

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS

**PROPUESTA DE MEJORA DE LA CALIDAD DEL AGUA FILTRADA
EN LA PTAP TUCUIRI MEDIANTE UN SISTEMA DE
COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN, SANTO TOMÁS, CHUMBIVILCAS**

PRESENTADO POR:

Br. ELIZABETH TTITO NUÑEZ

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO QUÍMICO**

ASESORA:

Dr. AMANDA ROSA MALDONADO FARFÁN

CUSCO - PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

La que suscribe, la asesora Amanda Rosa MALDONADO FARFÁN, quien aplica el software de detección de similitud a la tesis titulada: PROPUESTA DE MEJORA DE LA CALIDAD DEL AGUA FILTRADA EN LA PTAP TUCUIRI MEDIANTE UN SISTEMA DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN, SANTO TOMÁS, CHUMBIVILCAS

Presentado por: TTITO NUÑEZ ELIZABETH

DNI: 46418401

Para optar al Título Profesional de Ingeniero Químico.

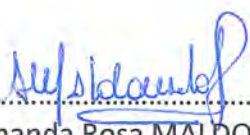
Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema de Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 9 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento. quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en condición de Asesora, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 17 de agosto de 2026


.....
Dra. Ing. Amanda Rosa MALDONADO FARFAN
DNI: 23822559
ORCID: 0000-0002-4870-7078

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio:
<https://unsaac.turnitin.com/viewer/submissions/oid:27259:615068907?locale=es-MX>

PROPUESTA DE MEJORA DE LA CALIDAD DEL AGUA FILTRADA EN LA PTAP TUCUIRI MEDIANTE UN SISTEMA DE ...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:615068907

Fecha de entrega

17 ago 2026, 7:55 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

17 ago 2026, 8:04 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

PROPUESTA DE MEJORA DE LA CALIDAD DEL AGUA FILTRADA EN LA PTAP TUCUIRI MEDIANTE UNpdf

Tamaño del archivo

3.3 MB

142 páginas

31.976 palabras

155.815 caracteres

9% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 9%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

PRESENTACIÓN

Señor Decano 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 Titulada: **“PROPUESTA DE MEJORA DE LA CALIDAD DEL AGUA FILTRADA EN LA PTAP TUCUIRI MEDIANTE UN SISTEMA DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN, SANTO TOMÁS, CHUMBIVILCAS”** el cual tiene por objetivo mejorar la calidad del agua potable y previa aprobación favorable permitirá optar al título profesional de Ingeniero Químico.

Atentamente

Br. TTITO NUÑEZ, ELIZABETH

DEDICATORIA

El presente trabajo de tesis, se la dedico a nuestro padre JEHOVA por las múltiples bendiciones que ha derramado sobre mi persona, por guiarme y darme su fortaleza durante este tiempo.

A mi papá Fidel Ttito Sánchez y a mi mamá Ignacia Nuñez Quispe, por todo su amor, sus consejos y su apoyo incondicional en cada paso que di para la elaboración del trabajo de tesis.

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

A mis hermanos(as), Juan, Jorge y Eliana por brindarme sus consejos, dándome la fuerza para seguir adelante con mis metas y brindándome su apoyo incondicional.

Br. TTITO NUÑEZ, ELIZABETH

AGRADECIMIENTO

A nuestro Señor Jesucristo

A mis padres por el apoyo incondicional que me brindaron, muchas gracias por el apoyo para el cumplimiento de esta gran meta profesional.

A mi asesora Dr. Ing. Amanda Maldonado Farfán por su orientación 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 (EMPSSAPAL S.A) sede Santo Tomas, por permitirme desarrollar el presente trabajo de investigación en las instalaciones de la planta de tratamiento de agua potable Tucuri.

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

Br. TTITO NUÑEZ, ELIZABETH

ÍNDICE GENERAL

PRESENTACIÓN.....	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE GENERAL	V
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE APÉNDICES.....	XIII
ÍNDICE DE ANEXOS	XIV
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	XV
RESUMEN.	XVI
ABSTRACT.....	XVII
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.3.1 PROBLEMA GENERAL	3
1.3.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS	3
1.4 OBJETIVOS	3
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.5.1 JUSTIFICACIÓN TEORICA	4

1.5.2	JUSTIFICACIÓN PRACTICA	4
1.5.3	JUSTIFICACIÓN SOCIAL	5
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.....		6
2.1	ANTECEDENTES	6
2.1.1	INTERNACIONALES.....	6
2.1.2	NACIONALES.....	7
2.2	BASES TEÓRICAS.....	10
2.2.1	AGUA CRUDA:	10
2.2.2	AGUA POTABLE.....	12
2.2.3	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE	16
2.2.4	VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS FILTROS LENTOS.....	23
2.2.5	FACTORES QUE MODIFICAN EL FUNCIONAMIENTO DEL FILTRO LENTO.....	25
2.2.6	PARÁMETROS HIDRAULICOS DE DISEÑO	26
2.2.7	MODELOS DE FLUJO HIDRAULICO	27
2.2.8	TRAZADORES.....	28
2.2.9	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE TUCUIRI	30
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS		41
3.1	MUESTRA	41
3.2	MATERIALES	41
3.1	UBICACIÓN GEOGRAFICA.....	41
3.2	DISEÑO METODOLÓGICO	43
3.3	MÉTODOS	44
3.3.1	Características de la planta Tucuiiri y unidades de tratamiento (sedimentador y filtro lento).	44

3.3.2	<i>Determinación del estado actual de operación y de la calidad de agua filtrada.</i>	45
3.3.3	<i>Evaluación de las deficiencias técnicas que presentaron en el sedimentador y filtro lento que afectan a la calidad de agua filtrada.</i>	60
3.3.4	<i>Determinación de las características técnicas de un sistema de coagulación-floculación que coadyuven a mejorar la calidad del agua filtrada.</i>	

62

CAPÍTULO 4:	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	84
4.1	DETERMINACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE OPERACIÓN Y DE LA CALIDAD DE AGUA FILTRADA.	84
4.1.1	<i>Medición de caudales y verificación de la operación de la planta.</i>	84
4.1.2	<i>Prueba de trazabilidad hidráulica en el sedimentador y filtro lento de la PTAP.</i>	93
4.1.3	<i>Calidad físico química y microbiológica del agua filtrada en la PTAP Tucuirí.</i>	106
4.2	EVALUACIÓN DE LAS DEFICIENCIAS TÉCNICAS QUE PRESENTAN EL SEDIMENTADOR Y FILTRO LENTO QUE AFECTAN A LA CALIDAD DE AGUA FILTRADA.	112
4.2.1	<i>Evaluación hidráulica del sistema sedimentador y filtro lento en la PTAP Tucuirí</i>	112
4.2.2	<i>Calculo de la capacidad estimada del sedimentador y filtro lento.</i>	112
4.2.3	<i>Comparación de caudales según el manual de operativos, prueba de trazabilidad y criterio normativos en las unidades de tratamiento.</i>	115
4.2.4	<i>Evaluación de la eficiencia del sistema sedimentador y filtro lento en la PTAP Tucuirí.</i>	116

4.3	DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE UN SISTEMA DE	
	COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN.	119
4.3.1	<i>Cálculo de las características técnicas del dosificador en solución (para el proceso de coagulación).</i>	121
4.3.2	<i>Cálculo de las Características técnicas de la unidad para difusor (para el proceso de coagulación).</i>	123
4.3.3	<i>Evaluación de las características hidráulicas del vertedero triangular existente.</i>	125
4.3.4	<i>Cálculo de las características técnicas de la unidad de floculación.</i>	126
	CONCLUSIONES	137
	RECOMENDACIONES	139
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	140
	APÉNDICES.....	146
	ANEXOS... ..	161

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ventajas y limitaciones de los filtros lentos.	23
Tabla 2 Factores que afectan el funcionamiento del filtro lento.....	25
Tabla 3 Características del canal de distribución de agua cruda.....	34
Tabla 4 Características de la grava de soporte.	37
Tabla 5 Coordenadas de ubicación de la PTAP Tucurí.	41
Tabla 6 Lista de materiales.	42
Tabla 7 Características de la planta Tucurí.	45
Tabla 8 Peso del trazador en ambos sistemas de estudio.....	53
Tabla 9 Puntos de muestreo para el análisis de los parámetros físico químicos y microbiológicos en la PTAP.	58
Tabla 10 Parámetros de eficiencia de remoción analizados en el sistema de sedimentación y filtro lento.....	62
Tabla 11 Cálculo de la estimación del valor de coeficiente efectivo de descarga (C_e).	88
Tabla 12 Cálculo de caudales a ingreso a planta a distintas alturas.....	88
Tabla 13 Cálculo de velocidad de sedimentación y de la velocidad horizontal del agua a ingreso de sedimentador.	89
Tabla 14 Cálculo de caudales a salida del filtro lento a distintas alturas.....	91
Tabla 15 Cálculo de velocidad de filtración del agua a salida de filtro lento.	92
Tabla 16 Características del sedimentador.....	93
Tabla 17 Resumen de datos para el cálculo del Peso del trazador en el proceso de sedimentación.	94
Tabla 18 Prueba de trazador en el sedimentador.	95
Tabla 19 Valores obtenidos de la distribución de tiempos de residencia en el sedimentador a partir de la curva de tendencia.	97
Tabla 20 Determinación del caudal de ingreso en el sedimentador por el método de inyección instantánea.....	99
Tabla 21 Análisis de flujo para el sedimentador.....	100
Tabla 22 Características del filtro lento.	101
Tabla 23 Resumen de datos para el cálculo del peso del trazador en el filtro lento.	101
Tabla 24 Resumen de datos para el cálculo del peso del trazador en el filtro lento	102
Tabla 25 Valores obtenidos de la distribución de tiempos de residencia en el filtro lento...	104

Tabla 26 Determinación del caudal de ingreso al filtro lento por el metodo de inyección instantánea.....	105
Tabla 27 Análisis de flujo para el filtro lento de arena.	106
Tabla 28 Análisis microbiologico de los puntos de muestreo durante la temporada de sequía (28/10/2025).....	107
Tabla 29 Análisis fisicoquímico de los puntos de muestreo durante la temporada de sequía, realizado el 28/10/2025 y 31/10/2025.....	108
Tabla 30 Análisis microbiologico de los puntos de muestreo durante la temporada de lluvia (19/02/2026).....	109
Tabla 31 Análisis fisicoquímico de los puntos de muestreo durante la temporada de lluvia (20/02/2026).....	110
Tabla 32 Comparación de los criterios de diseño establecidos por la normativa vigente con las condiciones de operación del sedimentador sin coagulación previa en la PTAP Tucuirí.	113
Tabla 33 Comparación de los criterios de diseño establecidos por la normativa vigente con las condiciones de operación del filtro lento de la PTAP Tucuirí.....	114
Tabla 34 Capacidad del sedimentador de la PTAP.....	115
Tabla 35 Capacidad del filtro lento de la PTAP.	115
Tabla 36 Comparación de caudales en las unidades de tratamiento.	116
Tabla 37 Determinación de la eficiencia de remoción analizados en el sedimentador.....	117
Tabla 38 Determinación de la eficiencia de remoción analizados en el filtro lento.	118
Tabla 39 Dotación por el número de habitantes.	120
Tabla 40 Cálculo del caudal máximo diario.	120
Tabla 41 Cálculo del caudal de solución promedio.	122
Tabla 42 Cálculo de parametros de las características técnicas del dosificador en solución.	123
Tabla 43 Cálculo de parametros de las características técnicas de la unidad para difusor. ..	124
Tabla 44 Cálculo de parámetros de las características hidráulicas del vertedero triangular existente.	126
Tabla 45 Cálculo de parametros de las características técnicas de la unidad de floculación tramo 1.	127
Tabla 46 Cálculo de parametros de las características técnicas de la unidad de floculación tramo 2.	128

Tabla 47 Cálculo de parametros de las características técnicas de la unidad de floculación tramo 3.	129
---	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Representación gráfica PTAP Tucui.	31
Figura 2 Planta de tratamiento de agua potable Tucui.	32
Figura 3 Captación de agua - riachuelo Tucui.	32
Figura 4 Cámara de distribución de caudales.	33
Figura 5 Ingreso de agua a sedimentador.	34
Figura 6 Pantalla difusora.	35
Figura 7 Zona de sedimentación.	36
Figura 8 Cámara de desagüe.	36
Figura 9 Grava de soporte y sistema de drenaje.	38
Figura 10 Filtro lento de la planta de tratamiento de agua potable Tucui.	38
Figura 11 Caseta de cloración de la planta de tratamiento de agua potable Tucui.	40
Figura 12 Reservorio Macho Soñaque.	40
Figura 13 Ubicación de la PTAP Tucui.	43
Figura 14 Representación esquemática de Vertedero triangular de pared delgada.	47
Figura 15 Valores de coeficiente de descarga para el vertedero triangular de 90°.	48
Figura 16 Curva de tiempo de residencia.	54
Figura 17 Flujograma: Prueba de trazabilidad de permanencia de agua en el sedimentador y filtro lento.	57
Figura 18 Diagrama de flujo del proceso de potabilización de agua en la PTAP Tucui.	59
Figura 19 Flujograma A: Características técnicas del dosificador en solución.	67
Figura 20 Flujograma B: Características técnicas de la unidad para difusor.	70
Figura 21 Flujograma C: Evaluación de las características hidráulicas del vertedero triangular existente.	77
Figura 22 Flujograma D: Características técnicas de la unidad de floculación.	83
Figura 23 Estado actual de la planta Tucui del año 2026.	85
Figura 24 Representación gráfica del vertedero triangular de pared delgada, para la medición de caudales a ingreso de sedimentador en la PTAP.	87

Figura 25 Representación gráfica de la camara de recoleccion, para la medición de caudales a la salida de filtro lento en la PTAP Tucui.	90
Figura 26 Curva de distribucion de tiempos de residencia (DTR)en el sedimentador.	97
Figura 27 Curva de distribucion de tiempos de residencia (DTR) en el filtro lento de arena.	104
Figura 28 Diagrama de flujo del proceso de potabilización de agua en la PTAP Tucui con inclusión de los procesos de coagulación y floculación.	134
Figura 29 Plano1: Panta de tratamiento de agua potable Tucui actual.	135
Figura 30 Plano2: Propuesta de mejora de la calidad de agua filtrada en la PTAP Tucui mediante un sistema de coagulación- floculación.	136

ÍNDICE DE APÉNDICES

Apéndice A: Análisis granulométrico de arena cuarsoza gris	146
Apéndice B: Solicitud de autorización para el ingreso a la PTAP Tucuri en la EPS. EMPSSAPAL S.A. en el mes de octubre del 2025.....	147
Apéndice C: Permiso firmado de la EPS. EMPSSAPAL S.A. en el mes de octubre del 2025.	148
Apéndice D: Solicitud de autorización para el ingreso a la PTAP Tucuri de la EPS. EMPSSAPAL S.A en el mes de febrero del 2026.	149
Apéndice E: Permiso firmado de la EPS. EMPSSAPAL S.A. en el mes de febrero del 2026.	150
Apéndice F: Evidencia fotográfica del ensayo de trazabilidad en el sistema de sedimentación y filtración lenta de la PTAP Tucuri.	151
Apéndice G: Evidencia fotográfica de la toma de muestra de agua en la temporada de estiaje y lluvia.	152
Apéndice H: Resultados del análisis microbiológico al ingreso del sedimentador de la PTAP Tucuri (28/10/2025).....	153
Apéndice I: Resultados del análisis microbiológico al ingreso del filtro lento de la PTAP Tucuri (28/10/2025).....	154
Apéndice J: Resultados del análisis microbiológico a la salida de filtro lento de la PTAP Tucuri (20/10/2025).....	155
Apéndice K: Resultados de los análisis fisicoquímicos en los tres puntos de muestreo (20/10/2025).....	156
Apéndice L: Resultados del análisis microbiológico al ingreso del sedimentador de la PTAP Tucuri (19/02/2026).....	157
Apéndice M: Resultados del análisis microbiológico al ingreso al filtro de la PTAP Tucuri (19/02/2026).....	158
Apéndice N: Resultados del análisis microbiológico a salida del filtro lento de la PTAP Tucuri (19/02/2026).....	159
Apéndice O: Resultados de los análisis fisicoquímicos en los tres puntos de muestreo (20/02/2026).....	160

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Estándares de calidad ambiental (ECA) para el agua.	161
Anexo B: Límites máximos permisibles de parametros de calidad organoléptica del agua potable.....	162
Anexo C: Límites máximos permisibles de parametros microbiológicos y parasitológicos.	163

LISTA DE ACRÓNIMOS

PTAP: Planta de Tratamiento de Agua Potable.

EDA: Enfermedades Diarreicas Aguda.

CEPIS: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

RAS: Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico.

ECA: Estándares de Calidad Ambiental.

MINAM: Ministerio del Ambiente.

PCO: Parámetros de Control Obligatorio.

DIGESA: Dirección General de Salud Ambiental.

PVC: Policloruro de Vinilo.

OMS: Organización Mundial de la Salud.

OPS: Organización Panamericana de la Salud.

EMPSSAPAL: Empresa Municipal Prestadora de Servicios de Saneamiento de las Provincias Alto Andinas.

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$: Sulfato de Aluminio Tipo A.

NaCl: Cloruro de Sodio.

UNT: Unidad Nefelométrica de Turbiedad.

TRH: Tiempo de Retención Hidráulico.

NTP: Norma Técnica Peruana.

RSSCH: Red de Servicios de Salud Chumbivilcas.

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo proponer la mejora de la calidad del agua filtrada de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Tucuri mediante un sistema de coagulación y floculación, en el distrito de Santo Tomás, Chumbivilcas. La metodología es de tipo aplicativo, de alcance descriptivo, propositivo, de enfoque cuantitativo y diseño no experimental.

De la evaluación del estado actual de la PTAP, se determinó que la planta presenta problemas en su operación y mantenimiento. Por otro lado, la prueba de trazabilidad de permanecía del agua en el sedimentador y filtro lento evidencia un comportamiento de flujo no ideal y problemas hidráulicos en el sistema. En cuanto a la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua filtrada, no cumple con los valores de referencia del D.S. N° 031-2010-SA.

El sedimentador y filtro lento presenta deficiencias en los criterios de diseño pues no cumplen con el Reglamento Nacional de Edificaciones del D.S. N° 011-2006-VIVIENDA, los caudales de ingreso de agua que presenta en la actualidad son superior a la capacidad de dicha planta, ya que debe ingresar solo un caudal de 3 L/s.

Es por ello, que se propone implementar un sistema de coagulación y floculación que ayude a mejorar la calidad del agua filtrada; que consta de un dosificador hidráulico, un vertedero triangular y un floculador de flujo horizontal de 3 tramos con los siguientes gradientes de velocidad: tramo 1 de 68.93 s^{-1} , tramo 2 de 48.87 s^{-1} y tramo 3 de 25.30 s^{-1} .

Palabras clave: Planta de tratamiento de agua, Prueba de trazabilidad, Calidad de agua, Sistema de coagulación y floculación.

ABSTRACT

The objective of this study was to propose improvements to the filtered water quality at the Tucuri Drinking Water Treatment Plant (PTAP) in the Santo Tomás district, Chumbivilcas, using a coagulation and flocculation system. The methodology employed was applied research with a descriptive and proposal-oriented scope, a quantitative approach, and a non-experimental design.

The assessment of the water treatment plant's current status revealed operational and maintenance issues. Furthermore, the water residence time tracer test in the sedimentation tank and slow sand filter indicates non-ideal flow behavior and hydraulic problems within the system. Regarding the physicochemical and microbiological quality of the filtered water, it does not meet the reference values of the Supreme Decree N° 031-2010-SA.

The sedimentation tank and slow sand filter exhibit design deficiencies, as they do not comply with the National Building Regulations Supreme Decree N° 011-2006-VIVIENDA; current water inflow rates exceed the plant's capacity, given that the intake flow should be limited to 3 L/s.

Therefore, the implementation of a coagulation and flocculation system is proposed to help improve filtered water quality; the system consists of a hydraulic dosing unit, a triangular weir, and a three-stage horizontal-flow flocculator with the following velocity gradients: stage 1 at 68.93 s^{-1} , stage 2 at 48.87 s^{-1} , and stage 3 at 25.30 s^{-1} .

Keywords: Water treatment plant, Tracer test, Water quality, Coagulation and flocculation system.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad el incremento de la población genera la escasez de fuentes hídricas aptas para el consumo humano y evidencia la importancia de este valioso líquido. Se han realizado esfuerzos continuos, intentando mejorar la eficiencia de los métodos utilizados, para el tratamiento del agua destinada al consumo humano (Martinez Garcia & Gonzales Silgado, 2012). Puesto que existen factores socioeconómicos que afectan en gran medida su obtención y posterior purificación; en la actualidad, ocurre en su gran mayoría en las comunidades, como es el caso de la Región del Cusco, provincia de Chumbivilcas el consumo de agua de mala calidad (PVICA, 2026).

Por tal motivo el agua cruda debe ser sometida a diversos procesos para ser tratada los cuales garantizan la eliminación parcial o total de impurezas, mejorando así las características de calidad del agua en los hogares (Martinez Garcia & Gonzales Silgado, 2012).

Hoy en día existen diferentes Plantas de Tratamiento de Agua Potable (en adelante PTAP), que son responsables de brindar el agua en óptimas condiciones, pero existen PTAP que ya no funcionan adecuadamente, ya sea porque cumplió su periodo de diseño, el caudal de ingreso es mayor al de diseño, la falta de mantenimiento o el desconocimiento de la operación por parte del personal a cargo (Romero Giraldez, 2021).

Tomando en cuenta lo mencionado, se consideró realizar el estudio de la situación actual en la que se encuentra la PTAP de Tucuri, de modo que se alcance a conocer las falencias que existen en la PTAP para posteriormente proponer una alternativa de mejora que aseguren un tratamiento más eficiente mediante la incorporación de un proceso de coagulación y floculación antes del sedimentador, con el objetivo de garantizar la mejor calidad del agua filtrada para ser suministrada a la población de Santo Tomas, Chumbivilcas.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La planta de tratamiento de agua potable (PTAP) Tucui, ubicada en el distrito de Santo Tomás, provincia de Chumbivilcas, es una planta de filtración lenta de arena, cuya fuente de abastecimiento es el río Tucui. Durante la temporada de lluvia se incrementa la turbidez del agua en un rango de 50 -150 UNT (Unidad Nefelométrica de Turbiedad); así como, también se incrementan la cantidad de los Coliformes Totales, Coliformes Termotolerantes y Bacterias Heterotróficas del agua a la salida del filtro lento. Cuando se presentan estos valores, se procede de inmediato a cerrar la planta. El cierre de la planta suele durar entre 2 a 5 horas, aunque en algunos casos puede extenderse hasta 1 día completo perjudicando de esta manera en la dotación de agua a la población (EMPSSAPAL, 2026).

El abastecimiento de agua potable presenta inconvenientes en el mejoramiento de la salud pública y el desarrollo socioeconómico del distrito de Santo Tomás, una parte importante de su población se encuentra afectada por enfermedades de origen hídrico; como, por ejemplo, enfermedades diarreicas aguda (EDA), en épocas de lluvia y sequía se presentan estos casos en la población afectando en su mayoría a los niños menores de 5 años y adultos mayores. Por tanto, es necesario mejorar los procesos previos a la desinfección (sedimentación y filtro lento), ya que la cloración no debe compensar un tratamiento deficiente (RSSCH, 2026).

Frente a los problemas mencionados en párrafos anteriores del sistema de tratamiento, se hace necesaria una mejora de los procesos previos a la desinfección, con atención al desempeño del sedimentador y del filtro lento, especialmente la etapa de filtración, para identificar los factores que limitan la calidad del agua filtrada y sobre esa base, proponer la incorporación de un proceso de coagulación-floculación antes del proceso de sedimentación.

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1 PROBLEMA GENERAL

¿Cómo mejorar la calidad del agua filtrada en la PTAP Tucuirí mediante un sistema de coagulación-floculación?

