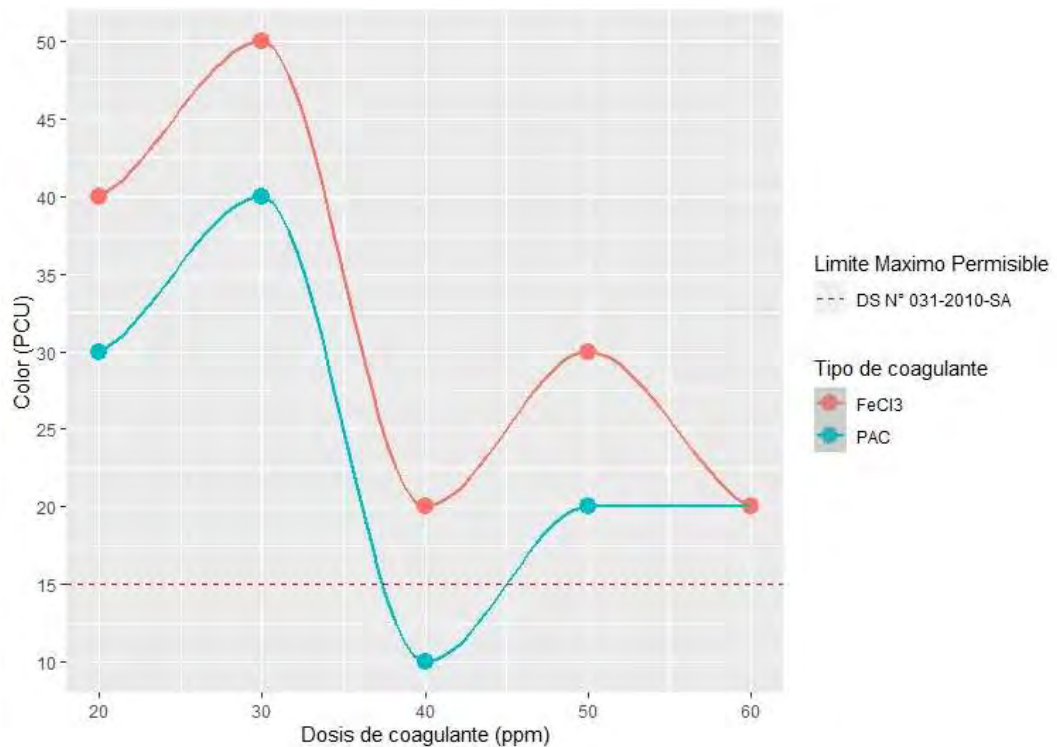
Fuente: Elaboración propia

**3.7.2. PRUEBAS PRE - EXPERIMENTALES**

A fin de determinar el rango de dosis de coagulante se realizaron pruebas pre - experimentales con 5 dosis (20, 30,40, 50, 60 ppm) para los dos tipos de coagulantes. La Figura 3.9 detalla el comportamiento de la remoción de color para una muestra con color inicial de 100 UPC a 50 rpm.

**Figura 3.9**

*Prueba preexperimental a diferentes dosis de coagulante y 50 rpm (Color inicial de 100 PCU)*



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.9 se observó una mayor remoción de color a dosis 40 ppm para los dos tipos de coagulante por lo que se consideró como punto intermedio y se tomó dosis de 30 y 50 ppm como niveles inferior y superior respectivamente para el análisis del comportamiento de la remoción de color (%). En adelante se considera estas dosis para el diseño experimental.

### 3.7.3. PROCESO DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN

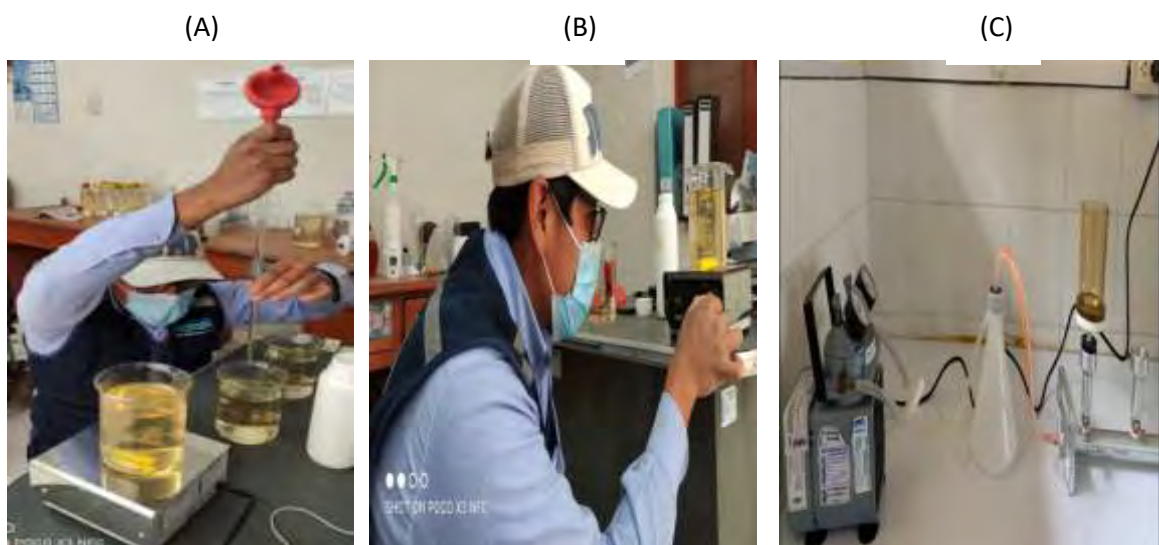
El proceso de coagulación - floculación se realizó sometiendo la muestra a un equipo de agitación magnética que consta de un vaso precipitado de 0.5 L y un agitador magnético marca M5 CAT con regulador de velocidad (10 – 1600 rpm). Se utilizó dos tipos de coagulantes-floculantes a diferentes dosis; sometiendo el sistema a diferentes velocidades de agitación lenta. Los experimentos se realizaron a temperatura ambiente y presión atmosférica de la ciudad de Santo Tomas (102.3 kpa).

La secuencia de pasos seguidos para los experimentos fue la siguiente:

- a) Se midió el color verdadero, turbiedad y pH inicial de la muestra
- b) Se tomó 0.5 L de muestra en un vaso de precipitado y se ubicó sobre el agitador magnético.
- c) Se dosificó coagulante con dosis de 30, 40 y 50 ppm establecidos anteriormente, seguidamente se ajustó la velocidad de agitación rápida 300 rpm durante 1min para la mezcla rápida. (ver Figura 3.10 A)
- d) Se ajustó la velocidad de agitación lenta a 40, 50 y 60 rpm con una duración de 30 min (ver Figura 3.10 B)
- e) Se dejó sedimentar los flocs durante un tiempo de 15 min para medir turbiedad y pH final.
- f) Se filtró la muestra tratada en un equipo de filtración al vacío con usando un filtro de membrana de 45 micras y finalmente se midió el color verdadero (ver Figura 3.10 C)

### Figura 3.10

*Pasos seguidos en las experimentaciones*



Fuente: Elaboración propia

### 3.7.4. PLAN EXPERIMENTAL

Las variables de investigación fueron:

Variable dependiente:

- Remoción de color (%)

Variables independientes:

- Tipo de coagulante
- Dosis de coagulante (ppm)
- Velocidad de agitación lenta (rpm)

La selección de los niveles inferior y superior de las variables independientes: tipo de coagulante y velocidad de agitación lenta se basaron en resultados de investigaciones, como la de Cerón Pérez, (2016) quien evaluó la acción del  $Al_2(SO_4)_3$  tipo B,  $FeCl_3$  y PAC con una agitación de 40 rpm en la clarificación de agua crudas que trata la PTAP Empoobamdo E.S.P. Por su parte Yanza López et al., (2019) estudiaron la acción del  $FeCl_3$  y PAC, con una agitación lenta de 39 rpm en aguas con alto contenido de color y baja turbiedad de la PTAP “Palacé”. Por ultimo Restrepo Osorno, (2009) determinó el coagulante más eficaz entre  $Al_2(SO_4)_3$  tipo B, PAC, poli sulfato de Aluminio (PASS) con una mezcla lenta a gradientes de 120, 100, 80, 60, 40 y 20 rpm en la PTAP que utiliza la Cervecería Unión S.A. Para el caso de la dosis de coagulante se consideró los resultados de las pruebas pre- experimentales (ver Figura 3.9).

Las variables independientes y sus niveles de estudio se muestran en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5**

*Variables independientes y sus niveles de estudio*

<b>Variables independientes</b>	<b>Inferior</b>	<b>Neutro</b>	<b>Superior</b>	<b>Niveles</b>
• Tipo de coagulante	PAC	PAC/FeCl <sub>3</sub>	FeCl <sub>3</sub>	3
• Dosis de coagulante (ppm)	30	40	50	3
• Agitación lenta (rpm)	40	50	60	3

Fuente: Elaboración propia

Para el desarrollo de los experimentos se planteó un diseño experimental factorial completo:

$$N=3^k$$

Donde:

- N: Número de ensayos
- K: Número de factores
- 3: Niveles

Por tanto, el número de ensayos:

$$N = 3^3 = 27 \text{ ensayos}$$

Con la finalidad de calcular el error experimental entre las medidas cada uno de estos ensayos fue realizado por triplicado, resultando en total 81 ensayos (ANEXO B). La Tabla 3.6 muestra el plan experimental que se realizó.

**Tabla 3.6***Plan experimental para la remoción de color*

Ensayo	Variables Independientes						Variable Dependiente
	X <sub>1</sub>		X <sub>2</sub>		X <sub>3</sub>		Y
	Tipo de coagulante		Dosis de coagulante (ppm)		Agitación lenta (rpm)		Remoción de color (%)
1	-1	PAC	-1	30	-1	40	
2	-1	PAC	-1	30	0	50	
3	-1	PAC	-1	30	1	60	
4	-1	PAC	0	40	-1	40	
5	-1	PAC	0	40	0	50	
6	-1	PAC	0	40	1	60	
7	-1	PAC	1	50	-1	40	
8	-1	PAC	1	50	0	50	
9	-1	PAC	1	50	1	60	
10	0	PAC/FeCl <sub>3</sub>	-1	30	-1	40	
11	0	PAC/FeCl <sub>3</sub>	-1	30	0	50	
12	0	PAC/FeCl <sub>3</sub>	-1	30	1	60	
13	0	PAC/FeCl <sub>3</sub>	0	40	-1	40	
14	0	PAC/FeCl <sub>3</sub>	0	40	0	50	
15	0	PAC/FeCl <sub>3</sub>	0	40	1	60	
16	0	PAC/FeCl <sub>3</sub>	1	50	-1	40	
17	0	PAC/FeCl <sub>3</sub>	1	50	0	50	
18	0	PAC/FeCl <sub>3</sub>	1	50	1	60	
19	1	FeCl <sub>3</sub>	-1	30	-1	40	
20	1	FeCl <sub>3</sub>	-1	30	0	50	
21	1	FeCl <sub>3</sub>	-1	30	1	60	
22	1	FeCl <sub>3</sub>	0	40	-1	40	
23	1	FeCl <sub>3</sub>	0	40	0	50	
24	1	FeCl <sub>3</sub>	0	40	1	60	
25	1	FeCl <sub>3</sub>	1	50	-1	40	
26	1	FeCl <sub>3</sub>	1	50	0	50	
27	1	FeCl <sub>3</sub>	1	50	1	60	

Nota: los valores de -1, 0, 1 representan los niveles inferior, neutro y superior de las variables independientes

El tratamiento estadístico de los resultados fue desarrollado en el software STATGRAPHICS Centurión 18 y el software Rstudio.

Se determinó el efecto de cada variable independiente sobre la variable dependiente, mediante la prueba ANOVA 1. Evaluando la significancia de los términos del modelo matemático. Se comparó la varianza explicada ( $V_{reg}$ ) por el modelo con la varianza residual ( $V_{res}$ ) a través de las siguientes hipótesis:

$$H_0: V_{reg} \leq V_{res} , p > \alpha$$

$$H_a: V_{reg} > V_{res} , p \leq \alpha$$

De estas dos hipótesis se desea que la varianza explicada por el modelo sea mayor a la varianza no explicada o residual; de este modo aceptar la hipótesis alternativa ( $H_a$ ), así como tener un valor  $p \leq \alpha$  para cada término del modelo.

Puesto que se tiene un variable cualitativa (Tipo de coagulante), es necesario plantear los niveles de dicha variable en forma de variables dummy o variables indicadoras (ANEXO C) para poder incluirlas en el modelo que se plantea para explicar el % remoción de color. Dicho esto, se tomó como nivel de referencia el tipo de coagulante  $FeCl_3$  y se planteó inicialmente el modelo matemático de la ecuación (3.1) para explicar la remoción de color.

$$\begin{aligned} \text{Remoción de color (\%)} = & \beta_0 + \beta_1 \text{ Dosis} + \beta_2 \text{ Agitación lenta} + \\ & \beta_3 \text{ PAC} + \beta_3 \text{ PAC/FeCl}_3 \end{aligned} \quad (3.1)$$

Donde las variables dummy PAC y PAC/  $FeCl_3$  se definieron de la siguiente manera:

$$PAC_i \begin{cases} 1 & \text{si la observación } i \text{ pertenece al tipo de coagulante PAC} \\ 0 & \text{si la observación } i \text{ no pertenece a la sede PAC} \end{cases}$$



$$\text{FeCl}_3_i \begin{cases} 1 & \text{si la observación } i \text{ pertenece al tipo de coagulante FeCl}_3 \\ 0 & \text{si la observación } i \text{ no pertenece al tipo de coagulante FeCl}_3 \end{cases}$$

Finalmente se estableció un compromiso entre un valor de  $R^2$  y modelo matemático que relacione las variables en estudio de manera concisa, explicando el % de remoción de color de la mejor manera para cada tipo de coagulante utilizado.

### **3.8. PARÁMETROS DE TIPO DE COAGULANTE, DOSIS DE COAGULANTE Y AGITACIÓN LENTA**

De los resultados obtenidos en el análisis estadístico se determinaron los parámetros: tipo de coagulante, la dosis de coagulante y agitación lenta que lograron la mayor remoción de color (%).

Con estos parámetros se realizó la validación de los resultados en una muestra problema determinando sus características de color, pH y turbiedad para comprobar que cumpla con la norma de calidad de agua potable vigente después del tratamiento de coagulación floculación.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LA PTAP MISKIUNU

##### 4.1.1. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE CAPTACIÓN Y CONDUCCIÓN

Se identificó las condiciones de operación de la captación y conducción comparándolas a lo establecido en la Normas OS.10 para lo cual inicialmente se calculó el caudal domestico mediante la ecuación (4.1).

$$Q_{domestico} = Población * dotación. \quad (4.1)$$

De acuerdo con el padrón registrado en la empresa EMPSSAPAL S.A actualmente se tiene una población de 4500 habitantes, para la cual corresponde una dotación de agua de 120 L/hab/día en un clima frio (Ver Tabla 4.1).

**Tabla 4.1**

*Dotación por número de habitantes*

Población (hab)	Dotación (L/hab/día)	
	Clima	
	Frio	Templado y Cálido
2000 – 10000	120	9
10000 – 50000	150	200
50000 a mas	200	250

Nota: Tomado del Reglamento Nacional de Edificaciones por el (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2006).

Entonces el caudal domestico será

$$Q_{domestico} = 4500 * 120 = 540000 \frac{L}{dia}$$

Teniendo el caudal domestico diario se procedió al cálculo del caudal máximo diario por medio de la ecuación (4.2) lo que será el caudal de diseño.

$$Q_{diseño} = K_1 * Q_{domestico} \quad (4.2)$$

Donde:

$K_1$ : coeficiente de caudal máximo diario y es igual a 1.3 (Norma OS. 020, 2006).

$$Q_{diseño} = 1.3 * 540000 = 702000 \frac{L}{dia} * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{1dia}{86400 s} = 0.008125 \frac{m^3}{s} \sim 29.25 \frac{m^3}{h}$$

La Tabla 4.2 muestra la evaluación de la fuente, captación y conducción de la PTAP Miskiunu.

**Tabla 4.2**

*Evaluación de la fuente, captación y conducción de la PTAP Miskiunu*

<b>CAPTACIÓN Y CONDUCCIÓN DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO</b>			
	<b>NORMA OS.10</b>	<b>PTAP MISKIUNU</b>	<b>CONFORMIDAD / NO CONFORMIDAD</b>
Fuente	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Asegurar el caudal máximo diario para el periodo de diseño.</li> <li>▪ El caudal de diseño a la fecha es de 8.125 L/s.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El caudal promedio aforado para el año 2020 es de 4.28 L/s según monitoreo realizado (ANEXO D).</li> </ul>	<b>x</b>
Captación	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Para aguas superficiales las tomas que se ubiquen en el curso de agua no deberán modificar el flujo normal de la fuente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La toma de agua es superficial con una estructura tipo tirolesa, recomendado para caudales pequeños que no genera cambios en el flujo normal del agua.</li> </ul>	✓
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aguas superficiales: La toma debe disponer de los elementos necesarios para impedir el paso de sólidos y facilitar su remoción.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La captación cuenta con una rejilla de barras de hierro corrugado separadas 5 cm entre sí que impide el ingreso de piedras y materiales de mayor tamaño. Esta rejilla se encuentra ubicada en dirección a la corriente lo que facilita su limpieza.</li> </ul>	✓
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La toma deberá ubicarse de tal manera que las variaciones de nivel no alteren el funcionamiento normal de la captación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Captación cuenta con un barraje o presa que aumenta el nivel de agua en el río para garantizar el ingreso de agua en la toma. También se cuenta con los muros de encausamiento para dirigir el agua hacia el barraje y se garantice la toma de agua.</li> </ul>	✓
Conducción	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Para el diseño de la conducción con tuberías se tendrá en cuenta las condiciones topográficas de la zona</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La línea de conducción es de tubería de PVC de 3" de diámetro, contando con 10 cámaras rompe presión. (EMPSSAPAL S.A, 2016)</li> </ul>	✓
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Conducción por gravedad en tuberías de PVC: la velocidad máxima de flujo será 5 m/s.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La velocidad de flujo es en promedio 3m/s.(EMPSSAPAL S.A, 2016)</li> </ul>	✓

Nota: Datos adaptados de la Norma OS. 010, (2006) y de la Ficha de evaluación de la Captación y Boca toma de la PTAP Miskiunu (ANEXO E).

Como se aprecia en la Tabla 4.2 la fuente de agua (riachuelo Miskiunu) tiene un caudal máximo promedio diario de 4.28 L/s, que no satisface la demanda actual del agua de 8.125 L/s para la población actual de 4500 habitantes. La omisión a la (Norma OS. 010, 2006) se debe a que probablemente no se consideró las variaciones de caudal al momento de construir la PTAP, y tampoco se hizo una proyección de la tasa de crecimiento poblacional.

La captación cuenta con una toma tipo tirolesa que al igual que Jáuregui (2019) en su trabajo de diseño de una captación o boca toma tipo tirolesa se adapta bien para caudales pequeños ya que mantienen el funcionamiento de la toma todo el año de forma constante.

Siendo la línea de conducción de la PTAP Miskiunu por gravedad, esta cuenta en su recorrido con 10 cámaras rompe presión para regular la velocidad de flujo alrededor de 3 m/s y de esta manera evitar sobrepresión y posibles roturas en las tuberías de PVC.

#### **4.1.2. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE TRATAMIENTO DE AGUA**

Se evaluó las condiciones de tratamiento de agua, identificando las conformidades y no conformidades respecto a lo establecido en la Norma OS.20. La Tabla 4.3 muestra la evaluación del sistema de tratamiento de agua de la PTAP Miskiunu.

**Tabla 4.3**

*Evaluación del sistema de tratamiento de la PTAP Miskiunu*

<b>PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO</b>			
	<b>NORMA OS.20</b>	<b>PTAP MISKIUNU</b>	<b>CONFORMIDAD / NO CONFORMIDAD</b>
<b>Ubicación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La planta debe estar ubicada en un lugar de fácil acceso en cualquier época del año.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se ubica al costado de la carretera Santo tomas – Chamaca.</li> </ul>	✓
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Debe estar ubicada en zonas no inundables, por encima del nivel de máxima creciente del curso del agua.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se ubica en una ladera del sector de Qenqo muy lejos de ríos o riachuelos que pueden generar inundaciones.</li> </ul>	✓
<b>Área</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El área del terreno debe ser suficiente para la construcción de las etapas de tratamiento y para ampliaciones futuras.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuenta con un área total de 655m<sup>2</sup> teniendo un área construida aproximada de 250 m<sup>2</sup>.</li> </ul>	✓
<b>Sedimentador</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Debe considerarse 02 unidades como mínimo en paralelo para el funcionamiento continuo, las unidades deben de tener forma rectangular</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se cuenta con 02 unidades en paralelo que funcionan de forma alternada, estas unidades tienen una forma geométrica rectangular</li> </ul>	✓
	<ul style="list-style-type: none"> <li>La estructura de entrada debe estar conformada por un vertedero a todo lo ancho de la unidad, seguido de una cortina perforada que proporciona una distribución uniforme del flujo en toda la sección.</li> <li>La distancia entre el vertedero y la cortina debe ser no menor de 0.80 m.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuenta con una zona de recepción de agua que está compuesta por un canal vertedero y una cortina metálica perforada que distribuye el caudal de forma uniforme en toda la sección</li> <li>La distancia entre el canal vertedero y la cortina metálica es de 0.80m.</li> </ul>	✓
	<ul style="list-style-type: none"> <li>La estructura de recolección de agua sedimentada debe tener bordes lisos o dentados y una canaleta para ampliar su recolección de agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuenta con una zona de recolección de agua sedimentada que tiene un vertedero de bordes lisos y una canaleta de recolección de agua en todo lo ancho del sedimentador.</li> </ul>	✓
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zona de sedimentación: La longitud del tanque deberá ser de 2 a 5 veces su ancho en el caso de sedimentadores de flujo horizontal La profundidad de los tanques debe variar de 1.5 a 3.0 m.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La zona de sedimentación tiene un ancho de 1,0 m y 3,40 m de largo y la profundidad es de 1.70 m.</li> </ul>	✓
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se deberá considerar en el diseño, el volumen de lodos producido, pudiéndose remover éstos por medios manuales, mecánicos o hidráulicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La zona de sedimentación de lodos tiene una pendiente de 60° de la base más profunda hacia la zona de recolección de agua sedimentada, esto favorece a la remoción de lodos de forma hidráulica y manual (con ayuda de escobas).</li> </ul>	✓
	<ul style="list-style-type: none"> <li>El fondo del tanque debe tener una pendiente no menor de 3% hacia la válvula de descarga de lodos</li> <li>La válvula de accionamiento de las descargas de lodo debe ser mínimo de 4 pulg de diámetro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El fondo de la unidad tiene una pendiente de 5 % para asegurar el arrastre de lodos y sean evacuados.</li> <li>La válvula de descarga de lodo tiene un diámetro de 4".</li> </ul>	✓

	<ul style="list-style-type: none"> <li>La turbiedad máxima del efluente a la salida del sedimentador debe ser entre 20 y 50 UNT.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La turbiedad de agua sedimentada oscila entre 0.5 y 10 UNT a lo largo del año.(EMPSSAPAL S.A, 2016)</li> </ul>	✓
<b>Pre- filtros de flujo horizontal</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diseñar como mínimo 2 unidades en paralelo con 3 compartimentos cada uno.</li> <li>La longitud del pre-filtro puede variar entre 5 y 10 m.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuenta con 02 unidades que funcionan de forma alterna cada unidad tiene 03 compartimentos.</li> <li>Tiene una longitud de 5.9m</li> </ul>	✓
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deberá considerar como mínimo tres compartimentos con un diámetro de material de 1 a 4 cm y varia de mayor a menor tamaño en el sentido del flujo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cada pre-filtro cuenta con 3 compartimentos que varían en tamaño de material filtrante según sentido del flujo. Primer compartimento material filtrante de 3 – 4 cm. Segundo compartimento material filtrante de 2 – 3 cm. Tercer compartimento material filtrante de 1 – 2 cm.</li> </ul>	✓
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Debe de considerar un sistema de lavado hidráulico en cada compartimento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cada compartimento cuenta con una canaleta de colección de lodos con una pendiente de 2% en dirección a la válvula de descarga. El lavado de los pre-filtros se realiza con agua a presión eliminando los lodos.</li> </ul>	✓
<b>Filtro lento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La turbiedad del agua pre filtrada del afluente deberá ser inferior a 50 UNT</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El agua pre filtrada tiene una turbiedad que oscila entre 0.5 y 9 UNT a lo largo del año.</li> </ul>	✓
	<ul style="list-style-type: none"> <li>El valor máximo del color al ingreso al filtro lento deber ser de 30 UPC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La presencia de color oscila entre 20 y 150 UPC en los meses de lluvias ( (Borda Choque, 2020).</li> </ul>	✗
	<ul style="list-style-type: none"> <li>El espesor de la arena deberá ser de 80 a 100 cm y el tamaño efectivo de la arena debe estar entre 0.2 a 0.3 mm, y el coeficiente de uniformidad no mayor de 3.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El espesor de la arena del lecho filtrante es de 100 cm con un tamaño efectivo de la arena de 0.2 a 0.3 mm y coeficiente de uniformidad de 3</li> </ul>	✓
	<ul style="list-style-type: none"> <li>La grava se colocará en tres capas, la primera de 15 cm, con tamaños de 19 a 50 mm, seguida de dos capas de 5 cm de espesor cada una, con tamaños de 9.5 mm a 19 mm y de 3 mm a 9.5 mm, respectivamente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La grava de soporte tiene tres capas son la siguientes: Primera capa de 15 cm con tamaños de 19 a 50 mm. Segunda capa de 5 cm con tamaños de 9,5 a 19 mm. Tercera capa de 5 cm con tamaños de 3 a 9,5 mm.</li> </ul>	✓
<b>Sistema de desinfección</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>De preferencia se utilizarán dosificadores en solución por gravedad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se tiene un sistema de dosificación por goteo en solución y por gravedad.</li> </ul>	✓
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se debe considerar como mínimo 2 tanques de solución interconectados para no interrumpir la dosificación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuenta con 01 tanque de una capacidad de 600 L.</li> </ul>	✗

Nota: Datos adaptados de la Norma OS. 020, (2006) y de la ficha de Evaluación del sistema de tratamiento de agua potable de la PTAP Miskiunu (ANEXO F).

Como se aprecia en la Tabla 4.3 la PTAP el color de agua no se elimina con el tratamiento actual de la PTAP Miskiunu. En efecto la evaluación hecha en el filtro lento (última etapa de tratamiento previa a la desinfección) contiene valores de color que excede 5 veces el valor máximo establecido (Norma OS. 020, 2006). Tal omisión al momento de diseñar y construir la planta demuestra su incapacidad para remover el color.

Por otro lado, la PTAP Miskiunu cuenta con un sistema de dosificación básico que tiene un solo tanque de desinfectante lo que genera interrupción en la dosificación cuando se prepara el desinfectante.

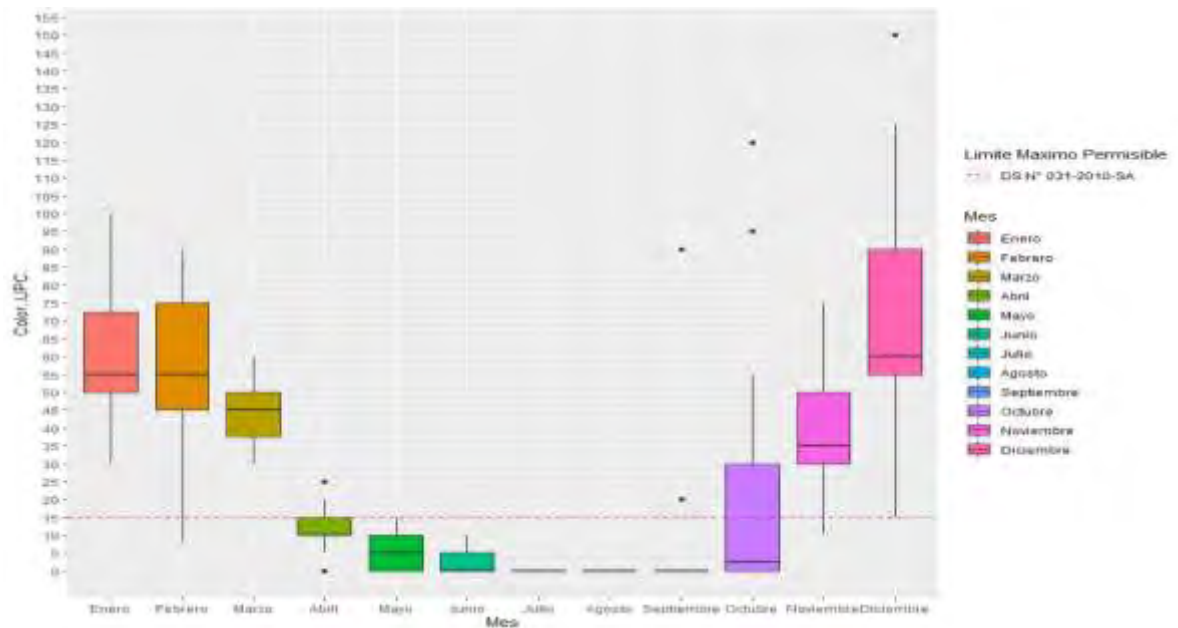
La Figura 4.1 presenta un diagrama de caja y bigotes del monitoreo de color que se realizó durante todo el año 2020 a la salida del filtro lento, mostrando que el agua presenta un problema de alto contenido de color en los meses con presencia de lluvia (octubre a marzo) que supera de manera exorbitante el LMP. De esta manera se observa mayor variabilidad de color para los meses con lluvia, que se traducen por cajas de mayor tamaño en comparación con los meses de estiaje que presentan cajas de tamaño reducido. Además, se observan mediciones de color atípicas respecto a la variabilidad de datos medidos, identificados como puntos negros que representan valores de color extremadamente grandes probablemente en días de lluvia intensa en la zona.

Por lo que pese a cumplir con las características de diseño y operar de manera correcta, la presencia de color no se elimina en el tratamiento actual de la PTAP Miskiunu.



**Figura 4.1**

*Monitoreo de color para el año 2020 a la salida del filtro lento*



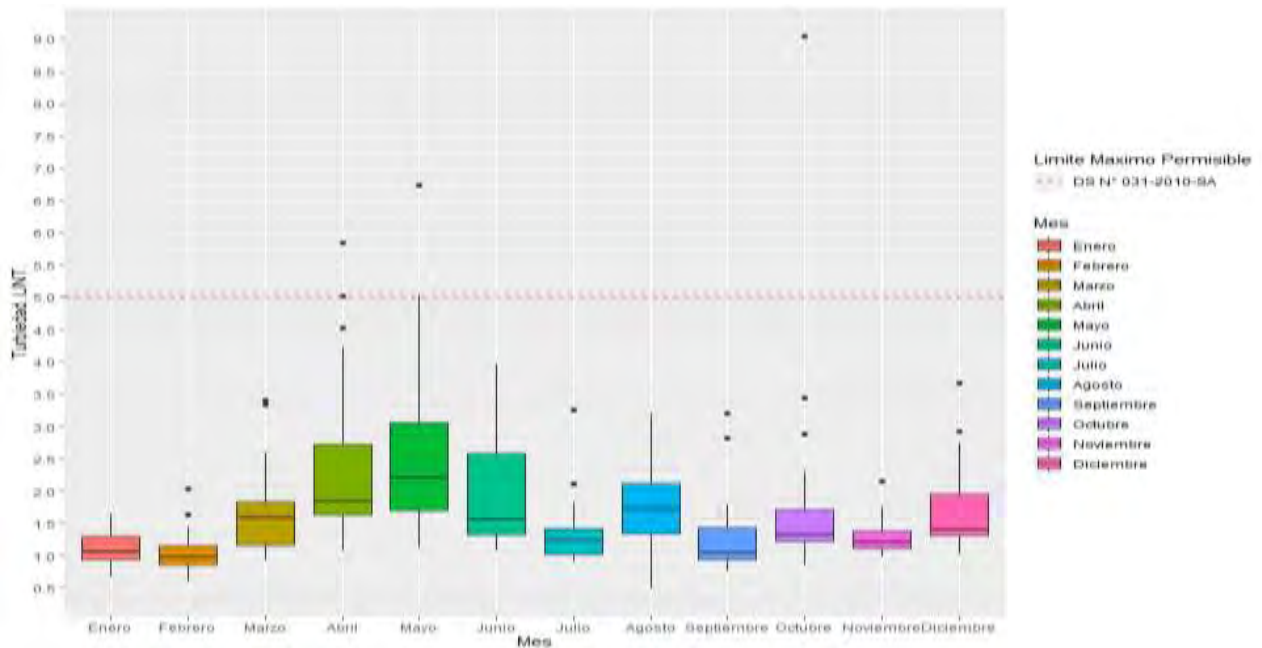
Nota: Adaptado de “Monitoreo del Sistema de Tratamiento de la PTAP Miskiunu”, (Borda Choque, 2020)

Por otro lado, la Figura 4.2 la muestra el diagrama de caja y bigotes del monitoreo de turbiedad del año 2020 a la salida del filtro lento, Se observa que la turbiedad no incrementa como el color en meses de lluvia (octubre a marzo), y presenta cajas con variabilidad reducida a lo largo del todo el año que no superan el LMP de 5 UTN. De otro lado se evidencia mediciones de turbiedad atípicas presentadas por los puntos negros que se son valores de turbiedad grandes respecto a la variabilidad de datos medidos que se deben a casos particulares de mayor presencia de solidos suspendidos en el agua.

Por lo que el sistema de tratamiento logra remover la turbiedad hasta valores inferiores al LMP y no presenta inconvenientes a lo largo del año en su operación.

**Figura 4.2**

*Monitoreo de turbiedad para el año 2020 a la salida del filtro lento*



Nota: Adaptado de “Monitoreo del Sistema de Tratamiento de la PTAP Miskiunu”, Borda Choque, (2020)

Esto demuestra que la planta ha sido diseñada para remover la turbiedad y no se consideró el problema del color que ocurre entre los meses de octubre – marzo. Dicho esto, con el fin de dar solución a tan grande omisión al momento de hacer el proyecto de construcción de la PTAP Miskiunu, según sugiere la Norma OS.20 respecto a los tipos de tratamiento según criterios de diseño, para las condiciones de la PTAP Miskiunu se estableció el proceso de coagulación – floculación como alternativa para remover el color del agua mediante un tratamiento Tipo II-B (Tabla 4.4). Siendo el proceso de coagulación floculación parte de los criterios básicos de diseño para el desarrollo de proyectos de plantas de tratamiento a nivel nacional.

**Tabla 4.4***Tipo de tratamiento del agua potable según criterios de diseño*

<b>Tipo de tratamiento</b>	<b>Etapas de tratamiento</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Captación</b>
Tipo I	Desinfección	Turbiedad < 5 NTU Color < 15 PCU	Subterránea o superficiales provenientes de cuencas
Tipo II - A	Desinfección, decantación y filtración	Turbiedad < 40 NTU Color <40 PCU	Subterránea o superficiales provenientes de cuencas
Tipo II - B	Coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección	Turbiedad >40 NTU Color >40 PCU)	Subterránea o superficiales provenientes de cuencas

Nota: Adaptado de la Norma OS. 020, (2006).

#### 4.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA MUESTRA

La Tabla 4.5 muestra los resultados de la caracterización fisicoquímica de la muestra, donde el color promedio excede 5.7 veces al valor máximo permisible de color en el agua de 15 UPC establecido por Ministerio de Salud, (2011). Con respecto a la turbiedad, se tiene un promedio de 1.32 UNT encontrándose por debajo del valor reportado por Yanza López et al., (2019) quienes obtuvieron un promedio de 6.5 UNT. Esta baja turbiedad se da porque en las captaciones de agua hay abundante vegetación que impiden el arrastre de materia que pueda aumentar la turbidez. En adición, el pH promedio encontrado es de 7.54; del mismo modo Cerón Pérez, (2016) y Pacheco Ancco & Zapana Mamani, (2018) reportan valores de pH entre 6.5-8 para aguas provenientes de captaciones superficiales.

La muestra más representativa en color de reporto un valor de 14.20 mg/L de materia orgánica total en el agua lo que probablemente sería la causa de la presencia de color. Para Yanza López et al., (2019) la razón del alto contenido de color en el agua se debe a la presencia de sustancias húmicas y materia orgánica disuelta. Esto se afirma con la abundante existencia

de vicuñas silvestres en los alrededores de la captación y también por la abundante vegetación (paja andina hichu) quienes serían los encargados de generar un suelo con abundante humus y materia orgánica biodegradable.

Por otro lado, el análisis de corrida de metales en el agua (ANEXO G) indica que la concentración de metales y/o minerales que pueden generar color son muy bajos del mismo modo una baja conductividad eléctrica del agua re afirmarían que el color del agua se debe a la presencia de materia orgánica disuelta y no de metales.

**Tabla 4.5**

*Caracterización fisicoquímica de las muestras*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>LMP</b>	<b>Unidad</b>
Color	85.67 +/- 20.21	15	UPC
Turbiedad	1.32 +/- 0.50	5	UNT
pH	7.54 +/- 0.12	6.5 – 8.5	-
Sólidos totales disueltos	91.80	1000	mg/L
Alcalinidad	35.50	-	mg/L HCO <sub>3</sub>
Materia orgánica	14.20	-	mg/L

Fuente: Adaptado del Certificado de análisis físico – químico de la muestra con color previa al proceso de coagulación – floculación (ANEXO H)

### **4.3. PROCESO DE COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN**

#### **4.3.1. CALIDAD DEL FLOC**










En la Tabla 4.6 se observa el proceso de coagulación floculación que mayor porcentaje de remoción de color obtuvo para cada coagulante. Para los tres casos se observa que en la etapa de coagulación no hay cambios con respecto a la formación de flocs esto debido a la baja turbiedad de las muestras por lo que se da una coagulación por barrido donde la formación de flocs será de forma lenta.

Para el caso de la floculación se tomó como referencia lo descrito por la Water Research Institute, 2000) para comparar y estimar el tamaño de floculo. Se observó que usando PAC la formación de flocs dio un tamaño de 0.75-1.0 mm, la mezcla binaria dio un floculo resultante con un tamaño de 0.5-0.75 mm y el  $\text{FeCl}_3$  dio un floculo con un tamaño 1.0-1.5 mm teniendo un mejor tamaño de floculo en comparación de los demás.

Del mismo modo en la etapa de sedimentación se evaluó la calidad de los flocs mediante el “índice de Willcomb” para cada tipo de coagulante. Se observó que para el caso del PAC se obtiene flocs bien formados y distribuidos uniformemente lo que correspondió a un índice de 4; para el caso de la mezcla PAC/ $\text{FeCl}_3$  se obtiene flocs relativamente grandes pero que precipitan con lentitud lo que correspondió a un índice de 6 y por último para  $\text{FeCl}_3$  se obtuvo flocs de buen tamaño que deposita de forma rápida, pero no completamente lo que correspondió a un índice de 8. Por lo tanto, se observó con mayor claridad la formación de flocs usando  $\text{FeCl}_3$  en comparación del PAC y la mezcla binaria.

**Tabla 4.6**

*Formación de flocs para cada coagulante*

	<b>Proceso</b>		
	<b>Coagulación</b>	<b>Floculación</b>	<b>Sedimentación</b>
<b>PAC</b>			
<b>PAC/FeCl<sub>3</sub></b>			
<b>FeCl<sub>3</sub></b>			

Fuente: Elaboración propia

### 4.3.2. ANÁLISIS DE DISEÑO EXPERIMENTAL

La Tabla 4.7 muestra los ensayos realizados con los resultados de remoción de color (%) a diferentes condiciones. Cada experimento se realizó por triplicado como se detalla en el (ANEXO B).

**Tabla 4.7**

*Resultados del diseño experimental*

Ensayo	Variables Independientes						Variable Dependiente
	X <sub>1</sub>		X <sub>2</sub>		X <sub>3</sub>		Y
	Tipo de coagulante		Dosis de coagulante (ppm)		Agitación lenta (rpm)		Remoción de color (%)
1	-1	PAC	-1	30	-1	40	70.00
2	-1	PAC	-1	30	0	50	72.00
3	-1	PAC	-1	30	1	60	75.00
4	-1	PAC	0	40	-1	40	88.00
5	-1	PAC	0	40	0	50	90.00
6	-1	PAC	0	40	1	60	86.00
7	-1	PAC	1	50	-1	40	85.00
8	-1	PAC	1	50	0	50	84.00
9	-1	PAC	1	50	1	60	82.00
10	0	PAC/FeCl <sub>3</sub>	-1	30	-1	40	40.00
11	0	PAC/FeCl <sub>3</sub>	-1	30	0	50	41.00
12	0	PAC/FeCl <sub>3</sub>	-1	30	1	60	43.00
13	0	PAC/FeCl <sub>3</sub>	0	40	-1	40	55.00
14	0	PAC/FeCl <sub>3</sub>	0	40	0	50	57.00
15	0	PAC/FeCl <sub>3</sub>	0	40	1	60	53.00
16	0	PAC/FeCl <sub>3</sub>	1	50	-1	40	51.00
17	0	PAC/FeCl <sub>3</sub>	1	50	0	50	47.00
18	0	PAC/FeCl <sub>3</sub>	1	50	1	60	45.00
19	1	FeCl <sub>3</sub>	-1	30	-1	40	48.00
20	1	FeCl <sub>3</sub>	-1	30	0	50	50.00
21	1	FeCl <sub>3</sub>	-1	30	1	60	45.00
22	1	FeCl <sub>3</sub>	0	40	-1	40	63.00
23	1	FeCl <sub>3</sub>	0	40	0	50	65.00
24	1	FeCl <sub>3</sub>	0	40	1	60	60.00
25	1	FeCl <sub>3</sub>	1	50	-1	40	58.00
26	1	FeCl <sub>3</sub>	1	50	0	50	55.00
27	1	FeCl <sub>3</sub>	1	50	1	60	52.00

Nota: los valores de -1, 0, 1 representan los niveles inferior, neutro y superior de las variables independientes.

En la Tabla 4.7 se observan tres escenarios sobresalientes

Primero, el PAC obtuvo un mayor porcentaje de remoción de color del 70% al 90%, seguido por el  $\text{FeCl}_3$  con un porcentaje de remoción del 48% al 65% y por último la mezcla binaria de PAC/ $\text{FeCl}_3$  obtiene un porcentaje de remoción del 40% al 57%. Dichos resultados muestran una mejor performance del PAC para remover el color, coincidiendo con el trabajo de Cerón Pérez, (2016) que estudió la influencia de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{FeCl}_3$  y PAC, mostrando que la acción del PAC remueve el 92% de color.

Segundo, con una dosis de 40 ppm se obtuvo mayores valores de remoción que a 30 y 50 ppm, por lo que dosis por debajo de 30 ppm no garantizan la neutralización completa de los coloides y la formación del floc. Así mismo, una dosis por encima de 50 ppm genera el reestabilización de coloides impidiendo la formación de flocs.

Tercero, nótese que para obtener mayores % de remoción de color; el cambio de la agitación lenta de 40 rpm a 60 rpm varía inversamente proporcional con el cambio de dosis de 30 a 50 ppm. Lo que sugiere una sinergia entre estas dos variables.

#### **4.3.3. EFECTO DEL TIPO DE COAGULANTE, DOSIS DE COAGULANTE Y VELOCIDAD DE AGITACIÓN LENTA**

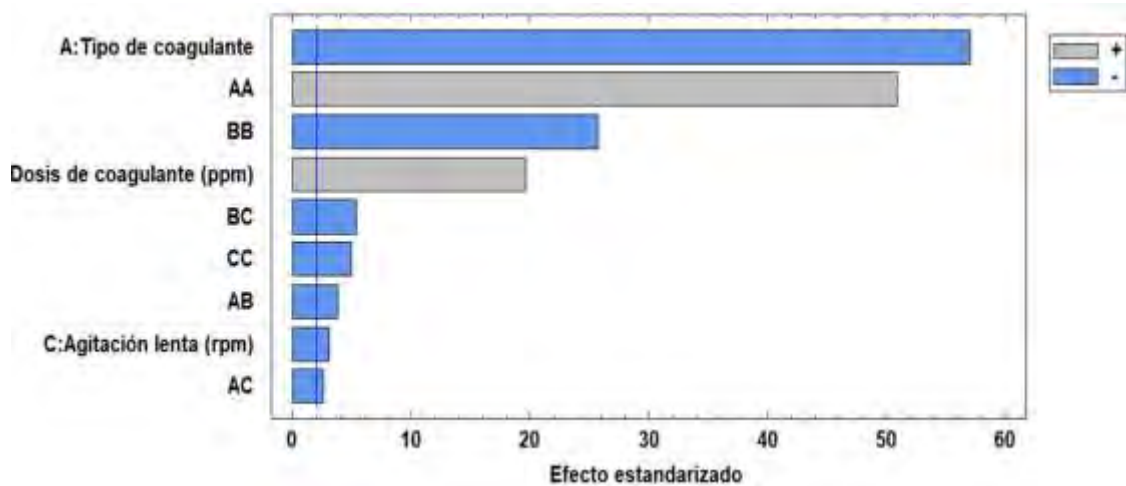
La Figura 4.3 muestra el efecto de las variables independientes y sus interacciones que intervienen en la remoción de color en orden de prioridad. El tipo de coagulante según se observa es el factor más importante, seguido de la dosis de coagulante, sin embargo, la velocidad de agitación lenta parece tener poco efecto en la variable dependiente. En adición se observa que solo el término AA y la dosis de coagulante



presentan un efecto positivo; mientras que el resto de los términos tienen un efecto negativo para explicar la remoción de color (%).