1.3.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿Cuál es el estado actual de operación y la calidad de agua filtrada en la PTAP Tucuirí?
- ¿Qué deficiencias técnicas presentan el sedimentador y filtro lento que afectan a la calidad de agua filtrada?
- ¿Cuáles son las características técnicas del sistema de coagulación-floculación que coadyuven a la mejora de la calidad del agua filtrada?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer una mejora de la calidad del agua filtrada de la PTAP Tucuirí mediante un sistema de coagulación-floculación.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el estado actual de operación y la calidad de agua filtrada en la PTAP Tucuirí.
- Evaluar las deficiencias técnicas que presentan el sedimentador y filtro lento que afectan a la calidad de agua filtrada.
- Determinar las características técnicas del sistema de coagulación-floculación que coadyuven a mejorar la calidad del agua filtrada.

1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 JUSTIFICACIÓN TEORICA

En el trabajo de investigación, la propuesta de mejora de la calidad de agua filtrada en la PTAP Tucuiiri mediante un sistema de coagulación-floculación, en el distrito de Santo Tomas Chumbivilcas contribuirá, al estudio de futuras investigaciones con similares deficiencias en la calidad del agua filtrada, dado que al conocer el diagnóstico completo de la etapa de sedimentación y filtración previos a la desinfección, se identificará los factores que limitan la calidad del agua filtrada, y se dará a conocer como el sistema de coagulación-floculación contribuirá en mejorar la calidad de agua filtrada que cumpla con las normas de calidad del agua, ya que la cloración no debe compensar un tratamiento deficiente.

1.5.2 JUSTIFICACIÓN PRACTICA

El presente trabajo de investigación ayudará en el futuro a resolver los problemas, que se presentan en la actualidad, debido a que un enorme sector de la población en el Perú consume agua de mala calidad, puesto que existen factores socioeconómicos que afectan en gran medida su obtención y posterior purificación en las comunidades, como es el caso de la Región del Cusco, el consumo de agua de mala calidad (Martinez Garcia & Gonzales Silgado, 2012).

Es por ello que la propuesta de mejora de la calidad de agua filtrada en la PTAP Tucuiiri mediante un sistema de coagulación-floculación, en el distrito de Santo Tomas Chumbivilcas, contribuirá a dar una alternativa de mejora ideal para mejorar el sistema de tratamiento de agua filtrada, que es capaz de remover la mayor cantidad posible de sólidos en suspensión, reduciendo la turbiedad, los coliformes totales y termotolerantes que se adhieren a las partículas suspendidas del agua, produciendo un agua filtrada de buena calidad.

1.5.3 JUSTIFICACIÓN SOCIAL

La presente investigación beneficia a diferentes sectores de la población, principalmente a la población de la región Cusco, provincia Chumbivilcas, distrito Santo Tomas, en la mejora de la calidad del agua filtrada antes de la desinfección, lo cual contribuirá en mejorar el abastecimiento de agua potable de calidad, beneficiando la salud pública y el desarrollo socioeconómico, contribuyendo a que en la población se minimice los problemas relacionados con las enfermedades de origen hídrico, como por ejemplo, enfermedades diarreicas aguda (EDA), el cólera, la disentería, la fiebre tifoidea y anemia, en su mayoría en los niños menores de 5 años y en adultos mayores, disminuyendo de esta manera los resultados de enfermedades hídricas emitidas por el Ministerio de Salud en el área de Epidemiología.

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 INTERNACIONALES

Guaman y Roman (2023) en su investigación Titulada “ Evaluacion técnica y operativa de la planta de tratamiento de agua potable La Loma del canton Nabon, provincia del Azuay” la presente investigación tuvo como objetivo principal evaluar técnica y operativamente la planta de tratamiento de agua potable “La Loma” del cantón Nabón. La metodología empleada fue de diseño no experimental, de nivel descriptivo, con un enfoque cuantitativo, de tipo aplicada, la población estuvo compuesta por 15 892 habitantes. Teniendo como resultados que las unidades de tratamiento resultaron no ser muy eficientes en la remoción de ciertos parámetros, se evidencia que gran parte de su estructura se encuentra en malas condiciones, requiriendo un mantenimiento urgente, pero aun con ello demostraron que la mayor parte del tiempo los parámetros analizados de la calidad del agua cumplen con la norma INEN 1108, en cuanto al cloro residual en la red de distribución se ve afectada a medida que aumenta la distancia a la planta. Llegando así a la siguiente conclusión que se debe incorporar en un futuro nuevas unidades de tratamiento en la PTAP, para así alcanzar el caudal de diseño deseado de alrededor de 6.5 L/s, para contrarrestar la deficiencia que existirá en el abastecimiento de agua en temporadas secas. Así mismo, se debe llevar a cabo un mantenimiento completo de las estructuras de la planta y capacitación del personal.

García Ávila (2014) en su investigación titulada “Diseño de una planta de tratamiento con filtración rápida para reemplazar a un sistema de filtración lenta” la presente investigación tuvo como objetivo diseñar un sistema de tratamiento convencional con operación a gravedad integrada por: Mezcla rápida, floculación, sedimentación, filtración rápida y desinfección, para implementarla en la planta actual de filtración lenta de la Junta de agua potable de la Parroquia

Bayas. La metodología empleada presenta un enfoque cuantitativo, de tipo aplicada, no experimental y descriptiva la metodología empleada se basó en cálculos hidráulicos y criterios técnicos establecidos por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) 2000 en PTAP. Los resultados evidenciaron que el valor del gradiente de velocidad para la mezcla rápida es de 1703 s^{-1} , el tiempo de retención de 0.55 s, la velocidad en el punto de mezcla es de 2.6 m/s, el floculador presenta un tiempo de retención de 20 minutos y el valor del gradiente de velocidad es de $38,9 \text{ s}^{-1}$ se encuentra dentro de lo recomendado de entre 20 a 70 s^{-1} . El sedimentador diseñado presenta una carga superficial de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$, el número de Reynolds ($Re = 173$). Las placas cumplen las características de inclinación (60°), separación entre ellas (5cm), espesor (8mm) que son las recomendadas. para la batería de filtros se puede observar que, para lechos de antracita sobre arena y profundidad estándar, la tasa para el proyecto se consideró $250 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{día})$, la carga hidráulica asumida es de 1,40 m, garantizando de esta manera una duración adecuada de la carrera de Filtración. Llegando a la conclusión, que el tipo de planta de tratamiento propuesto, está conformado por un vertedero rectangular, floculador hidráulico de flujo vertical, sedimentador de alta tasa y una batería de filtros. Se ha seleccionado esta alternativa por las condiciones de un tratamiento completo y porque podrá tratar aguas con niveles altos de turbidez y color, el sistema de tratamiento con una buena operación mejorará notablemente las características del agua potable.

2.1.2 NACIONALES

Romero Giráldez (2021) en su investigación titulada “Propuesta de mejora de la planta de tratamiento de agua potable de la ciudad de Ayaviri, Melgar, Puno - 2018”, la presente investigación tuvo como objetivo proponer la determinación de la alternativa de mejora de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Ayaviri. La metodología empleada es de diseño no experimental, tipo descriptivo de alcance aplicativo, enfoque cuantitativo. Teniendo como

resultado que a la planta de tratamiento ingresa un total de caudal de 68 L/s, lo cual es superior a la capacidad de dichas plantas, puesto que el caudal de diseño es 58.85 L/s, por ende, cada unidad no trabaja eficientemente; asimismo, las infraestructuras se encuentran deterioradas y no se tiene un adecuado manejo en cuanto a los insumos químicos, es por ello, que se desarrollaron los dimensionamientos adecuados de cada unidad o proceso de la planta; teniendo en consideración un caudal de 82.05 L/s. Llegando a la conclusión que la propuesta de mejora de la planta de tratamiento de agua potable, alcanza un Valor Actual Neto (VAN) positivo, por lo que es factible; así mismo, el valor de 20.78% de la Tasa Interna de Retorno (TIR) indica que el proyecto es rentable.

Cahuata Corrales y Borda Choque (2021) en su investigación titulada “ Evaluacion del proceso de coagulación – floculación en la planta de tratamiento de agua potable MiskiUnu – Santo Tomas para la eliminacion de color” la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el proceso de coagulación y floculación para la eliminación de color del agua en la PTAP Miskiunu – Santo Tomas. La metodología empleada es de enfoque cuantitativo, de tipo aplicativo y de diseño experimental. Teniendo como resultado 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 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. Los resultados determinaron que solamente la dosis de coagulante y tipo de coagulante son variables significativas sobre la variable respuesta remoción de color (%). Llegando así a la conclusión, que 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 con un gradiente de velocidad de 81.89 s^{-1} 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.

Yovera Rodríguez y Castro Villacorta (2020) en su investigación titulada “Proyecto de optimización de la planta de filtración rápida Los Molinos – Semapa Barranca S.A.” la presente investigación tuvo como objetivo aumentar y optimizar el tratamiento del agua potable en la Planta de Filtración de Los Molinos – Semapa Barranca S.A. La metodología empleada es de tipo descriptivo, el nivel es explorativa, el diseño es longitudinal y el enfoque es explicativo, sobre el análisis y diseño estructural explica los procesos constructivos, consideraciones técnicas, características de los materiales y normas adoptadas en el análisis y diseño estructural para la PTAP, además, muestran el dimensionamiento de los equipos y auxiliares de proceso de tratamiento. El caudal de diseño con el que trabaja es de 185 L/s , se hizo modificaciones para optimizar la planta una de ellas es cambiar el floculador de flujo horizontal existente por una unidad de flujo vertical con pantallas móviles constituida por tableros de concreto de las cuales se obtuvo las siguientes características del nuevo floculador de flujo vertical la cual está compuesta de 3 tramos con los siguientes gradientes de velocidad $60, 44 \text{ y } 23 \text{ s}^{-1}$ los tiempos de residencia fueron de $5.99, 6.64 \text{ y } 6.94 \text{ min}$. Llegando así a la conclusión, que con esta ejecución del proyecto de optimización se tendría mejor calidad de agua tratada, los floculadores tendrían su propia pantalla, ya que en este momento no cuenta con una pantalla de floculación, colocando dicha pantalla se tendría más tiempo de retención de los coagulantes (sulfato de aluminio, polímero) por consiguiente mayor floculación de las impurezas, mejor calidad de agua en contenido de dureza.

Llamocca Tupayachi y Paliza Chino (2020) en su investigación titulada “Evaluación de la eficiencia del proceso de filtración de la planta de tratamiento de agua potable Santa Ana - Cusco aplicando la Norma OS.020 y el reglamento técnico del sector de agua potable y

saneamiento básico RAS 2000”, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia del proceso de filtración de la PTAP Santa Ana – Cusco. La metodología empleada es de enfoque cuantitativo, nivel descriptivo, nivel no experimental.

Teniendo como resultado que, durante los meses con abundante precipitación pluvial, la PTAP Santa Ana, no cumple con los parámetros establecidos por la norma debido a que la turbiedad es abundante, por consecuencia la eficiencia del filtro se reduce. Llegando así a la conclusión, que los valores obtenidos de eficiencia del filtro, varían de acuerdo con el estado meteorológico de la región del Cusco, la eficiencia obtenida del proceso de filtración aplicando la norma OS.020 fue de 59.87%, y la eficiencia obtenida por la norma técnica colombiana RAS 2000 fue de 69.56%, la eficiencia obtenida por la norma OS.020 es menor que la obtenida por la norma colombiana RAS 2000.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 AGUA CRUDA:

Es aquella agua, en estado natural, captada para abastecimiento que no ha sido sometido a procesos de tratamiento (Dirección General de Salud Ambiental, 2011).

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) (Cahuata Corrales & Borda Choque, 2021).

- AGUAS SUPERFICIALES

Esta agua proviene de ríos, embalses y lagos. Los ríos están formados por el agua del deshielo de montañas y laderas cubiertas de nieve. En el camino, los ríos arrastran tierra, restos de plantas y cualquier otra cosa a su paso. Las fuentes más importantes de contaminación de las aguas superficiales son los desechos humanos o animales (Salazar, 2023).

- ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA) PARA AGUA.

El presente decreto supremo N° 004-2017-MINAM, define al ECA como la medida que establece los niveles de concentración de los elementos, sustancias, parámetros físico químicos y biológicos, presente en el agua en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos que no represente riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente (SINIA, 2017).

Tiene por objeto las disposiciones aprobadas mediante el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, que aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, quedando sujetos a lo establecido en el presente Decreto Supremo y el Anexo que forma parte integrante del mismo. Esta normativa modifica y elimina algunos valores, parámetros, categorías y subcategorías de los ECA, y mantiene otros, que fueron aprobados por los referidos decretos supremos revisar Anexo A (Estandares de Calidad Ambiental (ECA), 2017).

Categoría 1: Poblacional y recreacional

Se subdivide en:

- **Subcategoría A: Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable.** Son aquellas aguas superficiales que, previo tratamiento, son destinadas para el abastecimiento de agua para consumo humano (Estandares de Calidad Ambiental (ECA), 2017).
- **Subcategoría A1: Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección.**

Entiéndase como aquellas aguas que, por sus características de calidad, reúnen las condiciones para ser destinadas al abastecimiento de agua para consumo humano con simple desinfección, de conformidad con la normativa vigente (Estandares de Calidad Ambiental (ECA), 2017).

- **Subcategoría A2: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional.** Son aquellas aguas destinadas al abastecimiento de agua para consumo humano, sometidas a un tratamiento convencional, mediante dos o más de los siguientes procesos: Coagulación, floculación, decantación, sedimentación, y/o filtración o procesos equivalentes; incluyendo su desinfección, de conformidad con la normativa vigente (Estandares de Calidad Ambiental (ECA), 2017).
- **Subcategoría A3: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado.** Entiéndase como aquellas aguas destinadas al abastecimiento de agua para consumo humano, sometidas a un tratamiento convencional que incluye procesos físicos y químicos avanzados como precloración, micro filtración, ultra filtración, nanofiltración, carbón activado, ósmosis inversa o procesos equivalentes establecidos por el sector competente (Estandares de Calidad Ambiental (ECA), 2017).

2.2.2 AGUA POTABLE

Es agua que ha sido tratada con propiedades físicas, químicas y microbiológicas para asegurar su idoneidad para el consumo humano (Salazar, 2023).

- REGLAMENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO

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. El reglamento contiene 10 títulos y 81 artículos que establecen los límites máximos permisibles de parámetros microbiológicos, parasitológicos, organolépticos y químicos orgánicos e inorgánicos. Comprometiendo a los

gobiernos regionales para el cumplimiento de este reglamento. Así mismo, incorpora a la DIGESA como autoridad sanitaria fiscalizadora. En el título 9 del reglamento, nombrado “Requisitos de Calidad del Agua para Consumo Humano” se establece los parámetros de control obligatorio (PCO) que deben efectuar las plantas de tratamiento de agua potable (Cahuata Corrales & Borda Choque, 2021).

Límite máximo permisible: Son los valores máximos admisibles de los parámetros representativos de la calidad del agua revisar Anexo B y Anexo C (Dirección General de Salud Ambiental, 2011).

- CALIDAD DEL AGUA.

La calidad del agua suministrada por el proveedor, se mide de acuerdo a los requisitos físicos, químicos, microbiológicos y parasitológicos del agua para consumo humano (Dirección General de Salud Ambiental, 2011). Sin implicancias para la salud incluyendo apariencia, gusto y olor, estos requisitos deberán cumplir con las normas nacionales de calidad de agua vigentes en el país (Barraza Soto, 2006).

- PARÁMETROS DE CONTROL OBLIGATORIO (PCO).

Son los parámetros que todo proveedor de agua debe realizar obligatoriamente al agua para consumo humano (coliformes totales, coliformes termotolerantes, color, turbiedad, cloro residual, pH). En caso de resultar positiva la prueba de coliformes termotolerantes, el proveedor debe realizar el análisis de bacterias *Escherichia coli*, como prueba confirmativa de la contaminación fecal (Dirección General de Salud Ambiental, 2011).

- PARÁMETROS DE CALIDAD ORGANOLÉPTICA.

Son las características físicas del agua que se pueden percibir con los sentidos, el noventa por ciento (90%) de las muestras tomadas en la red de distribución en cada monitoreo

establecido en el plan de control, correspondientes a los parámetros químicos que afectan la calidad estética y organoléptica del agua para consumo humano, no deben exceder las concentraciones o valores señalados en el reglamento de calidad del agua (Dirección General de Salud Ambiental, 2011).

TURBIEDAD

Es la medida del grado de transparencia que pierde el agua u otro líquido debido a la presencia de partículas en suspensión. A mayor cantidad de sólidos suspendidos, mayor será el grado de turbidez (Escobar Arango, 2021).

pH

Es una medición del potencial de hidrógeno (H^+), el cual indica la alcalinidad o acidez del agua; este no presenta unidades. El agua contiene protones e iones hidroxilo. Las mediciones están determinadas por una escala de 0 al 14, considerándose el número 7 como el valor neutro, en este caso la cantidad de iones hidroxilo y protones es la misma; los valores mayores a 7 se consideran alcalinos, en este caso el número de iones hidroxilo es mayor a la cantidad de protones y valores menores a 7 se consideran ácidos, donde se presentan mayor cantidad de protones que iones hidroxilo. El pH de agua potable debe estar en un rango de 6.5 y 8.5, según indica la normatividad (Escobar Arango, 2021).

El pH no tiene ningún efecto sobre la salud, pero su valor puede afectar los procesos de tratamiento del agua. Así, para que la desinfección con cloro sea efectiva, es conveniente que el pH sea menor a 8 (Aguilar herrera, 2019).

CONDUCTIVIDAD

La conductividad en el agua es la capacidad que tiene el fluido para transportar a través de los iones disueltos la corriente eléctrica. Las unidades de medida de este parámetro según el sistema internacional de medidas son Siemens por metro (S/m).

Se considera un indicador de calidad del agua porque da a conocer de forma indirecta la cantidad de sólidos disueltos como sales que pueden conducir corriente eléctrica, también llamados electrolitos (Escobar Arango, 2021).

- PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS

La presencia de microorganismos hace parte de los parámetros básicos de calidad del agua. La presencia de estos organismos está directamente relacionada generalmente con la descomposición de materia orgánica, contaminaciones fecales, en el agua. Normalmente los grupos de bacterias que se evalúan en los parámetros de calidad del agua son coliformes totales y *Escherichia coli* (Escobar Arango, 2021).

COLIFORMES TOTALES

Son un grupo de bacterias, que a nivel sanitario dan indicios de contaminación debido a descomposición orgánica, de desechos, entre otros compuestos. Generalmente se encuentran en las capas superficiales de los cuerpos de agua, plantas, animales, suelos o sedimentos (Escobar Arango, 2021).

COLIFORMES TERMOTOLERANTES O FECAL

Se llaman bacterias Coliformes termotolerantes y son bacterias que tienen las mismas propiedades de las Coliformes totales. La bacteria que representa este grupo es la *Escherichia coli*, son bacterias que sirven como indicadores de la contaminación de organismos patógenos, ya que están presentes en aguas contaminadas con heces humanas y animales y están frecuentemente asociados con brotes de enfermedades hídricas. Son el parámetro fundamental para determinar la calidad del agua cruda y la eficiencia del proceso, de mayor importancia que la turbiedad (ENOHSA, 2024).

BACTERIAS HETEROTROFICAS

Están presentes en todos los cuerpos de agua y constituyen un grupo de bacterias ambientales de amplia distribución, estas son indicadores de la eficiencia de los procesos de tratamiento, principalmente de la desinfección (descontaminación) (Marchand Pajares, 2002).

2.2.3 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

La planta de tratamiento de agua potable (PTAP) es una secuencia de operaciones y procesos unitarios convenientemente seleccionados con el fin de remover totalmente los contaminantes microbiológicos presentes en el agua cruda y parcialmente los físicos y químicos, hasta llevarlos a los límites aceptables estipulados por las normas (Llamocca Tupayachi & Paliza Chino, 2020).

Son instalaciones cuyo principal objetivo es tratar de manera óptima las fuentes de agua para adecuarlas al consumo humano. Para ello, las plantas de tratamiento deben diseñarse de acuerdo con la composición física, química y biológica del agua a tratar, y así conocer los elementos que es necesario reducir y adicionar para obtener recursos eficientes para el consumo humano (Salazar, 2023).

Afluente: Es el agua que entra a una unidad de tratamiento o inicia una etapa o el total de un proceso de tratamiento (NORMA OS.020, 2016).

Efluente: Es el agua que sale de un depósito o termina una etapa o el total de un proceso de tratamiento (Barraza Soto, 2006).

- REGLAMENTO NACIONAL DE EDIFICACIONES

El Reglamento Nacional de Edificaciones 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. Comprende de tres títulos, el Título Tercero norma las Edificaciones y comprende las normas referidas a

arquitectura, estructuras, instalaciones sanitarias e instalaciones eléctricas y mecánicas (Barraza Soto, 2006).

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 físico químicos y microbiológicos del agua hasta cumplir con los límites establecidos en las normas nacionales de calidad de agua (NORMA OS.020, 2016).

- CAPTACIÓN Y CONDUCCIÓN.

Esta fase se realiza mediante la toma de agua de diversos sistemas de almacenamiento ríos, diques, lagunas, para ser conducidas a canales abiertos para su posterior tratamiento para agua potable, la captación de agua cruda está diseñada para funcionar las 24 horas (Arocha, 2011).

- COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN.

Coagulación: Es el pproceso donde se desestabiliza o anula la carga eléctrica de las partículas suspendidas, mediante la acción de un coagulante facilitando su posterior aglomeración en el floculador.

Flóculos: Partículas desestabilizadas y aglomeradas por acción del coagulante.

Floculación: Formación de partículas aglutinadas o flóculos. Proceso inmediato a la coagulación (Barraza Soto, 2006).

La coagulación se refiere al proceso de desestabilización de las partículas suspendidas, de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas, lo que produce que se aglutinen en pequeñas masas llamadas microfloculos tal que su peso específico supere a la del agua,

mientras que la floculación tiene relación con los fenómenos de transporte dentro del líquido para que las partículas hagan contacto. Esto implica la formación de puentes químicos entre partículas de modo que se forme una malla de coágulos, la cual sería tridimensional y porosa. Así se formaría, mediante el crecimiento de partículas coaguladas, un floculo suficientemente grande y pesado como para sedimentar (Vargas C. & Romero E., 2012).

Floculador hidráulica de flujo horizontal: El floculador horizontal consiste en un tanque de concreto dividido por tabiques, baffles o pantallas de concreto u otro material adecuado, dispuesto en tal forma que el agua haga un recorrido de ida y vuelta alrededor de los extremos libres de los tabiques. En la práctica, los floculadores hidráulicos de flujo horizontal se usan para plantas pequeñas, caudales menores de 50 L/s (Benites Bayona, Machuca Quiñones, & Sabino Barreto, 2018).

Condiciones generales que debe cumplir el floculador de flujo horizontal.

- Las unidades de flujo horizontal son apropiadas para sistemas de menos de 50 L/s de capacidad.
- En sistemas de menos de 50 L/s de capacidad, se puede considerar un rango de gradientes de velocidad de 70 a 20 s^{-1} y un tiempo de retención promedio de 20 minutos (Barraza Soto, 2006).
- El ancho de las vueltas debe ser 1.5 veces el espacio entre pantallas.
- El coeficiente de pérdida de carga en las vueltas (K) debe ser igual a 2 (Barraza Soto, 2006).
- El ancho de la unidad debe seleccionarse en función de que las pantallas en el último tramo se entrecrucen, por lo menos, en 1/3 de su longitud.

- Se debe diseñar con tirantes de agua de 1 a 3 m, dependiendo del material de la pantalla (Barraza Soto, 2006).

- **SEDIMENTACIÓN.**

La sedimentación es un proceso de clarificación del agua, en el que esta se deja reposar cierto tiempo, para permitir que las partículas suspendidas y algunos microorganismos adheridos a ellas sedimenten y se precipiten al fondo del tanque o recipiente, es el primer paso de tratamiento en los que el agua es muy turbia (Gonzalez Herrera, 2023).

La sedimentación sirve a menudo como preparación para la filtración, se requiere que el agua se mueva lentamente en un tanque de sedimentación, este tanque está hecho generalmente de hormigón, acero, polietileno u otros materiales, no debe tener fugas y es preciso mantenerlo tapado para impedir el crecimiento de algas, el piso del tanque debe ser inclinado para que sea más fácil retirar el lodo sedimentado, el tamaño del tanque dependerá de las necesidades de agua de la comunidad a la que sirve (Aguilar herrera, 2019).

Condiciones generales que debe cumplir el sedimentador sin coagulación previa.