**Figura 4.3**

*Diagrama de Pareto para remoción de color (%).*



Fuente: Elaboración propia

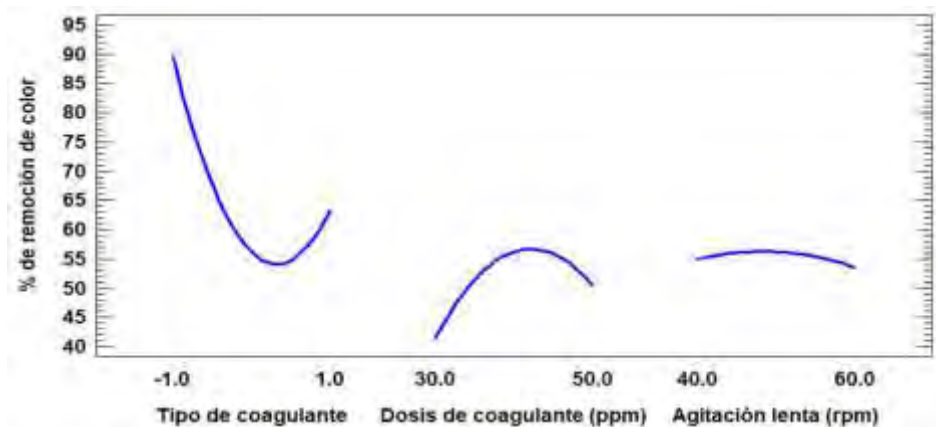
Del mismo modo la Figura 4.4 muestra que para la variable tipo de coagulante, cuando se emplea PAC (-1.0) se alcanza un 90% remoción de color, cuando se emplea la mezcla binaria PAC/FeCl<sub>3</sub> (0.0) se logra remover el 54% del color y cuando se emplea FeCl<sub>3</sub> (1.0) se obtiene una remoción de color que alcanza el 63 %. Para la variable dosis de coagulante se observa que a 30 ppm se obtiene 41%, para 40 ppm se obtiene 57 % y para 50 ppm se obtiene 51% de remoción de color. Así mismo para la variable agitación lenta se tiene que para 40 rpm alcanza 55%, a 50 rpm 56% y para 60 rpm alcanza 53% de remoción de color, no siendo tan representativa para explicar la remoción de color en los niveles planteados, lo que se representa por un rango de apenas 3% de remoción de color desde el nivel inferior al nivel superior de dicha variable.

Por lo que para remover el color del agua la variable tipo de coagulante es la variable que presenta mayor repercusión, seguida de la variable dosis de coagulante.

Por otro lado, la variable agitación lenta no tiene mayor objeto de interés para el estudio ya no tiene gran efecto en la remoción de color.

**Figura 4.4**

*Grafica de efectos principales para remoción de color (%)*



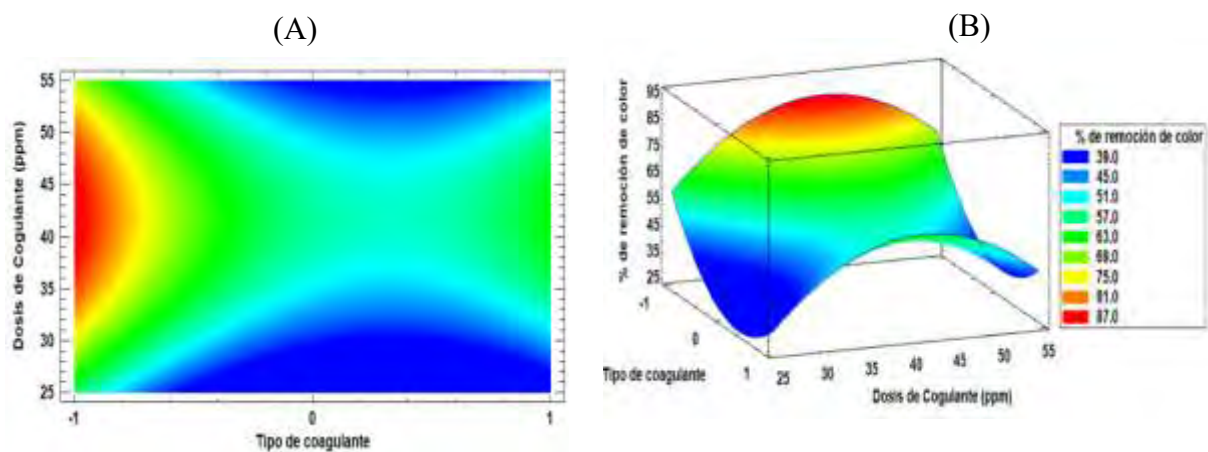
Fuente: Elaboración propia

La Figura 4.5 muestra el gráfico de contorno y la superficie de respuesta del modelo de regresión para la remoción de color (%), manteniendo la velocidad de agitación lenta constante a 50 rpm. Donde colores fríos ascienden hasta colores cálidos representando las zonas de menor hacia mayor remoción de color (%). Como se observa en el gráfico de contorno (Figura 4.5 A) la zona de mayor remoción de color se encuentra en el rango de 35 a 50 ppm utilizando PAC como coagulante, así mismo al descender por debajo de 35 ppm y al ascender por encima de 50 ppm se muestra la zona de menor remoción de color para cualquier tipo de coagulante utilizado, finalmente se observa una zona de remoción intermedia entre 35 a 50 ppm para el  $\text{FeCl}_3$  y la mezcla binaria PAC/ $\text{FeCl}_3$ . Nótese que para un tipo de coagulante a diferentes dosis se presenta una curva cóncava hacia abajo. Lo contrario ocurre cuando se toma una dosis a diferentes tipos de coagulante, donde se observa una curva cóncava hacia arriba (Figura 4.5 B).

Yanza López et al., (2019) obtuvo mejor resultado para la mezcla binaria de PAC/FeCl<sub>3</sub> seguido por el FeCl<sub>3</sub> y por último el PAC con porcentajes de remoción de color de 86.9%, 75.0% y 55.8% respectivamente trabajando a valores iniciales promedios de color y turbiedad de 51.3 UPC y 6.5 NTU, donde la turbidez favorece a la mezcla binaria para remover el color, esto debido a que la coagulación se da por adsorción donde la turbiedad (alta concentración de coloides) absorbe a los productos insolubles generados por los coagulantes para formar el floc. Por otro lado, el presente trabajo obtuvo mejor resultado utilizando el PAC seguido por el FeCl<sub>3</sub> y por último la mezcla binaria PAC/FeCl<sub>3</sub> con porcentajes de remoción de color de 90.0%, 65.0% y 57.0% partiendo a valores iniciales promedios de 86.7 UPC y 1.32 NTU; donde la turbidez es menor y no favorece a la mezcla binaria PAC/FeCl<sub>3</sub> ni al FeCl<sub>3</sub> para remover el color del agua, por lo que la coagulación se da por barrido donde los productos insolubles generados por los coagulantes atrapan a los coloides y forman el floc por sobre saturación mientras estas precipitan barriendo con los coloides presentes en el tramo de precipitación.

#### Figura 4.5

Gráfico de contorno (A) y superficie de respuesta (B) manteniendo constante la agitación lenta a 50 rpm.



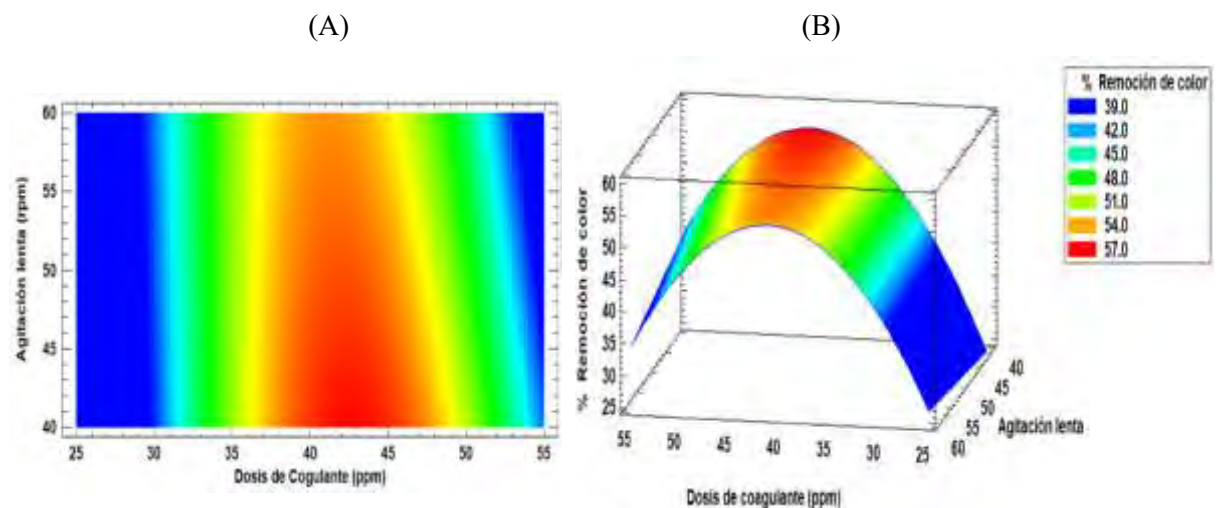
Nota: -1, 0, 1 representan a los coagulantes PAC, mezcla PAC/ FeCl<sub>3</sub> y FeCl<sub>3</sub>.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4.6 muestra el gráfico de contorno y la superficie de respuesta del modelo de regresión para la remoción de color (%), tomando como coagulante floclulante la mezcla binaria. Como se observa la zona de mayor remoción de color se encuentra a un rango de dosis de 40 a 45 ppm y un rango de agitación lenta de 40 a 50 rpm y las zonas fuera de esta área muestran una disminución de la remoción de color (Figura 4.6 A). Del mismo modo a una agitación lenta y diferentes dosis de mezcla binaria se genera una curva cóncava hacia abajo mostrando una inflexión en el punto de mayor remoción de color (Figura 4.6 B). Aguilar Cruz & Yupanqui Cruz, (2018) obtuvo similares resultados en su estudio sobre optimización de la dosis de coagulante en el tratamiento químico del agua de bombeo. Esto sugiere que la dosis de coagulante domina la remoción de color.

#### Figura 4.6

Gráfico de contorno (A) y superficie de respuesta (B) con la mezcla binaria PAC /FeCl<sub>3</sub>

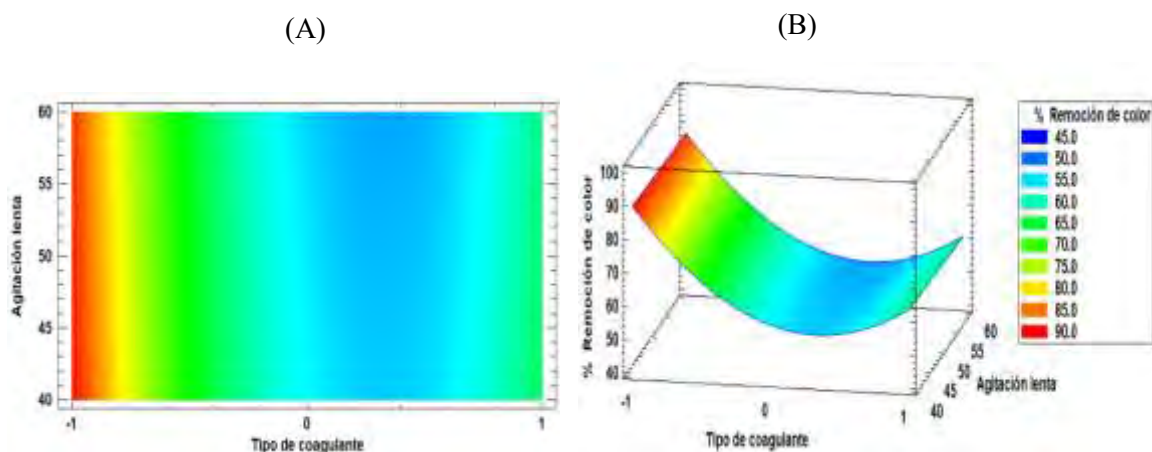


Fuente: Elaboración propia

La Figura 4.7 muestra el gráfico de contorno y superficie de respuesta del modelo de regresión para la remoción de color (%), manteniendo constante la dosis de coagulante a 40 ppm. Se observa la zona de mayor remoción de color se encuentra utilizando PAC como coagulante. Por otro lado, la agitación lenta no tiene efecto significativo en la remoción de color lo que se traduce como un color constante para varios valores de la variable dependiente (Figura 4.7 A). Esto sugiere la alternativa de trabajar con una agitación lenta constante como en los trabajos de Yanza López et al., (2019), Pacheco Ancco & Zapana Mamani, (2018) y Malakootian & Fatehizadeh, (2010) donde trabajaron a valores constantes de 39, 40 y 30 rpm respectivamente. Del mismo modo la (Figura 4.7 B) muestra que a una agitación lenta y diferentes tipos de coagulante se genera una curva cóncava hacia arriba mostrando una inflexión en el punto de menor remoción de color.

#### Figura 4.7

*Gráfico de contorno (A) y superficie de respuesta (B) manteniendo constante la dosis de coagulante a 40 rpm.*



Nota: -1, 0, 1 representan a los coagulantes PAC, mezcla PAC/ FeCl<sub>3</sub> y FeCl<sub>3</sub>.

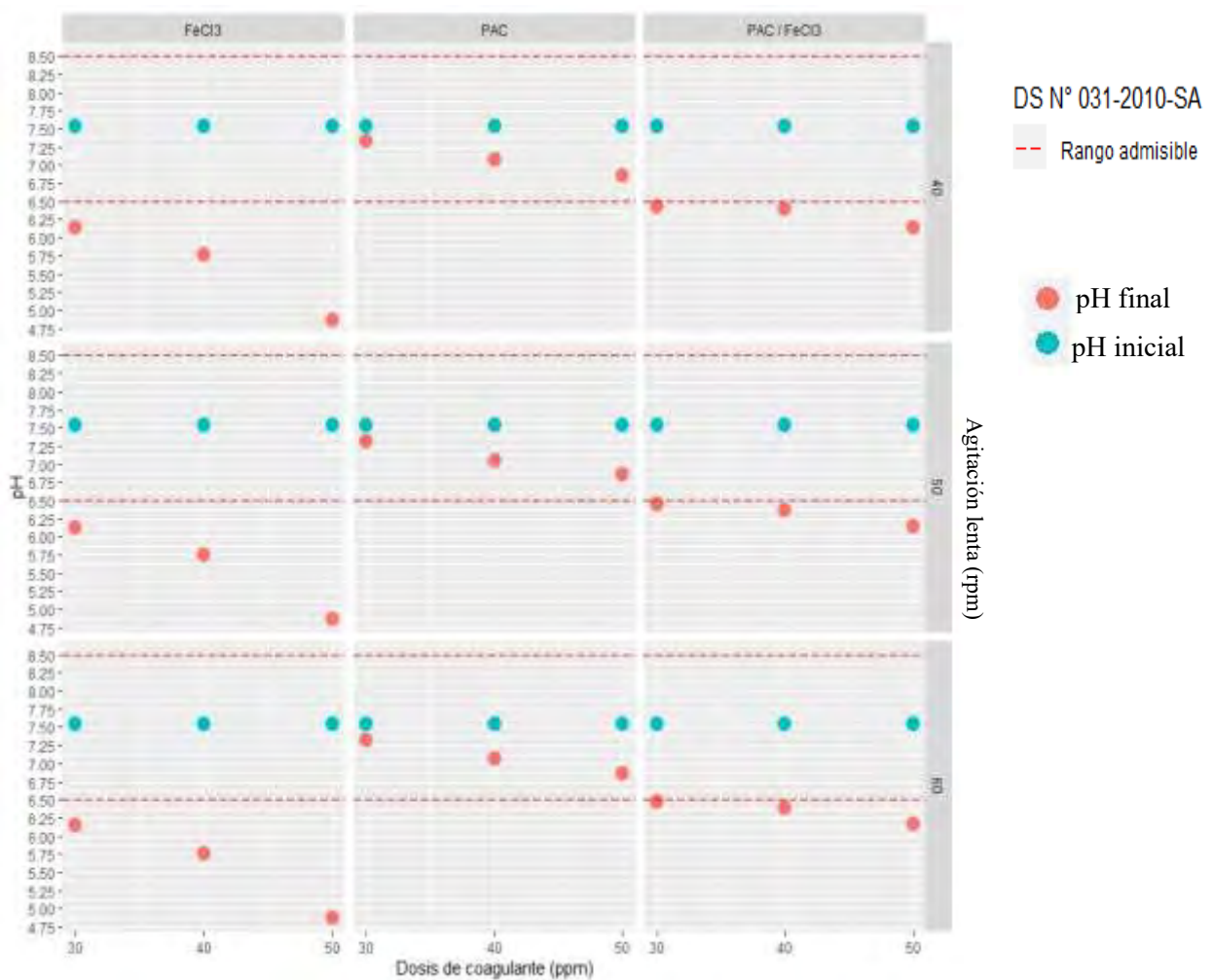
Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.4. COMPORTAMIENTO DEL pH

La Figura 4.8 muestra el comportamiento del pH para las condiciones de diseño experimental planteado y sus réplicas (muestra 1,2 y 3). La disminución del pH en todos los escenarios se explica por la hidrólisis de los coagulantes que forman hidróxidos ( $\text{Al}(\text{OH})_3$  o  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) liberando hidrogeniones ( $\text{H}^+$ ). Por ejemplo, usando  $\text{FeCl}_3$  las experimentaciones dan un pH muy por debajo del mínimo permisible teniendo el menor valor a una dosis de 50ppm. La misma reducción se presenta usando la mezcla binaria estando por debajo del mínimo permisible. Se obtiene mejores valores de pH para el uso del PAC debido a que su disminución es muy baja a consecuencia de los compuestos poliméricos que tiene, los valores finales de pH se encuentran dentro del rango permisible. Para los tres casos se puede observar que la disminución del pH es directamente proporcional con la dosis de coagulante

**Figura 4.8**

*Comportamiento del pH en el proceso experimental*



Fuente: Elaboración propia

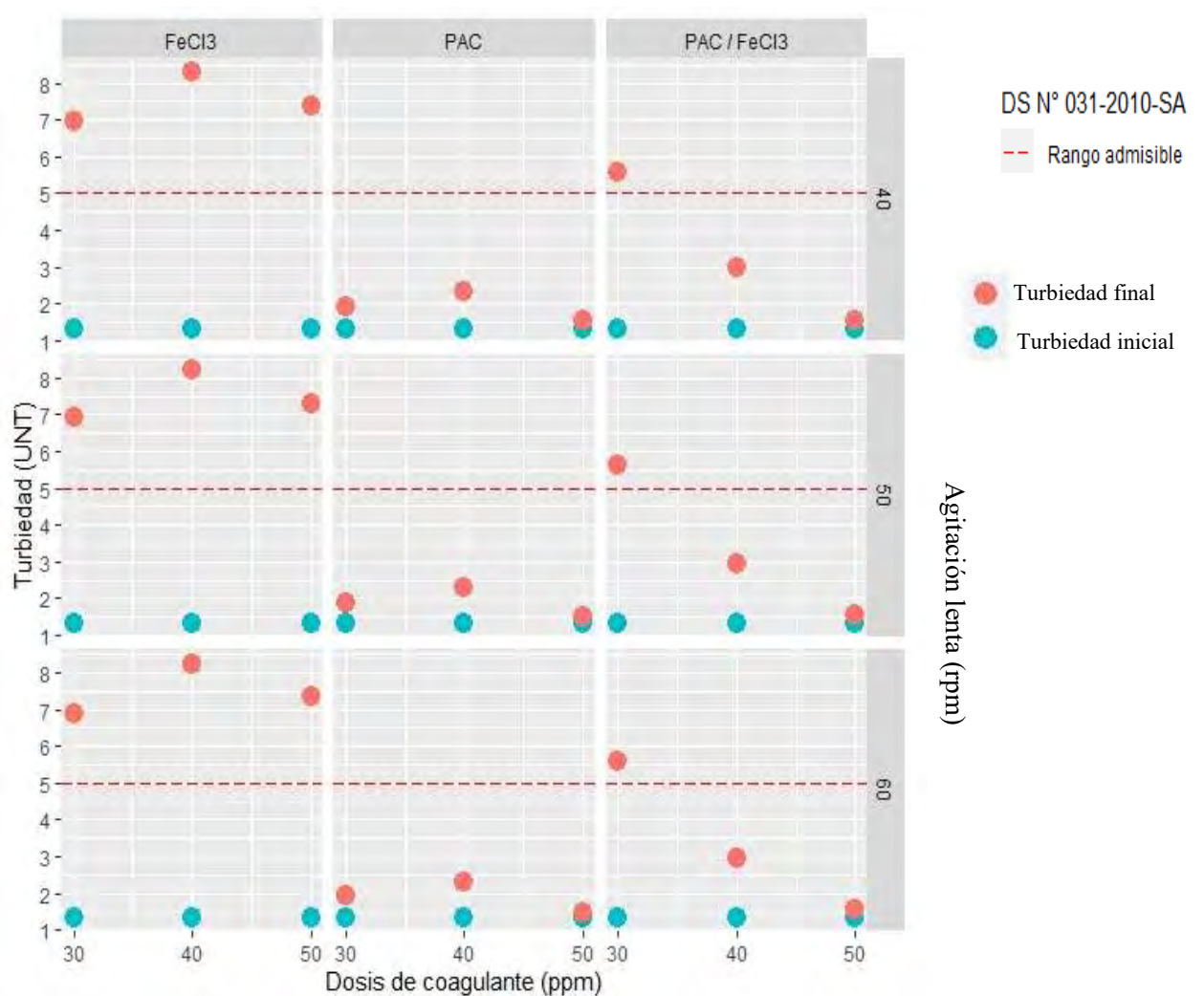
### 4.3.5. COMPORTAMIENTO DE LA TURBIEDAD

La Figura 4.9 muestra el comportamiento de la turbiedad para las condiciones de diseño experimental planteado y sus réplicas (muestra 1,2 y 3). El aumento de la turbiedad se debe a la formación de micro flocs que no logran sedimentar por no tener tamaño ni peso necesario que aumente la velocidad de sedimentación. Usando FeCl<sub>3</sub> la turbiedad aumenta por encima del límite máximo permisible en todas las dosis de

coagulante, para el caso de la mezcla binaria el mayor aumento se da una dosis de 30 ppm. El mejor valor se da usando PAC que para las tres condiciones de dosis de coagulante se obtiene una turbiedad relativamente alta, esto se debe a que el PAC tiene compuestos poliméricos que actúan mejor en aguas de turbiedad baja y pH neutro por lo que los coloides neutralizados son fácilmente atrapados en flocs de mayor tamaño y precipitan en corto tiempo (Cerón Pérez, 2016).