- Las partículas en suspensión de tamaño superior a 1 μm deben ser eliminadas en un porcentaje de 60%. Este rendimiento debe ser comprobado mediante ensayos de simulación del proceso (Barraza Soto, 2006).
- La turbiedad máxima del efluente debe ser de 50 UNT y preferiblemente de 20 UNT.
- El período de retención debe calcularse en el ensayo de simulación del proceso y deberá considerarse un valor mínimo de 2 horas (Barraza Soto, 2006).
- La velocidad horizontal debe ser menor o igual a 0.55 cm/s, este valor no debe superar la velocidad mínima de arrastre.

- La razón entre la velocidad horizontal del agua y la velocidad de sedimentación de las partículas deberá estar en el rango de 5 a 20.
- la profundidad de los tanques, al igual que para los desarenadores, debe variar de 1.5 a 3.0 m.
- La estructura de entrada debe comprender un vertedero a todo lo ancho de la unidad y una pantalla o cortina perforada.
- La longitud del tanque deberá ser de 2 a 5 veces su ancho en el caso de sedimentadores de flujo horizontal.
- El fondo del tanque debe tener una pendiente no menor de 3% (Barraza Soto, 2006).

- **FILTRACIÓN.**

Proceso físico mediante el cual el agua pasa a través de un medio permeable, como arena, cerámica, una tela o una membrana, los poros son lo suficientemente grandes para que pase el agua, pero suficientemente pequeños para retener las partículas suspendidas, la filtración se realiza después de la sedimentación, con el fin de reducir aún más la turbiedad y eliminar microorganismos patógenos de menor tamaño, que no alcanzó a ser removida en los procesos anteriores (Gonsalez Herrera, 2023).

FILTRACIÓN LENTA DE ARENA.

Es un proceso que consiste en hacer pasar el agua a través de un medio filtrante, se realiza por un flujo descendente a través de un lecho de arena, para mejorar las características del agua, reduciendo o eliminando los sólidos en suspensión o material coloidal, en la capa superficial de los filtros lentos. La remoción de impurezas se produce a través de mecanismos físico-químicos, cuando el agua cruda atraviesa el medio filtrante, dejando impurezas retenidas

en los poros del medio filtrante, y también a través de una capa biológica (Tavares & Concepcion, 2022).

La capa biológica contiene una gran variedad de microorganismos que contribuyen a la descomposición de la materia orgánica perteneciente al afluente a tratar, mientras que la materia inorgánica y otra orgánica queda retenida por acción física, contribuyendo en la remoción de organismos patógenos del agua cruda, Entre los organismos parásitos a considerar están: bacterias, virus, protozoarios y helmintos responsables de la trasmisión de enfermedades relacionadas con el agua (Marron, 1999), logrando eficiencias del 99.9% en remoción de materia orgánica y reducción del 99.9% de los microorganismos (Escobar Arango, 2021).

El mejoramiento en la calidad del agua mediante filtración lenta en arena difiere de un lugar a otro porque el proceso depende de muchos factores, como la calidad del agua cruda, el tamaño de los granos de arena, la velocidad de filtración, la temperatura y el contenido de oxígeno del agua (Vischer, paramasivam, Raman, & Heijnen, 1992).

Condiciones generales que deben cumplir los filtros lentos convencionales de arena.

- La turbiedad del agua cruda, sedimentada o pre filtrada del afluente deberá ser inferior a 50 UNT, se podrán aceptar picos de turbiedad no mayores de 100 UNT por pocas horas (no más de 4 horas) (Barraza Soto, 2006).
- Cuando la calidad de la fuente exceda los límites de turbiedad indicados y siempre que ésta se encuentre en suspensión, se deberá efectuar un tratamiento preliminar mediante sedimentación simple y/o pre filtración en grava (Barraza Soto, 2006).
- El filtro lento debe proyectarse para operar las 24 horas en forma continua, para que pueda mantener su eficiencia de remoción de microorganismos. La operación intermitente debilita al zooplancton responsable del mecanismo biológico debido a la falta de nutrientes para su alimentación (Barraza Soto, 2006).

- La tasa de filtración deber estar comprendida entre 2 y 8 m³/ (m² · día) Cuando las aguas procedan de lagunas, embalses o se esté considerando tratamiento preliminar.
- La estructura de entrada a la unidad debe considerar, instalaciones para medir y regular el caudal en forma sencilla, mediante vertedero triangular o rectangular, antecedido de una válvula, o compuerta, para regular el flujo de ingreso y un aliviadero para eliminar excesos; así como, también un canal que distribuya equitativamente el caudal a todas las unidades de filtración (Barraza Soto, 2006).

- **DESINFECCIÓN O CLORACIÓN.**

La utilización de cloro ayuda a eliminar un gran porcentaje de agentes microbianos y hace más factible el traslado del agua hasta los hogares (Arocha, 2011).

2.2.4 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS FILTROS LENTOS.

Se presenta las principales ventajas y limitaciones de los filtros lentos en la Tabla 1.

Tabla 1

Ventajas y limitaciones de los filtros lentos.

Ítems	Ventajas de los filtros lentos	Limitaciones
1	Mejora simultánea en la calidad física, química y bacteriológica del agua, con un número de ventajas especiales para los países en desarrollo tales como el nuestro.	El filtro lento solo no debe operar con aguas con turbiedades mayores a 20 ó 30 UNT, esporádicamente se pueden aceptar picos de 50 a 100 UNT.
2	La eficacia en la eliminación de bacterias totales es igual que en los filtros rápidos.	La eficiencia de esta unidad se reduce a temperaturas inferiores a los 4 °C.

3	El proceso de filtración lenta se da por gravedad; no hay otras partes mecánicas que precisen de energía para funcionar.	En regiones con inviernos muy fríos, se tendrán que instalar protecciones contra el frío.
4	Los lodos generados no causa problemas; las cantidades de lodos son pequeñas y tienen un alto contenido de materia seca.	Los cambios bruscos en el agua de ingreso producen alteraciones en el funcionamiento normal del filtro.
5	No hay cambios organolépticos en la calidad del agua.	Los filtros lentos de arena no retiran completamente todos los químicos orgánicos, sustancias inorgánicas disueltas, como algunos metales pesados.
6	Sencillo diseño y bajo coste en los materiales que se puede rebajar aún más utilizando técnicas locales y personal de la propia comunidad.	El acceso a la arena necesaria y a las protecciones contra el frío son los dos conceptos que se tienen que tener en cuenta para no encarecer demasiado la obra.

Nota. Fuente: (Blacio Ordoñez & Palacios Perez, 2011).

2.2.5 FACTORES QUE MODIFICAN EL FUNCIONAMIENTO DEL FILTRO LENTO

Estos factores pueden clasificarse como de diseño, operación y ambientales; del comportamiento de estos dependerá el buen funcionamiento del filtro ver la Tabla 2.

Tabla 2

Factores que afectan el funcionamiento del filtro lento.

Clasificación	Factor
Condiciones de diseño	Velocidad de filtración o tasa de filtración.
	Tamaño de arena (d ₁₀) y Coeficiente de uniformidad (CU).
	Profundidad del lecho de arena (máximo y mínimo).
Parámetros de operación	Tiempo en que el filtro está fuera de operación después del raspado.
	Mínima altura de lecho permitida.
	Tiempo de maduración del filtro.
	Tiempo de retención hidráulico.
Condiciones Ambientales del Agua Cruda	Calidad del agua Cruda.
	Magnitud de Turbiedad.
	Concentración y tipo de nutrientes.

Nota. Fuente: (Llanos Angeles & Mirano Celis, 2018).

2.2.6 PARÁMETROS HIDRAULICOS DE DISEÑO

- VELOCIDAD HORIZONTAL DE SEDIMENTACIÓN

Es la velocidad que el agua fluye horizontalmente a través del tanque de sedimentación, es un parametro importante que afecta la eficiencia de la separación de sólidos en un tanque de sedimentación. Ayuda a la floculación en los tanques aumentando el peso y el tamaño de las partículas que se desean remover, y arrastra y re suspende los flóculos ya depositados (Caceres Schrei, 2017).

- VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

La velocidad de sedimentación, también conocida como velocidad de caída de grano, se refiere a la tasa de depositación de los sólidos suspendidos en un medio fluido (Ortiz Hernandez, 2020).

- VELOCIDAD DE FILTRACIÓN

Es la cantidad de agua que pasa a través de un filtro por unidad de área y por un tiempo se expresa en metros por hora (m/h) o metro cubico, por metro cuadrado por hora ($m^3/m^2 \cdot h$).

El comportamiento hidráulico del filtro de arena depende en gran medida de la velocidad de filtración. Para que un filtro de arena pueda ser catalogado como lento, la velocidad de filtración (V_f), debe estar en el rango: (Llanos Angeles & Mirano Celis, 2018).

$$0.1 \frac{m^3}{m^2 * h} \leq V_f \leq 0.4 \frac{m^3}{m^2 * h} \quad (1)$$

La velocidad de filtración dependerá de la granulometría del medio filtrante y el espesor del lecho de arena. La granulometría se refiere a la distribución de tamaños de los granos de arena: mientras más pequeños sean los granos, el agua requerirá mayor energía o carga hidráulica (Gonsalez Herrera, 2023).

El programa regional del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano lo cual menciona lo siguiente:

La velocidad de aproximación del flujo es un parametro hidráulico muy importante. De acuerdo a las recomendaciones, si el filtro lento es el único tratamiento, esta velocidad puede fluctuar entre 0.10 a 0.20 m/h como máximo y si hay procesos previos de acondicionamiento de la calidad del agua, puede llegar a 0.30 o 0.40 m/h, con operación confiable y buen mantenimiento (Canepa de Vargas, 1992).

- TIEMPO DE RETENCION HIDRÁULICO (TRH) DEL FILTRO LENTO

Se define como el tiempo medio que toma una gota de agua en traspasar el lecho filtrante durante un proceso de tratamiento (Fernando Quintero & Armado Alferez, 2008).

Es el parametro de diseño clave que controla la calidad del agua del efluente, en la mayoría de las revisiones técnicas de los filtros de arena lentos, existe una falta general de apreciación del TRH como parametro de diseño clave (Maiyo, Dasika, & Jafvert, 2023).

2.2.7 MODELOS DE FLUJO HIDRAULICO

- FLUJO DE PISTÓN

Todos los elementos que ingresan a la unidad de filtración, permanecen allí el mismo tiempo, es decir que los elementos de descarga son los mismos que ingresaron a la unidad, las unidades se diseñan bajo algunas unidades hidráulicas como Parshall, los vertederos, los floculadores hidráulicos de pantallas y en los decantadores (Escobar Arango, 2021).

- FLUJO MEZCLADO

Se describe como una unidad donde todos los elementos que ingresan a esta, se dispersan dentro ella, cumpliendo que la concentración de las sustancias a la salida es igual a la que se encuentra en cualquier punto de la unidad (Escobar Arango, 2021).

- FLUJO NO IDEAL

Se describe como un flujo que corresponde a la combinación de flujo pistón y mezcla completa, en general este tipo de flujos se encuentran en plantas de tratamiento y en unidades de filtración, ya que la composición de los fluidos puede variar entre los diferentes puntos (Escobar Arango, 2021).

Este tipo de flujo corresponde a cualquier grado intermedio entre flujo pistón y mezcla completa con otras posibles alteraciones como la presencia de zonas muertas, cortocircuitos hidráulicos, recirculación. Viene a ser el tipo de flujo con el que nos encontraríamos usualmente en las unidades de tratamiento en las plantas (CEPIS, 1992).

2.2.8 TRAZADORES

El objeto de las pruebas con trazadores es el de determinar la proporción de flujo pistón y mezclado; así como también, si existe presencia de caminos preferenciales del flujo de agua a través de los sistemas, los cuales generan fenómenos de cortocircuito hidráulico, o si existe regiones donde el flujo de agua se queda demasiado tiempo posiblemente vinculada a la recirculación del fluido lo que genera zonas muertas en los sistemas (Calle Idrovo & Zambrano Torres, 2015), agregando al flujo sustancias llamadas trazadoras. Estas se inyectan en el flujo de entrada al tanque que se quiere analizar, en concentración conocida, y se determina a la salida del mismo como dicha concentración se distribuye a través del tiempo (Burgos Flores, Martin Dominguez, & Martin Dominguez, 2003).

Las técnicas de trazadores permiten obtener información sobre un sistema o parte de él observando el comportamiento en ese medio de una sustancia específica, el trazador, que se añade al sistema o es parte de él. Son básicamente de dos tipos: ambientales (o naturales) y artificiales.

Los trazadores químicos solubles son aquellos que disueltos en el agua permiten identificarlos fácilmente. En este grupo se encuentran los trazadores salinos. Los trazadores salinos son bastante solubles y, por lo general, el más utilizado es el ión de cloruro, que por ello es un trazador casi ideal. Si el agua es originalmente poco salina, la concentración se puede medir por conductividad, ya que como se conoce, al disolverse la sal en el agua los aniones y los cationes se separan por acción de las moléculas polares del agua, comienzan a moverse libremente y la disolución comienza a ser conductora (Morelio Leon, 2012).

Para el uso de trazadores salinos es indispensable considerar los siguientes factores:

- Baja salinidad de las aguas a trazar.
- Aplicación en grandes cantidades (NaCl y KCl) (Morelio Leon, 2012).
- Suficiente cantidad de agua para la disolución y el transporte, por ello habrá restricciones en zonas con escasez de agua (Morelio Leon, 2012).
- Fácil detección en el campo con mediciones de conductividad.
- Algunos ejemplos de trazadores salinos: NaCl, KCl, LiCl, Cloruro de Estroncio, Cloruro de Cesio, Cloruro de Cromo (Morelio Leon, 2012).

2.2.9 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE TUCUIRI

La planta de tratamiento Tucuirí está compuesta por un conjunto de procesos físicos y biológicos que remueven los microorganismos patógenos del agua, llamados filtros lentos. Dicha planta de tratamiento está conformada por una unidad de sedimentador, una unidad de filtración y un sistema de desinfección a goteo continuo con hipoclorito de calcio al 70%.

El agua superficial llega a través de una línea de conducción ingresando al sedimentador, en donde por efecto de la gravedad se retienen las partículas de sólidos más grandes del agua, seguidamente el agua sedimentada pasa al filtro por un canal de conexión, en el filtro se producen mecanismos físicos de colisión entre las partículas y los granos de arena removiendo los sólidos más finos del agua; y mecanismos biológicos produciendo una película biológica que crece sobre los granos de arena, y en la que se produce la depredación de los microorganismos patógenos por organismos de mayor tamaño tales como los protozoarios y rotíferas.

El agua filtrada es recolectada por el fondo del filtro y conducida a una cámara donde se ubica un vertedero que vierte el agua a otra cámara de reunión donde se junta el agua filtrada y el agua del manante de Ancascota de la cual sale una tubería que conduce el agua, en la línea de conducción se realiza la desinfección en el sector calzada por un sistema de cloración a goteo continuo con hipoclorito de calcio, para luego ser conducida hacia el reservorio Macho Soñaque, como se muestra en la Figura 1.

De acuerdo con el Manual de operación y mantenimiento (EMPSSAPAL, 2026), la planta de tratamiento consta de las siguientes etapas:

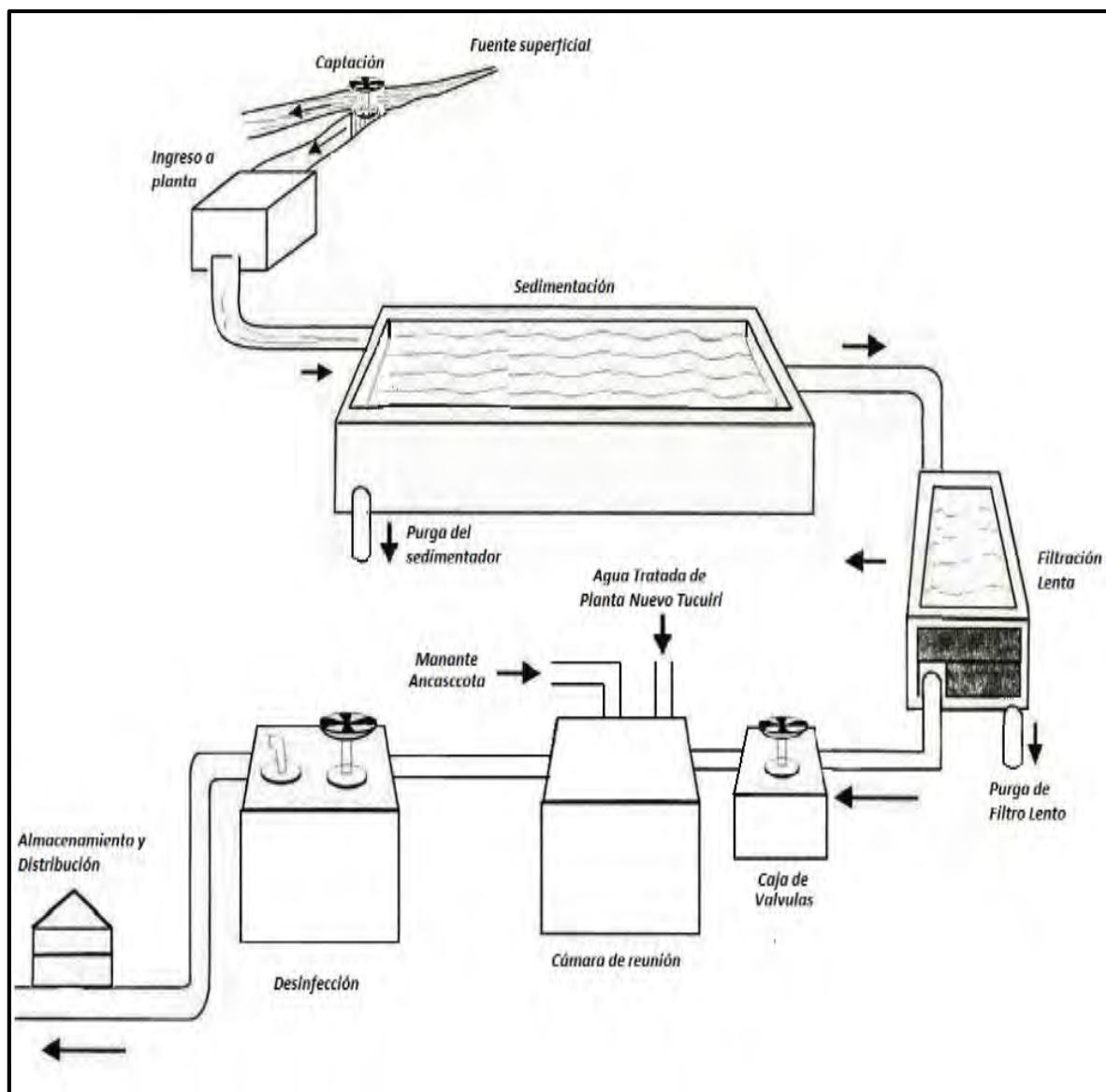
CAPTACIÓN ANCASCOTA

Es una fuente de captación subterránea, el agua es captada de dos manantes, situados aguas arriba de la planta de tratamiento de Tucuirí a una distancia de 3 km, las captaciones cuentan con tuberías de concreto armado de 4 y 6 pulgadas de diámetro, que se juntan en una cámara de reunión y son conducidas hasta la cámara de salida de la planta de Tucuirí, mediante una

tubería de PVC de 3 pulgadas de diámetro de 3000 m de longitud. El manante Ancascota tiene un caudal de producción promedio de 3.30 L/s que se combinan con las aguas producidas en la planta de tratamiento de Tucuri (EMPSSAPAL, 2026).

Figura 1

Representación gráfica PTAP Tucuri.



Nota. Fuente: Tomado del Manual de Operación y Mantenimiento de la PTAP Tucuri (EMPSSAPAL, 2026).

Figura 2

Planta de tratamiento de agua potable Tucui.



Nota. La imagen muestra la planta de tratamiento de filtración lenta que opera con un proceso de sedimentación y un proceso de filtración.

CAPTACIÓN DEL RÍO TUCUIRI

La captación de la Planta de Tratamiento de agua Tucui se ubica en la parte suroeste de la ciudad de Santo Tomas a 12 km de distancia, siendo la fuente el agua superficial del río Tucui, con una elevación de cota 3905 m.s.n.m. la toma de agua se realiza a través de un barraje con ventana lateral, produciendo un caudal aforado promedio de 13.5 L/s (EMPSSAPAL, 2026). La captación de agua del rio Tucui se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Captación de agua - riachuelo Tucui.



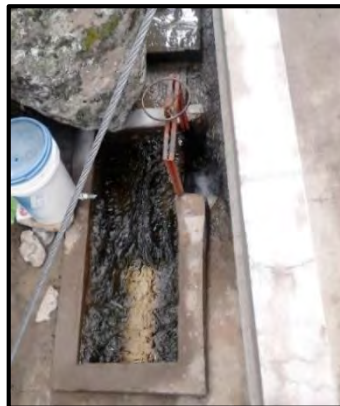
CÁMARA DE DISTRIBUCIÓN DE CAUDALES

La planta cuenta con una cámara de distribución de caudales el agua del canal de conducción a la línea de conducción, proveniente del río Tucuirí.

- La cámara de distribución tiene una distribución de dimensiones de 0.80 m x 0.80 m de lado y una altura interior de 1.10 m; los muros son de 0.15 m de espesor.
- En el interior de la cámara de distribución se ubica 01 válvula tipo tarjeta metálica de control de 0.60 m x 0.70 m de alto que se encarga de controlar el ingreso de agua hacia la planta. En la Figura 4 se muestra la cámara de distribución de caudales (EMPSSAPAL, 2026).

Figura 4

Cámara de distribución de caudales.



SEDIMENTADOR CONVENCIONAL

La planta cuenta con un sedimentador, que opera en forma paralela al filtro, tiene por objeto sedimentar partículas de hasta 0.002 cm de diámetro, la unidad tiene unas dimensiones de 2.66 m de ancho por 7.30 m de largo como superficie neta de sedimentación. Esta unidad está compuesta por las siguientes estructuras:

- Canal de distribución de agua cruda al sedimentador.
- Pantalla difusora.

- Zona de sedimentación.
- Canal de recolección de agua sedimentada.
- Sistema de almacenamiento y extracción hidráulica de los lodos (EMPSSAPAL, 2026).

I. Canal de distribución de agua cruda al sedimentador

Estructura de concreto cuya función es distribuir uniformemente el caudal del agua cruda al sedimentador. El sedimentador tiene una compuerta de ingreso de 0.20 m de ancho por 0.07 m de altura útil (EMPSSAPAL, 2026). En la Tabla 3 se muestra las características del canal de distribución del agua cruda.

Tabla 3

Características del canal de distribución de agua cruda.

Características	Dimensión
Sección compuerta	0.25 m x 0.40 m

Nota. Fuente: Tomado de Manual de Operación y Mantenimiento de la PTAP Tucuirí (EMPSSAPAL, 2026).

Figura 5

Ingreso de agua a sedimentador.



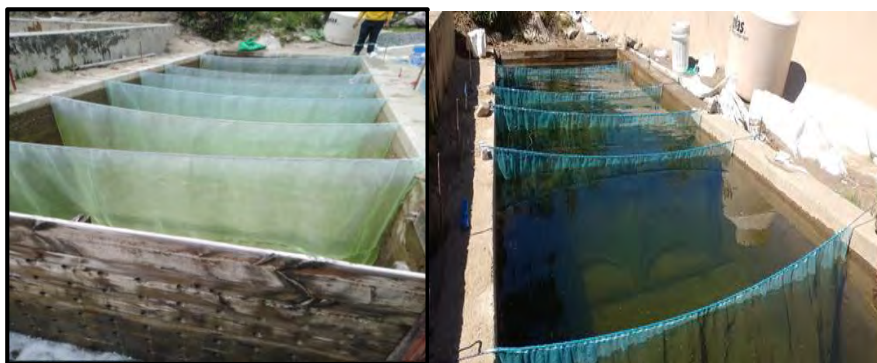
En la Figura 5 se muestra el ingreso de agua al sedimentador de la PTAP Tucuri.

II. Pantalla difusora

Pantalla de madera de 1" de espesor con perforaciones de Ø 1" espaciadas 8 cm una de la otra, con manubrio tipo bastidor, que se fija mediante una canaleta en la estructura de concreto del sedimentador. Este dispositivo sirve para aquietar el movimiento del agua bajando su turbulencia, por cuanto ingresa con flujo turbulento y en dispositivo se disipa y baja la velocidad del agua a flujo laminar fenómeno que permite que en el dispositivo pueda sedimentar cualquier materia que se haya infiltrado en la línea de conducción (EMPSSAPAL, 2026). En la Figura 6 se muestra la pantalla difusora del sedimentador de la PTAP Tucuri.

Figura 6

Pantalla difusora.



III. Zona de sedimentación

Una vez distribuido el caudal a través de la pantalla difusora, el agua ingresa a la zona de sedimentación con un ancho de 2.66 m y 7.30 m de largo.

El fondo de la unidad tiene una pendiente para asegurar el arrastre del sedimento, para mejorar la eficiencia de trabajo de esta unidad se ha colocado cada 2.0 m pantallas batidoras móviles para bajar la velocidad del agua y mejorar la sedimentación (EMPSSAPAL, 2026). En la Figura 7 se muestra la zona de sedimentación.

Figura 7

Zona de sedimentación.



IV. Sistema de evacuación de lodos

En ella se ubica una válvula de 6" de diámetro que permite la evacuación de los lodos por medio de una tubería PVC SAP de Ø 6" (EMPSSAPAL, 2026). En la Figura 8 muestra la cámara de desagüe.

Figura 8

Cámara de desagüe.



FILTRO LENTO

El filtro lento está conformado por una estructura de 4.50 m x 7.30 m de área y una altura de 2.66 m. Los filtros operarán con una velocidad de filtración de 0.728 m/h. El ingreso a esta unidad es por medio de una compuerta, en la base de la entrada de agua y por encima del medio

filtrante se coloca una losa de concreto de 0.70 m x 0.50 m, con el fin de disipar la energía producida por la caída del agua.

Capa de agua sobrenadante: Tendrá como máximo una altura de 1m en la peor condición de servicio y tiene por objetivo lo siguiente:

Primero, proporciona una carga de agua suficiente para hacer que el agua cruda pase a través del medio filtrante.

Segundo, proporciona al agua cruda un tiempo de retención de varias horas, periodo durante el cual las partículas pueden sedimentar. Sobre esta capa de agua se tiene un borde libre de 0.30 m (EMPSSAPAL, 2026).

El medio filtrante: está conformado por una capa de 1.00 m de arena de tamaño efectivo de 0.30 mm y un coeficiente de uniformidad de 1.43, la cual está situada sobre una capa de grava de soporte de 0.25 m, dividida en tres capas de diámetro variable, el siguiente cuadro detalla las características del lecho de soporte:

El valor máximo permisible operacional de turbiedad es de 50 NTU (Unidad Nefelométrica de Turbidez) teniendo como resultado agua filtrada menor a 5 NTU (EMPSSAPAL, 2026). En la Tabla 4 se muestra las características de la grava de soporte y Figura 9 se muestra la grava de soporte y sistema de drenaje.

Tabla 4

Características de la grava de soporte.

Características de la grava de soporte		
Capa	Espesor (cm)	Diámetro (mm)
1	12	25
2	8	10
3	5	7

Nota. Fuente: Tomado de Manual de Operación y Mantenimiento de la PTAP Tucuiñi (EMPSSAPAL, 2026).

Figura 9

Grava de soporte y sistema de drenaje.



Con cada limpieza del filtro se remueve parte del lecho filtrante, teniendo como altura mínima de lecho de 0.30 m, momento en el cual este requerirá ser repuesto.

En el fondo del filtro se ubica un sistema de recolección de agua compuesta por tuberías de PVC (Policloruro de Vinilo) de diámetro nominal de 100 mm con orificios de 8 mm separadas cada 12 cm. Estas tuberías llegan a un ramal de mayor diámetro compuesta por una tubería de PVC de diámetro nominal de 150 mm el cual dirige el agua filtrada a la cámara de interconexión.

La cámara de interconexión cuenta con un vertedero de salida y una derivación hacia una cámara de desagüe. El filtro cuenta con un aliviadero para controlar el nivel máximo de operación (EMPSSAPAL, 2026). En la Figura 10 se muestra el filtro lento de la planta de tratamiento de agua potable Tucui.

Figura 10

Filtro lento de la planta de tratamiento de agua potable Tucui.



CÁMARA DE VÁLVULAS.

Estructura de concreto que está compuesta por los siguientes elementos:

- Cámara de recolección, recoge las aguas provenientes del filtro lento y regula el caudal de salida.
- Vertederos de salida, regula el nivel mínimo de las aguas en el filtro y se ubica a 10 cm sobre el lecho filtrante, tiene como finalidad proteger la película biológica.
- Dos válvulas de Fierro Galvanizado de Ø 3", que dan a la cámara de limpieza y que se ubican antes de las válvulas de control que comunican el filtro lento con el reservorio que permiten eliminar el filtrado inicial.
- La cámara de filtración cuenta con un sistema de desagüe controlado por válvulas de Fierro Galvanizado de Ø 4" y que dan a la cámara de limpieza que se conecta a una tubería de PVC (Policloruro de Vinilo) de clase SAP (Standard Americano Pesado) de Ø 6".
- Una Válvula de control de Fierro Galvanizado de Ø 4" que se comunican al filtro lento con el reservorio.
- Tapa sanitaria metálica, cuenta con tapas sanitarias metálicas.
- Una escalera de Fierro Galvanizado de Ø ¾" que permite acceder a la cámara de limpieza del filtro lento (EMPSSAPAL, 2026).

DESINFECCIÓN

La desinfección se realiza con el insumo Hipoclorito de Calcio al 70% el cual se prepara según la demanda de cloro requerida por el agua y se dosifica en una cámara de contacto, En esta etapa busca la eliminación de los elementos patógenos, para posteriormente almacenar el agua desinfectada.

La caseta de cloración está ubicada en el sector denominado La Calzada cercano al sector Sumpuruni en donde se realiza la desinfección del agua por goteo continuo en una

cámara de reunión, no se hace en el mismo reservorio por que diariamente al medio día el reservorio se vacía por lo que no es conveniente realizar esta actividad en el reservorio (EMPSSAPAL, 2026). En la Figura 11 se muestra la caseta de cloración de la planta de tratamiento de agua potable Tucuri.

Figura 11

Caseta de cloración de la planta de tratamiento de agua potable Tucuri.



ALMACENAMIENTO

El almacenamiento del agua desinfectada se realiza en el Reservorio de Tucuri, es una estructura hidráulica con una capacidad de 150 m³ 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 12 se muestra el Reservorio Macho Soñaque.

Figura 12

Reservorio Macho Soñaque.



Nota. Fuente: (EMPSSAPAL, 2026).

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

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 Tucuri.

3.2 MATERIALES

Los materiales que se utilizaron con el fin de realizar el estudio en el desarrollo del trabajo, se dan a conocer en la Tabla 6.

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El presente estudio se desarrolló en las instalaciones de la PTAP Tucuri que pertenece a la Empresa Municipal Prestadora de Servicios de Saneamiento de las Provincias Alto Andinas S.A. (EMPSSAPAL S.A.), se encuentra ubicada en el sector Hanansaya Orccoma en el distrito de Santo Tomas provincia de Chumbivilcas de la región del Cusco (ver Tabla 5 y Figura 13). Se ubica en la parte suroeste de la ciudad de Santo Tomas a 12 km de distancia. Actualmente se encuentra administrada por la EPS. EMPSSAPAL S.A.

Tabla 5

Coordenadas de ubicación de la PTAP Tucuri.

Ubicación	Coordenadas geográficas
Sur	-14.506156
Este	-72.069169
Altitud	3,905 m.s.n.m

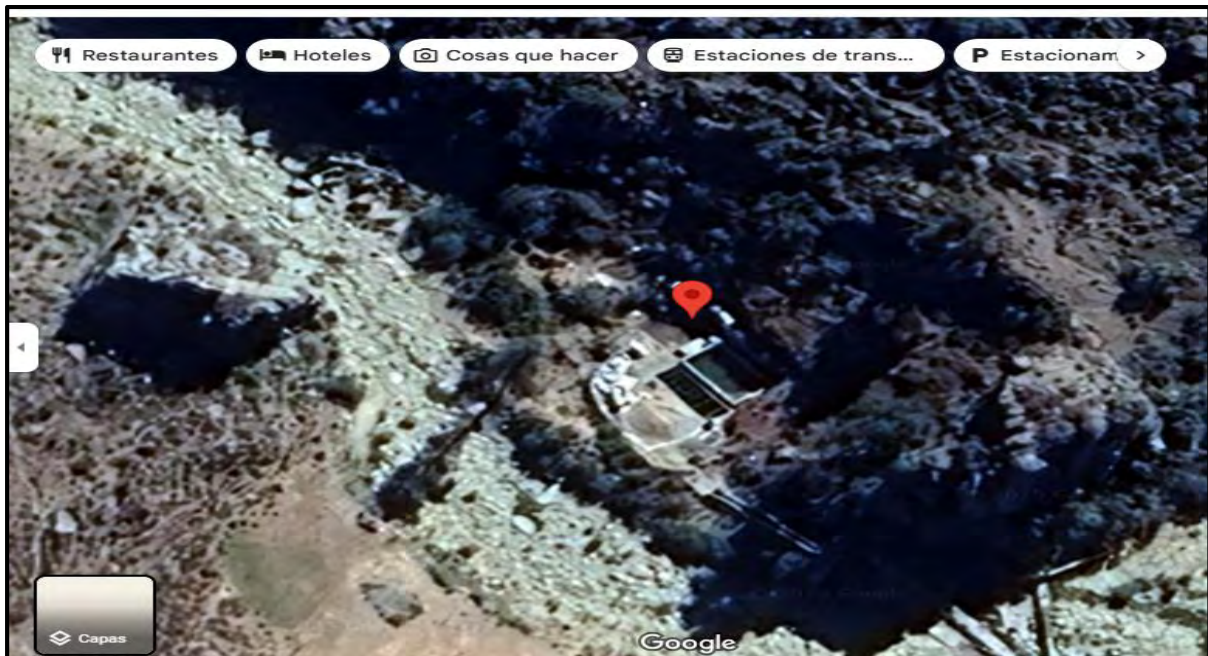
Nota. Fuente: Tomado del Manual de operaciones de la PTAP Tucuri (EMPSSAPAL, 2026).

Tabla 6*Lista de materiales.*

Tipo	Descripción	Características	Cantidad
Trazador	Trazador inerte	El trazador que se utilizara es NaCl.	9.35 kg
Instrumentos	Turbidímetro	Marca Hach, modelo 2100Q.	1 unidad
	Conductímetro	Marca OHRUS.	1 unidad
	Multiparametro	Marca HQ HACH	1 unidad
Materiales	Botellas de polipropileno	De plástico con un volumen de 500 mL.	3 unidades
	Recipientes de plástico	Para la dilución del NaCl en el agua cruda.	1unidad
	Gorra descartable y Guantes quirúrgicos.	Guantes de nitrilo Libres Polvo Talla M, gorra de doble elástico en la circunferencia.	6 unidades

Figura 13

Ubicación de la PTAP Tucui.



Nota. Fuente:

<https://www.google.com/maps/place/14%C2%B030'22.2%22S+72%C2%B004'09.0%22W/@-14.506205,-72.0694912,93m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!4b1!8m2!3d-14.5061667!4d>

3.2 DISEÑO METODOLÓGICO

La metodología es de tipo aplicativo, de alcance descriptivo, propositivo, de enfoque cuantitativo y diseño no experimental.

Diseño: No Experimental, adecuado para este estudio, porque no se va a manipular variables para observar sus efectos, sino se aplicarán criterios técnicos y normativos para proponer una solución en el mejoramiento del sistema sedimentador y filtro lento mediante un sistema de coagulación-floculación, con el fin de mejorar la calidad de agua filtrada en la PTAP Tucui, antes del proceso de desinfección (Benavente Garcia, 2019).

Tipo y alcance: Es de tipo aplicativo, con un alcance descriptivo - propositivo, porque se usan conocimientos básicos para dar solución a la deficiencia en la calidad de agua filtrada ; asimismo, dará a conocer los problemas técnicos actuales de la operación y mantenimiento de la planta, teniendo en cuenta las normas establecidas; así como, también los factores causales que han podido afectar la calidad del agua filtrada en la PTAP Tucui, antes del proceso de desinfección (Benavente Garcia, 2019).

Enfoque: Cuantitativo, puesto a que se centra en la recolección y análisis de datos de parametros físico químicos y biológicos del agua filtrada, también de datos hidráulicos del sistema, con el fin de ver cómo está operando el sistema sedimentador y filtro lento en la PTAP Tucui (Benavente Garcia, 2019).

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Características de la planta Tucui y unidades de tratamiento (sedimentador y filtro lento).

Según el reporte del manual de operaciones y mantenimiento de la PTAP Tucui por (EMPSSAPAL, 2026), el análisis granulométrico de la arena cuarcífera gris utilizada en filtro lento, fue realizado por la empresa FILTERMEDIA el 20 de noviembre de 2022.

Las características de la arena cuarcífera gris son las siguientes: con un diámetro efectivo ($D.E = 0.30 \text{ mm}$) y coeficiente de uniformidad ($C.U. = 1.43$) ver Apéndice A. Aunque el análisis corresponde al año 2022, la arena comenzó a ser utilizada en el proceso de filtración lenta a partir del 1 de enero del 2024. Los rangos se encuentran dentro de lo recomendado por la norma OS.020 de material filtrante para filtros convencionales.

En la Tabla 7 se representa las características de la planta.

Tabla 7*Características de la planta Tucuirí.*

Fuente de abastecimiento.	Río de Tucuirí
Tipo de toma.	A través de un barraje y una ventana lateral.
Conducción de agua cruda.	Por Gravedad.
Tipo de Planta.	Convencional de filtro lento de arena.
Sedimentador.	Tipo horizontal de área 19.34 m ² y una altura de 2.88 m.
Filtro lento.	Tipo de lecho filtrante doble tiene grava y arena fina, área 32.85 m ² y una altura de 2.66 m.
Sentido del flujo en operación.	Decendente.
Velocidad de filtración .	0.728 m/h.
Caudal de diseño según manual.	47.88 m ³ /h (13.30 L/s).
Caudal de la Planta Promedio.	13.3 L/s.
Caudal máximo con el que opera la Planta.	25.5 L/s se da durante los meses de noviembre al mes de mayo.
Caudal mínimo con el que opera la planta	6 L/s se da entre los meses de estiaje de junio a octubre.

Nota. Fuente: Tomado de Manual de Operación y Mantenimiento de la PTAP Tucuirí (EMPSSAPAL, 2026).

3.3.2 Determinación del estado actual de operación y de la calidad de agua filtrada.

Se realizó la evaluación del estado actual de operación de la calidad de agua filtrada mediante inspección técnica directa, la cual constó de tres etapas:

1. Medición de caudales y verificación de la operación de la planta.
2. Prueba de trazabilidad de permanencia de agua en el sistema de sedimentador y filtro lento.
3. Toma de muestra de la calidad físico químico y microbiológico del agua filtrada.

Las visitas técnicas a la planta fueron programadas durante los meses de octubre de 2025 y febrero de 2026, previa autorización de la EPS. EMPSSAPAL S.A. (ver Apéndice B y E).

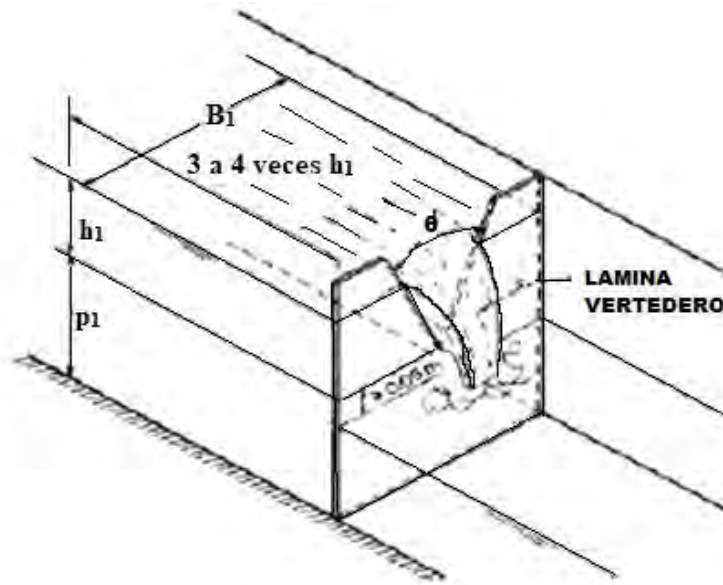
1. Medición de caudales y verificación de la operación de la planta

Se realizaron 2 visitas de campo a la planta de tratamiento en el distrito de Santo Tomas, durante los meses de octubre del 2025 y febrero del 2026 para poder tener un diagnóstico técnico completo realista del funcionamiento del sistema de tratamiento, para medir el caudal con el que opera, la velocidad de sedimentación y filtración, la altura del lecho filtrante de arena del filtro lento se determinó mediante medición directa, utilizando un flexómetro (cinta métrica), Asimismo se evaluó las condiciones actuales de mantenimiento y operación de la planta.

- Se calculó el caudal de agua a ingreso a la PTAP, mediante el aforo del vertedero triangular que se encuentra en la planta. Para medir el caudal se utilizó la ecuación de descarga para vertederos triangulares de pared delgada, que se da en la siguiente ecuación 2:

Figura 14

Representación esquemática de Vertedero triangular de pared delgada.



Nota. Fuente: (Sanchez, 2012).

$$Q = C_e * \frac{8}{15} \sqrt{2g} * \tan \left(\frac{\theta}{2} \right) * h_1^{2.5} \quad (2)$$

Donde:

Q: Caudal real (m³/h).

C_e: Coeficiente efectivo de descarga (adimensional).

g: Aceleración de la gravedad (m/s²).

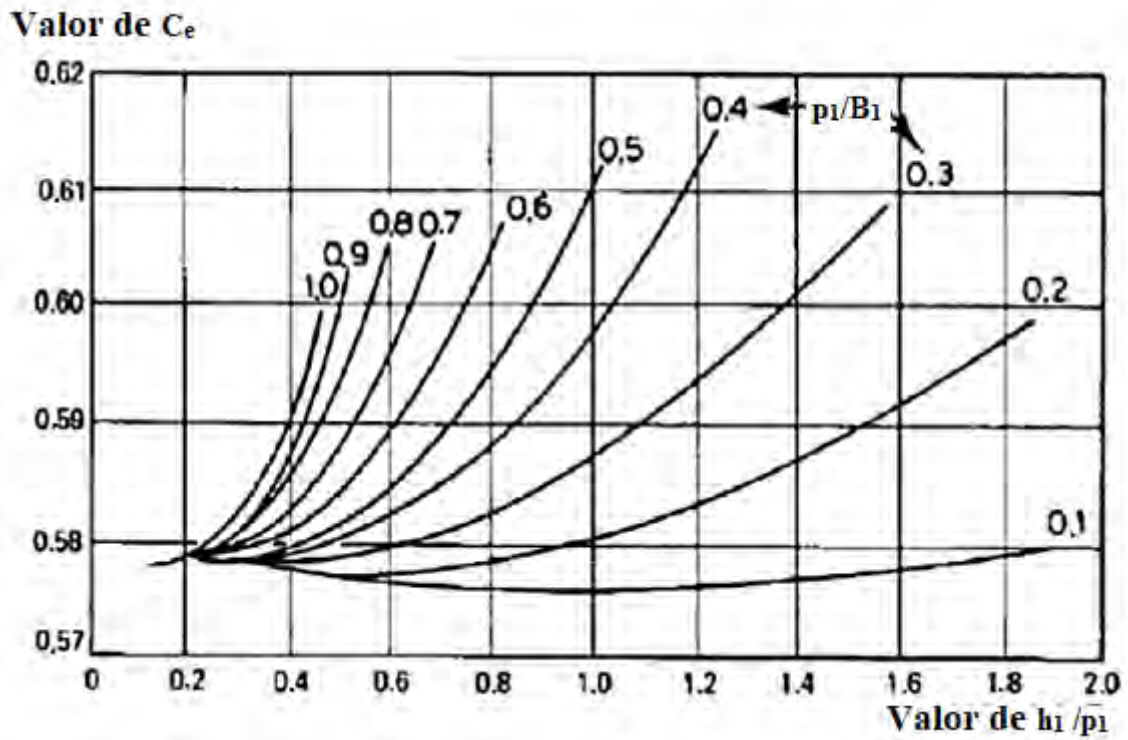
h₁: Carga del vertedero (m).

θ: Ángulo del vértice (Sanchez, 2012).

Para el cálculo de la estimación del valor de coeficiente efectivo de descarga para distintas alturas, se determinó, el coeficiente efectivo de descarga, C_e, depende de las relaciones h₁ /p₁, h₁ /B₁, donde h₁ es la carga del vertedero, p₁ es la altura hasta el vértice y B₁ es el ancho. La estimación del valor de C_e para un ángulo de escotadura θ = 90° ver Figura 15.

Figura 15

Valores de coeficiente de descarga para el vertedero triangular de 90°.



Nota. Fuente: (Sanchez, 2012).

Con los datos obtenidos del coeficiente efectivo a distintas alturas, se calcularon los caudales de agua a ingreso de planta, utilizando la ecuación número 2.

- Se calculó la velocidad de sedimentación (V_s en m/s o en cm/s) mediante la ecuación 3:

$$V_s = \frac{Q}{A_s} * 100 \quad (3)$$

Siendo:

V_s : velocidad de sedimentación (cm/s).

A_s : área superficial de la unidad (A_s), que es el área superficial de la zona de sedimentación (m^2).

Q: Caudal de diseño (m³/s).

El factor 100 convierte el resultado de m/s a cm/s, si se desea solo en unidades de m/s no se utiliza el factor 100 (Organización panamericana de la salud (OPS) & CEPIS, 2005).

- Se calculó la velocidad horizontal (V_h en m/s o en cm/s) del sedimentador mediante las ecuaciones 4 y 5:

$$V_H = \frac{Q}{B * H} \quad (4)$$

$$V_H = \frac{100 * Q}{B * H} \quad (5)$$

Siendo:

V_H : Velocidad horizontal (m/s).

Q: Caudal (m³/s).

B: Ancho del sedimentador (m).

H: Altura del sedimentador (m).

El factor 100 convierte el resultado de m/s a cm/s, si se desea solo en unidades de m/s no se utiliza el factor 100 (Organización panamericana de la salud (OPS) & CEPIS, 2005).

- Se calculó el caudal de agua en la cámara de recolección a salida de filtro lento, mediante el metodo volumétrico, cronometrando cuanto tiempo tarda en llenar el recipiente de volumen conocido, para el cálculo del caudal de agua a salida de filtro lento se da a conocer en las siguientes ecuaciones número 6 y 7:

$$Q = \frac{V}{t} * 1000 \quad (6)$$

$$V = A * H_4 \quad (7)$$

Donde:

Q: Caudal a salida de filtro lento (L/s).

V: Volumen de agua en la cámara de recolección (m³).

t: Tiempo de llenado de la camara de recolección (s).

H₄: Altura del nivel del agua (m).

A: Área de la base de la camara de recolección que es igual al lago por ancho (m²).

El factor 1000 convierte el resultado de m³ a L.

- Se calculó la velocidad de filtración mediante la ecuación 8.

$$V_f = \frac{Q_{md}}{N * A_f} \quad (8)$$

Donde:

V_f: Velocidad de filtración (m/h).

Q_{md}: Caudal (m³/h).

N: Número de filtros (adimensional).

A_f: Área del filtro lento (m²) (Ministerio de Vivienda Construcion y Saneamiento, 2018).

2. Prueba de trazabilidad de permanencia de agua en el sedimentador y filtro lento de la PTAP.

Se realizó la prueba de trazabilidad de permanencia de agua en el sedimentador y filtro lento el 31 de octubre del 2025 utilizando como trazador (NaCl), registrándose la variación de conductividad en función del tiempo para evaluar el comportamiento hidráulico del sistema.

El registro fotográfico del procedimiento se presenta en el Apéndice F, para lo cual se ejecutó los cálculos correspondientes:

- **Cálculo del Tiempo de retención teórico T_0 (horas) del sedimentador**

La fórmula para hallar el tiempo de retención del sedimentador se muestra en la ecuación 9.

$$T_0 = \frac{A_s * H}{3600 * Q} \quad (9)$$

A_s : área superficial de la unidad (A_s), que es el área superficial de la zona de sedimentación (m^2).

H: altura del sedimentador (m).