**Figura 4.9**

*Comportamiento de la turbiedad en el proceso experimental*



Fuente: Elaboración propia



#### 4.3.6. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA REMOCIÓN DE COLOR (%)

Se realizó el estudio de análisis de la varianza del modelo de regresión considerando como variable de respuesta el % de remoción de color, de esta manera se evaluó el valor-p para el tipo de coagulante, dosis de coagulante, agitación lenta.

Como ya se dijo, se propuso inicialmente un modelo lineal, como muestra la ecuación (4.3).

$$\text{Remoción de color (\%)} = \beta_0 + \beta_1 \text{ Dosis} + \beta_2 \text{ Agitación lenta} + \beta_3 \text{ PAC} + \beta_3 \text{ PAC/FeCl}_3 \quad (4.3)$$

Para este modelo se encontró un  $R^2$  de 87.95 % y tal como se aprecia en la Tabla 4.8, todas variables son significativos a excepción de la variable agitación lenta, cuyo valor de  $\alpha$  es mayor a 0.05, por lo tanto, no es estadísticamente significativo para el modelo propuesto y no contribuye a la remoción de color (%).

**Tabla 4.8**

*ANOVA del diseño experimental para la remoción de color (%) para un modelo lineal*

<b>Término</b>	<b>Estimado</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor-P</b>
Intercepto	40.74	4.91	2.92e-12
Dosis de coagulante	0.45	0.07	5.94e-08
Agitación lenta	-0.07	0.07	0.35
Tipo de coagulante PAC	26.22	1.50	2e-16
Tipo de coagulante PAC/ FeCl <sub>3</sub>	-7.15	1.50	8.53e-06

Fuente: Elaboración propia

Razón por la cual la variable agitación lenta fue excluida del análisis y con la finalidad de mejorar el modelo para explicar la remoción de color, se planteó un modelo cuadrático como muestra la ecuación (4.4).

$$\text{Remoción de color (\%)} = \beta_0 + \beta_1 \text{ Dosis} + \beta_2 \text{ Dosis}^2 + \beta_3 \text{ PAC} + \beta_4 \text{ PAC/FeCl}_3 \quad (4.4)$$

Como se puede apreciar para la variable dosis de coagulante se planteó un término cuadrático, esto basado en el comportamiento de dicha variable en las pruebas preexperimentales donde se observa un punto de inflexión donde se logra mayor remoción de color. Para este modelo se encontró un  $R^2$  de 97.71%

En la Tabla 4.9 todas variables son significativas, los valores de  $\alpha$  son menores a 0.05, por lo que son estadísticamente significativo para el modelo propuesto y contribuye a explicar la remoción de color.

**Tabla 4.9**

*ANOVA del diseño experimental para la remoción de color (%) para un modelo cuadrático*

<b>Término</b>	<b>Estimado</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor-P</b>
Intercepto	-119.80	8.79	2e-16
Dosis de coagulante	8.64	0.45	2e-16
Tipo de coagulante PAC	26.22	0.65	2e-16
Tipo de coagulante PAC/ FeCl <sub>3</sub>	-7.15	0.65	2e-16
Dosis de coagulante <sup>2</sup>	-0.10	0.0057	2e-16

#### 4.3.7. MODELO PARA LA REMOCIÓN DE COLOR (%)

Para el mejor ajuste de los datos experimentales y estudio de la remoción de color (%) se propuso el modelo cuadrático ecuación (4.4) con un  $R^2$  de 97.71 %.

Partiendo de dicho modelo, se establecieron 3 ecuaciones para cada tipo de coagulante reemplazando las variables dummy creadas para la variable cualitativa tipo de coagulante; así se tiene:

- Para el PAC:

$$\text{Remoción de color (\%)} = -93.58 + 8.64 * \text{Dosis} - 0.10 * \text{Dosis}^2 \quad (4.5)$$

- Para el FeCl<sub>3</sub>:

$$\text{Remoción de color (\%)} = -119.80 + 8.64 * \text{Dosis} - 0.10 * \text{Dosis}^2 \quad (4.6)$$

- Para la mezcla binaria PAC/ FeCl<sub>3</sub>:

$$\text{Remoción de color (\%)} = -126.95 + 8.64 * \text{Dosis} - 0.10 * \text{Dosis}^2 \quad (4.7)$$

Dichas ecuaciones permiten predecir el % de remoción de color para cada tipo de coagulante dentro de los límites del área experimental de estudio. Vale decir cuando se utiliza PAC y FeCl<sub>3</sub> como tipo de coagulante; un rango de dosis de 30 a 50 ppm y una agitación lenta de 40 a 60 rpm.

#### **4.4. PARÁMETROS DE TIPO DE COAGULANTE, DOSIS DE COAGULANTE Y VELOCIDAD DE AGITACIÓN LENTA**

De todas las experiencias realizadas, las condiciones a las cuales se obtuvo mayor remoción de color (90%) fue utilizando el PAC como coagulante a una dosis de 40 ppm con una agitación lenta de 50 rpm (Tabla 4.10). Del mismo modo Yanza López et al., (2019) logró un 92% de remoción con una dosis de 20 ppm empleando PAC como coagulante, Malakootian & Fatehizadeh, 2010) obtuvo un 75% de remoción con una dosis de 40 ppm utilizando PAC.

Según lo visto en el estado de arte, el PAC tiene un comportamiento más adecuado sobre otros tipos de coagulante, trabajando bien a diferentes concentraciones de turbiedad y a un rango amplio de pH esto se debe por ser un polímero de cadena ramificada que da una acción doble de trabajo como coagulación y floculación por otro lado FeCl<sub>3</sub> solo tiene la acción de coagulación y que se complementa bien en aguas de turbiedad alta para flocular.

**Tabla 4.10***Parámetros que logran mayor remoción de color (%)*

<b>Variable Independiente</b>	<b>Parámetro</b>
Tipo de coagulante	PAC
Dosis de coagulante (ppm)	40.0
Agitación lenta (rpm)	50.0

Fuente: Elaboración propia

**4.4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA TRATADA**

La Tabla 4.11 presenta la caracterización fisicoquímica de la muestra tratada utilizando PAC a 40 ppm y 50 rpm. Se obtuvo un 90 % de remoción de color partiendo de un inicial de 120 UPC. Los valores de turbiedad, pH, sólidos disueltos totales y alcalinidad están por debajo del límite máximo permisibles establecido por DS. 031-2010-SA para consumo de agua potable. Respecto a la materia orgánica, se logró remover el 100% (ANEXO I), demostrando que utilizando el PAC como agente coagulante se logra remover el color, así como la presencia de material orgánico sin afectar el pH del agua.

**Tabla 4.11***Muestras de validación*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Límite Máximo Permisible</b>	<b>Unidad</b>
Color	12	15	UPC
Turbiedad	2.38	5	UNT
pH	7.41	6.5 a 8.5	
Sólidos disueltos totales	40	1000	mg/L
Alcalinidad	25	-	mg/L
Materia orgánica	0	-	mg/L

Fuente: Elaboración propia

## **CAPÍTULO V**

### **PROPUESTA DE UN SISTEMA DE COAGULACIÓN -FLOCULACIÓN**

Se propuso un sistema de coagulación- floculación a la entrada de la PTAP Miskiunu, en base a los parámetros encontrados en la parte experimental. Se realizó el diseño de operación del dosificador, el diseño de la etapa de mezcla rápida y el diseño de la etapa de mezcla lenta.

#### **5.1 SISTEMA DE DOSIFICACIÓN**

Se diseñó el sistema de dosificación utilizando el PAC porque demostró remover el color del agua de manera más eficiente. Se realizó una búsqueda de los tipos de dosificación que existen en el mercado que se adapte a las condiciones de operación de la PTAP Miskiunu, la cual como ya se dijo opera con cambios de caudal a lo largo del año; del mismo modo que tenga facilidad de operación por parte del operador de planta, y que logre garantizar una dosificación certera y sea sensibles a los cambios de caudal y presión de la corriente de agua.

Teniendo esas limitaciones se encontró una tecnología que existe en el mercado desde el 2016. Se trata de un dosificador hidráulico que funciona sin electricidad y que utiliza la presión del agua como fuerza motriz, accionando de esta manera un pistón motor que acciona a su vez el pistón dosificador que aspira el producto concentrado (PAC) hacia una cámara mezcladora donde lo homogeniza con el agua motriz, de esta manera la solución es enviada a la salida del dosificador (ANEXO J). Por lo tanto, la dosis de producto inyectada es siempre proporcional al volumen de agua que pasa por el dosificador, no importando las variaciones de caudal y presión. Los requerimientos del dosificador para que funcione de manera correcta son:

- Enjuagar el dosificador después de cada cambio de producto concentrado.
- Cambiar el tubo de aspiración en cuanto parezca deteriorado por el concentrado dosificado.

- En caso de agua duras, se debe colocar un filtro con tamiz (300 mesh -60 micras) antes del dosificador.
- El ajuste de dosificación debe efectuarse sin presión. Cerrar la llegada de agua.
- Asegurarse de que el caudal y la presión de agua de la instalación son conformes con las características del dosificador.
- Se debe considerar que el dosificador quede siempre por encima del tanque de contiene el concentrado dosificado para evitar que se dé un efecto sifón. La instalación se debe hacer máximo a una altura de 4 m.c.a.
- Dejar un filtro de aspiración por lo menos 10 cm por encima de la base del tanque para evitar aspirar partículas no solubles que puedan dañar el cuerpo del dosificador.

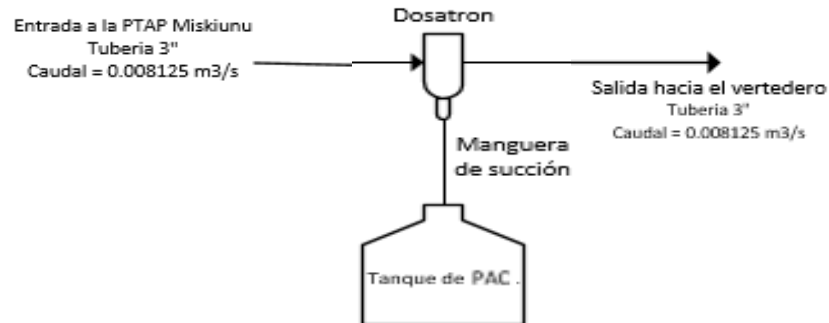
(Dosatron International S.A.S, 2016).

Una vez conocidos los requerimientos del dosificador, se realizó el diseño del sistema de dosificación para la PTAP Miskiunu para lo cual se propuso la instalación del dosificador en la tubería de ingreso a la PTAP Miskiunu tomando en cuenta que el caudal máximo diario de  $29.25 \text{ m}^3/\text{s}$  ecuación (4.2) se encuentra dentro del rango de trabajo del dosificador (8 – 30  $\text{m}^3/\text{h}$ ) indicado en manual del dosificador (ANEXO K).

La Figura 5.1 muestra el diseño de instalación dosificador en la tubería de ingreso a la PTAP Miskiunu.

**Figura 5.1**

*Instalación del dosificador a la entrada de la PTAP Miskiunu*



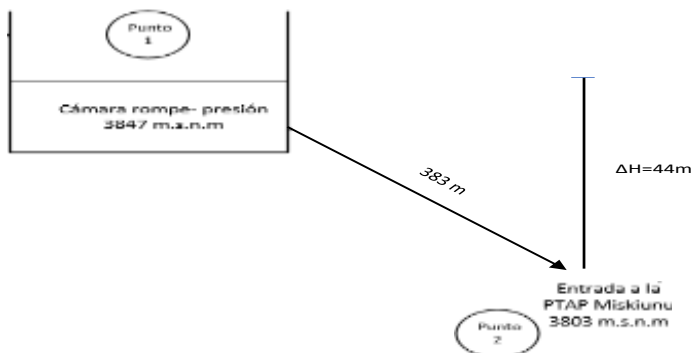
Fuente: Adaptado de manual del usuario (Dosatron International S.A.S, 2016)

Para comprobar que la presión a la entrada de la PTAP Miskiunu este dentro del rango de trabajo del dosificador de (5 kPa - 600 kPa) indicado en la ficha técnica del dosificador (ANEXO K). Se calculó la presión a la entrada de la PTAP Miskiunu utilizando la ecuación de conservación de la energía, ecuación (5.1).

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 + \rho g h_1 - h_L = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 + \rho g h_2 \quad (5.1)$$

**Figura 5.2**

*Diagrama para el cálculo de la presión a la entrada de la PTAP Miskiunu.*



Fuente: Elaboración propia

Para lo cual se consideró:

- P1: se consideró la presión atmosférica en la provincia de Santo Tomas (102.3 kpa)
- V1: Velocidad de flujo en el punto 1 que se consideró nulo porque el agua se almacena en la cámara rompe presión, existiendo un almacenamiento momentáneo.
- $\rho$ : Densidad del agua (1000 Kg/m<sup>3</sup>)
- g: Gravedad (9.8 m/s<sup>2</sup>)
- V2: Velocidad de flujo en el punto 2 que se calculó en base al caudal que entra a la PTAP Miskiunu por medio de la ecuación (5.2).

$$\text{Velocidad de flujo (m/s)} = \text{Caudal (m}^3\text{/s)} / \text{Área de flujo (m}^2\text{)}. \quad (5.2)$$

- Caudal (m<sup>3</sup>/s) = 0.008125 L/s

- Área de flujo (m<sup>2</sup>) =  $\pi r^2$ , donde r es el radio de la tubería de 3" de diámetro que equivale a 0,08 m

$$\text{Área de flujo (m}^2\text{)} = \pi * (0,08/2)^2$$

$$\text{Área de flujo (m}^2\text{)} = 0.005 \text{ m}^2$$

$$\text{Velocidad de flujo } \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) = \frac{\text{Caudal } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)}{\text{Área de flujo (m}^2\text{)}} = \frac{0.008125 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)}{0.005 \text{ (m}^2\text{)}} = 1.78 \text{ m/s}$$

- hL, Pérdidas por fricción a lo largo de la tubería del punto 1 al punto 2. Se calculó las pérdidas de carga por fricción a la salida de la última cámara rompe presión e ingreso a la tubería (hLs) y la pérdida de carga a lo largo de la tubería (hLt) de longitud 383 m del punto 1 al punto 2.

La pérdida de carga a la salida de la cámara rompe presión se calculó por medio de la ecuación (5.3).

$$hLs = k * \frac{V^2}{2g} \quad (5.3)$$



Donde:

K: Coeficiente de resistencia de acoplamiento de tanque a tubería, equivalente a 0.5

V: Velocidad promedio del fluido en la tubería (1.78 m/s)

g: Gravedad (9.8 m/s<sup>2</sup>)

$$hLs = k * \frac{V^2}{2g} = 0.5 * \frac{\left(1.78 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9.8 \frac{m}{s^2}} = 0.081m$$

Seguidamente se calculó las pérdidas de carga a lo largo de la tubería de 383 m de longitud por medio de la ecuación (5.4) de Darcy -Weisbach.

$$hLt = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad (5.4)$$

Donde:

L: Longitud de la tubería (383 m)

V: Velocidad promedio del fluido en la tubería (1.78 m/s)

D: Diámetro de la tubería (0.08 m)

g: Gravedad (9.8 m/s<sup>2</sup>)

f: Factor de fricción que es función del número de Reynolds (Re), este último se calcula mediante la ecuación (5.5)

Re: Permite determinar el tipo de flujo, pudiendo ser este de tipo laminar (Re < 2300) o flujo turbulento (Re > 4000) (Çengel & Cimbala, 2006).

$$Re = \frac{\rho * V * D}{u} \quad (5.5)$$

u: Viscosidad dinámica de 0.00017 Kg / m-s (Mott Robert, 1996) a 13.4 ° C, temperatura promedio del agua según el monitoreo del año 2020 (Borda Choque, 2020).

$$Re = \frac{\rho * V * D}{u} = \frac{1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 1.78 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.08 \text{ m}}{0.000117 \frac{\text{Kg}}{\text{m} * \text{s}}} = 1217094.02$$

En vista que Re indica que se trata de un fluido turbulento, el factor de fricción fue hallado por medio del diagrama de Moody, que relaciona el número de Reynolds (Re) y la rugosidad relativa ( $\epsilon$ ) para encontrar el factor de fricción. Por lo que se calculó primero el valor de  $\epsilon$  mediante la ecuación (5.6).

$$\epsilon = \frac{\text{rugosidad de la tubería PVC}}{D} \quad (5.6)$$

$$\epsilon = \frac{\text{rugosidad de la tubería PVC}}{D} = \frac{0.0025 \text{ mm}}{80 \text{ mm}} = 3.13 * 10^{-5}$$

El valor de f leído en el diagrama de Moody fue de 0.018. Se reemplazó los valores hallados en la ecuación (5.4).

$$h_{Lt} = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} = 0.018 * \frac{383 \text{ m}}{0.08 \text{ m}} * \frac{\left(1.78 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 14 \text{ m}$$

Por lo tanto, la pérdida total de carga será:

$$h_L = h_{Ls} + h_{Lt} = 0.081 \text{ m} + 14 \text{ m} = 14.081 \text{ m. c. a } \sim 138 \text{ kPa}$$

Finalmente se reemplazó los valores hallados en la ecuación (5.1 para hallar el valor de P2:

$$P_2 = P_1 + \rho g(h_1 - h_2) - \frac{1}{2} \rho V^2 - h_L$$

$$P2 = 102.3 \text{ Kpa} + 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (3847 - 3804) \text{m} - \frac{1}{2} * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(1.78 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 - 138 \text{ kPa}$$

$$P2 = 532 \text{ kPa} - 138 \text{ kPa}$$

$$P2 = 394 \text{ kPa} \sim 3.94 \text{ bar (Presión a la entrada de la PTAP Miskiunu)}$$

Como se observa dicha presión está dentro del rango de trabajo (5 – 600 kPa) especificada por el fabricante. Por lo que el dosificador se adapta de manera eficiente para dosificar PAC.

### 5.1.1. CÁLCULO EL CONSUMO DEL PAC

Para determinar el consumo de PAC, primero se calculó el ajuste de dosificación (%) para que el dosificador suministre PAC a 40 ppm (parámetro encontrado en la parte experimental). Para dicho cálculo se consideró:

- Rango de ajuste de dosificación del dosificador (0.003 % v/v – 0.03 % v/v)
- Capacidad del tanque que contiene el PAC = 200 L
- Caudal de agua que entra al Dosatron = 29.25 m<sup>3</sup>/h = 8.125 L/s ~ 8125 ml/s

Se debe tener en cuenta que el principio de dosificación del Dosatron indica que 1% -1/100 = 1 volumen de producto concentrado para 100 volúmenes de agua. Por lo que se consideró el caudal de agua que entra al Dosatron (8125 ml/s) como 100 % y se calculó el caudal del PAC (L/s) para cada (% v/v) del ajuste de dosificación, por medio de la ecuación (5.7).

$$\text{Caudal de PAC} \left( \frac{\text{ml}}{\text{s}} \right) = \frac{\% \text{ de dosificación del Dosatron } V/V}{100 \%} * 8125 \frac{\text{ml}}{\text{s}} \quad (5.7)$$

La Tabla 5.1 muestra los caudales encontrados para los distintos % ajustes de dosificación, donde se encontró que para poder dosificar PAC a 40 ppm agua abajo, se debe regular el dosificador a 0.004 % v/v. Ósea que por cada 8125 ml agua el Dosatron dosificara 0.33 ml de PAC para alcanzar una concentración de 40 ppm.

**Tabla 5.1***Ajuste de dosificación (%) y su respectiva concentración de PAC en ppm*

<b>Ajuste de dosificación (%)</b>	<b>PAC (ppm)</b>	<b>Caudal de PAC (ml/s)</b>
0.003	30	0.24
0.004	40	0.33
0.005	50	0.41
0.006	60	0.49
0.007	70	0.57
0.008	80	0.65
0.009	90	0.73
0.01	100	0.81
0.011	110	0.89
0.012	120	0.98
0.013	130	1.06
0.014	140	1.14
0.015	150	1.22
0.016	160	1.30
0.017	170	1.38
0.018	180	1.46
0.019	190	1.54
0.02	200	1.63
0.021	210	1.71
0.022	220	1.79
0.023	230	1.87
0.024	240	1.95
0.025	250	2.03
0.026	260	2.11
0.027	270	2.19
0.028	280	2.28
0.029	290	2.36
0.03	300	2.44

Fuente: Elaboración propia.

El cálculo del consumo de PAC se realizó teniendo establecido el caudal de PAC (0.33 ml/s) y la capacidad del tanque (200 L) por medio de la ecuación (5.8).

$$\text{Tiempo de vaciado del tanque (s)} = \frac{\text{Volumen del tanque (ml)}}{\text{Caudal de succión del PAC } \left(\frac{\text{ml}}{\text{s}}\right)} \quad (5.8)$$

$$\text{Tiempo de vaciado del tanque (s)} = \frac{200000 \text{ (ml)}}{0.33 \left(\frac{\text{ml}}{\text{s}}\right)} = 606061 \text{ (s)}$$

$$\text{Tiempo de vaciado del tanque (días)} = 606061 \text{ (s)} * \frac{1 \text{ (h)}}{3600 \text{ s}} * \frac{1 \text{ (día)}}{24 \text{ (h)}} = 7 \text{ (días)}$$

Por lo visto un tanque de 200 L de PAC dura 1 semana, esto permite al operador de planta el monitoreo de dosificación por semana de trabajo, por lo que se recomienda incluir un formato de verificación del correcto funcionamiento del dosificador.