Q: Caudal de diseño (m^3/s).

El factor 3600 convierte el resultado de segundos en una hora (Organización panamericana de la salud (OPS) & CEPIS, 2005).

- **Cálculo del Tiempo de retención hidráulico del filtro lento teórico**

El TRH es una función del caudal (Q, m^3/h) y el volumen total de la arena (V , m^3) y se calculó mediante la ecuación 10.

$$TRH = \frac{V_0}{Q} \quad (10)$$

Donde:

TRH: Tiempo de retención hidráulico (h).

V_0 : Volumen total de arena (m^3).

Q: Caudal de filtración (m^3/h).

El tiempo de retención hidráulica, la temperatura y el tamaño de la arena también influyen en la calidad final del agua del efluente (Quintero & Alferez, 2008).

- **Cálculo del peso del trazador que se añadió al sedimentador y filtro lento**

Para la evaluación mediante el trazador seleccionado, aplicamos la dosificación instantánea, para este caso usamos como sustancia trazadora cloruro de sodio (NaCl) en solución, la cantidad de trazador (kg) que se necesitó añadir al sedimentador y filtro lento en evaluación está dada por la siguiente ecuación 11:

$$P = \frac{V * K * C_0}{I * 10^3} \quad (11)$$

Dónde:

P: peso del trazador por añadir al sedimentador o filtro lento (kg).

V: volumen útil del sedimentador o filtro lento (m³).

K: constante de corrección (adimensional).

C₀: concentración (mg/L o g/m³).

I: grado de pureza del trazador, fracción de la unidad (Calle Idrovo & Zambrano Torres, 2015).

El tipo de dosificación para evaluar fue el de dosificación instantánea.

Se aplicó una concentración (C₀) a la entrada del sedimentador y filtro lento en un tiempo muy corto, (T₀) y en un punto tal que se mezcló instantáneamente con la masa de agua afluente de la unidad que se analizó. Se utilizó una concentración de 50 mg/L donde el peso del trazador en ambos sistemas se da a conocer en la Tabla 8, en ambos sistemas se consideraron el factor de corrección para compensar pérdidas del trazador durante el ensayo,

la cantidad de trazador en ambos sistemas fueron disueltos en 20 litros de agua e inyectados instantáneamente en los sistemas.

Tabla 8

Peso del trazador en ambos sistemas de estudio.

Concentración (mg/L)	Peso de trazador (kg) para el sedimentador.	Peso de trazador (kg) para el filtro lento.
50	4.26	5.09

Nota. La prueba de trazabilidad en la PTAP Tucui se realizó con una concentración de 50 mg/L.

- **Análisis del tiempo de retención por la metodología de la curva de tendencia.**

Para el análisis del tiempo de retención se aplicó la metodología de la Curva de los tiempos de residencia, donde se graficó los valores de tiempo (t) versus variación de concentración (C-Co) en escala aritmética de la misma se levantó una curva, tal cual se indica en el manual de “Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención” (CEPIS, 1992). El tiempo de retención real será en el cual se exprese la mayor concentración de la sustancia trazadora ver Figura 16.

Donde:

T_i: Tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente (min).

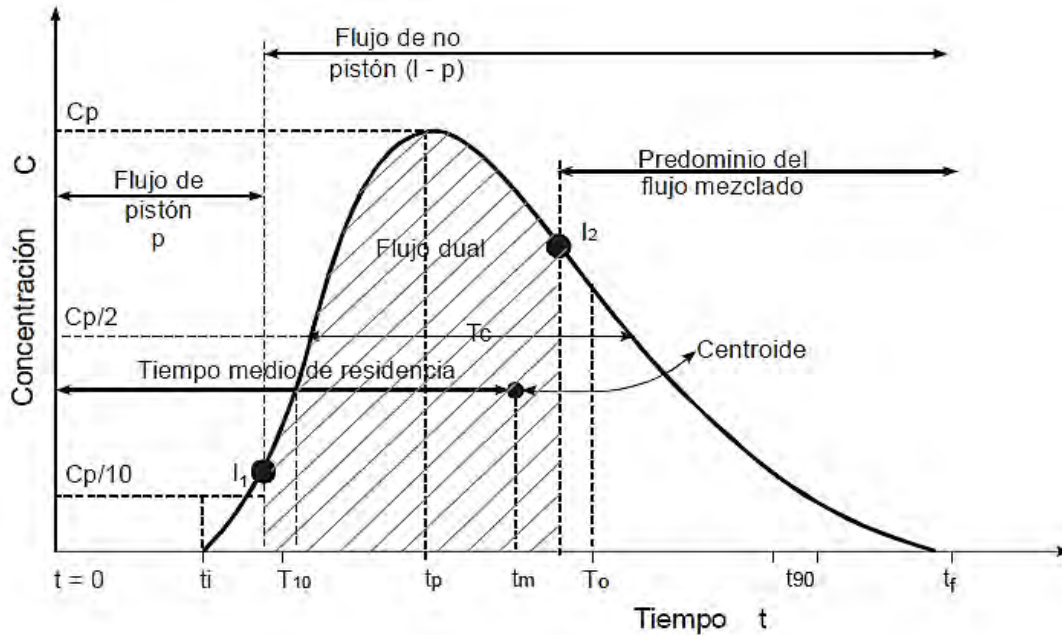
T₁₀: Tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total del trazador (min).

T_p: Tiempo modal, correspondiente a la presentación de la máxima concentración (min).

T_m: Tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de la cantidad del trazador (min).

Figura 16

Curva de tiempo de residencia.



Nota. Fuente: (Calle Idrovo & Zambrano Torres, 2015).

T_0 : Tiempo medio de retención o tiempo teórico de retención (min).

T_{90} : Tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total del trazador (min).

T_f : Tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador al reactor(min).

T_c : Tiempo que representa el 10% de C_p (min).

T_b : Tiempo que representa el 50% de C_p (min).

C_0 : Concentración inicial (mg/L).

C_p : Concentración máxima a la salida (mg/L) (Calle Idrovo & Zambrano Torres, 2015).

Se utilizarán los siguientes criterios:

a) Mide los cortocircuitos grandes. Es igual a 1 para flujo de pistón y a 0 para el flujo mezclado. Si el valor de la relación es ($< 0,3$), puede significar que existe paso directo del trazador entre la entrada y la salida (cortocircuito hidráulico) (Calle Idrovo & Zambrano Torres, 2015).

.

$$\frac{T_i}{T_0} \quad (12)$$

b) Si la relación es menor que la unidad, existen cortocircuitos hidráulicos. Si es mayor, hay errores experimentales o existen zonas donde el trazador ha quedado retenido por un cierto tiempo (espacios muertos), para luego salir lentamente, con lo que la rama descendente de la curva presenta una forma alargada, que desplaza el centroide del área y aumenta el valor de T_m , haciendo $T_m > T_0$ (Calle Idrovo & Zambrano Torres, 2015).

.

$$\frac{T_m}{T_0} \quad (13)$$

c) Indica la relación de flujo de pistón y flujo mezclado. Cuando es igual a 1, existe únicamente flujo de pistón, y cuando es 0, existe flujo mezclado. Cuando la relación t_p/t_o se aproxima a 1 y $T_i/T_0 > 0,5$, se puede concluir que existe predominio de flujo de pistón, y cuando se aproxima a 0, existe predominio de flujo mezclado (Calle Idrovo & Zambrano Torres, 2015).

$$\frac{T_P}{T_0} \quad (14)$$

d) Valores auxiliares T_c y T_b

$$T_c = \frac{Cp}{10} \text{ y } T_b = \frac{Cp}{2} \quad (15)$$

e) Expresa la excentricidad de la curva y, por lo tanto, es función de la recirculación. Es igual a (0) para flujo de pistón y mayor de 2,3 para flujo mezclado ideal.

$$e = \frac{(T_f - T_f) - (T_p - T_i)}{T_0} \quad (16)$$

Fuente: (Calle Idrovo & Zambrano Torres, 2015).

Se realizó una recolección de información existente respecto al funcionamiento y características hidráulicas, materiales utilizados, calidad del agua y estado actual de cada una de las estructuras que la conforman (Calle Idrovo & Zambrano Torres, 2015).

Se tomó en consideración para el tiempo de residencia del sedimentador y filtro lento el D.S. N°011-2006-VIVIENDA del reglamento nacional de edificaciones.

Cálculo del caudal por el metodo de inyección instantánea

Para el cálculo del caudal instantáneo en la prueba de trazabilidad se utilizará la ecuación número 16.

$$Q = \frac{V_1 * C_1}{\int_0^t C_2 * dt} \quad (17)$$

Donde:

Q = Caudal del trazador inyectado (L/s).

C₁: Concentración de la solución inyectada (mg/L).

C₂: Concentración obtenida en la sección de muestreo (mg/L).

V₁: Volumen de la solución inyectada (L).

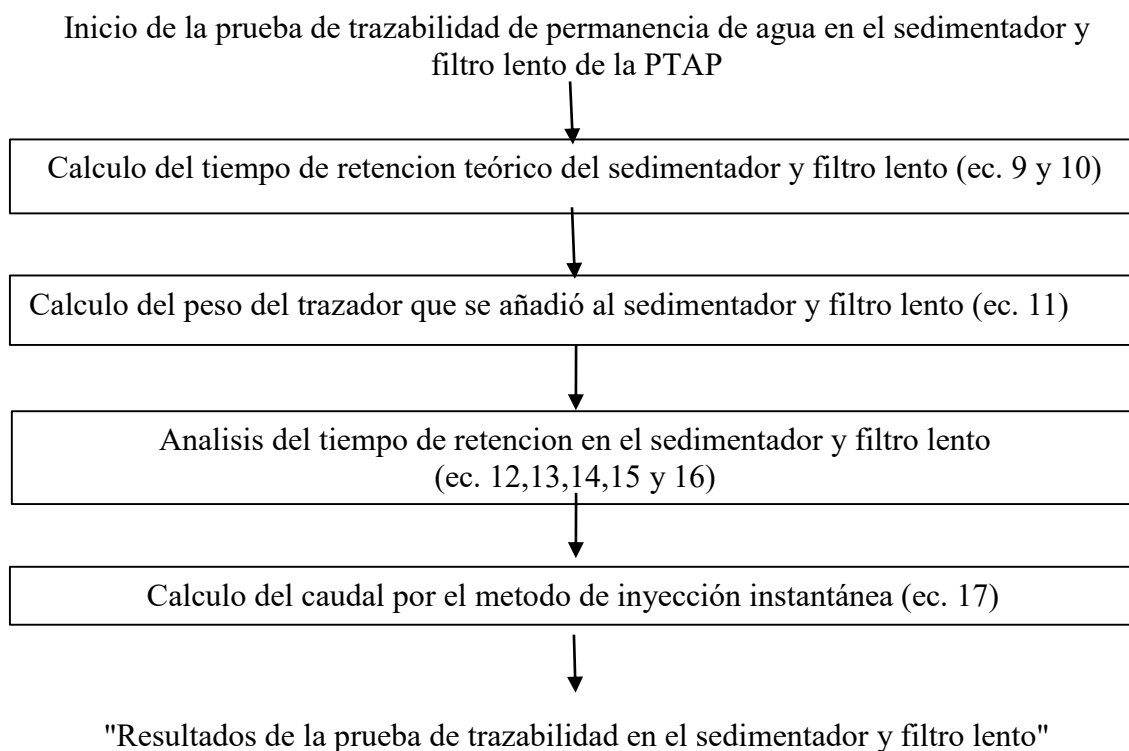
t: Tiempo en que toda la solución cruza por el punto de muestreo (s) (Saldaña Marin, 2019).

Flujograma: Prueba de trazabilidad de permanencia de agua en el sedimentador y filtro lento de la PTAP.

Este flujograma describe la secuencia de cálculos para realizar la prueba de trazabilidad de permanencia de agua en ambos procesos, mediante la curva de tendencia donde se graficó los valores de tiempo (t) versus la variación de la conductividad, se da a conocer el flujograma en la Figura 17.

Figura 17

Flujograma: Prueba de trazabilidad de permanencia de agua en el sedimentador y filtro lento.



3. Calidad físico química y microbiológica del agua filtrada.

Se realizó la toma de muestra de agua para el análisis de los parámetros físico químicos y microbiológicos en tres puntos de muestreo, se empleó un muestreo simple para la recolección de las muestras.

En la Tabla 9 se da a conocer los puntos de muestreo, los parametros que se analizó y posteriormente, los resultados obtenidos en los tres puntos de muestreo se compararán con los Estándar de calidad ambiental (D.S. N° 004 -2017-MINAM), categoria A2 y con los Valores de referencia establecidos en el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano del D.S. N° 031-2010-SA.

Tabla 9

Puntos de muestreo para el analisis de los parametros físico químicos y microbiológicos en la PTAP.

Puntos de muestreo	Tipo de agua	Tipo de muestra	Parametros a analizar	Norma a comparar
Ingreso al sedimentador	Agua cruda	Muestra simple	En los tres puntos de muestreo se analizó estos parámetros de calidad de agua:	Estándar de calidad ambiental (D.S. N° 004 -2017-MINAM), Categoria A2.
Ingreso al filtro lento de arena (post-sedimentación).	Agua en tratamiento	Muestra simple	- Turbiedad. - pH. - Conductividad, - Coliformes totales	Valores de referencia del D.S. N° 031-2010 -SA .
Salida del filtro lento de arena (antes del proceso de desinfección).	Agua en tratamiento	Muestra simple	- Coliformes termotolerantes, - Bacterias heterotroficas.	Valores de referencia del D.S. N° 031-2010 -SA.

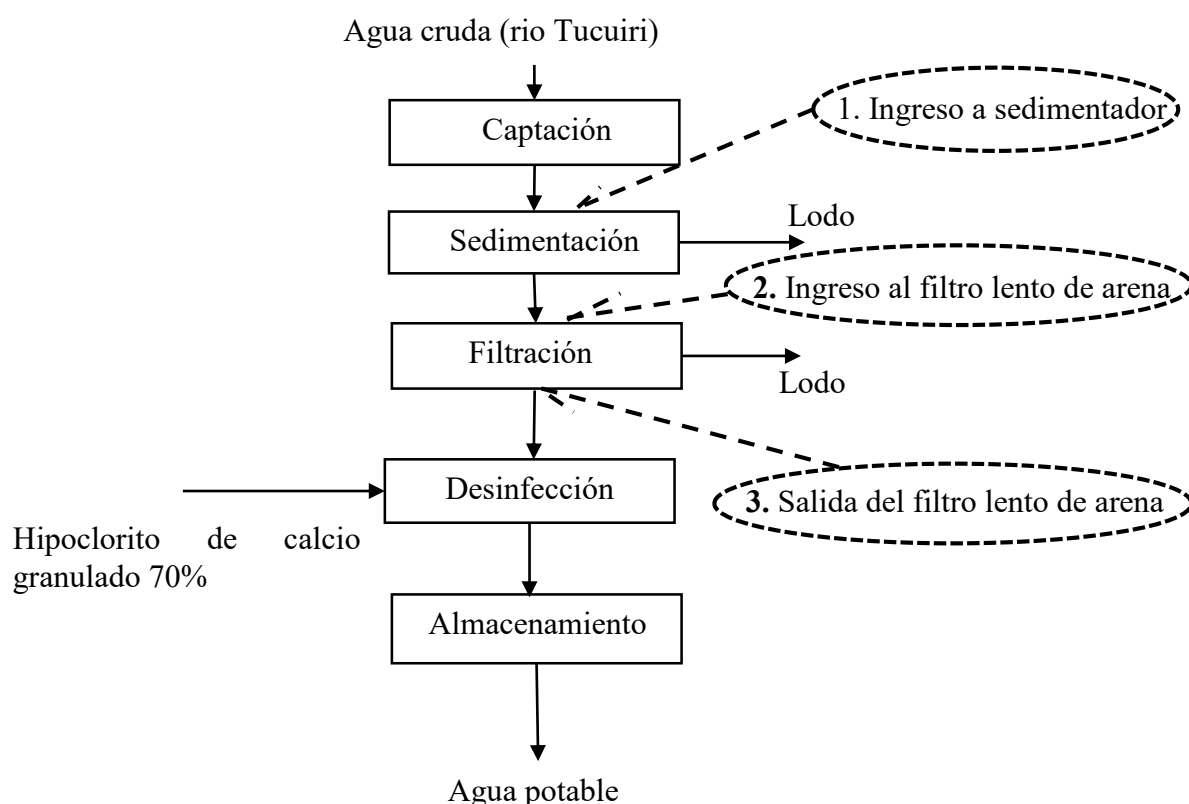
Nota. Con los datos obtenidos de los parámetros físico químicos y biológicos, se realizó el análisis de la calidad del agua en cada proceso de la PTAP, comparándolo con la normativa correspondiente.

- **Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de agua potable Tucurí y ubicación de los puntos de muestreo.**

En la Figura 18 se muestra el diagrama de flujo del proceso (DFP) de la planta de tratamiento de agua potable indicando los tres puntos de muestreo.

Figura 18

Diagrama de flujo del proceso de potabilización de agua en la PTAP Tucurí.



Nota. Las líneas entre cortadas de color negro indican la ubicación de los tres puntos de muestreo de agua.

Las muestras de agua se tomaron en dos momentos del año en **temporada de sequía** durante el mes de octubre del 2025 las muestras fueron enviadas al laboratorio LOUIS

PASTEUR en la ciudad de Cusco, donde se analizaron los parámetros microbiológicos (coliformes totales, termotolerantes y bacterias heterotróficas), se empleó el método de fermentación en tubos múltiples para miembros del grupo de coliformes y el recuento en placa heterotrófica y vertido en placa para bacterias heterotróficas, los análisis físicoquímicos (turbiedad, pH, conductividad) fueron analizados utilizando los equipos de la EPS. EMPSSAPAL S.A. y en **temporada de lluvia** durante el mes de febrero del 2026, las muestras de agua fueron enviadas al laboratorio MICROLAB en la ciudad de Cusco, donde se analizaron los parámetros microbiológicos, se empleó el método de fermentación en tubos múltiples para miembros del grupo de coliformes y el recuento en placa heterotrófica y vertido en placa para bacterias heterotróficas, los análisis físicoquímicos fueron analizados en el laboratorio de Análisis químico del Departamento Académico de Química de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, se empleó los métodos: NTP 339.088, NTP 214.003, NTP 24.006. Las tomas de muestras en ambas temporadas se realizaron siguiendo el protocolo establecido ver Apéndice G.

3.3.3 Evaluación de las deficiencias técnicas que presentaron en el sedimentador y filtro lento que afectan a la calidad de agua filtrada.

La evaluación de las deficiencias técnicas del sedimentador y filtro lento se realizó mediante los siguientes pasos:

1. Evaluación hidráulica del sedimentador y filtro lento.

La evaluación hidráulica del sistema se comparó con los criterios de diseño establecidos en el Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA del Reglamento Nacional de Edificaciones, para analizar si las condiciones actuales del sedimentador y filtro lento cumplen o no con el reglamento.

2. Cálculo de la capacidad estimada del sedimentador y filtro lento.

Para la capacidad estimada del sedimentador, se utilizó la ecuación 18

$$Capacidad \left(\frac{m^3}{d} \right) = \text{Área superficial Total} \times \text{Tasa de decantación} \quad (18)$$

Para la capacidad estimada del filtro lento, se utilizó la ecuación 19

$$Capacidad \left(\frac{m^3}{d} \right) = \text{Área superficial Total} \times \text{Tasa de filtración} \quad (19)$$

(Toapanta Arce & Tualombo Amagua, 2018).

3. Comparación de los caudales según el manual de operaciones, prueba de trazabilidad y criterios normativos en las unidades de tratamiento.

Se utilizó las normas técnicas nacionales o internacionales que establecen cómo debe operar un sedimentador y filtro lento en una planta de filtración lenta.

4. Evaluación de la eficiencia de las operaciones de sedimentación y filtración lenta.

Para la eficiencia de remoción de las unidades de tratamiento (sedimentador y filtro lento) se utilizó la ecuación 20.

$$Ef = \frac{\text{Concentración } X_i - \text{Concentración } X_f}{\text{Concentración } X_i} * 100 \% \quad (20)$$

Donde:

Ef: es la eficiencia de remoción del parámetro X en %.

Concentración X_i : es la concentración del parámetro X antes del tratamiento en mg/L.

Concentración X_s : es la concentración del parámetro X después del tratamiento en

mg/L (Guaman Guaman & Roman Sarmiento, 2023). Los parámetros de eficiencia de remoción que se analizarán en el sistema de sedimentación y filtro lento se dan en la Tabla 10:

Tabla 10

Parámetros de eficiencia de remoción analizados en el sistema de sedimentación y filtro lento.

Parámetros	% de eficiencia en el sedimentador	% de eficiencia en el filtro lento
Turbiedad.	X	X
Coliformes Totales.	X	X
Coliformes Termotolerantes.	X	X
Bacterias Heterotróficas.	X	X

3.3.4 Determinación de las características técnicas de un sistema de coagulación-floculación que coadyuven a mejorar la calidad del agua filtrada.

Para la determinación de las características técnicas del sistema de coagulación-floculación, se aplicaron las normas técnicas nacionales o internacionales que establecen cómo debe operar un sistema de coagulación-floculación para que cumpla con los requisitos técnicos, utilizando el Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA del reglamento nacional de edificaciones; así como, también los documentos técnicos del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) que pertenece a la Organización Panamericana de la Salud (OPS), que actúa como la oficina regional para las Américas de la Organización Mundial de la Salud (OMS), para ello se procedió a realizar la caracterización técnica del sistema de coagulación y floculación.

Se procedió a hallar el consumo máximo diario con el que trabaja la planta.

- **Consumo máximo diario (Q_{md}):** se debe considerar un valor de 1.3 del consumo diario anual. La fórmula de caudal promedio y caudal máximo diario se muestra en la ecuación 21 y 22.

$$Q_p = \frac{Dot * P_d}{86400} \quad (21)$$

$$Q_{md} = 1.3 * Q_P \quad (22)$$

Donde:

Q_p : Caudal promedio diario anual en L/s.

Q_{md} : Caudal máximo diario en L/s.

Dot: Dotación en L/ hab · d.

P_d : Población de diseño en habitantes (hab).

1.3: Coeficiente de variación diaria (adimensional) (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2018).

Conociendo el consumo máximo diario, el sistema propuesto de coagulación y floculación para mejorar la calidad del agua filtrada en la PTAP, fue diseñado considerando el caudal nominal de 3 L/s, debido a que las unidades existentes que consta de un sistema de sedimentación y filtración lenta, fueron originalmente dimensionadas para dicho caudal. Un incremento del caudal podría alterar las condiciones hidráulicas y la eficiencia operacional de las unidades existentes es por este motivo que se utilizó como caudal de diseño de las características del proceso de coagulación y floculación el caudal de 3 L/s.

- Características técnicas del proceso de coagulación y floculación antes del sedimentador.

Para la incorporación de un proceso de coagulación y floculación antes del proceso de sedimentación se procedió en base a los siguientes pasos:

- A. Características técnicas del dosificador en solución.
- B. Características técnicas de la unidad para difusor.

C. Evaluación de las características hidráulicas del vertedero triangular existente, como una unidad de mezcla rápida.

D. Características técnicas de la unidad de floculación.

A. Características técnicas del dosificador en solución (para el proceso de coagulación).

Para las características técnicas del dosificador en solución, se consideró el tipo de coagulante y el agua a tratar, se da en dos unidades, una en operación y otra en preparación, para que la dosificación sea continua, el tipo de equipo que se empleó es por gravedad con orificios de carga constante y la graduación de la cantidad a emplear se realizó con el coagulante en solución, el coagulante que se utilizó para el proceso de coagulación es el Sulfato de Aluminio Tipo A ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$) sólido granulado.

- **Cálculo del caudal de solución promedio:**

Se calculó mediante la ecuación 23.

$$q = \frac{Q * D}{C} \quad (23)$$

Donde:

q: Caudal de solución promedio ($\text{m}^3/\text{día}$).

Q: Caudal de diseño ($\text{m}^3/\text{día}$).

D: Dosis promedio (mg/L).

C: Concentración del coagulante (mg/L) (Romero Giraldez, 2021).

- **Cálculo del volumen del tanque de solución (V):**

Se calculó mediante la ecuación 24.

$$V = q * \frac{T_0}{24} \quad (24)$$

Donde:

V: Volumen del tanque de solución (m³).

q: Caudal de solución promedio (m³/día).

T₀: Intervalo de tiempo (horas).

24: Es un factor de conversión que convierte el tiempo de autonomía en días.

- **Consumo promedio diario de coagulante:**

Se calculó mediante la ecuación 25.

$$P = Q * D \quad (25)$$

Donde:

P: Consumo promedio diario de coagulante (mg/s).

Q: Caudal de diseño (L/s).

D: Dosis promedio (mg/L).

- **Consumo de coagulante por tanque de solución:**

Se calculó mediante la ecuación 26.

$$P_0 = P * \frac{T_0}{24} \quad (26)$$

Donde:

P₀: consumo de coagulante por tanque de solución (kg).

P: promedio diario de coagulante (kg/día).

T₀: intervalo de tiempo (horas) (Romero Giraldez, 2021).

- **Caudal máximo dosificado:**

Se calculó mediante la ecuación 27.

$$q_M = Q * \frac{D_M}{C} \quad (27)$$

Donde:

q_M : Caudal máximo dosificado (L/s).

Q: Caudal de diseño (L/s).

D_M : Dosis máxima (mg/L).

C: Concentración del coagulante (mg/L).

- **Caudal mínimo dosificado:**

Se calculó mediante la ecuación 28.

$$q_m = Q * \frac{D_m}{C} \quad (28)$$

Donde:

q_m : Caudal mínimo dosificado (mg/s).

Q: Caudal de diseño (L/s).

D_m : Dosis mínima (mg/L).

C: Concentración del coagulante (mg/L) (Romero Giraldez, 2021).

- **Rango del dosificador:**

Se calculó mediante la ecuación 29.

$$R = q_M - q_m \quad (29)$$

Donde:

R: Rango de dosificador (L/h).

q_M : Caudal máximo dosificado (L/h).

q_m : Caudal mínimo dosificado (L/h) (Romero Giraldez, 2021).

Flujograma A: características técnicas del dosificador en solución (para el proceso de coagulación).

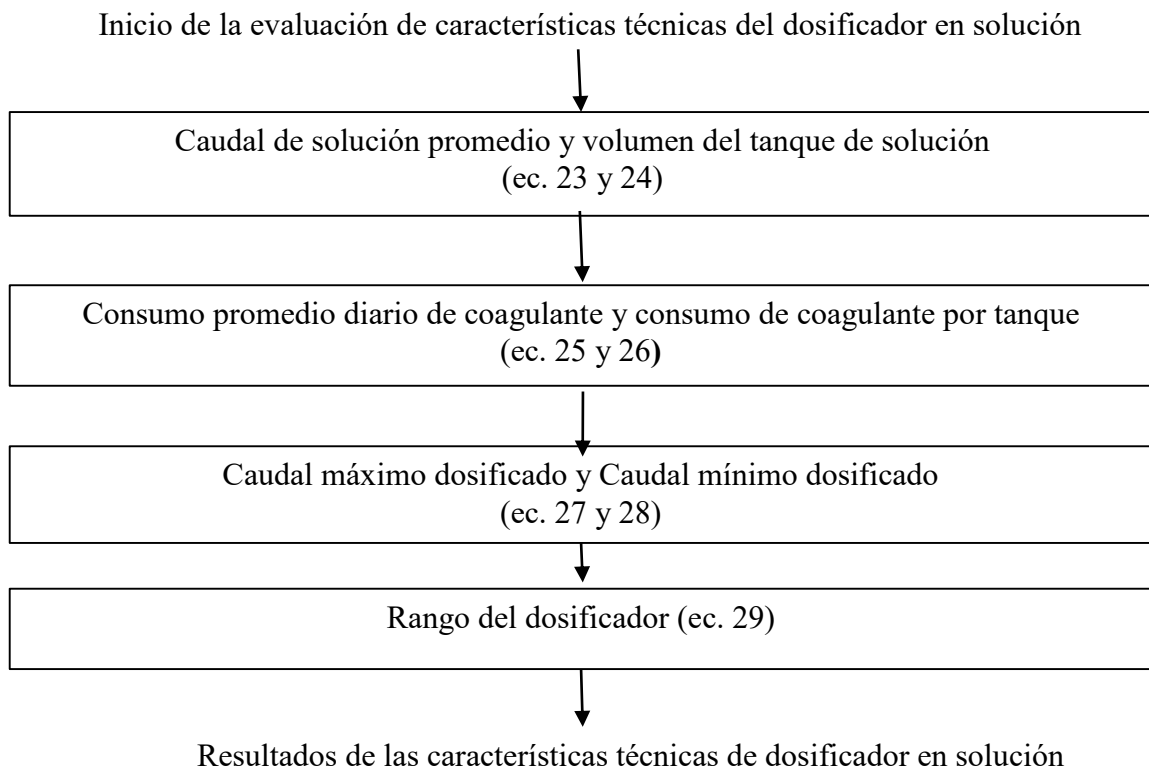
Este flujograma describe la secuencia de cálculos para la dosificación en solución, para la incorporación de un proceso de coagulación-floculación antes del proceso de sedimentación, se da a conocer el flujograma A en la Figura 19.

B. Características técnicas de la unidad para difusor (para el proceso de coagulación).

Esta unidad tiene la finalidad de alcanzar mayor dispersión y mezcla del coagulante. La mezcla está relacionada con la turbulencia, por ello es importante relacionar las variaciones de la concentración con la velocidad.

Figura 19

Flujograma A: Características técnicas del dosificador en solución.



- **Calculo del Número de orificios:**

Se calculó mediante la ecuación 30.

$$N = \frac{B}{e} \quad (30)$$

Donde:

N: Número de orificios (adimensional).

e: Espaciamiento entre orificios (m).

B: Ancho del vertedero (m) (Romero Giraldez, 2021).

- **Calculo del área de orificios:**

Se calculó mediante la ecuación 31.

$$A_0 = \frac{\pi * d_0^2}{4} \quad (31)$$

Donde:

A₀: Área de orificios (m²).

d₀: Diámetro de los orificios (m).

- **Caudal promedio de solución por aplicar:**

Se calculó mediante la ecuación 32.

$$q' = \frac{Q * D}{C} \quad (32)$$

Donde:

q': Caudal promedio de solución (m³/s).

Q: Caudal de diseño (m³/s).

D: Dosis promedio (mg/L).

C: Concentración del coagulante (mg/L).

- **Velocidad en los orificios:**

Se calculó mediante la ecuación 33.

$$V_0 = \frac{q'}{A_0 * N} \quad (33)$$

Donde:

V_0 : Velocidad en los orificios (m/s).

q' : Caudal promedio de solución por aplicar (m³/s).

A_0 : Sección de orificios (m²).

N : Número de orificios (adimensional) (Romero Giraldez, 2021).

- **Velocidad en la tubería:**

Se calculó mediante la ecuación 34.

$$V_t = \frac{V_0}{R} \quad (34)$$

Donde:

V_t : Velocidad en la tubería (m/s).

V_0 : Velocidad en los orificios (m/s).

R : Constante de relación de velocidades (adimensional).

- **Área de la tubería difusora:**

Se calculó mediante la ecuación 35.

$$A_t = \frac{q'}{V_t} \quad (35)$$

Donde:

A_t : Área de la tubería difusora (m²).

q' : Caudal promedio de solución (m³/s).

V_t : Velocidad en los orificios (m/s).

- **Diámetro de la tubería difusora:**

Se calculó mediante la ecuación 36.

$$D_t = \sqrt{\frac{4 * A_t}{\pi}} \quad (36)$$

Donde:

D_t : Diametro de la tubería (m).

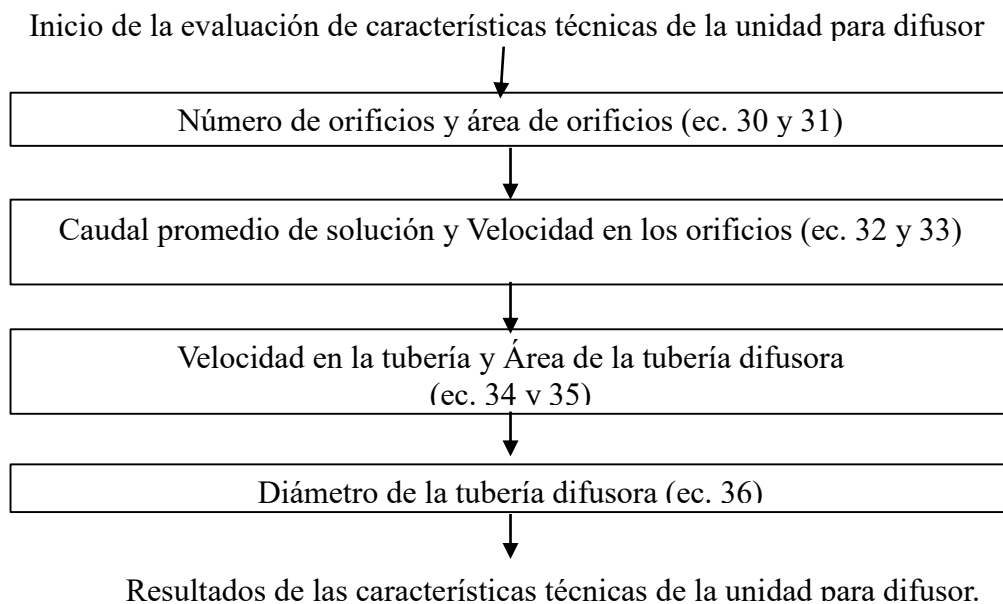
A_t : Sección de la tubería difusora (m^2) (Romero Giraldez, 2021).

Flujograma B: Características técnicas de la unidad para difusor (para el proceso de coagulación).

Este flujograma describe la secuencia de cálculos de la unidad para difusor, para la incorporación de un proceso de coagulación-floculación antes del proceso de sedimentación, se da a conocer el flujograma B en la Figura 20.

Figura 20

Flujograma B: Características técnicas de la unidad para difusor.



C. Evaluación de las características hidráulicas del vertedero triangular existente, como una unidad de mezcla rápida.

Se evaluaron las características hidráulicas del vertedero triangular a partir de las mediciones en campo, con el fin de verificar si esta unidad puede trabajar como una unidad de mezcla rápida, para así añadir el coagulante sulfato de aluminio a través del tubo difusor con orificios de carga constante de un sistema de dosificador en solución por gravedad.

Los vertederos triangulares son recomendables para caudales menores a 50 L/s, se recomienda establecer el tiempo de mezcla, el gradiente de velocidad de mezcla y la forma de obtener una distribución uniforme y rápida del coagulante en toda la masa de agua (Barraza Soto, 2006). Se tomó en consideración para la evaluación de las características hidráulicas del vertedero el D.S. N° 011-2006 VIVIENDA del reglamento nacional de edificaciones.

- **Cálculo de caudal unitario promedio:**

Se calculó mediante la ecuación 37.

$$q = \frac{Q}{B} \quad (37)$$

Donde:

q: Caudal unitario promedio (m³/s).

Q: Caudal de diseño (m³/s).

B: Ancho del vertedero (m).

- **Cálculo de la altura crítica:**

Se calculó mediante la ecuación 38.

$$h_c = \left(\frac{q^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (38)$$

Donde:

h_c : Altura crítica (m).

q : Caudal unitario promedio (m^3/s).

g : Aceleración de la gravedad ($9.81 m/s^2$) (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2023).

- **Cálculo de la altura al inicio del resalto.**

Se calculó mediante la ecuación 39.

$$h_1 = \frac{(1.41 * h_c)}{2.56 + \left(\frac{P}{h_c}\right)^{1/2}} \quad (39)$$

Donde:

h_1 : Altura a inicio del resalto (m).

h_c : Altura crítica (m).

P : Altura desde el vértice del vertedero al fondo del canal aguas abajo (0.40 m), este valor se determinó de la medición en campo del vertedero de la PTAP Tucui.

Nota. El resalto hidráulico es el cambio de régimen de flujo supercrítico (condición de control aguas arriba) a flujo subcrítico (condición de control aguas abajo), acompañado de remolinos o vórtices turbulentos y gran disipación de energía (Manrique Andrade, 2013).

- **Velocidad al inicio del resalto:**

Se calculó mediante la ecuación 40.

$$V_1 = \frac{q}{h_1} \quad (40)$$

Donde:

V_1 : Velocidad al inicio del resalto (m/s).

q : Caudal unitario promedio (m^3/s).

h_1 : Altura a inicio del resalto (m).

- **Numero de Froude:**

Se calculó mediante la ecuación 41.

$$F_1 = \frac{V_1}{(g * h_1)^{1/2}} \quad (41)$$

Donde:

F_1 : Número de Froude (adimensional).

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2).

h_1 : Altura a inicio del resalto (m).

V_1 : Velocidad al inicio del resalto (m/s).

- **Altura de agua después del resalto:**

Se calculó mediante la ecuación 42.

$$h_2 = \left(\frac{h_1}{2}\right) * ((1 + 8 * F_1)^{\frac{1}{2}} - 1) \quad (42)$$

Donde:

h_2 : Altura de agua después del resalto (m).

h_1 : Altura a inicio del resalto (m).

F_1 : Número de Froude (adimensional) (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2023).

- **Velocidad al final del resalto:**

Se calculó mediante la ecuación 43.

$$V_2 = \frac{q}{h_2} \quad (43)$$

Donde:

V_2 : Velocidad al final del resalto (m/s).

h_2 : Altura de agua después del resalto (m).

q : Caudal unitario promedio (m^3/s).

Energía disipada en el resalto:

Se calculó mediante la ecuación 44.

$$h_p = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4 * h_1 * h_2} \quad (44)$$

Donde:

h_p : Energía disipada en el resalto (m).

h_2 : Altura de agua después del resalto (m).

h_1 : Altura a inicio del resalto (m).

- **Longitud del resalto:**

Se calculó mediante la ecuación 45.

$$L_m = 6 * (h_2 - h_1) \quad (45)$$

Donde:

L_m : Longitud del resalto (m).

h_2 : Altura de agua después del resalto (m).

h_1 : Altura a inicio del resalto (m).

- **Distancia del vertedero:**

Se calculó mediante la ecuación 46.

$$L' = 4.3 * P * \left(\frac{h_c}{P}\right)^{0.9} \quad (46)$$

Donde:

L' : Distancia del vertedero (m).

h_c : Altura crítica (m).

P: Altura desde el vértice del vertedero al fondo del canal aguas abajo (0.40 m), este valor se determinó de la medición en campo del vertedero de la PTAP Tucuri.

- **Velocidad media:**

Se calculó mediante la ecuación 47.

$$V_m = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (47)$$

Donde:

V_m : Velocidad media (m/s).

V_1 : Velocidad al inicio del resalto (m/s).

V_2 : Velocidad al final del resalto (m/s) (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2023).

- **Tiempo de mezcla:**

Se calculó mediante la ecuación 48.

$$T = \frac{L_m}{V_m} \quad (48)$$

Donde:

T: Tiempo de mezcla (s).

L_m : Longitud del resalto (m).

V_m : Velocidad media (m/s).

- **Gradiente de velocidad:**

Se calculó mediante la ecuación 49.

$$G = \left(\frac{h_p}{T} \right)^{1/2} * \left(\frac{\gamma}{\mu} \right)^{0.5} \quad (49)$$

Donde:

G: Gradiente de velocidad (s^{-1}).

h_p : Energía disipada en el resalto (m).

T: Tiempo de mezcla (s).

γ : Peso específico del agua (N/m^3).

μ : Viscosidad dinámica del agua ($N \cdot s/m^2$) (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2023).

Flujograma C: Evaluación de las características hidráulicas del vertedero triangular existente, como una unidad de mezcla rápida.

Este flujograma describe la secuencia de cálculos de la evaluación de las características hidráulicas del vertedero triangular existente como una unidad de mezcla rápida, para la incorporación de un proceso de coagulación y floculación antes del proceso de sedimentación, se da a conocer el flujograma C en la siguiente Figura 21.

D. Características técnicas de la unidad de floculación.

Se tomó en consideración para las características técnicas del floculador el D.S. N° 011-2006-VIVIENDA del reglamento nacional de edificaciones, en el ítem 5.9 de la NORMA OS. 020, nos da a conocer los criterios de diseño para una unidad de floculación.

Se consideró para este estudio el floculador de flujo horizontal puesto que, son apropiadas para sistemas de menos de 50 L/s de capacidad (Barraza Soto, 2006).

Características técnicas de un floculador hidráulico de flujo horizontal.

- **Cálculo de la longitud de canales del tramo:**

Se calculó mediante la ecuación 49.

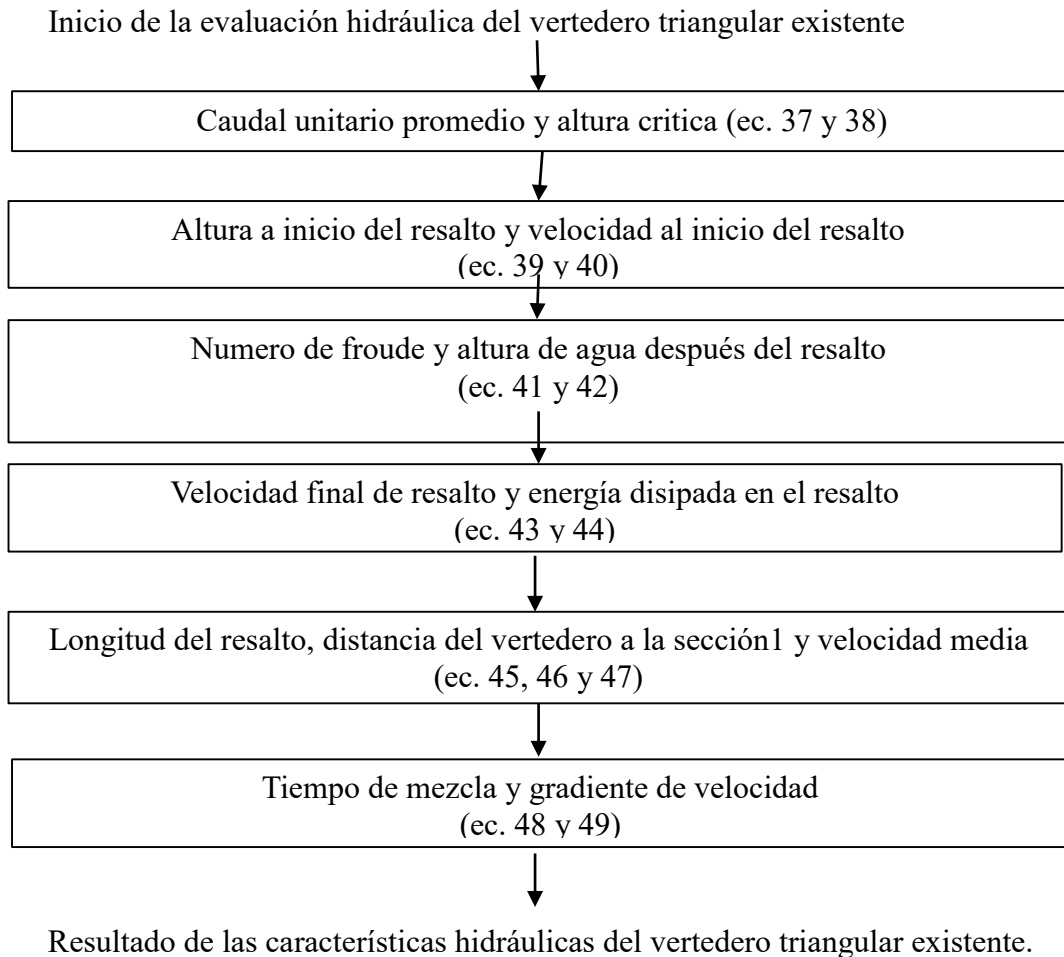
$$l_n = 60 * V_n * T_n \quad (50)$$

Donde:

l_n : Longitud de canal del tramo n (m).

Figura 21

Flujograma C: Evaluación de las características hidráulicas del vertedero triangular existente.



V_n : Velocidad del tramo n (m/s).

T_n : Tiempo de floculación del tramo n (min).

n : Número de tramo (1,2,3).

60: Es el factor que convierte min a segundos.

Fuente: Adaptado de (Benites Bayona, Machuca Quiñones, & Sabino Barreto, 2018).

- **Cálculo de la sección del canal:**

Se calculó mediante la ecuación 51.

$$A_n = \frac{Q}{V_n} \quad (51)$$

Donde:

A_n : Sección del canal del tramo n (m^2).

Q: Caudal de diseño (m^3/s).

V_n : Velocidad en el tramo n (m/s).

n: Número de tramo (1,2,3).

- **Cálculo del ancho del canal del tramo:**

Se calculó mediante la ecuación 52.

$$a_n = \frac{A_n}{H} \quad (52)$$

Donde:

a_n : Ancho del canal del tramo n (m).

A_n : Sección del canal del tramo n (m^2).

H: Altura del canal (m).

n: Número de tramo (1,2,3).

Fuente: Adaptado de (Benites Bayona, Machuca Quiñones, & Sabino Barreto, 2018).

- **Cálculo del ancho de vueltas del tramo:**

Se calculó mediante la ecuación 53.

$$d_n = 1.5 * a_n \quad (53)$$

Donde:

d_n : Ancho de vueltas del tramo n (m).

a_n : Ancho del canal del tramo n (m).

n: Número de tramo (1,2,3).

- **Cálculo del ancho del floculador:**

Se calculó mediante la ecuación 54.

$$B = b + d_n \quad (54)$$

Donde:

B: Ancho del floculador (m).

b: Ancho total útil de la lámina (m).

d_n : Ancho de vueltas del tramo n (m).

n: Número de tramo (1,2,3).

- **Cálculo del número de canales del tramo:**

Se calculó mediante la ecuación 55.

$$N_n = \frac{l_n}{B} \quad (55)$$

Donde:

N_n : Número de canales del tramo n (adimensional).

l_n : Longitud de canal del tramo n (m).

B: Ancho del floculador (m).

n: Número de tramo (1,2,3).

Fuente: Adaptado de (Benites Bayona, Machuca Quiñones, & Sabino Barreto, 2018).

- **Cálculo de la longitud del tramo:**

Se calculó mediante la ecuación 56.

$$L_n = N_n * a_n + (N_n - 1) * e \quad (56)$$

Donde:

L_n : Longitud del tramo n (m).

N_n : Número de canales del tramo n (adimensional).

a_n : Ancho del canal del tramo n (m).

e: Espesor de las pantallas (m).

n: Número de tramo (1,2,3).

- **Cálculo del perímetro mojado de la sección del tramo:**

Se calculó mediante la ecuación 57.

$$P_n = 2 * H + a_n \quad (57)$$

Donde:

P_n : Perímetro mojado de la sección del tramo n (m).

H: Altura del canal (m).

a_n : Ancho del canal del tramo n (m).

n: Número de tramo (1,2,3).

- **Cálculo del radio hidráulico de los canales del tramo:**

Se calculó mediante la ecuación 58.

$$Rh_n = H * \frac{a_n}{P_n} \quad (58)$$

Donde:

Rh_n : Radio hidráulico de los canales del tramo n (m).

H: Altura del canal (m).

a_n : Ancho del canal del tramo n (m).

n: Número de tramo (1,2,3).

P_n : Perímetro mojado de la sección del tramo n (m).

- **Cálculo de pérdida de carga en las vueltas del tramo:**

Se calculó mediante la ecuación 59.

$$h_{1n} = K * V_n^2 * \frac{(N_n - 1)}{2 * g} \quad (59)$$

Donde:

h_{1n} : Pérdida de carga en las vueltas del tramo n (m).

K: Coeficiente de perdida de carga en las vueltas (adimensional).

V_n : Velocidad en el tramo n (m/s).

N_n : Número de canales del tramo n (adimensional).

g: Aceleración de la gravedad (m/s^2).

n: Número de tramo (1,2,3).

Fuente: Adaptado de (Benites Bayona, Machuca Quiñones, & Sabino Barreto, 2018).

- **Cálculo de la pérdida de carga en los canales del tramo:**

Se calculó mediante la ecuación 60.

$$h_{2n} = \left(\frac{n * V_n}{Rh_n^{2/3}} \right)^2 * l_n \quad (60)$$

Donde:

h_{2n} : Pérdida de carga en los canales del tramo n (m).

n : Coeficiente de Manning (adimensional).

V_n : Velocidad en el tramo n (m/s).

l_n : Longitud de canal del tramo n (m).