## 5.2. DISEÑO DE LA ETAPA DE MEZCLA RAPIDA O COAGULACIÓN

La (Norma OS. 020, 2006) del Reglamento Nacional de Edificaciones del Ministerio de vivienda, indica que para un caudal menor a 50 L/s se debe utilizar un vertedero triangular como dispositivos de mezcla hidráulica. El diseño de esta unidad se realizó empleando las siguientes ecuaciones

Teniendo en cuenta el caudal de diseño calculado en la ecuación (4.2, se calculó la altura de la lámina vertiente mediante la ecuación (5.9) propia para un vertedero con ángulo de 90 grados

$$H = \left(\frac{Q_{\text{diseño}}}{1.386}\right)^{0.4} \quad (5.9)$$

$$H = \left(\frac{0.008125 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1.386}\right)^{0.4} = 0.128 \text{ m} = 12.8 \text{ cm}$$

Para un vertedero triangular de 90° la relación entre su ancho y altura está representada mediante la ecuación (5.10).

$$L = 2H \quad (5.10)$$

$$L = 2 * 0.128 = 0.256 \text{ m} \cong 25.6 \text{ cm}$$

Para inicios del diseño se asumió el ancho del canal de transición

$$B = 0.51 \text{ cm (asumido)}$$

Con el ancho del canal de transición asumido (B), se calculó el caudal unitario mediante la ecuación (5.11).

$$q = \frac{Q}{B} \quad (5.11)$$

$$q = \frac{0.008125 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.492 \text{ m}} = 0.02 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Ya teniendo el caudal unitario, y considerando la gravedad igual a  $9.8 \text{ m/s}^2$ . Se calculó la altura crítica del flujo mediante la ecuación (5.12).

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (5.12)$$

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{\left(0.02 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)^2}{9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} = 0.030 \text{ m} \cong 3.0 \text{ cm}$$

Para seguir con el diseño de vertedero en primera instancia se asumió un valor para la altura que comprende desde el fondo del canal de transición hasta el vértice del vertedero el cual se identificó con la letra P, esto permitió calcular la profundidad del agua en la sección de máxima turbulencia con la ecuación (5.13).

$$P = 0.37 \text{ m (asumido)}$$

$$h_1 = \frac{1.41 h_c}{\sqrt[2]{2.56 + \frac{P}{h_c}}} \quad (5.13)$$

$$h_1 = \frac{1.41(0.030)}{\sqrt[2]{2.56 + \frac{0.37}{0.030}}} = 0.0107 \text{ m}$$

Teniendo la profundidad del agua en la sección de máxima turbulencia y el caudal unitario se calculó la velocidad al inicio del resalto con la ecuación (5.14).

$$V_1 = \frac{q}{h_1} \quad (5.14)$$

$$V_1 = \frac{0.02 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{0.0107 \text{ m}} = 1.49 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para comprobar si las condiciones hidráulicas de la mezcla son adecuadas se calculó el número de Froude. La Norma OS.20 indica que debe estar entre 4.5 y 9.0 para que la mezcla sea adecuada. El número de Froude se calculó mediante la ecuación (5.15).

$$F = \frac{V_1}{\sqrt{g h_1}} \quad (5.15)$$

$$F = \frac{1.49 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\sqrt{9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.0107 \text{ m}}} = 4.60$$

Obtenido el número de Froude y la profundidad del agua en la sección de máxima turbulencia se procedió a calcular la profundidad del agua después del resalto con la ecuación (5.16).

$$h_2 = \frac{\sqrt{1 + 8F^2} - 1}{2} * h_1 \quad (5.16)$$

$$h_2 = \frac{\sqrt{1 + 8(4.60)^2} - 1}{2} * 0.0107 \text{ m} = 0.0645 \text{ m} \cong 6.45 \text{ cm}$$

Teniendo la profundidad del agua después del resalto y el caudal unitario se procedió al cálculo de la velocidad al final del resalto con la ecuación (5.17).

$$V_2 = \frac{q}{h_2} \quad (5.17)$$

$$V_2 = \frac{0.02 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{0.0645 \text{ m}} = 0.25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Teniendo la profundidad del agua después del resalto y la profundidad en la máxima turbulencia se procedió al cálculo de la pérdida de carga con la ecuación (5.18).

$$h = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1h_2} \quad (5.18)$$

$$h = \frac{(0.0645 \text{ m} - 0.0107 \text{ m})^3}{4 * 0.0107 \text{ m} * 0.0645 \text{ m}} = 0.06\text{m}$$

La longitud a la que ocurre el resalto se calculó con la ecuación (5.19).

$$L_j = 6(h_2 - h_1) \quad (5.19)$$

$$L_j = 6(0.0645 \text{ m} - 0.0107 \text{ m}) = 0.32\text{m} \cong 32\text{cm}$$

La longitud a la que se da la máxima turbulencia se calculó con la ecuación (5.20).

$$L_m = 4.3P^{0.1}h_c^{0.9} \quad (5.20)$$

$$L_m = 4.3(0.37)^{0.1}(0.03)^{0.9} = 0.16\text{m} \cong 16\text{cm}$$

Con las velocidades calculadas se calculó la velocidad media con la ecuación (5.21).

$$V_m = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (5.21)$$

$$V_m = \frac{1.49 + 0.25}{2} = 0.87 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Teniendo la longitud al final del resalto y la velocidad media se calculó el tiempo de mezcla que de preferencia debe ser  $\leq 1$  min y se calcula con la ecuación (5.22).

$$t = \frac{L_j}{V_m} \quad (5.22)$$

$$t = \frac{0.32}{0.87} = 0.37\text{s}$$



Para el cálculo de la gradiente de velocidad es necesario conocer el peso específico y la viscosidad dinámica del agua a la temperatura promedio del agua de 13.4 °C (Borda Choque, 2020).

Según Mott Robert, (1996) dichas propiedades mecánicas del agua a una temperatura de 13.4°C presentan son los siguientes valores:

$$\gamma \text{ (peso específico del agua)} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\mu \text{ (viscosidad dinámica del agua)} = 0.000117 \frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$$

La gradiente de velocidad del diseño para la mezcla rápida se calculó con la ecuación (5.23).

$$G_{DMR} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot h}{\mu \cdot t}} \quad (5.23)$$

$$G_{DMR} = \sqrt{\frac{1000 * 0.06}{0.000117 * 0.37}} = 1138.22 \text{ s}^{-1}$$

Se calculó la gradiente de velocidad de la mezcla rápida experimental tomando en cuenta especificaciones del equipo agitador y del proceso de coagulación establecidos en la parte experimental. Los datos recopilados se muestran en la Tabla 5.2.

**Tabla 5.2**

*Datos técnicos del equipo agitador.*

Descripción	Unidades	Valor
Ancho de paleta de agitación	cm	2.55
Longitud de paleta de agitación	cm	7.63
Velocidad de agitación rápida	rpm	300
Velocidad de agitación lenta	rpm	50
Volumen de muestra	ml	500

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se calculó la gradiente de velocidad experimental en la mezcla rápida se utilizó la ecuación (5.24).

$$G_{exp1} = \sqrt{\frac{K \cdot \rho \cdot N^3 \cdot \emptyset^5}{\mu \cdot \forall}} \quad (5.24)$$

Donde:

K: es el factor de forma de las placas, es igual a 2.30 (Melo Parra & Herrera Delgado, 2016)

$\rho$ : Densidad del agua a 13.4°C es igual a 101.74 kg – s<sup>2</sup>/m<sup>4</sup> (Mott Robert, 1965)

N: Revoluciones por segundo.

$\emptyset$ : Diámetro de las paletas.

$\mu$ : Viscosidad dinámica del agua a 13.4 °C.

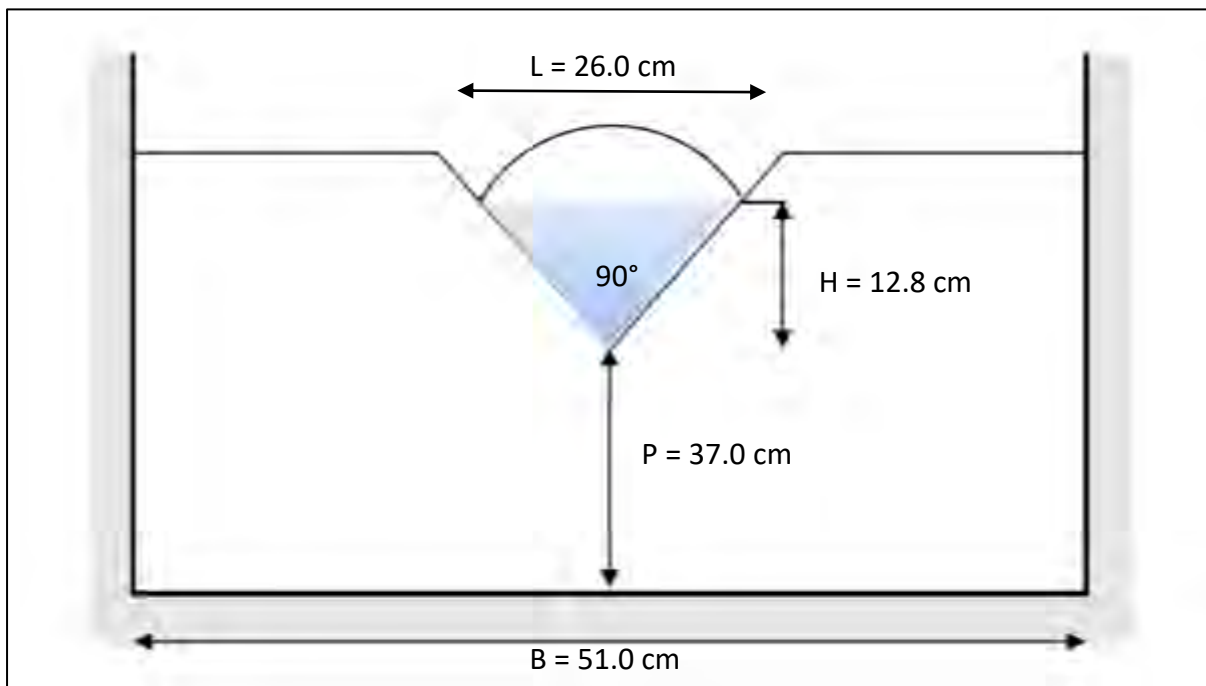
$\forall$ : Volumen de muestra de agua

$$G_{exp1} = \sqrt{\frac{2.30 * 101.94 * 5^3 * 0.0763^5}{0.000117 * 0.0005}} = 1138.22 \text{ s}^{-1}$$

La gradiente de la velocidad del diseño para la mezcla rápida es igual a la gradiente de velocidad experimental. Por lo tanto, los valores asumidos para el cálculo del diseño quedan validados, el diseño del vertedero triangular donde se da la agitación rápida se visualiza en la Figura 5.3. y Figura 5.4.

**Figura 5.3**

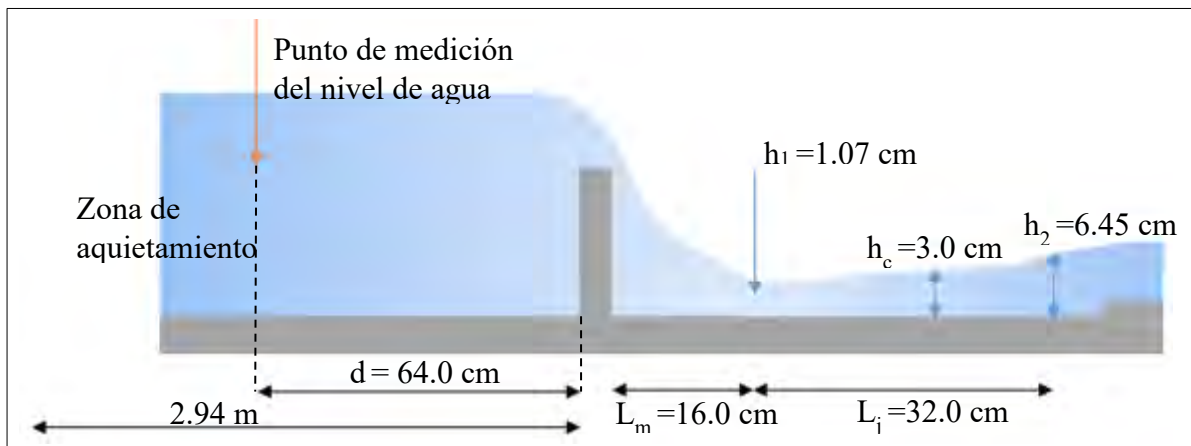
*Vertedero triangular*



Fuente: elaboración propia

**Figura 5.4**

*Perfil de vertedero triangular y estructura hidráulica de mezcla rápida.*



Fuente: elaboración propia

### 5.3. DISEÑO DE LA ETAPA DE MEZCLA LENTA O FLOCULACION

La norma OS.020 del Reglamento Nacional de Edificaciones indica que para caudales menores a 50L/s es apropiado el uso de floculadores hidráulicos de flujo horizontal y que para temas de diseño es recomendable considerar una velocidad promedio de 0.165 m/s.

El tiempo de floculación (residencia) del agua en el floculador fue de 15 min tal y como se consideró en pruebas experimentales.

Se calculó la longitud total del canal de floculación con la ecuación (5.25).

$$L = V * t * 60 \quad (5.25)$$

$$L = 0.165 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 15 * 60 \text{ s} = 148.5 \text{ m}$$

Con la velocidad promedio y el caudal de diseño se calculó el área de la sección del canal con la ecuación (5.26).

$$A = \frac{Q}{V} \quad (5.26)$$

$$A = \frac{0.008125 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.165 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.049 \text{ m}^2$$

Para temas de diseño los tirantes de agua o altura del agua debe estar entre 1 a 3 metros tal como indica la Normal OS.020 del Reglamento de Nacional de Edificaciones. Entonces, con el área transversal del canal y considerando una altura del agua “h” de 2.81 m se puede determinar el ancho del canal con la ecuación (5.27).

$$b = \frac{A}{h} \quad (5.27)$$

$$b = \frac{0.049 \text{ m}^2}{2.81 \text{ m}} = 0.0175 \text{ m} \cong 1.75 \text{ cm}$$

Para el cálculo del ancho de las vueltas se tomó en cuenta lo establecido en la norma OS.020 del Reglamento de Nacional de Edificaciones representada en la ecuación (5.28).

$$E = 1.5 * b \quad (5.28)$$

$$E = 1.5 * 0.0175 \text{ m} = 0.026 \text{ m} \cong 2.6 \text{ cm}$$

Para seguir con el diseño se asumió el ancho útil de las pantallas de floculación “ $L_t$ ” igual a 2.0 m y se calculó del ancho útil del floculador con la ecuación (5.29).

$$B = L_t + E \quad (5.29)$$

$$B = 2.0 + 0.026 = 2.026 \text{ m} \cong 202.6 \text{ cm}$$

Teniendo la longitud total del canal de floculación y el ancho útil del floculador se calculó el número de tramos con la ecuación (5.30).

$$M = \frac{L}{B} \quad (5.30)$$

$$M = \frac{148.5 \text{ m}}{2.026 \text{ m}} = 73.3 \cong 74$$

Del número de tramos se calculó el número de tabiques o pantallas de floculación con la ecuación (5.31).

$$N = M - 1 \quad (5.31)$$

$$N = 74 - 1 = 73$$

Según la (Norma OS. 020, 2006) el espesor de los tabiques o pantallas de floculación “e” es de 0.006 m para temas de diseño

Se calculó la longitud del floculador con la ecuación (5.32).

$$P = (N * e) + (M * b) \quad (5.32)$$

$$P = (73 * 0.006 \text{ m}) + (74 * 0.0175 \text{ m}) = 1.74 \text{ m}$$

Para el cálculo de la pérdida de carga por fricción “ $h_f$ ” se consideran la ecuación (5.33).

$$h_f = \left( \frac{\eta * V^2}{R_h^{2/3}} \right)^2 * L \quad (5.33)$$

Donde:

$\eta$ : coeficiente de fricción de Mannig. Para planchas corrugadas ( $\eta=0.015$ ) ((Norma OS. 020, 2006)

$R_h$ : radio hidráulico.

El radio hidráulico se calculó con la ecuación (5.34)

$$R_h = \frac{A}{p} \quad (5.34)$$

Donde:

$p$ : perímetro mojado de las secciones del tramo

$$(p = 2h + b = 2 * 2.81 + 0.0175 = 5.633 \text{ m})$$

$$R_h = \frac{0.049 \text{ m}^2}{5.633 \text{ m}} = 0.009 \text{ m}$$

Teniendo el radio hidráulico se remplaza en la Ecuación (5.33) y se calculó la pérdida de carga por fricción.

$$h_f = \left( \frac{0.015 * (0.165)^2}{(0.009)^{2/3}} \right)^2 * 148.5 = 0.505 \text{ m}$$

Para el cálculo de la pérdida de carga en las vueltas, la Norma OS.020 recomienda utilizar un coeficiente de pérdida de carga “ $k$ ” igual a 2 el que se remplaza en la ecuación (5.35).

$$h_2 = k * N * \frac{V^2}{2 * g} \quad (5.35)$$

$$h_2 = 2 * 73 * \frac{(0.165)^2}{2 * 9.81} = 0.203 \text{ m}$$

Ya teniendo los valores de pérdida de carga por fricción y la pérdida de carga en las vueltas se calculó la pérdida de carga total con la ecuación (5.36).

$$H_T = h_f + h_2 \quad (5.36)$$

$$H_T = 0.505 + 0.203 = 0.708\text{m}$$

La pendiente del floculador se calculó con la ecuación (5.37).

$$S = \frac{H_T}{P} * 100 \quad (5.37)$$

$$S = \frac{0.708}{1.74} * 100 = 40.77 \%$$

La gradiente de velocidad del diseño de la mezcla rápida se calculó con la ecuación (5.38).

$$G_{DML} = \sqrt{\frac{\gamma * H_T}{\mu * t}} \quad (5.38)$$

$$G_{DML} = \sqrt{\frac{1000 * 0.708}{0.000117 * 15 * 60}} = 81.98$$

Se calculó la gradiente de velocidad de la mezcla lenta experimental, para lo cual se utilizaron algunos datos obtenidos del equipo agitador y del proceso de coagulación mostrados en la Tabla 5.2 La gradiente de velocidad experimental en la mezcla lenta de cálculo con la ecuación (5.39).

$$G_{exp2} = \sqrt{\frac{C_d \cdot A_p \cdot \rho \cdot v^3}{2 \cdot \mu \cdot V}} \quad (5.39)$$

$$v = 0.75 * (2 * \pi * r * N)$$

Donde:

$C_d$ : Coeficiente de arrastre, se obtiene de la Tabla 5.3

$A_p$ : Área de las paletas.

v: Velocidad relativa de las paletas.

r: Radio de las paletas

Para el cálculo del valor del coeficiente de arrastre se considera la relación dimensional (largo y ancho) de la paleta de agitación y mediante interpolación se obtiene el valor de  $C_d$ .

**Tabla 5.3**

*Valores de coeficiente de arrastre  $C_d$  de paletas en mezcladores.*

Relación de longitud y ancho de paletas L/W	$C_d$
1.0	1.16
2.5	1.17
3.5	1.18
5.0	1.20
10.0	1.30
15.0	1.40
20.0	1.50
$\infty$	1.90

Fuente: (Parrado Dávila, 2017)

$$v = 0.75 * (2 * \pi * 0.0382 * 0.83) = 0.150 \frac{m}{s}$$

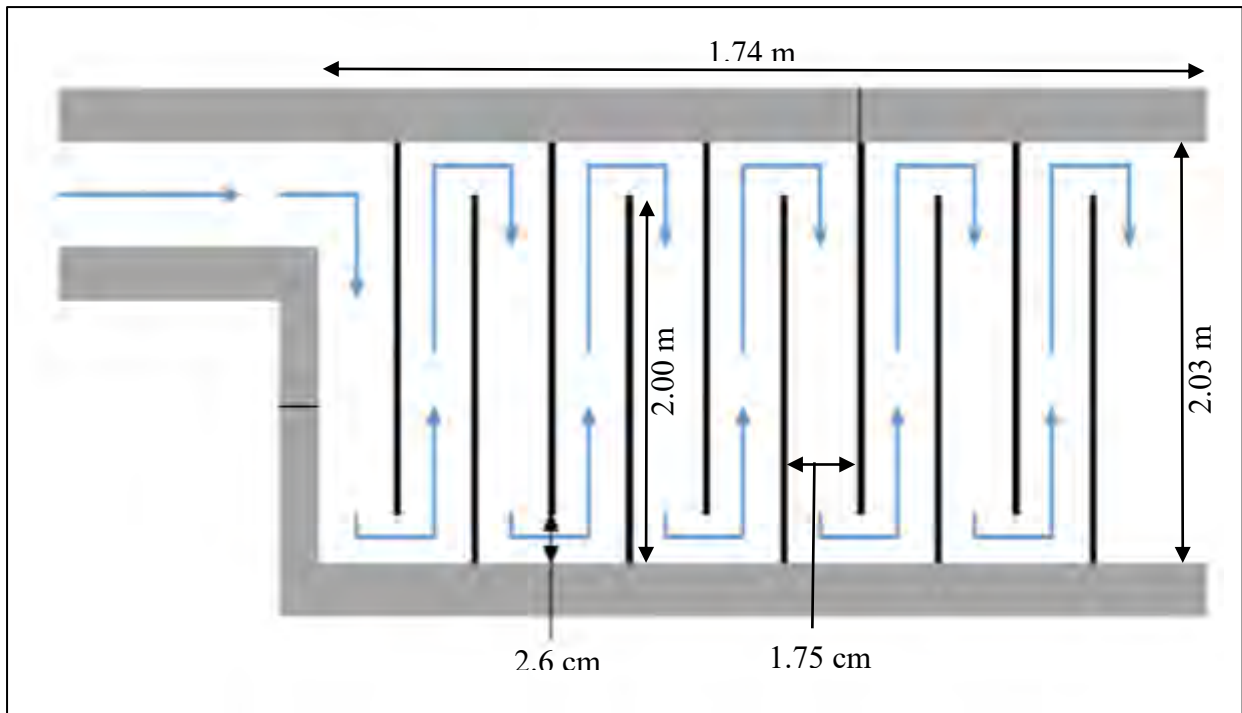
$$G_{exp 2} = \sqrt{\frac{1.18 * 0.0019 * 101.94 * 0.150^3}{2 * 0.00117 * 0.0005}} = 81.98s^{-1}$$

La gradiente de la velocidad del diseño para la mezcla lenta es cercana al valor de la gradiente de velocidad experimental, por lo que los valores asumidos para el cálculo del diseño quedan validados, el diseño del floculador hidráulico de flujo horizontal donde se da la agitación lenta se visualiza en la Figura 5.5 y Figura 5.6.