Rh_n : Radio hidráulico de los canales del tramo n (m).

n: Número de tramo (1,2,3).

- **Cálculo de la perdida de carga total en el tramo:**

Se calculó mediante la ecuación 61.

$$hf_{Tn} = h_{1n} + h_{2n} \quad (61)$$

Donde:

hf_{Tn} : Pérdida de carga total en el tramo n (m).

h_{1n} : Pérdida de carga en las vueltas del tramo n (m).

h_{2n} : Pérdida de carga en los canales del tramo n (m).

n: Número de tramo (1,2,3).

- **Cálculo del gradiente de velocidad en el tramo:**

Se calculó mediante la ecuación 62 y 63.

$$G_n = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} * \sqrt{\frac{hf_{Tn}}{t}} \quad (62)$$

$$t = \frac{L_n}{V_n} \quad (63)$$

Donde:

G_n : Gradiente de velocidad en el tramo n (s^{-1}).

γ : Peso específico del agua a 15°C (9802 kg/m³).

μ : Coeficiente de viscosidad dinámica a 15°C (0.00114 kg·m⁻¹·s⁻¹).

hf_{Tn} : Pérdida de carga total en el tramo n (m).

t: Tiempo que el agua tarda en recorrer el tramo n (s)

L_n : Longitud del tramo n (m).

V_n : Velocidad en el tramo n (m/s).

n: Número de tramo (1,2,3).

Fuente: Adaptado de (Benites Bayona, Machuca Quiñones, & Sabino Barreto, 2018).

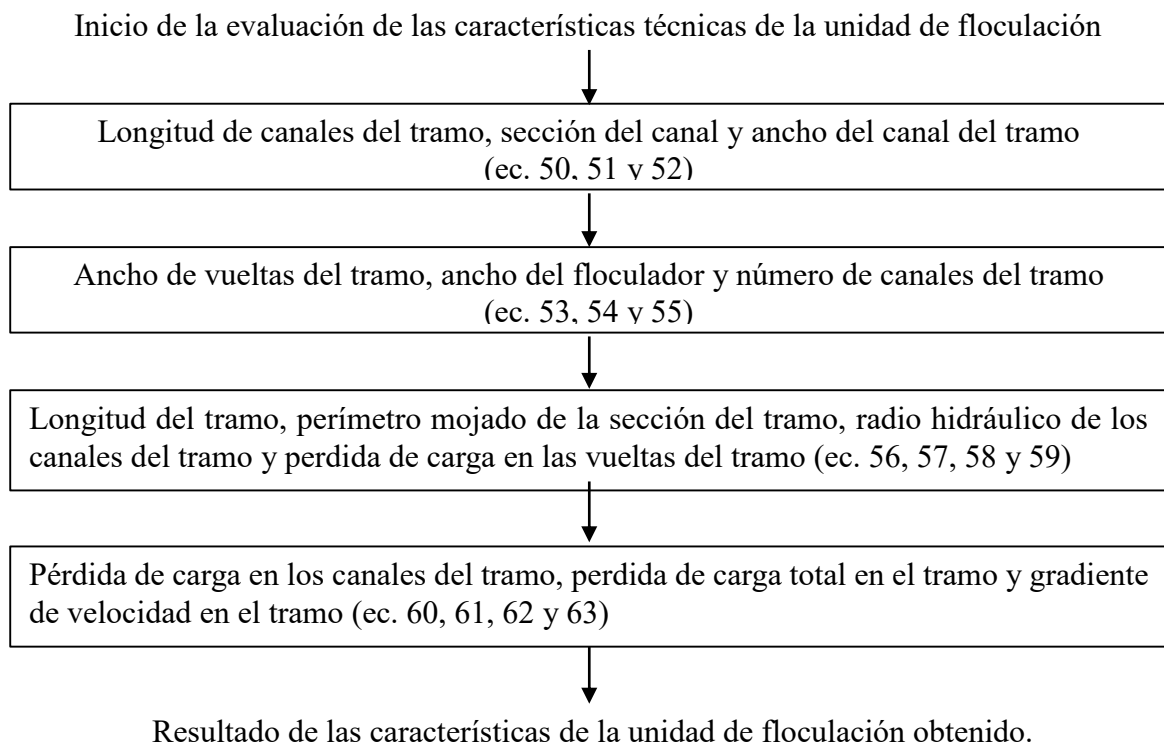
Los gradientes de velocidad que optimizan el proceso normalmente varían entre 70 y 20 s^{-1} (García Ávila, 2014).

Flujograma D: Características técnicas de la unidad de floculación.

Este flujograma describe la secuencia de cálculos de la unidad de floculación, para la incorporación de un proceso de coagulación y floculación antes del proceso de sedimentación, se da a conocer el flujograma D en la Figura 22.

Figura 22

Flujograma D: Características técnicas de la unidad de floculación.



Al finalizar la caracterización técnica del sistema de coagulación-floculación, se elaboró un diagrama de flujo de proceso mediante el programa Microsoft Visio, asimismo, se realizó un plano en 2D el cual se ejecutó mediante el programa AutoCAD, correspondientes al estado antes y después de la implementación del sistema de coagulación-floculación, el cual permita la representación gráfica de la propuesta de mejora planteada.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Determinación del estado actual de operación y de la calidad de agua filtrada.

Se presentan los resultados y análisis obtenidos del estado actual de operación de la calidad de agua filtrada en la PTAP mediante inspección técnica directa en el sistema sedimentador y filtro lento.

4.1.1 Medición de caudales y verificación de la operación de la planta.

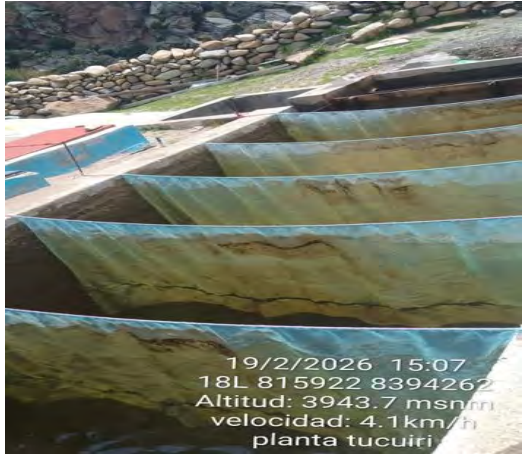
En el ítems 3.3.2 en la etapa 1 se menciona como se realizó la verificación de la operación de la planta y los meses en que se visitara la planta, durante la inspección realizada en los meses de octubre de 2025 y febrero de 2026, se observó que el espesor de la arena del lecho filtrante presenta una profundidad de 38 cm de arena cuarcífera gris, la existencia de arena cuarcífera lavada y sin lavar amontonada alrededor del sedimentador y filtro lento, la arena que está siendo lavada a un costado no ha sido colocado todavía, evidenciando un estado de funcionamiento inadecuado.

La planta tiene serias limitaciones en su rendimiento, presentando valores por debajo del 50 % en cuanto a la remoción de partículas suspendidas en temporada de lluvia debido a que sólo cuenta con una unidad en el proceso de sedimentación y filtración; asimismo, la estructura no cuenta con un cerco perimétrico.

El ingreso de agua a la cámara de distribución de caudales, presenta rebose de agua a su alrededor y el vertedero triangular sobrepasa su nivel de capacidad desbordando el agua a los alrededores. Se observa en épocas de lluvia, durante los meses de enero y febrero de 2026, mayor frecuencia de acumulación de partículas suspendidas en las pantallas batidoras móviles del sedimentador, colmatación de material fino en la superficie del lecho filtrante, incremento de turbiedad a salida de filtro lento ver Figura 23.

Figura 23

Estado actual de la planta Tucui del año 2026.

Arena cuarcífera sin lavar alrededor del filtro lento 	Arena cuarcífera lavada alrededor del sedimentador. 
Cámara de distribución de caudales presenta rebose de agua a su alrededor. 	Presencia de sólidos suspendidos en la PTAP Tucui en temporada de lluvia. 
Partículas suspendidas en las pantallas batidoras móviles. 	Colmatacion del filtro lento por solidos suspendidos de menor partícula. 

En la Figura 23 se observa las evidencias más relevantes del estado actual de la PTAP, la profundidad del espesor de la arena del lecho filtrante (38 cm) indica una posible deficiencia en la calidad del agua filtrada. Según el reglamento de edificaciones el espesor de la arena deberá ser de 80 a 100 cm y el valor mínimo considerado, después de raspados sucesivos durante la operación de limpieza, será de 50 cm (Barraza Soto, 2006). Es necesario aumentar la altura del lecho filtrante y del material soporte, con la finalidad de mejorar la eficiencia de la planta especialmente en temporada de lluvias.

La infraestructura de la planta es perjudicial frente a otras plantas que cuentan con dos o más unidades, no teniendo la opción de *bypasear* el agua mientras la unidad es sometida al proceso de limpieza perjudicando la producción de agua que afecta a la continuidad del servicio. Asimismo, la ausencia de cerco perimétrico expone a la infraestructura al sobrepastoreo de ganado vacuno y al ingreso no autorizado de personas externas, lo que podría comprometer la calidad del agua filtrada.

El rebose de la cámara de distribución de caudales es perjudicial para la medición del caudal de ingreso a la planta, produciendo así la colmatación de la arena en el filtro lento lo cual afecta la eficiencia del proceso de filtración. Según el reglamento de edificaciones la colmatación del filtro produce que la velocidad de filtración decrezca (Barraza Soto, 2006), por lo que, este tipo de condiciones requiere mantenimiento periódico.

Comparando los resultados obtenidos con Guamán y Roman (2023) donde se evidencia que gran parte de su estructura se encuentra en malas condiciones, requiriendo un mantenimiento urgente, existe fuga de agua a través de ellas, en algunas ocasiones se observó al filtro lento inundado por la colmatación de la arena debido a la falta de mantenimiento, no cumple con la altura del lecho filtrante establecida en la norma vigente.

Por tanto, se concluye que ambas investigaciones presentan similitud y evidencian la necesidad de incorporar en un futuro nuevas unidades de tratamiento en la PTAP, para así alcanzar la mayor eficiencia de operación y la mejora de calidad del agua filtrada.

Datos hidráulicos del sedimentador y del filtro lento.

Las ecuaciones para determinar los cálculos del caudal de ingreso, la velocidad de sedimentación, la velocidad horizontal, la velocidad de filtración y el caudal de salida del filtro lento de arena se presentan en el ítem 3.3.2 en la etapa 1 de medición de caudales.

Sedimentador: cálculo del caudal de ingreso, velocidad de sedimentación y velocidad horizontal del sedimentador.

Los valores estimados del coeficiente efectivo de descarga para distintas alturas del vertedero triangular de 90° obtenidos a partir de las Figura 15 y Figura 24, se presentan en la Tabla 11.

Figura 24

Representación gráfica del vertedero triangular de pared delgada, para la medición de caudales a ingreso de sedimentador en la PTAP.

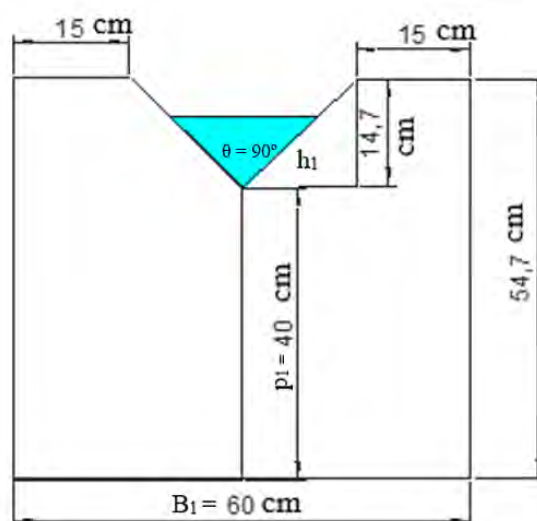


Tabla 11

Cálculo de la estimación del valor de coeficiente efectivo de descarga (C_e).

h_1 (cm)	p_1 (cm)	B_1 (cm)	h_1/p_1	h_1/B_1	p_1/B_1	C_e
12	40	60	0.30	0.20	0.7	0.58
12.5	40	60	0.32	0.21	0.7	0.58
16.8	40	60	0.42	0.28	0.7	0.582
20	40	60	0.50	0.33	0.7	0.588

Nota. Las alturas medidas de 16.8 y 20 cm, corresponden a condiciones en las cuales la cámara de distribución presentaba rebose, debido a que el nivel del agua superaba la altura del vertedero triangular, como consecuencia, los cálculos del coeficiente efectivo de descarga en estos puntos son valores referenciales.

Como se observa en la Tabla 11 a medida que aumenta la altura sobre el vertedero aumenta el valor del coeficiente efectivo de descarga.

Los caudales de ingreso de agua a la planta fueron determinados mediante la ecuación 2, utilizando el coeficiente efectivo de descarga (C_e) obtenido en la Tabla 11 y las dimensiones del vertedero triangular ver Figura 23. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12

Cálculo de caudales a ingreso a planta a distintas alturas.

Medición de caudales en el vertedero triangular							
Fecha	C_e	h_1 (m)	$\theta/2$	$\tan(\theta/2)$	G (m/h)	Q (m ³ /h)	Q (L/s)
29/10/2025	0.58	0.12	45	1.00	127137600	24.61	6.83
31/10/2025	0.58	0.125	45	1.00	127137600	27.25	7.57
01/02/2026	0.582	0.168	45	1.00	127137600	57.26	15.91
19/02/2026	0.588	0.20	45	1.00	127137600	89.45	24.85

Nota. Los caudales medidos a las alturas de 16.8 y 20 cm, corresponden a condiciones en las cuales la cámara de distribución presentaba rebose, lo cual genera posibles errores en el cálculo del caudal.

Como se observa en la Tabla 12, el caudal aumenta conforme se incrementa la altura sobre el vertedero, lo cual coincide con el comportamiento teórico descrito para vertederos triangulares. El cálculo del caudal se realizó bajo condiciones no ideales debido a que el nivel del agua sobrepasaba la altura del vertedero triangular lo que puede presentar desviaciones respecto al caudal real, por lo que deben considerarse como valores referenciales. Este comportamiento indica que el vertedero no opera bajo las condiciones de diseño.

En ese sentido, se identifica la necesidad de mejorar el sistema y que permitan un adecuado manejo del caudal, evitando así problemas de desborde y asegurando un funcionamiento más eficiente de la planta.

Los cálculos de velocidad de sedimentación y de la velocidad horizontal, para diferentes caudales de ingreso al sedimentador, fueron determinados a partir de las ecuaciones 3, 4 y 5, los resultados obtenidos, se representan en la Tabla 13.

Tabla 13

Cálculo de velocidad de sedimentación y de la velocidad horizontal del agua a ingreso de sedimentador.

Cálculo de velocidad de sedimentación y de la velocidad horizontal					
	Largo del sedimentador (m)		7.30		
	Ancho del sedimentador (m)		2.66		
	Altura del sedimentador (m)		2.88		
Fecha	Q (m ³ /s)	AS (m ²)	V _s (cm/s)	V _H (cm/s)	V _H /V _s
29/10/2025	0.007	19.418	0.0352	0.0892	2.5347
31/10/2025	0.008	19.418	0.0390	0.0988	2.5347
01/02/2026	0.016	19.418	0.0819	0.2076	2.5347
19/02/2026	0.025	19.418	0.1280	0.3244	2.5347

En la Tabla 13 se observa que se cumple lo establecido en el Reglamento de Edificaciones, el cual indica que la velocidad horizontal en sedimentadores no debe exceder 0.55 cm/s, pero no sucede lo mismo en la relación V_H/V_s que tiene un valor de 2.53 que se

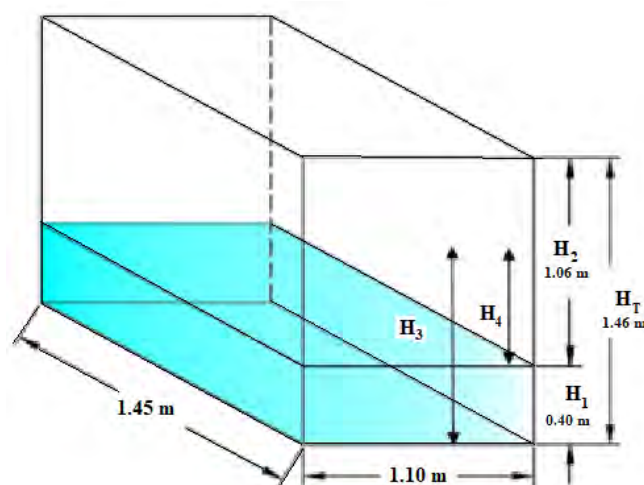
encuentra por debajo del rango recomendado de 5 a 20 (Barraza Soto, 2006), esto se debe a que la velocidad de sedimentación es menor a la velocidad horizontal, por ello no cumple con la teoría básica de la sedimentación el cual indica que “todas las partículas cuya velocidad de sedimentación sea mayor o igual que la velocidad horizontal de escurrimiento serán igualmente eliminadas puesto que han de sedimentar en un tiempo menor” (Perez farras, 2005), lo que no sucede en este caso, provocando así el arrastre de partículas a la salida del sedimentador puesto que, el agua va más rápido de lo que las partículas pueden sedimentar. Asimismo, produce una sobrecarga de partículas sólidas en el filtro lento, por consiguiente, las condiciones hidráulicas no son óptimas y excitó una baja eficiencia en el proceso de sedimentación.

Filtro lento: cálculo del caudal de salida y velocidad de filtración.

Los caudales a salida de filtro lento para diferentes alturas ver Figura 25, determinados mediante el metodo volumétrico a partir de la ecuación número 6 y 7, se representa en la Tabla 14.

Figura 25

Representación gráfica de la camara de recoleccion, para la medición de caudales a la salida de filtro lento en la PTAP Tucui.



Como se observa en la Tabla 14, el caudal en el mes de febrero es de 21.29 L/s menor al caudal de ingreso de planta correspondiente a 24.84 L/s registrado en la Tabla 12, esto se debe a la colmatacion de material fino en la superficie del filtro lento, que provoca un incremento en la resistencia hidráulica del lecho filtrante de manera que se cumple el concepto según el reglamento de edificaciones “ la colmatación del filtro produce que la velocidad de filtración decrezca” (Barraza Soto, 2006), ocasionando el rebose del agua en el filtro lento. Esta situación genera una reducción del caudal filtrado, debido a que parte del agua no atraviesa adecuadamente el sistema de filtración, afectando la eficiencia del proceso.

Tabla 14

Cálculo de caudales a salida del filtro lento a distintas alturas.

FECHA	Nº	Tiempo (s)	Altura h_4 (m)	Volumen (m^3)	Caudal (m^3/s)	Caudal Promedio (L/s)
29/10/2025	1	55.8	0.23	0.367	0.007	6.67
	2	53.6			0.007	
	3	55.6			0.007	
31/10/2025	1	50.8	0.26	0.407	0.008	7.98
	2	51.6			0.008	
	3	50.6			0.008	
01/02/2026	1	30.9	0.30	0.479	0.015	15.67
	2	30			0.016	
	3	30.7			0.016	
19/02/2026	1	25.1	0.35	0.558	0.022	21.29
	2	25.9			0.022	
	3	27.8			0.020	

Nota. El área de la base de la camara de recoleccion es de $1.595 m^2$, los caudales medidos a distintas alturas (h_4), corresponden a condiciones en las cuales la cámara de recoleccion de agua a salida de filtro lento, no se vaciaba por completo puesto que siempre permanecía 40 cm de agua estancada por ello solo se consideraba solo la altura h_4 .

Los cálculos de velocidad de filtración, para diferentes caudales a salida de filtro lento, fueron determinados a partir de la ecuación número 8, y sus resultados se representan en la Tabla 15.

En la Tabla 15 se presenta los valores de la velocidad de filtración a salida del filtro lento, donde se observa que a medida que el caudal aumenta la velocidad de filtración aumenta.

La velocidad de filtración registrada según el manual de operación es de 0.728 m/h, y la velocidad de filtración durante la operación alcanza valores de hasta 2.33 m/h. Estos valores resultan elevados para un sistema de filtración lenta.

Tabla 15

Cálculo de velocidad de filtración del agua a salida de filtro lento.

Cálculo de velocidad de filtración del agua a distintos caudales					
		Largo del filtro lento (m)		7.3	
		Ancho del filtro lento (m)		4.5	
		Altura del filtro lento (m)		2.66	
Fecha	Q(L/s)	Q _{md} (m ³ /h)	N	A _f (m ²)	V _f (m/h)
29/10/2025	6.67	24.02	1	32.85	0.7312
31/10/2025	7.98	28.73	1	32.85	0.8745
01/02/2026	15.67	56.41	1	32.85	1.7173
19/02/2026	21.29	76.65	1	32.85	2.3334

Puesto que, superan el rango recomendado Según el Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA del reglamento nacional de edificaciones, el cual indica que si se considera un tratamiento preliminar antes del proceso de filtración se podrán emplear velocidades de filtración de 5 a 8 m³/m²·día lo que corresponde al rango de **0.21 a 0.33 m/h** (Barraza Soto, 2006). Asimismo En el programa regional del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano menciona lo siguiente: La velocidad de aproximación del flujo si hay procesos previos de

acondicionamiento de la calidad del agua, puede llegar a **0.30 o 0.40 m/h**, con operación confiable y buen mantenimiento (Canepa de Vargas, 1992).

Por consiguiente, no se cumple con el reglamento nacional de edificaciones ni con el manual de CEPIS, puesto que la velocidad mínima de filtración fue de 0.37 m/h y la velocidad máxima de 2.33 m/h, lo que indica una sobrecarga hidráulica del sistema y que el filtro lento opera a tasas superiores a las óptimas, Esta condición reduce la eficiencia del proceso de filtración, debido a la disminución del tiempo de contacto y la limitada acción del medio filtrante, evidenciando un funcionamiento inadecuado del sistema.

4.1.2 Prueba de trazabilidad hidráulica en el sedimentador y filtro lento de la PTAP.

El procedimiento y los cálculos empleados para la prueba de trazabilidad para ambos procesos de sedimentación y filtración lenta se da a conocer en el ítem 3.3.2 en la etapa número 2, la evidencia fotográfica de la prueba de trazabilidad en ambos procesos se presenta en el Apendice F.

- **Prueba de trazabilidad hidráulica en el sedimentador**

Los resultados de la prueba de trazabilidad hidráulica del agua presentes en el sedimentador se representan en las Tablas 16, 17, 18, 19, 20 y 21.

Tabla 16

Características del sedimentador.

Parámetros	Valor
Caudal de ingreso (L/s)	8.03
Área de perfil del sedimentador (m ²)	7.30
Altura de la unidad (m)	2.88
Volumen del sedimentador (m ³)	55.92
Volumen útil del sedimentador (m ³)	51.0693
Tiempo de retención teórico (s)	6359.8181
Tiempo de retención teórico (min)	105.9969

Para el cálculo del peso del trazador (NaCl), se utilizó la ecuación 11 que se basa en el método por inyección instantánea, obtenemos lo siguiente ver Tabla 17.

Tabla 17

Resumen de datos para el cálculo del Peso del trazador en el proceso de sedimentación.

Parámetros	Valor
V = volumen útil del sedimentador (m^3)	51.07
K = Constante de corrección	1.65
C ₀ = Concentración inicial (mg/l)	50
I = grado de pureza del trazador, fracción de unidad (90 % = 0.90)	0.99
P = Peso de Trazador (kg)	4.26

Los datos que se obtuvieron en el ensayo de trazabilidad en campo para determinación de las características hidráulicas y análisis de flujo del Sedimentador son los siguientes ver Tabla 18.

Después del ensayo de trazabilidad, obtenemos la Curva de Análisis de Tiempo de Residencia para el sedimentador, se graficaron los valores de tiempo (t) versus variación de concentración (C-Co) en escala aritmética de la misma se levantó una curva, tal cual se indica en el manual de “Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención” (CEPIS, 1992), se obtuvieron los siguientes datos representado en la Figura 26, Tabla 19 y 21.

Tabla 18

Prueba de trazador en el sedimentador.