**Figura 5.5**

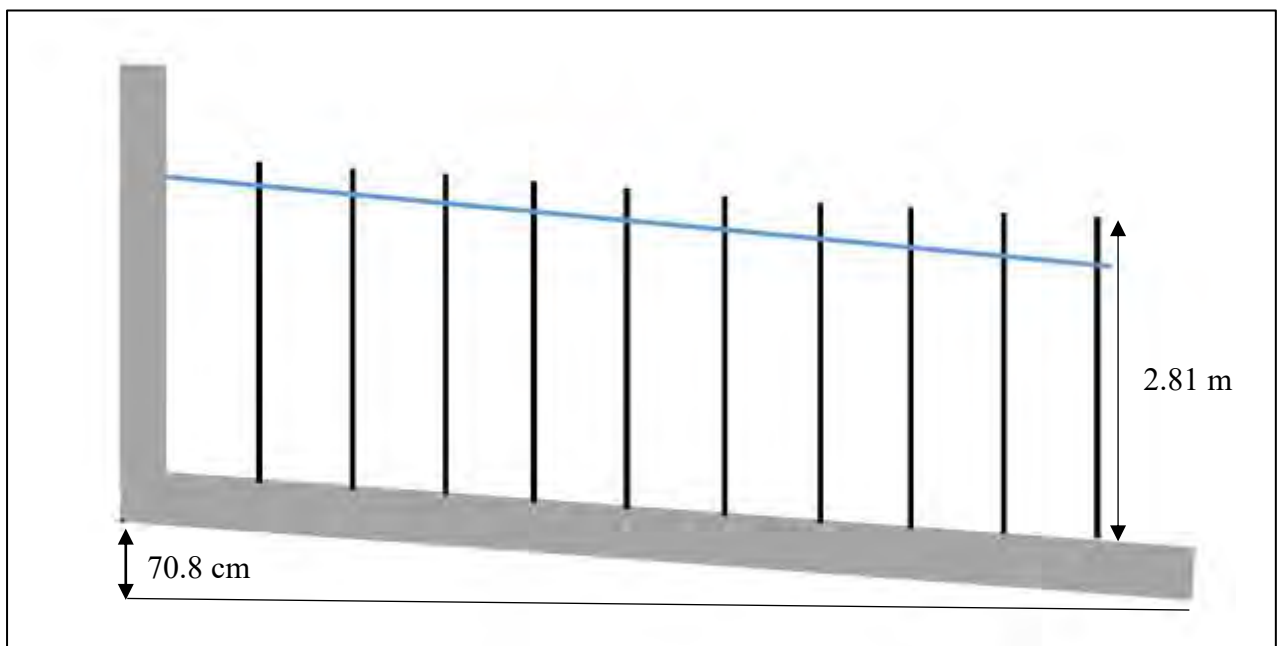
*Floculador hidráulico de flujo horizontal*



Fuente: elaboración propia

**Figura 5.6**

*Floculador hidráulico vista lateral*



Fuente: elaboración propia

## CONCLUSIONES

1. Se demostró que es posible remover un 90% de color del agua tratada en la Planta Miskiunu, mediante el proceso de coagulación– floculación con policloruro de aluminio (PAC).
2. La evaluación de la PTAP Miskiunu determinó que la fuente de agua no satisface la demanda diaria para una población de 4500 habitantes. Por otro lado, la planta fue diseñada sin considerar la presencia de color en el agua, no cumpliendo con la Norma OS. 020 para un tratamiento Tipo II-A. Se estableció el proceso de coagulación floculación como alternativa para remover el color del agua mediante un tratamiento Tipo II-B.
3. La caracterización fisicoquímica dio como resultado que el agua tratada excede en promedio 5.7 veces el LMP de color, no cumpliendo con el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano (DS N° 031-2010-SA).
4. La evaluación del proceso de coagulación – floculación ha determinado que las variables de estudio: tipo de coagulante, dosis de coagulante son significativas para la remoción de color. Por el contrario, la variable: velocidad de agitación lenta resulta ser no significativa. Se obtuvo un modelo matemático cuadrático ( $R^2= 97,99\%$ ).
5. Las mejores condiciones de operación del proceso de coagulación- floculación se encuentran utilizando el policloruro de aluminio como coagulante – floculante, a una dosis de 40 ppm y una velocidad de agitación lenta de 50 rpm.
6. Para la remoción de color en la planta de tratamiento de agua potable Miskiunu, se propone integrar a la entrada de la planta un sistema de coagulación – floculación, conformada por un dosificador hidráulico que soporta flujo turbulento con variaciones de caudal y presión, un vertedero tipo triangular de pared delgada y ángulo recto y floculador hidráulico de flujo horizontal.

## RECOMENDACIONES

1. Desarrollar un proyecto para la implementación de la propuesta del sistema de coagulación – floculación aplicando los criterios de diseño propuestos.
2. Caracterizar la naturaleza química de los sólidos responsables del color, mediante técnicas de análisis modernas para identificar las diferentes moléculas de materia orgánica e inorgánica disueltas en el agua.
3. Evaluar la cinética de formación de flocs y velocidad de sedimentación usando policloruro de aluminio, dicha evaluación ayudara a conocer de forma exacta el comportamiento del policloruro de aluminio en el proceso de coagulación floculación.
4. Estudiar otras variables de estudio que intervienen en el proceso de coagulación – floculación como son el tiempo de floculación y tiempo de sedimentación.

## REFERENCIAS

- Aguilar Cruz, E. M., & Yupanqui Cruz, J. A. (2018). *Optimización de la Dosis de Coagulante y Floculante en el Tratamiento Químico del Agua de Bombeo en una Empresa Pesquera de Chimbote* [Tesis de Grado, Universidad Nacional de Trujillo].  
<https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/10520>
- Andía Cárdenas, Y. (2000). *Tratamiento de Agua Coagulación y Floculación*. Sedapal.
- APHA, AWWA, & WEF. (2012). *Standard Methods for examination of water and wastewater* (22a ed.). American Public Health Association. <http://www.standardmethods.org/>
- Arboleda Valencia, J. (2000). *Teoría y Practica de la Purificación del Agua* (3a ed.). McGraw-Hill Interamericana de Colombia.
- Atenea. (2004). *Análisis Organoléptico y set de sólidos*. Colombia: Universidad distrital.
- Báez Muñoz, M. (2009). *Validación de Métodos de Ensayo para el Análisis de Parámetros Físico-Químicos en Aguas Limpias y Residuales en el Laboratorio de Medio Ambiente* [Tesis de Grado, Escuela Politécnica del Ejército de Ecuador].  
<http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/772/T-ESPE-026616.pdf>
- Borda Choque, D. F. (2020). *Monitoreo del Sistema de Tratamiento de la PTAP Miskiunu*. EMPSSAPAL S.A; Conjunto de Datos.
- Camargo Valero, M., & Cruz Torres, L. (1999). Sustancias Húmicas en Aguas Para Abastecimiento. *Revista Ingeniería e Investigación*, 44, 63–72.
- Castrillon Bedoya, D., & de Los Ángeles Giraldo, M. (2012). *Determinación de las dosis optimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa* [Tesis de Grado, Universidad Tecnológica de Pereira]. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/3146>
- Cava Suárez, T., & Ramos Arévalo, F. R. (2016). *Caracterización físico – química y microbiológica de agua para consumo humano de la localidad Las Juntas del distrito Pacora – Lambayeque y*

- propuesta de tratamiento* [Tesis de Grado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo].  
<https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/850>
- Cerón Pérez, V. A. (2016). *Estudio para la determinación y dosificación óptima de coagulantes en el proceso de clarificación de aguas crudas en la potabilización de aguas de la empresa EMPOOBANDO E.SP* [Tesis de Grado, Universidad de Nariño].  
[http://sired.udenar.edu.co/3769/1/tg\\_vcp.pdf](http://sired.udenar.edu.co/3769/1/tg_vcp.pdf)
- Cogollo Flórez, J. M. (2011). *Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: Caso del hidróxido de Aluminio*. 78(165), 18–27.
- Díaz Claros, J. N. (2016). *Coagulantes-floculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas y del reciclaje de la chatarra, para el tratamiento de aguas contaminadas* [Tesis de Grado, Universidad Pedagógica Nacional Francisco Morazán].  
<http://www.cervantesvirtual.com/nd/ark:/59851/bmch1516>
- Dosatron International S.A.S. (2016). *Manual de utilización Dosatron*.  
[http://bd.dosatron.com/Products\\_Products/Manuals\\_Notices/ES/Manual\\_Notice\\_D14WL\\_E S.pdf](http://bd.dosatron.com/Products_Products/Manuals_Notices/ES/Manual_Notice_D14WL_E S.pdf)
- EMPSSAPAL S.A. (2016). *Manual de Operaciones & Mantenimiento Planta de Filtración Lenta de Miskiunu -Santo Tomas—Provincia de Chumbivilcas -Cusco*.
- Fernandez Alba, A. R., Letón García, Pedro, Rosal García, R., Dorado Valiño, M., Villar Fernández, S., & Sanz García, J. M. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales* [Informe de vigilancia tecnológica]. Fundación para el conocimiento madri+d CEIM.  
[https://www.madrimasd.org/uploads/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/VT2\\_Tr atamientos\\_avanzados\\_de\\_aguas\\_residuales\\_industriales.pdf](https://www.madrimasd.org/uploads/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/VT2_Tr atamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf)
- Fiessinger, F., Cases, J. M., & Bersill, N. (1977). *Uso de polímeros de hidróxido de aluminio para la coagulación del agua*.
- Fuentes Rivas, R. M., Ramos Leal, J. A., Jimenez Moleon, M. del C., & Esparza Soto, M. (2015). *Caracterización de la materia orgánica disuelta en agua subterránea del Valle de Toluca*

- mediante espectrofotometría de fluorescencia 3D. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 31(3), 253–264.
- Gjessing, E. T., Matilainen, A., Lahtinen, T., Hed, L., Bhatnagar, A., & Sillanpää, M. (2011). *An overview of the methods used in the characterisation of natural organic matter (NOM) in relation to drinking water treatment*. Cromosphere.
- Jáuregui, B. (2019). *Diseño hidraulico de una bocatoma en el río Mayobamba para el mejoramiento del sistema de irrigacion Ccecca, Ishua y Huaycahuacho* [Universidad Nacional Agraria la Molina]. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3901/jauregui-jauregui-bruno-gabriel.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Jiménez Moleon, B. E. (2001). *La contaminación ambiental de México: Causas, efectos y tecnología apropiada*. Limusa Noriega Editores.
- <https://books.google.com.pe/books?id=8MVxlyJGokIC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- Kettab, A. (1992). *Traitement Des Eaux*.
- Lorenzo Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. *Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar*, XL(2), 10–17.
- Malakootian, M., & Fatehizadeh, A. (2010). Color removal from water by coagulation/caustic soda and lime. *Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Kerman University of Medical Sciences*, 7(3), 267–272.
- Márquez Canosa, E., Beato Fernández, O., Rodríguez Fernández, D., & Herrera Vasconcelos, T. (1994). *Uso de floculantes nacionales en la potabilización de aguas superficiales*. 15(2).
- Melo Parra, A., & Herrera Delgado, J. S. (2016). *Diseño y construcción de una planta piloto para el tratamiento de agua potable en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia* [Tesis de Grado, Universidad Católica de Colombia].

- <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14034/4/Proyecto%20de%20grado%20-%20Dise%C3%B1o%20y%20construcci%C3%B3n%20de%20una%20PTAP.pdf>
- Ministerio de Salud. (2011). Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. *Dirección General de Salud Ambiental, 1*.
- [http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/Reglamento\\_Calidad\\_Agua.pdf](http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/Reglamento_Calidad_Agua.pdf)
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006). *Reglamento Nacional de Edificaciones*.
- [https://www3.vivienda.gob.pe/Direcciones/Documentos/RNE\\_Actualizado\\_Solo\\_Saneamiento.pdf](https://www3.vivienda.gob.pe/Direcciones/Documentos/RNE_Actualizado_Solo_Saneamiento.pdf)
- Mott Robert, L. (1996). *Mécanica de fluidos aplicada*. Prentice - Hall Hispanoamericana.
- Norma Mexicana Análisis de agua. (2001). *Análisis de agua—Determinación de color Platino Cobalto en aguas Naturales, Residuales y Residuales tratadas—Métodos de prueba*.
- <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa045-01.pdf>
- Norma OS. 010. (2006). *Reglamento Nacional de Edificaciones (Vol. 1)*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. <https://ww3.vivienda.gob.pe/ejes/vivienda-y-urbanismo/documentos/Reglamento%20Nacional%20de%20Edificaciones.pdf>
- Norma OS. 020. (2006). *Reglamento Nacional de Edificaciones (1a ed.)*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. <https://ww3.vivienda.gob.pe/ejes/vivienda-y-urbanismo/documentos/Reglamento%20Nacional%20de%20Edificaciones.pdf>
- Osorio Trujillo, A. F., & Martínez Cajigas, M. E. (2018). Validación de un método para el análisis de color real en agua. *Revista de la Facultad de Ciencias, 7(1)*, 143–155.
- <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v7n1.68086>
- Pacheco Ancco, P. H., & Zapana Mamani, K. F. (2018). *Evaluación de los parámetros en el proceso de clarificación de aguas de la subcuenca del Río Yura en la zona la Caleta para la potabilización de aguas de la Jass-Vitor* [Tesis de Grado, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa].
- <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/7572>
- Packham, R. F. (1964). *Studies of Organic in Natural Water*. Proc. SOC. Water Treat.

- Parrado Dávila, C. C. (2017). *Implementación de planta a escala para tratamiento de agua potable con fines académicos para el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Piloto de Colombia* [Tesis de Grado, Universidad Piloto de Colombia].  
<http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/4933>
- Pérez de la Cruz, F. J., & Urrea Mallebrera, J. (2011). Abastecimientos de agua. Tema 6 – Coagulación y floculación. *Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela de Ingeniería de Caminos y de Minas*.  
[https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6019/mod\\_resource/content/1/Tema\\_06\\_COAGULACION\\_Y\\_FLOCULACION.pdf](https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6019/mod_resource/content/1/Tema_06_COAGULACION_Y_FLOCULACION.pdf)
- Pérez Parra, J. A. (1981). *Manual de Tratamiento de Aguas*. Universidad Nacional de Colombia.  
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2056>
- Restrepo Osorno, H. A. (2009). *Evaluación del Proceso de Coagulación—Floculación de una Planta de Tratamiento de Agua Potable*. Universidad Nacional de Colombia.  
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2561>
- Rodríguez Salcedo, C. F. (2008). *Uso y control del Proceso de Coagulación en Plantas de Tratamiento de Agua Potable* [Tesis de Grado, Universidad de Sucre].  
<https://repositorio.unisucre.edu.co/bitstream/handle/001/298/628.162R696.pdf;jsessionid=58F21EA8C1C1F4990896954E69DFBA4C?sequence=2>
- Romero Rojas, J. A. (2000). *Calidad del Agua* (2a ed.). Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sharp, E. L., Parsons, S. A., & Jefferson, B. (2006). *Seasonal variations in natural organic matter and its impact on coagulation in water treatment*. 363, 183–194.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.05.032>
- Sillanpää, M. (2015). *Natural Organic Matter in Water Characterization and Treatment Methods*. Lappeenranta University of Technology.  
[https://books.google.com.pe/books?hl=fr&lr=&id=\\_57vAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=General+Introduction,%E2%80%9D+in+Natural+Organic+Matter+in+Water,.&ots=kpcoZb9uh3](https://books.google.com.pe/books?hl=fr&lr=&id=_57vAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=General+Introduction,%E2%80%9D+in+Natural+Organic+Matter+in+Water,.&ots=kpcoZb9uh3)



&sig=RIZNXZIYIK7aDWmPpCiLgfoq9E#v=onpage&q=General%20Introduction%2C%E2%80%9D%20in%20Natural%20Organic%20Matter%20in%20Water%2C.&f=false

Steinberg, C. E. W., & Münster, U. (1985). *Geochemistry and ecological role of humic substances in lakewater. En: Humic substances in soil, sediment and water. Geochemistry, isolation and characterisation.* 105–145.

Vargas, L. (2004). *Tratamiento de Agua para Consumo Humano—Plantas de Filtración Lenta* (Vol. 1).

Water Research Institute. (2000). *Comparador para evaluar el tamaño de floculos.*

Yanza López, J., Rivera Hernández, R., & Gómez Torres, L. (2019). Evaluación de FeCl<sub>3</sub> y PAC para la potabilización de agua con alto contenido de color y baja turbiedad. *Tecnológicas*, 22(45), 9–21. <https://doi.org/10.22430/22565337.1085>

Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones* (1a ed.). McGraw-Hill.

## ANEXO A

### LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE PARÁMETROS DE CALIDAD ORGANOLEPTICA DEL AGUA POTABLE

Parámetros	Unidad de medida	Límite máximo permisible
Olor	---	Aceptable
Sabor	---	Aceptable
Color	UCV escala Pt/Co	15
Turbiedad	UNT	5
pH	Valor de pH	6,5 a 8,5
Conductividad (25°C)	µmho/cm	1 500
Sólidos totales disueltos	mg/L	1 000
Cloruros	mg Cl /L	250
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> /L	250
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	500
Amoniaco	mg N/L	1,5
Hierro	mg Fe/L	0,3
Manganeso	mg Mn/L	0,4
Aluminio	mg Al/L	0,2
Cobre	mg Cu/L	2,0
Zinc	mg Zn/L	3,0
Sodio	mg Na/L	200

Nota : Adaptado del Reglamento de Calidad de agua potable (Ministerio de Salud, 2011)

## ANEXO B

### DATOS EXPERIMENTALES

Muestra 1										
Nº	Tipo de coagulante	Concentración (ppm)	Agitación lenta (rpm)	Color inicial	Color final	% Remoción de color	pH1	pH2	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)
1	-1	30	40	105	32	70.00	7.67	7.53	1.86	1.93
2	-1	30	50	105	29	72.00	7.67	7.49	1.86	1.89
3	-1	30	60	105	26	75.00	7.67	7.52	1.86	1.91
4	-1	40	40	105	13	88.00	7.67	7.16	1.86	2.38
5	-1	40	50	105	11	90.00	7.67	7.13	1.86	2.43
6	-1	40	60	105	15	86.00	7.67	7.12	1.86	2.41
7	-1	50	40	105	16	85.00	7.67	6.97	1.86	1.6
8	-1	50	50	105	17	84.00	7.67	7.04	1.86	1.57
9	-1	50	60	105	19	82.00	7.67	7.03	1.86	1.55
10	0	30	40	105	63	40.00	7.67	6.58	1.86	5.66
11	0	30	50	105	62	41.00	7.67	6.63	1.86	5.58
12	0	30	60	105	60	43.00	7.67	6.62	1.86	5.62
13	0	40	40	105	47	55.00	7.67	6.52	1.86	4.36
14	0	40	50	105	45	57.00	7.67	6.47	1.86	4.27
15	0	40	60	105	49	53.00	7.67	6.48	1.86	4.31
16	0	50	40	105	51	51.00	7.67	6.24	1.86	1.74
17	0	50	50	105	56	47.00	7.67	6.22	1.86	1.86
18	0	50	60	105	58	45.00	7.67	6.26	1.86	1.85
19	1	30	40	105	55	48.00	7.67	6.15	1.86	7.22
20	1	30	50	105	53	50.00	7.67	6.17	1.86	7.13
21	1	30	60	105	58	45.00	7.67	6.21	1.86	7.1
22	1	40	40	105	39	63.00	7.67	5.84	1.86	8.55
23	1	40	50	105	37	65.00	7.67	5.8	1.86	8.37
24	1	40	60	105	42	60.00	7.67	5.82	1.86	8.42
25	1	50	40	105	44	58.00	7.67	5.07	1.86	7.41

26	1	50	50	105	47	55.00	7.67	5.03	1.86	7.33
27	1	50	60	105	50	52.00	7.67	5.05	1.86	7.36

Muestra 2										
Nº	Tipo de coagulante	Concentración (ppm)	Agitación lenta (rpm)	Color inicial	Color final	% Remoción de color	pH1	pH2	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)
1	-1	30	40	90	28	69.00	7.45	7.18	1.21	1.98
2	-1	30	50	90	24	73.00	7.45	7.22	1.21	2
3	-1	30	60	90	23	74.00	7.45	7.19	1.21	2.03
4	-1	40	40	90	12	87.00	7.45	7.01	1.21	2.33
5	-1	40	50	90	7	92.00	7.45	6.97	1.21	2.27
6	-1	40	60	90	13	86.00	7.45	7.03	1.21	2.31
7	-1	50	40	90	14	84.00	7.45	6.73	1.21	1.57
8	-1	50	50	90	14	84.00	7.45	6.69	1.21	1.53
9	-1	50	60	90	17	81.00	7.45	6.71	1.21	1.55
10	0	30	40	90	54	40.00	7.45	6.31	1.21	5.73
11	0	30	50	90	52	42.00	7.45	6.34	1.21	5.7
12	0	30	60	90	50	44.00	7.45	6.37	1.21	5.72
13	0	40	40	90	42	53.00	7.45	6.28	1.21	1.23
14	0	40	50	90	41	55.00	7.45	6.28	1.21	1.2
15	0	40	60	90	44	51.00	7.45	6.3	1.21	1.2
16	0	50	40	90	46	49.00	7.45	6.04	1.21	1.34
17	0	50	50	90	45	50.00	7.45	6.05	1.21	1.32
18	0	50	60	90	47	48.00	7.45	6.04	1.21	1.4
19	1	30	40	90	46	49.00	7.45	6.1	1.21	6.87
20	1	30	50	90	42	53.00	7.45	6.08	1.21	6.86
21	1	30	60	90	49	46.00	7.45	6.11	1.21	6.84
22	1	40	40	90	35	61.00	7.45	5.71	1.21	8.19
23	1	40	50	90	31	66.00	7.45	5.67	1.21	8.18
24	1	40	60	90	37	59.00	7.45	5.69	1.21	8.14
25	1	50	40	90	37	59.00	7.45	4.73	1.21	7.57
26	1	50	50	90	40	56.00	7.45	4.77	1.21	7.53
27	1	50	60	90	42	53.00	7.45	4.76	1.21	7.56

Muestra 3										
Nº	Tipo de coagulante	Concentración (ppm)	Agitación lenta (rpm)	Color inicial	Color final	% Remoción de color	pH1	pH2	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)
1	-1	30	40	65	19	71.00	7.5	7.26	0.88	1.82
2	-1	30	50	65	18	72.00	7.5	7.25	0.88	1.79
3	-1	30	60	65	18	73.00	7.5	7.27	0.88	1.83
4	-1	40	40	65	8	88.00	7.5	7.04	0.88	2.22
5	-1	40	50	65	6	91.00	7.5	7.03	0.88	2.19
6	-1	40	60	65	9	86.00	7.5	7.05	0.88	2.25
7	-1	50	40	65	9	86.00	7.5	6.84	0.88	1.5
8	-1	50	50	65	9	86.00	7.5	6.85	0.88	1.4
9	-1	50	60	65	10	84.00	7.5	6.86	0.88	1.37
10	0	30	40	65	40	39.00	7.5	6.38	0.88	5.39
11	0	30	50	65	39	40.00	7.5	6.38	0.88	5.55
12	0	30	60	65	38	41.00	7.5	6.4	0.88	5.49
13	0	40	40	65	29	55.00	7.5	6.37	0.88	3.37
14	0	40	50	65	27	58.00	7.5	6.35	0.88	3.42
15	0	40	60	65	30	54.00	7.5	6.37	0.88	3.35
16	0	50	40	65	31	53.00	7.5	6.15	0.88	1.55
17	0	50	50	65	34	48.00	7.5	6.16	0.88	1.53
18	0	50	60	65	35	46.00	7.5	6.18	0.88	1.51
19	1	30	40	65	36	44.00	7.5	6.17	0.88	6.77
20	1	30	50	65	33	49.00	7.5	6.15	0.88	6.75
21	1	30	60	65	35	46.00	7.5	6.14	0.88	6.76
22	1	40	40	65	25	62.00	7.5	5.73	0.88	8.16
23	1	40	50	65	21	67.00	7.5	5.76	0.88	8.1
24	1	40	60	65	27	59.00	7.5	5.75	0.88	8.12
25	1	50	40	65	28	57.00	7.5	4.8	0.88	7.1
26	1	50	50	65	29	55.00	7.5	4.82	0.88	7.08
27	1	50	60	65	30	54.00	7.5	4.81	0.88	7.12

Fuente: Elaboración propia

## ANEXO C

### MATRIZ TRANSFORMADA CON VARIABLES DUMMY PARA EL TIPO DE COAGULANTE

Experiencia	Intercepto	Dosis de coagulante (ppm)	Agitación lenta (rpm)	PAC	PAC / FeCl
1	1	30	40	1	0
2	1	30	50	1	0
3	1	30	60	1	0
4	1	40	40	1	0
5	1	40	50	1	0
6	1	40	60	1	0
7	1	50	40	1	0
8	1	50	50	1	0
9	1	50	60	1	0
10	1	30	40	0	1
11	1	30	50	0	1
12	1	30	60	0	1
13	1	40	40	0	1
14	1	40	50	0	1
15	1	40	60	0	1
16	1	50	40	0	1
17	1	50	50	0	1
18	1	50	60	0	1
19	1	30	40	0	0
20	1	30	50	0	0
21	1	30	60	0	0
22	1	40	40	0	0
23	1	40	50	0	0
24	1	40	60	0	0
25	1	50	40	0	0
26	1	50	50	0	0
27	1	50	60	0	0
28	1	30	40	1	0
29	1	30	50	1	0
30	1	30	60	1	0
31	1	40	40	1	0
32	1	40	50	1	0
33	1	40	60	1	0
34	1	50	40	1	0
35	1	50	50	1	0
36	1	50	60	1	0
37	1	30	40	0	1
38	1	30	50	0	1

39	1	30	60	0	1
40	1	40	40	0	1
41	1	40	50	0	1
42	1	40	60	0	1
43	1	50	40	0	1
44	1	50	50	0	1
45	1	50	60	0	1
46	1	30	40	0	0
47	1	30	50	0	0
48	1	30	60	0	0
49	1	40	40	0	0
50	1	40	50	0	0
51	1	40	60	0	0
52	1	50	40	0	0
53	1	50	50	0	0
54	1	50	60	0	0
55	1	30	40	1	0
56	1	30	50	1	0
57	1	30	60	1	0
58	1	40	40	1	0
59	1	40	50	1	0
60	1	40	60	1	0
61	1	50	40	1	0
62	1	50	50	1	0
63	1	50	60	1	0
64	1	30	40	0	1
65	1	30	50	0	1
66	1	30	60	0	1
67	1	40	40	0	1
68	1	40	50	0	1
69	1	40	60	0	1
70	1	50	40	0	1
71	1	50	50	0	1
72	1	50	60	0	1
73	1	30	40	0	0
74	1	30	50	0	0
75	1	30	60	0	0
76	1	40	40	0	0
77	1	40	50	0	0
78	1	40	60	0	0
79	1	50	40	0	0
80	1	50	50	0	0
81	1	50	60	0	0



## ANEXO D

### MONITOREO DEL CAUDAL EN LA CAPTACION DE MISKI UNU PARA EL 2020

<b>MONITOREO DE CAUDAL (L/s) EN TEMPORADA DE LLUVIAS EN LA CAPTACION DE MISKIUNU PARA EL AÑO 2020</b>						
<b>DIA</b>	<b>OCTUBRE</b>	<b>NOVIEMBRE</b>	<b>DICIEMBRE</b>	<b>ENERO</b>	<b>FEBRERO</b>	<b>MARZO</b>
1	3.21	6.80	6.60	6.90	6.18	5.61
2	3.00	6.70	6.70	7.00	6.25	5.44
3	3.47	6.60	6.60	6.70	6.10	5.44
4	3.02	6.70	6.60	7.10	6.23	5.42
5	3.37	6.60	6.50	7.10	6.17	5.41
6	3.31	6.60	6.60	6.70	6.18	5.33
7	3.45	6.60	6.60	7.20	6.23	5.40
8	2.84	6.70	6.60	7.20	6.23	5.48
9	2.73	6.70	6.70	7.30	5.87	5.50
10	2.75	6.80	6.70	7.40	6.08	5.52
11	3.02	6.70	6.60	7.20	6.02	5.53
12	3.09	6.50	6.50	7.40	5.59	5.41
13	3.14	6.60	6.60	7.20	6.00	5.42
14	3.04	6.50	6.70	7.40	5.81	5.18
15	2.85	6.50	6.50	7.20	5.51	5.34
16	2.89	6.40	6.50	7.10	5.50	5.33
17	3.09	6.40	6.80	7.50	5.60	5.29
18	3.17	6.50	6.90	7.20	5.55	5.31
19	3.54	6.50	6.90	7.30	5.60	5.33
20	3.50	6.60	6.90	6.90	5.57	5.27
21	3.55	6.40	7.00	6.70	5.59	5.26
22	3.40	6.50	7.00	6.80	5.63	5.40
23	3.29	6.60	7.10	7.40	5.58	5.41
24	3.23	6.50	7.10	7.40	5.61	5.23
25	3.47	6.60	7.10	6.80	5.52	4.99
26	3.52	6.60	7.20	6.70	5.50	5.13
27	3.42	6.60	7.10	6.80	5.55	5.22
28	3.29	6.70	7.10	6.50	5.41	5.32
29	3.23	6.60	7.00	6.70	5.84	5.12
30	3.09	6.70	-	6.60	5.87	4.88
31	3.11	6.60	-	6.50	-	5.25
<b>PROMEDIO</b>	3.20	6.59	6.79	7.03	5.81	5.33
Caudal promedio para temporada de lluvias o avenidas (Diciembre - Mayo)						5.79

<b>MONITOREO DE CAUDAL (L/s) EN TEMPORADA DE ESTIAJE EN LA CAPTACION DE MISKIUNU PARA EL AÑO 2020</b>						
<b>DIA</b>	<b>ABRIL</b>	<b>MAYO</b>	<b>JUNIO</b>	<b>JULIO</b>	<b>AGOSTO</b>	<b>SETIEMBRE</b>
1	5.50	2.44	2.88	1.84	2.74	3.09
2	4.20	2.47	2.75	1.85	2.90	3.29
3	5.30	2.55	3.03	1.78	3.23	3.07
4	3.30	2.70	3.15	1.79	3.48	3.16
5	3.20	2.75	2.79	1.59	3.02	3.25
6	3.40	2.80	2.79	1.65	3.78	3.11
7	3.10	2.99	2.81	1.82	3.58	3.09
8	3.20	3.01	2.71	1.74	3.54	3.16
9	3.00	3.05	2.72	1.42	3.44	3.07
10	2.80	3.27	2.80	1.46	3.59	3.12
11	2.50	3.02	2.88	4.39	3.40	3.10
12	2.30	2.82	2.74	3.57	2.99	2.84
13	2.20	2.21	2.77	2.43	3.28	2.54
14	1.80	2.27	2.94	2.91	3.32	2.59
15	1.90	2.33	2.91	2.89	6.79	2.47
16	1.90	2.43	2.78	2.98	3.32	2.47
17	2.00	2.53	2.92	2.99	3.35	2.45
18	1.60	2.54	2.90	2.86	3.38	2.49
19	1.50	2.62	2.96	3.07	3.37	2.47
20	2.00	2.51	3.00	2.79	3.32	2.54
21	2.30	2.81	3.02	2.72	3.23	2.22
22	2.40	2.71	2.23	2.60	4.69	2.12
23	1.90	2.72	2.43	2.44	2.60	2.16
24	1.80	2.53	2.88	2.48	3.51	2.56
25	2.00	2.50	2.76	2.38	3.33	2.37
26	1.90	2.42	3.05	2.31	3.12	2.34
27	1.70	2.48	3.07	2.44	3.45	2.37
28	1.50	2.59	2.54	3.07	3.20	2.24
29	1.70	2.54	2.97	3.16	3.22	2.55
30	1.50	2.55	2.91	3.29	3.25	2.67
31	-	2.52	2.87	-	3.38	-
<b>PROMEDIO</b>	2.51	2.64	2.84	2.49	3.45	2.70
Caudal promedio para temporada de sequía (Junio - Noviembre)						2.77

<b>Caudal promedio anual (L/s)</b>	<b>4.28</b>
------------------------------------	-------------

Fuente: Elaboración propia

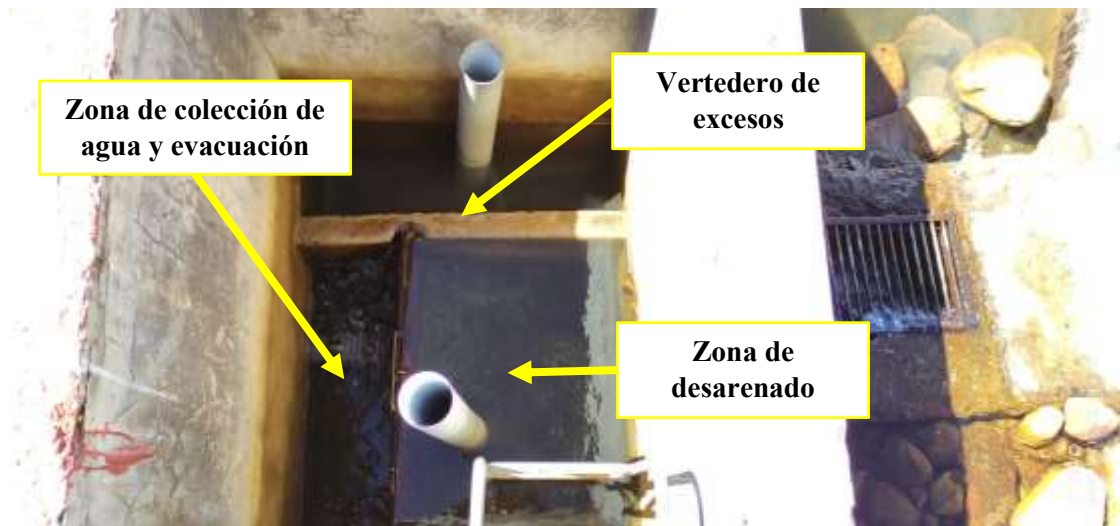
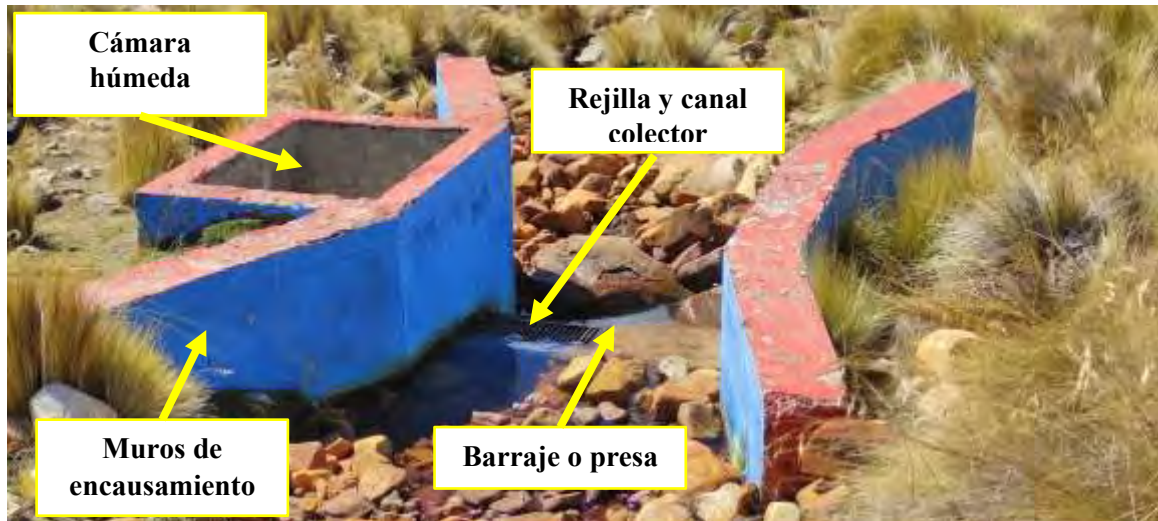
## ANEXO E

### FICHA DE EVALUACIÓN DE LA CAPTACIÓN Y BOCA TOMA DEL SISTEMA

<b>CAPTACIÓN O BOCA TOMA DEL SISTEMA</b>					
<b>Ubicación</b>	Se constató su ubicación a una distancia de 12.8 Km de la planta de tratamiento de agua Miskiunu a una cota de 4333 msnm; con coordenadas geográficas en grados, minutos y segundos de 14°20'06" S 72°20'16"N.				
<b>Tipo de Captación</b>	Superficial	<b>Tipo de Toma</b>		Tipo tirolesa	
<b>ELEMENTOS DE CAPTACIÓN</b>					
Se verificó in situ los elementos de la toma de agua, asimismo se verificó el funcionamiento y su dimensionamiento.					
<b>Barraje o presa</b>	<b>Función</b>	Aumenta el nivel de agua en el río para garantizar el ingreso del agua por la rejilla			
	<b>Dimensione</b>	<b>Largo:</b>	1.51m	<b>Ancho:</b>	0.70 m
	<b>Material</b>	Concreto armado			
<b>Rejilla</b>	<b>Función</b>	Impide el ingreso de piedras o materiales de tamaño mayor a 5 cm de diámetro. Están ubicadas en dirección de la corriente de agua.			
	<b>Ubicación</b>	Se ubica en la parte superior de la presa y en dirección perpendicular al flujo del riachuelo.			
	<b>Material</b>	Barras de hierro corrugado			
	<b>Separación entre barras</b>	Tiene separación de 5 cm.			
	<b>Dimensión</b>	<b>Largo:</b>	75 cm	<b>Ancho:</b>	30 cm
<b>Muros de encauzamiento</b>	<b>Función</b>	Encauzar las aguas para que ingresen al canal colector			
	<b>Material</b>	Concreto armado			
	<b>Longitud de alero</b>	1.60 m			
	<b>Distancia mínima entre muros:</b>	1.51 m	<b>Distancia máxima entre muros:</b>	2.65 m.	
<b>Canal colector (aducción)</b>	<b>Función</b>	Recibe el agua a través de la rejilla			
	<b>Tipo de Sección</b>	Rectangular			
	<b>Dimensión del canal</b>	<b>Largo:</b>	1.0 m	<b>Ancho:</b>	0.21 m
<b>Cámara húmeda</b>	<b>Función</b>	Colectar el agua proveniente del canal colector y retener partículas menores como arenillas, grava y/o cascajo.			
	<b>Altura</b>	1.14 m	<b>Largo / Ancho</b>	1.18 m	0.98 m
	<b>Elementos dentro de la cámara.</b>				

<b>Vertedero de excesos:</b> Hecha de concreto sirve para eliminar el exceso de agua captada.				
<b>Largo</b>	1.0 m	<b>Ancho</b>	0.30 m	
<b>Zona de desarenado:</b> Sirve para retener partículas pequeñas que pasaron la rejilla.				
<b>Altura:</b>	44 cm	<b>Largo / Ancho</b>	66 cm	81 cm
<b>Zona de colectora de agua:</b> Colecta el agua por rebose proveniente de la zona de desarenado.				
<b>Altura:</b>	44 cm	<b>Largo / Ancho</b>	66 cm	32 cm
<b>Zona de evacuación:</b> Sirve para evacuar el agua y ser conducida por una línea de conducción con una tubería de PVC y diámetro de 3'' hasta la planta de tratamiento.				

**Tomas fotográficas**



Fuente: Elaboración propia

## ANEXO F

### FICHA DE EVALUACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

#### POTABLE MISKIUNU

<b>PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE MISKIUNU</b>						
---	--	--	--	--	--	--

<b>Ubicación</b>	Se constató que se ubica al costado de la carretera Santo Tomas - Chamaca, en una ladera del sector de Qenqo muy lejos de ríos o riachuelos que pueden generar inundaciones, a una distancia de 4 km de la población de Santo Tomas con una cota de 3800 msnm; con coordenadas geográficas en grados, minutos y segundos de 14°27'29" S 72°03'51" O.					
------------------	--	--	--	--	--	--

<b>Tipo de Planta</b>	convencional con tratamiento físico por gravedad	<b>Largo/Ancho</b>	32.10 m	20.41 m	<b>Área total:</b>	655 m <sup>2</sup>
-----------------------	--	--------------------	---------	---------	--------------------	--------------------

#### Toma fotográfica



#### ETAPAS DE TRATAMIENTO

Se verifico in situ el funcionamiento y dimensiones de cada etapa y/o estructura.

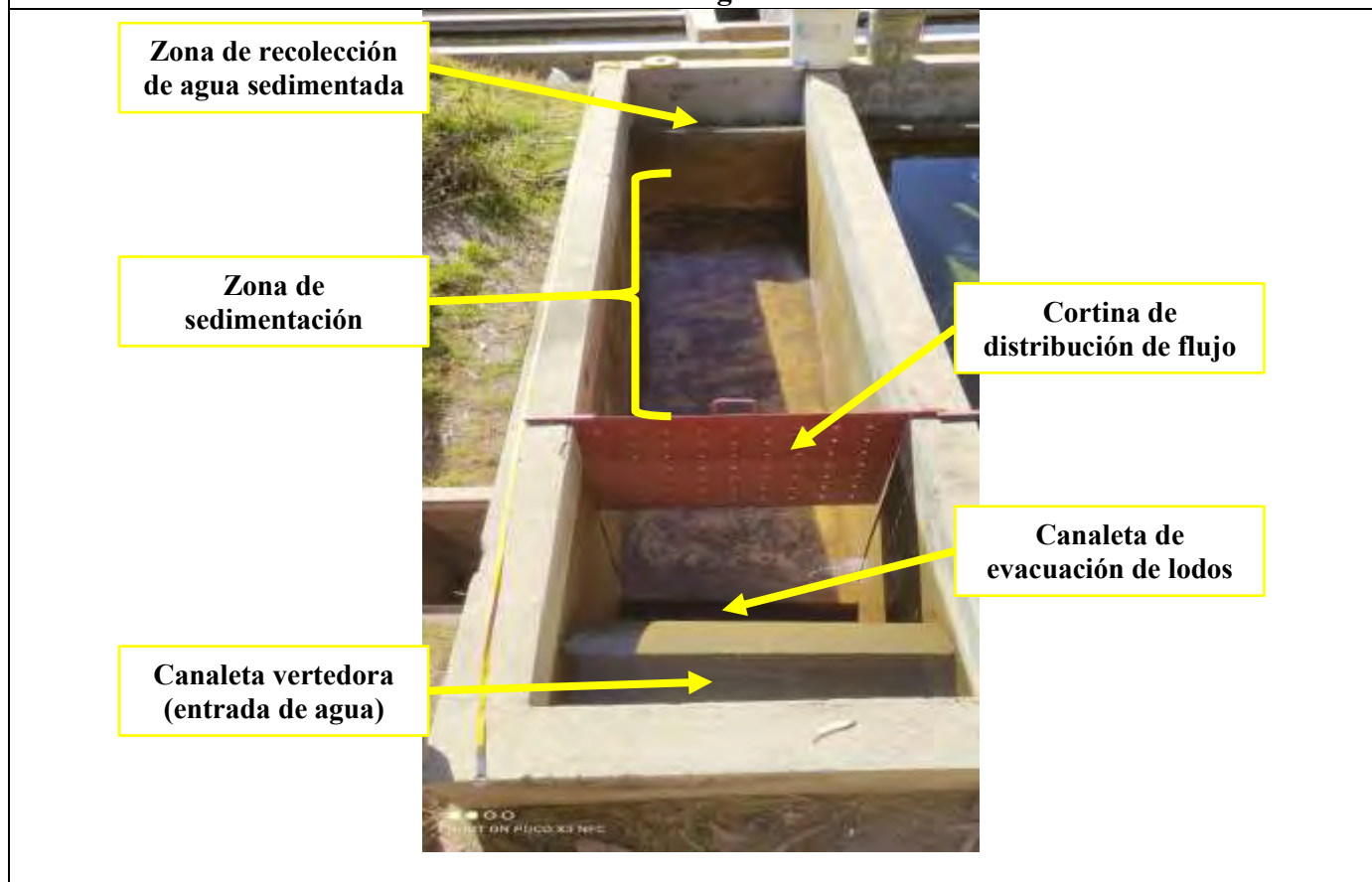
#### SEDIMENTADOR

<b>Función</b>	Recepcionar y elimina partículas en suspensión por decantación dando como resultado un valor de turbiedad menor a la inicial.					
<b>Número de unidades</b>	02	<b>Largo</b>	5.30 m	<b>Ancho</b>	2.47 m	
<b>Forma</b>	Rectangular	<b>Material de construcción</b>		Concreto armado		
<b>Elementos del sedimentador</b>						

<b>Zona de recepción de agua o Estructura de entrada</b>	<b>Función</b>	Recepcionar el agua que llega a la planta reduciendo su velocidad y generando una distribución uniforme del flujo en toda la estructura.			
	<b>Elementos presentes</b>				
	<u>Canaleta vertedora:</u> se encuentra al ingreso y cubre todo el ancho de la unidad del sedimentador encargada de recepcionar el agua y disminuir la velocidad del flujo por retención y por rebose pasar a la cortina de distribución de flujo				
	<b>Altura</b>	0.30 m	<b>Largo/Ancho</b>	0.97 m	0.30 m
	<u>Cortina de distribución de flujo:</u> se encuentra después de la canaleta vertedora es una placa de metal que tiene perforaciones circulares que ayudan a retener el flujo para ser distribuido en toda la sección de la estructura.				
	<b>Dimensiones de la placa</b>	<b>Largo</b>	0.96 m	<b>Ancho</b>	0.70 m
	<b>Numero de perforaciones</b>	42	<b>Forma y dimensión de las perforaciones</b>	Circulares de 1 pulg de diámetro	
	<b>Distancia de la canaleta vertedora a la cortina</b>			0.80 m.	
	<b>Distancia del fondo del sedimentador al orificio más bajo de la cortina:</b>			0.84 m	
	<b>Distancia de la superficie del sedimentador al orificio más alto de la cortina:</b>			0.08 m	
<b>Zona de sedimentación</b>	<b>Función</b>	Sedimentar los sólidos suspendidos en el agua.			
	<b>Altura máxima</b>	1.70 m.	<b>Altura mínima</b>	1.0 m.	
	<b>Largo</b>	3.40 m.	<b>Ancho</b>	1.0 m.	
<b>Zona de recolección y evacuación de lodos</b>	<b>Función</b>	Es donde se depositan las partículas sedimentadas, tiene una pendiente de 10 % hacia la parte más baja del sedimentador donde se encuentra el canal dicho canal tiene una pendiente de 5% hacia la válvula de evacuación de lodos facilitando la limpieza y remoción de lodos.			
		<b>Largo</b>	1.0 m.	<b>Ancho</b>	0.20 m.

	<b>Dimensión del canal de evacuación</b>	Alto	0.20 m.	<b>Válvula de purga</b>	4 pulg.
<b>Zona de recolección de agua sedimentada</b>	<b>Función</b>	Recolecta el agua sedimentada mediante un vertedero rectangular con bordes lisos que permite la recolección uniforme y el vertimiento del agua a una canaleta para luego evacuar el agua a la siguiente etapa de tratamiento.			
	<b>Altura de la canaleta hasta el punto de vertimiento:</b>				0.31 m
	<b>Dimensión de la canaleta</b>	Largo	0.97 m.	Ancho	0.26 m.
	<b>Distancia del punto de vertimiento a la superficie del sedimentador</b>				0.30 m.
<b>Espesor del vertedero</b>			0.15 m.		

**Toma fotográfica**



<b>PREFILTRO</b>					
<b>Función</b>	Retener partículas en suspensión que no hayan sedimentado su turbiedad máxima a la entrada del prefiltro fue de 0.5 - 1.5 NTU a lo largo del año.				
<b>Número de unidades</b>	02	<b>Numero de compartimentos por unidad</b>	03	<b>Largo/Ancho</b>	5.9 m / 6.05 m
<b>Forma:</b>	Rectangular	<b>Material de construcción:</b>	Concreto armado	<b>Altura variable</b>	1.90 m a 2.35 m
Zonas con las que cuenta el prefiltro					
<b>Canal de distribución de caudal</b>	<b>Función</b>	Se encarga de recepcionar el agua proveniente del sedimentador y distribuye el caudal del agua en todo el ancho de la unidad del pre-filtro con la ayuda de un muro armado con bloques de concreto.			
	Elementos presentes				
	<u>Canal de recepción:</u> se encuentra al ingreso y cubre todo el ancho de la unidad del pre-filtro encargada de recepcionar el agua y disminuir la velocidad del flujo por retención, esta unidad presenta una pendiente de 5% hacia el punto de purga que facilita su limpieza y remoción de lodos.				
	Altura	1.90 m	Largo/Ancho	6.05 m	0.60 m
	<u>Muro distribuidor de caudal:</u> Se encarga de contener el agua del canal para luego distribuir el caudal del agua de forma uniforme en toda la sección de pre-filtro mediante los orificios que presenta este muro.				
	Espesor	0.08 m	Largo/Ancho	6.08 m	0.57 m
<b>Zona de prefiltración</b>	<b>Función</b>	Es donde se da el proceso físico de retención de sólidos en suspensión, posee 3 secciones de lecho filtrante cada sección se encuentra separada por muros distribuidores de caudal.			
	<b>Número de Secciones</b>	03	Primera sección grava	3 - 4 cm	
			Segunda sección grava	2- 3 cm	
			Tercera sección grava	1 - 2 cm	
	Purga en cada compartimiento para lavados hidráulicos		si	Pendiente a la purga	2%
<b>Zonal de colección de agua pre filtrada</b>	<b>Función</b>	Es donde se colecta el agua pre filtrada para pasar a la siguiente etapa.			
	Elementos presentes				



	<p><b>Canal de recepción:</b> se encuentra a la salida de la zona de prefiltración y cubre todo el ancho de la unidad del prefiltro encargada de recibir el agua prefiltrada para luego por rebose verter a un colector de agua. Esta unidad presenta una pendiente de 5% hacia el punto de purga que facilita su limpieza y remoción de lodos.</p>			
Altura	1.90 m	Largo/Ancho	6.05 m	0.60 m
	<p><b>Colector de agua prefiltrada:</b> Se encarga de coleccionar el agua de las dos unidades de prefiltración para luego evacuar el agua hacia la siguiente etapa de tratamiento.</p>			
Altura	0.70 m	Largo/Ancho	3.20 m	0.60 m

### Toma fotográfica



FILTRO LENTO					
<b>Función</b>	Retener partículas en suspensión del agua que proviene de la prefiltración, la turbiedad al ingreso del filtro lento normalmente oscila entre 0.5 a 1.5 UNT a lo largo del año, en temporada de lluvias el color del agua oscila entre 30 a 100 UPC a la entrada y salida de la unidad. La limpieza del lecho filtrante se realiza por raspado de una profundidad de 5cm cada 15 días.				
<b>Número de unidades</b>	02	<b>Altura</b>	3.25 m.	<b>Largo/Ancho</b>	3.50 m/4.65 m
<b>Numero de capas filtrantes</b>	04	Espesor de la 1ra capa	15 cm	Tamaño de la grava 1ra capa	19 a 50 mm
		Espesor de la 2da capa	5 cm	Tamaño de la grava 2da capa	9.5 a 19 mm

	Espesor de la 3ra capa	5 cm	Tamaño de la grava 3ra capa	3 a 9.5 mm
	Espesor de la 4ta capa	1 m	Tamaño de la grava 4ta capa	0.2 a 0.3 mm

**Zonas con las que cuenta el filtro lento**

<b>Zona de recepción de agua pre filtrada</b>	<b>Función</b>	Colectar el agua proveniente del prefiltro en una canaleta que se encuentra interconectada con las dos unidades de filtración lenta, las tuberías que vierten el agua en los filtros lento trabajan de forma alternada.			
	Altura	1.50 m.	Largo/Ancho	0.60 m	0.60 m
	diámetro de las tuberías vertedoras				4 pulgadas

<b>Zona de colección de agua filtrada</b>	<b>Función</b>	la colección del agua se realiza mediante un ramal de tuberías perforadas que se ubican en el fondo del filtro lento, el agua pasa por estas tuberías y se dirige a la cámara colectora de agua filtrada donde por un vertedero el agua pasa a la zona de evacuación de agua para almacenamiento.
---	----------------	---

**Toma fotográfica**



Fuente: Elaboración propia

**DESINFECCIÓN**

<b>Función</b>	Eliminación de bacterias y/o microorganismos mediante la dosificación de hipoclorito de calcio en solución, esta dosificación se realiza a la salida del filtro lento en el canal colector de agua filtrada antes de ser evacuada a la unidad de almacenamiento.		
<b>Tipo de dosificación</b>	Gravedad por goteo	volumen de tanque	600 L

**Toma Fotográfica**



Fuente: Elaboración propia

## ANEXO G

### ANÁLISIS DE METALES EN EL AGUA EN LA PTAP MISKIUNU

#### INFORME DE ENSAYO N° MA2412190040

A Solicitud de	EPS EMPSSAPAL S.A.
Dirección del Solicitante	AV. CONFEDERACIÓN NRO. 556 (EN LOCAL DE EMPSSAPAL PTA PRINCIPAL) - SICUANI - CANCHIS -CUSCO
Cantidad de Muestras	03 envases de plástico
Instrucciones de Ensayo	ANÁLISIS INSTRUMENTAL
Plan de Muestreo N°	—
Fecha de Recepción	24/12/2019 09:49
Fecha de ejecución del ensayo	24/12/2019 al 30/12/2019
Cotización de Análisis N°	1910-016_Vr01
Cadena de Custodia N°	130-19-W

#### PARÁMETROS INSTRUMENTALES

#### RESULTADOS DE ENSAYO

CÓDIGO DE LABORATORIO		METALES TOTALES POR ICP-OES				
		W-1227-19		W-1228-19		W-1229-19
IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA		SAIDA DE FILTRO LENTO	SAIDA DE FILTRO LENTO	SAIDA DE FILTRO LENTO	SAIDA DE FILTRO LENTO	RED DE DISTRIBUCION
		PTAP TUCURI	PTAP MISKIUNU	PTAP MISKIUNU	PTAP MISKIUNU	MISKIUNU (L.E. 94248)
MÉTODO DE MUESTREO BASADO EN						
FECHA DE MUESTREO		19/12/2019	19/12/2019	19/12/2019	19/12/2019	19/12/2019
HORA DE MUESTREO		10:50	09:40	09:40	09:50	09:50
COORDENADAS		18 L	18 L	18 L	18 L	18 L
		ESTE	ESTE	ESTE	ESTE	ESTE
		NORTE	NORTE	NORTE	NORTE	NORTE
Clasificación de Aguas		MATRIZ		MATRIZ		MATRIZ
		Agua para uso y Consumo Humano		Agua para uso y Consumo Humano		Agua para uso y Consumo Humano
		Agua Potable		Agua Potable		Agua Potable
ELEMENTOS	L.D.	L.C.	UNID	Resultado	Resultado	Resultado
Ag	0,006	0,02	mg/L	< 0,006	< 0,006	< 0,006
Al	0,02	0,08	mg/L	< 0,02	< 0,02	0,030
As	0,009	0,03	mg/L	< 0,009	0,011	< 0,009
B	0,005	0,01	mg/L	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Ba	0,009	0,03	mg/L	< 0,009	< 0,009	< 0,009
Be	0,002	0,005	mg/L	< 0,002	< 0,002	< 0,002
Ca	0,12	0,37	mg/L	7,48	8,12	8,91
Cd	0,001	0,002	mg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Ce	0,004	0,01	mg/L	< 0,004	< 0,004	< 0,004
Co	0,002	0,007	mg/L	< 0,002	< 0,002	< 0,002
Cr	0,002	0,006	mg/L	< 0,002	< 0,002	< 0,002
Cu	0,002	0,005	mg/L	0,002	0,003	0,003
Fe	0,14	0,44	mg/L	< 0,14	< 0,14	< 0,14
Hg	0,001	0,002	mg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001
K	0,04	0,12	mg/L	0,480	0,27	0,58
Li	0,001	0,004	mg/L	< 0,001	0,001	0,002
Mg	0,03	0,08	mg/L	1,18	1,06	1,44
Mn	0,001	0,005	mg/L	< 0,001	< 0,001	0,002
Mo	0,008	0,02	mg/L	< 0,008	< 0,008	< 0,008
Na	0,12	0,37	mg/L	2,43	3,03	3,12
Ni	0,001	0,004	mg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001
P	0,14	0,46	mg/L	< 0,14	< 0,14	< 0,14
Pb	0,001	0,004	mg/L	0,003	< 0,001	0,004
Sb	0,003	0,01	mg/L	< 0,003	0,009	0,006
Se	0,005	0,02	mg/L	0,010	< 0,005	0,011
Si	0,03	0,1	mg/L	7,370	9,580	8,680
Sn	0,007	0,02	mg/L	< 0,007	0,008	< 0,007
Sr	0,001	0,002	mg/L	0,046	0,052	0,060
Ti	0,004	0,01	mg/L	< 0,004	< 0,004	< 0,004
Tl	0,001	0,002	mg/L	0,030	0,032	< 0,001
V	0,001	0,002	mg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Zn	0,05	0,15	mg/L	< 0,05	< 0,05	< 0,05

Nota: Tomado de (EMPSSAPAL S.A, 2016)

ANEXO H

CERTIFICADO DE ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO DE LA MUESTRA CON  
COLOR PREVIA AL PROCESO DE COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAAD DEL CUSCO  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
Av. de la Cultura 233 - Pabellón "C" Of. 106 1er. piso - Telefax: 224831 - Apartado Postal 921 - Cusco Perú



UNIDAD DE PRESTACIÓN DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO  
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA  
**INFORME DE ANÁLISIS**  
N00003-20-LAQ

**SOLICITANTE:** RODRIGO CAHUATA CORRALES  
**MUESTRA :** AGUA  
**FUENTE :** SISTEMA MISKI UNU / INGRESO PTAP  
**DISTRITO :** SANTO TOMAS  
**PROVINCIA :** CHUMBIVILCAS  
**REGION :** CUSCO  
**MUESTREADO :** DIEGO FERNANDO BORDA CHOQUE  
**FECHA M. :** 02/01/2020

**RESULTADO ANALISIS FISICOQUIMICO:**

Solidos suspendidos ppm	6.20
Solidos disueltos totales ppm	91.80
Materia Orgánica ppm	14.20
Alcalinidad ppm $\text{NaHCO}_3$	35.50

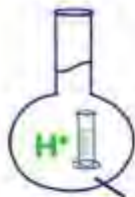
\* ANALISIS DEL AGUA, JEAN RODIER, 98EDICION  
Cusco, 08 de Enero 2020



LABORATORIO  
ANÁLISIS  
QUÍMICO  
RESPONSABLE DEL LABORATORIO  
DE ANÁLISIS QUÍMICO

## ANEXO I

### ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO PARA VALIDACIÓN DE RESULTADOS



# MC QUIMICALAB

De: Ing. Gury Manuel Cumpa Gutierrez  
LABORATORIO DE CIENCIAS NATURALES  
AGUAS, SUELOS, MINERALES Y MEDIO AMBIENTE

RUC N° 10465897711 - COVIDUC A4 - SAN SEBASTIÁN CEL: 974 673993 - 946 688776

**INFORME N°LO 0095-21**

#### ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DEL AGUA

**SOLICITA :**

Bachilleres de la Escuela Profesional de Ingeniería Química – UNSAAC:

- Diego Fernando Borda Choque.
- Rodrigo Cahuáta Corrales.

**TESIS :** "EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE MISKIUNU – SANTO TOMAS PARA LA ELIMINACION DE COLOR"

**DEPARTAMENTO :** CUSCO.

**MUESTRA :** AGUA TRATADA MISKIUNU.

**FECHA DE INFORME:** 10/03/21

#### **RESULTADOS:**

DETERMINACIONES	UNIDAD	
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	40
Alcalinidad Total $\text{HCO}_3^-$	mg/L	25
Materia Orgánica	mg/L	0.0

**MÉTODO DE ANÁLISIS:** Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales publicado conjuntamente por AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA), WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (WPCF).

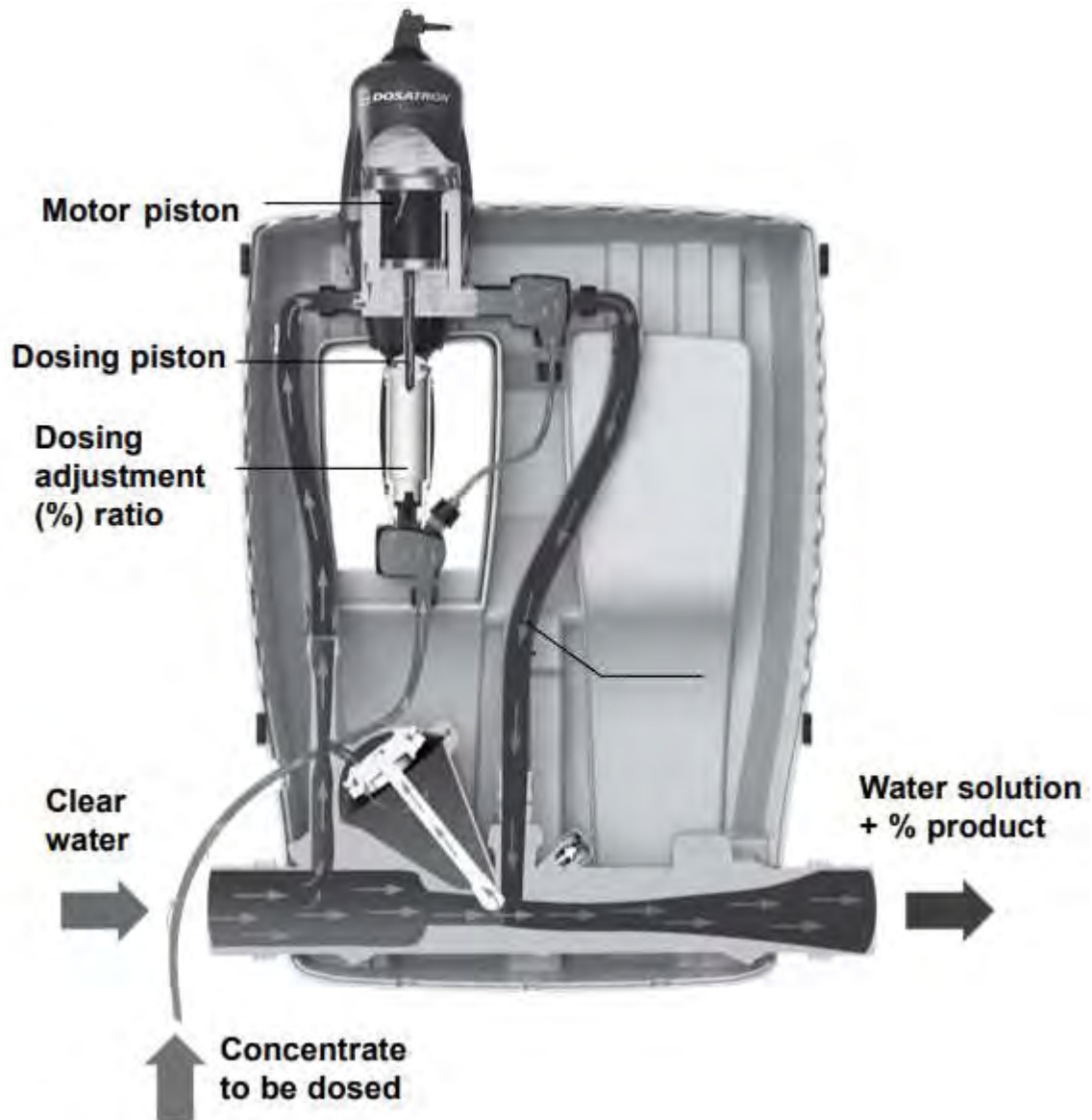
**NOTA:** Los resultados son válidos únicamente para la muestra analizada.



**MARIO CUMPA CAYURI**  
INGENIERO QUÍMICO  
REG. COLEGIO DE INGENIEROS N° 16196

## ANEXO J

### DOSIFICADOR HIDRAULICO PROPUESTO PARA LA DOSIFICACION DEL PAC



Fuente: (Dosatron International S.A.S, 2016)

## ANEXO K

### CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN Y DIMENSIONES DEL DOSIFICADOR

CHARACTERISTICS			
	D30WL30000	D30WL30000IE	D30WL5000
<b>Operating flow:</b>			
<b>Min. l/h - Max. l/h</b>	<b>8,000 - 30,000</b>		
US gpm min. - max.	35.2 - 132		
<b>Max. operating temperature:</b> ..... <b>40°C [104°F]</b>			
<b>Operating pressure:</b>			
<b>bars</b>	<b>0.5 - 8</b>	<b>0.5 - 6</b>	<b>0.5 - 8</b>
psi	7 - 116	7 - 87	7 - 116
<b>Dosing adjustable from the exterior:</b>			
<b>%</b>	<b>0.003 - 0.03</b>	<b>0.003 - 0.03</b>	<b>0.02 - 0.2</b>
Ratio	1/30,000 - 1/3,000	1/30,000 - 1/3,000	1/5000 - 1/500
<b>Concentrate injection flow:</b>			
<b>Min. l/h - Max. l/h</b>	<b>0.24 - 9</b>	<b>0.24 - 9</b>	<b>1.6 - 60</b>
US Fl. oz/min - MIN	0.135 - 5	0.135 - 5	0.9 - 33.8
US Fl. oz/min - MAX	0.001 - 0.04	0.001 - 0.04	0.007 - 0.26
<b>Connection:</b> ..... Thread DN80 BSP or flange DN80 PN10			
<b>Hydraulic motor capacity</b> (every two clicks of the piston i.e. one Cycle): about <b>0.53 l</b> [0.14 US Gallons]			
<b>IMPORTANT! The DOSATRON is not pre-set, please refer to the paragraph ADJUSTING THE DOSING</b>			

#### DIMENSIONS

Diameter: <b>cm</b> ["]	<b>22.3</b> [8 13/16]
Total height: <b>cm</b> ["]	<b>91.3</b> [36 3/4]
Overall width: <b>cm</b> ["]	<b>65.2</b> [25 11/16]
Weight: ± <b>kg</b> [lbs]	<b>15</b> [33.07]

**PARCEL COMPOSITION:** 1 DOSATRON/1 Dosatron regulator/  
1 suction hose for concentrate/1 strainer/2 Flanges/  
1 quick start guide

**PACKAGING DIMENSIONS:**

106 x 69 x 6 cm [41 47/64" x 27 11/64" x 10 15/64"]

**PARCEL WEIGHT:** Approx. 19 kg [~ 41.88 US lbs]

Fuente: (Dosatron International S.A.S, 2016)



## ANEXO L

### FOTOGRAFIAS DEL PROCESO DEL PROCESO DE COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN



Fotografía 1: Toma de muestra en la PTAP Miskiunu en zona de filtros lentos.



Fotografía 2: Registro de pH inicial de las muestras.



Fotografía 3: Registro de color verdadero inicial de las muestras.



Fotografía 4: Formación del floc para PAC, dosis: 40 ppm y 50 rpm.



Fotografía 5: Registro de pH final después del tratamiento por coagulación – floculación