Muestra	Tiempo	T_i= 14: 36 am	Conductividad				Δt (s)		120
N⁰	Min	Tiempo (h)	(μS/cm)	t/to	C-C0	Σ(C-Co)	F(t)	1-F(t)	C*Δt
1	0	14:38	80	0.00	0	0	0.00	100.00	0
2	2	14:40	80	0.02	0	0	0.00	100.00	0
3	4	14:42	83.3	0.04	3	3	0.14	99.86	396
4	6	14:44	97.3	0.06	17	21	0.88	99.12	2076
5	8	14:46	120.4	0.08	40	61	2.61	97.39	4848
6	10	14:48	175.6	0.09	96	157	6.70	93.30	11472
7	12	14:50	172.9	0.11	93	250	10.68	89.32	11148
8	14	14:52	215	0.13	135	385	16.46	83.54	16200
* 9	16	14:54	246	0.15	166	551	23.56	76.44	19920
10	18	14:56	213	0.17	133	684	29.26	70.74	15960
11	20	14:58	199.4	0.19	119	803	34.37	65.63	14328
12	22	15:00	188.7	0.21	109	912	39.02	60.98	13044
13	24	15:02	184.9	0.23	105	1017	43.51	56.49	12588
14	26	15:04	190.1	0.25	110	1127	48.22	51.78	13212
15	28	15:06	179.9	0.26	100	1227	52.50	47.50	11988
16	30	15:08	164.6	0.28	85	1311	56.12	43.88	10152
17	32	15:10	162.4	0.30	82	1394	59.65	40.35	9888
18	34	15:12	158.4	0.32	78	1472	63.00	37.00	9408
19	36	15:14	145.9	0.34	66	1538	65.82	34.18	7908
20	38	15:16	136.9	0.36	57	1595	68.26	31.74	6828
21	40	15:18	140.8	0.38	61	1656	70.86	29.14	7296
22	42	15:20	143.4	0.40	63	1719	73.58	26.42	7608
23	44	15:22	147.3	0.42	67	1786	76.46	23.54	8076
24	46	15:24	134.8	0.43	55	1841	78.80	21.20	6576
25	48	15:26	140.2	0.45	60	1901	81.38	18.62	7224
26	50	15:28	127.8	0.47	48	1949	83.43	16.57	5736
27	52	15:30	120.6	0.49	41	1990	85.16	14.84	4872
28	54	15:32	119.9	0.51	40	2030	86.87	13.13	4788

29	56	15:34	123.2	0.53	43	2073	88.72	11.28	5184
30	58	15:36	112.5	0.55	33	2105	90.11	9.89	3900
31	60	15:38	105.8	0.57	26	2131	91.22	8.78	3096
32	62	15:40	103.9	0.58	24	2155	92.24	7.76	2868
33	64	15:42	103.9	0.60	24	2179	93.26	6.74	2868
34	66	15:44	100.7	0.62	21	2200	94.15	5.85	2484
35	68	15:46	97	0.64	17	2217	94.88	5.12	2040
36	70	15:48	97.9	0.66	18	2234	95.64	4.36	2148
37	72	15:50	94.3	0.68	14	2249	96.25	3.75	1716
38	74	15:52	93.5	0.70	14	2262	96.83	3.17	1620
39	76	15:54	93	0.72	13	2275	97.39	2.61	1560
40	78	15:56	83	0.74	3	2278	97.52	2.48	360
41	80	15:58	87.8	0.75	8	2286	97.85	2.15	936
42	82	16:00	86.8	0.77	7	2293	98.14	1.86	816
43	84	16:02	86.1	0.79	6	2299	98.40	1.60	732
44	86	16:04	85.7	0.81	6	2305	98.65	1.35	684
45	88	16:06	87.6	0.83	8	2312	98.97	1.03	912
46	90	16:08	84.6	0.85	5	2317	99.17	0.83	552
47	92	16:10	85	0.87	5	2322	99.38	0.62	600
48	94	16:12	85.7	0.89	6	2328	99.63	0.37	684
49	96	16:14	81.9	0.91	2	2329	99.71	0.29	228
50	98	16:16	82.8	0.92	3	2332	99.83	0.17	336
51	100	16:18	81.7	0.94	2	2334	99.82	0.18	204
52	102	16:20	81.8	0.96	2	2334	99.89	0.11	216
53	104	16:22	82.5	0.98	3	2336	100.00	0.00	300
54	106	16:24	80	1.00	0	2336	100.00	0.00	0
55	108	16:26	80	1.02	0	2336	100.00	0.00	0
56	110	16:28	80	1.04	0	2336	100.00	0.00	0
								Σ	280344

Nota. * los datos resaltados de color negrita representan el tiempo de retencion real en el sedimentador, que corresponde al pico máximo de la curva de tendencia que es cuando se alcanza la mayor concentración del trazador.

Figura 26

Curva de distribución de tiempos de residencia (DTR) en el sedimentador.

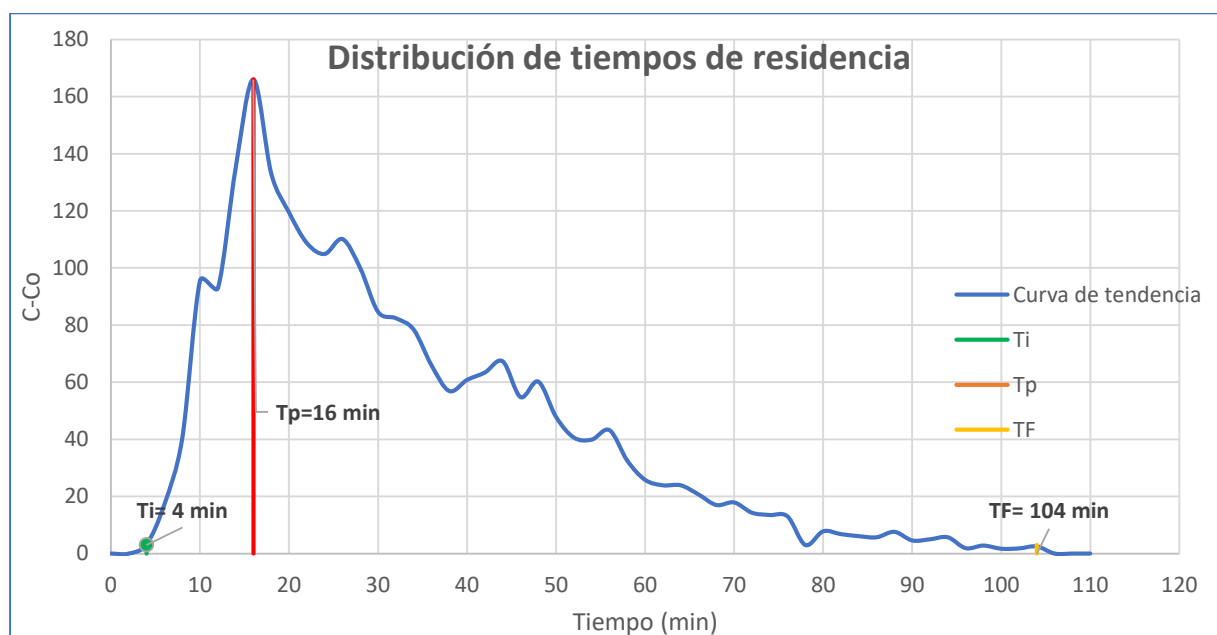


Tabla 19

Valores obtenidos de la distribución de tiempos de residencia en el sedimentador a partir de la curva de tendencia.

Caudal $Q = 8.03$ L/s						
T_i	T_{10}	T_p	T_0	T_{90}	T_F	C_0
4	11.66	16	106	57.84	104	80
C_p	$C_{p/2}$	$C_{p/10}$	T_c	T_b	T_m	
166	83	16.6	49.58	14.04	26.83	

Nota. los tiempos T_n están en minutos, las concentraciones C están en mg/L.

A partir de los resultados obtenidos en la prueba de trazabilidad hidráulica en el sedimentador, representados en la curva de distribución de tiempos de residencia (Figura 26), se evidencia que la curva presenta una cola larga decreciente debido a recirculaciones internas o por la presencia de zonas dentro del sistema que retienen el trazador, donde se queda demasiado tiempo y luego lo liberan paulatinamente lo que genera zonas muertas. Asimismo, se observa que el tiempo de retención hidráulico real (TRH real = 16 min) es menor que el

tiempo de retención hidráulico teórico (TRH teórico = 106 min), lo cual indica que parte del flujo atraviesa la unidad en un tiempo inferior al esperado, por consiguiente, el volumen efectivo del sedimentador no está siendo completamente aprovechado. Esta condición lo confirma el análisis del flujo descrito en la Tabla 21, por consiguiente, el flujo de agua no se mueve de forma uniforme dentro del sedimentador hay mezcla interna y desorden en el flujo, lo cual indica problemas hidráulicos y disminución de la eficiencia en el sedimentador.

Comparando los resultados obtenidos con Saldaña Marin (2019), donde existe paso directo del trazador entre la entrada y la salida del flujo de agua (cortocircuito hidráulico), en la unidad existe poca corriente de turbulencia evidenciando un bajo nivel de mezcla, el tiempo de retención Teórico es de 167.37 min mayor al tiempo de retención real de 100 min, el sedimentador tiene predominio de flujo pistón (flujo ideal)

Comparando los resultados obtenidos con CEPIS (1992), del análisis por el método de la curva de tendencia en un sedimentador de flujo horizontal, en la cual se puede apreciar que existe paso directo del trazador entre la entrada y la salida del flujo de agua (cortocircuitos hidráulicos) como de espacios muertos y asimetría del lado derecho de la curva, el tiempo de retención Teórico es de 111.47 min mayor al tiempo de retención real de 60 min, el sedimentador tiene predominio de flujo no ideal.

Por tanto, se concluye que las investigaciones presentan similitud en cuanto al paso directo del trazador entre la entrada y la salida del flujo de agua (cortocircuito hidráulico), lo cual disminuye el tiempo real de retención y afecta la eficiencia del tratamiento, difiere en cuanto al predominio del flujo, en la presente investigación predomina un flujo no ideal y en la investigación de Saldaña predomina el flujo pistón.

Calculo del caudal de ingreso en el sedimentador por el metodo de inyección instantánea.

El cálculo del caudal en el sedimentador por el método de inyección instantánea en el momento en el que se realizó la prueba de trazabilidad, se determinó utilizando la ecuación 17, la cual representa al caudal que realmente está circulando hidráulicamente en el sedimentador ver Tabla 20.

Tabla 20

Determinación del caudal de ingreso en el sedimentador por el metodo de inyección instantánea.

Parametros	Valor	Unidad
C_1	153000	$\mu\text{s/cm}$
V_1	51069.34	L
$\int_0^t C_2 * dt$	280344	$\mu\text{s} \cdot \text{s} / \text{cm}$
Q	7	L/s

El caudal que se obtuvo a ingreso en el vertedero triangular antes de iniciar la prueba de trazabilidad fue de 8.03 L/s y el caudal determinado mediante la prueba de trazabilidad fue de 7 L/s es menor al medido a ingreso del sedimentador, lo que evidencia la presencia de ineficiencias hidráulicas. esto puede ser debido a filtraciones provocadas por las fisuras que presenta el sedimentador o a la mala distribucion del flujo de agua.

Comparando los resultados obtenidos con Saldaña Marin (2019) quien obtuvo un caudal resultante por el metodo de inyección instantánea con NaCl de 36.94 L/s, el cual difiere levemente del caudal de diseño de 40 L/s.

Por tanto, se concluye que ambas investigaciones presentan similitud en cuanto a los resultados obtenidos del caudal hallado por el metodo de inyección instantánea que es menor al caudal de ingreso a planta e indicando un comportamiento del fluido semejante entre ambos sistemas evaluados.

Análisis de flujo para el sedimentador durante la prueba de trazabilidad

Con la curva de tendencia de sedimentador representado en la Figura 26 y los valores obtenidos en la Tabla 19, se calculó el caudal instantáneo en el momento y se realizó el análisis de flujo para el sedimentador, para ello se utilizaron las ecuaciones 12, 13, 14, 15 y 16 obteniendo lo siguiente ver Tabla 21.

Tabla 21

Análisis de flujo para el sedimentador.

Criterio	Valor	Análisis
T_i/T_0	0.04	Este valor (< 0.30) indica que existe paso directo del trazador entre la entrada y la salida del sedimentador (cortocircuito hidráulico) e indica la tendencia de flujo mezclado.
T_m/T_0	0.25	Este valor (< 1) indica que existe presencia de caminos preferenciales del flujo de agua a través del sedimentador, reduciendo de esta manera su tiempo de residencia efectivo, los cuales generan fenómenos de cortocircuito hidráulico.
T_p/T_0	0.15	Existen dos tipos de flujo, flujo pistón con predominio de flujo mezclado.
T_c/T_0	0.47	Este valor es inferior a 0.7, por lo que se considera que en el sedimentador existen pocas corrientes de turbulencia.
T_b/T_0	0.13	Comparado a 2.3, se podría deducir que en la unidad existe poca recirculación de las corrientes de flujo, lo cual indica la presencia de zonas muertas, evidenciando un bajo nivel de mezcla.
E	0.72	Este valor hace referencia que el sedimentador presenta un flujo de agua disperso con tendencia a mezcla, indicando un comportamiento de flujo no ideal dentro del sedimentador.

- **Prueba de trazabilidad hidráulica en el filtro lento de arena.**

Los resultados de la prueba de trazabilidad hidráulica del agua presentes en el filtro lento se representan en las Tablas 22, 23, 24, 25, 26 y 27.

Previo al análisis de la práctica con trazador, se determinó las siguientes características del filtro lento:

Tabla 22*Características del filtro lento.*

Parámetros	Valor
Caudal de ingreso (L/s)	8.03
Área de perfil del filtro lento (m ²)	4.50
Altura de la unidad (m)	2.66
Volumen del filtro lento (m ³)	87.381
Volumen útil del filtro lento (m ³)	61.101
Tiempo de retención teórico (s)	7609.090
Tiempo de retención teórico (min)	126.818

Para el cálculo del peso del trazador (NaCl), se utilizó la ecuación 11 que se basa en el método por inyección instantánea, obtenemos lo siguiente ver Tabla 23.

Tabla 23*Resumen de datos para el cálculo del peso del trazador en el filtro lento.*

Parámetros	Valor
V = Volumen útil del filtro (m ³)	61.10
K = Constante de corrección	1.65
C0 = Concentración inicial (mg/L)	50
I = grado de pureza del trazador, fracción de unidad (90 % = 0.90)	0.99
P = Peso de Trazador (kg)	5.09

Los datos que se obtuvieron en el ensayo de trazabilidad en campo para determinación de las características hidráulicas y análisis de flujo para el filtro lento de arena son los siguientes ver Tabla 24.

Tabla 24

Resumen de datos para el cálculo del peso del trazador en el filtro lento

Tiempo		T ₁ = 11: 20 am	Conductividad				Δt (s)		120
N ⁰	Min	tiempo (min)	($\mu S/cm$)	t/to	C-C0	$\Sigma(C-C_0)$	F(t)	1-F(t)	C* Δt
1	0	11:22	92.3	0.00	0	0	0.00	100.00	0
2	2	11:24	92.3	0.02	0	0	0.00	100.00	0
3	4	11:26	92.3	0.03	0	0	0.00	100.00	0
4	6	11:28	100.7	0.05	8	8	0.23	99.77	1008
5	8	11:30	182	0.06	90	98	2.67	97.33	10764
6	10	11:32	115.3	0.08	23	121	3.29	96.71	2760
7	12	11:34	214	0.09	122	243	6.60	93.40	14604
8	14	11:36	330	0.11	238	481	13.07	86.93	28524
9	16	11:38	436	0.13	344	824	22.41	77.59	41244
10	18	11:40	483	0.14	391	1215	33.04	66.96	46884
*11	20	11:42	501	0.16	409	1624	44.15	55.85	49044
12	22	11:44	445	0.17	353	1976	53.74	46.26	42324
13	24	11:46	381	0.19	289	2265	61.59	38.41	34644
14	26	11:48	334	0.21	242	2507	68.16	31.84	29004
15	28	11:50	319	0.22	227	2733	74.33	25.67	27204
16	30	11:52	252	0.24	160	2893	78.67	21.33	19164
17	32	11:54	226	0.25	134	3027	82.31	17.69	16044
18	34	11:56	198.2	0.27	106	3133	85.19	14.81	12708
19	36	11:58	197.5	0.28	105	3238	88.05	11.95	12624
20	38	12:00	197.5	0.30	105	3343	90.91	9.09	12624
21	40	12:02	162.6	0.32	70	3413	92.82	7.18	8436
22	42	12:04	149.3	0.33	57	3470	94.37	5.63	6840
23	44	12:06	142.7	0.35	50	3521	95.74	4.26	6048

24	46	12:08	136	0.36	44	3565	96.93	3.07	5244
25	48	12:10	128.1	0.38	36	3600	97.90	2.10	4296
26	50	12:12	120.7	0.39	28	3629	98.67	1.33	3408
27	52	12:14	110.9	0.41	19	3647	99.18	0.82	2232
28	54	12:16	107.6	0.43	15	3663	99.59	0.41	1836
29	56	12:18	98.9	0.44	7	3669	99.77	0.23	792
30	58	12:20	97.3	0.46	5	3674	99.91	0.09	600
31	60	12:22	95.6	0.47	3	3678	100.00	0.00	396
32	62	12:24	92.3	0.49	0	3678	100.00	0.00	0
33	64	12:26	92.3	0.50	0	3678	100.00	0.00	0
34	66	12:28	92.3	0.52	0	3678	100.00	0.00	0
								Σ	441300

Nota. * Los datos resaltados de color negrita representan el tiempo de retención real en el filtro lento de arena, que corresponde al pico máximo de la curva de tendencia que es cuando se alcanza la mayor concentración del trazador.

Después del ensayo con trazadores, obtenemos la Curva de Análisis de Tiempo de Residencia para el filtro lento de arena, se graficaron los valores de tiempo (t) versus variación de concentración (C-Co) en escala aritmética de la misma se levantó una curva, tal cual se indica en el manual de “Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención” (CEPIS, 1992), se obtuvieron los siguientes datos representado en la Figura 27, Tabla 25 y 27.

Figura 27

Curva de distribución de tiempos de residencia (DTR) en el filtro lento de arena.

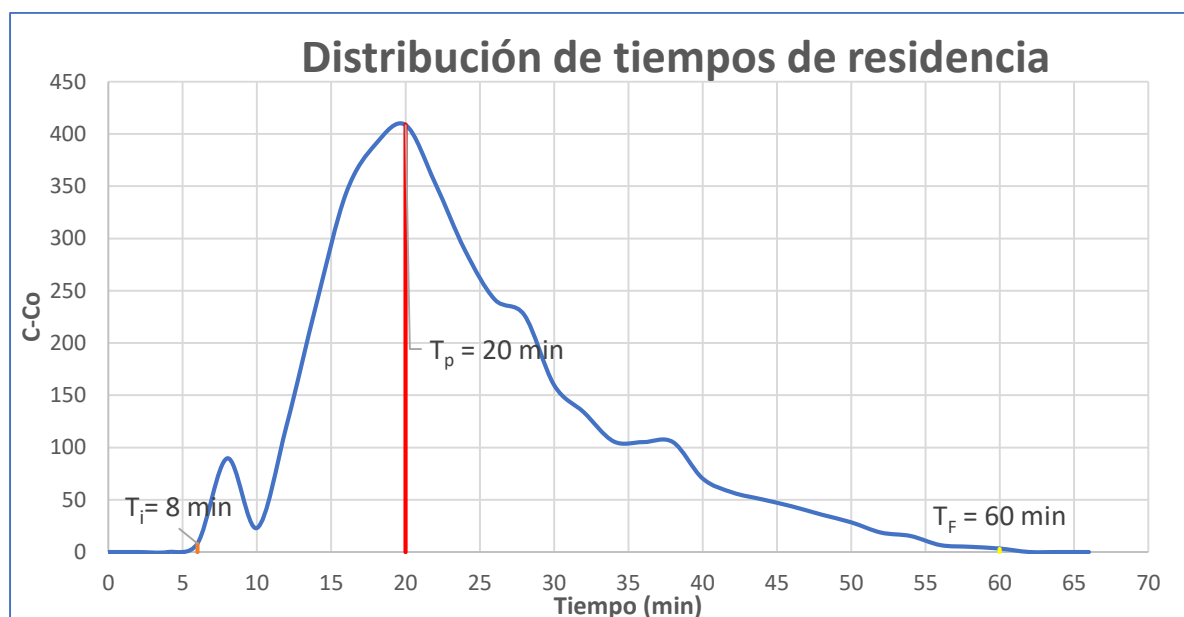


Tabla 25

Valores obtenidos de la distribución de tiempos de residencia en el filtro lento.

Caudal Q = 8.03 L/s						
T _i	T ₁₀	T _p	T ₀	T ₉₀	T _F	C ₀
6	13.05	20	126.82	37.37	60	92.3
C _p	C _p /2	C _p /10	T _c	T _b	T _m	
409	204.35	40.87	13.42	47.04	21.22	

Nota. Los tiempos T_n están en minutos, las concentraciones C están en mg/L.

A partir de los resultados obtenidos en la prueba de trazabilidad hidráulica del filtro lento de arena, representado en la curva de distribución de tiempos de residencia (Figura 27), se evidencia que la curva presenta una cola pequeña decreciente debido a que existe poca recirculación. Asimismo, se observa que el tiempo de retención hidráulico real (TRH real = 20 min) es menor que el tiempo de retención hidráulico teórico (TRH teórico = 127 min), lo cual indica que parte del flujo, atraviesa el filtro lento en un tiempo inferior al esperado, ya que el

volumen efectivo del filtro lento no está siendo completamente aprovechado. Estas condiciones lo confirman el análisis del flujo descrito en la Tabla 27, en este sentido, el comportamiento hidráulico del filtro es próximo al flujo tipo pistón, con baja dispersión y recirculación si bien el flujo presenta una tendencia ordenada, existen trayectorias preferenciales que permiten el paso acelerado de una fracción del agua, afectando la eficiencia del filtro lento de arena.

Comparando los resultados obtenidos con Saldaña Marin (2019) donde se evidencia que existe paso directo del trazador entre la entrada y la salida del flujo de agua (cortocircuito hidráulico), en la unidad existe poca corriente de turbulencia evidenciando un bajo nivel de mezcla en el filtro lento y tiene predominio de flujo pistón (flujo ideal).

Por tanto, se concluye que ambas investigaciones presentan similitud en cuanto al paso directo del trazador entre la entrada y la salida del flujo de agua y que ambos tienen predominio a flujo pistón.

Cálculo del caudal del filtro lento de arena por el método de inyección instantánea

El cálculo del caudal del filtro lento de arena por el método de inyección instantánea en el momento en que se realiza la prueba de trazabilidad, se calculó utilizando la ecuación 17, la cual representa al caudal que realmente está circulando hidráulicamente en el filtro lento ver Tabla 26.

Tabla 26

Determinación del caudal de ingreso al filtro lento por el metodo de inyección instantánea.

C₁	246	ms/cm
C ₁	246000	μs/cm
V ₁	61101	L
$\int_0^t C_2 * dt$	441300	μs · s /cm
Q	7	L/s

El caudal que se obtuvo a ingreso al filtro lento antes de iniciar la prueba de trazabilidad fue de 8.03 L/s y el caudal determinado mediante la prueba de trazabilidad fue de 7 L/s es

menor al medido a ingreso del filtro lento, lo que evidencia la presencia de ineficiencias hidráulicas. esto puede ser debido a la mala distribución del flujo.

Análisis de flujo para el filtro lento de arena durante la prueba de trazabilidad.

Con la curva de tendencia del filtro lento representado en la Figura 27 y los valores obtenidos en la Tabla 25, se realizó el análisis de flujo para el filtro lento de arena, para ello se utilizaron las ecuaciones 12, 13, 14, 15 y 16 obteniendo lo siguiente ver Tabla 27.

Tabla 27

Análisis de flujo para el filtro lento de arena.

Criterio	Valor	Análisis
T_i/T_0	0.05	Este valor (< 0.30) indica que existe paso directo del trazador entre la entrada y la salida del filtro lento (cortocircuito hidráulico) e indica la presencia de flujo mezclado
T_m/T_0	0.17	Este valor (< 1) indica que existe presencia de cortocircuito hidráulico y hay caminos preferenciales.
T_p/T_0	0.16	Este valor indica que hay predominio de flujo de mezclado, ya que su valor es menor a 0.5.
T_c/T_0	0.11	Este valor es inferior a 0.7, se considera que en la unidad existe pocas corrientes de inercia (turbulencia), por lo que la proporción de flujo mezclado es baja.
T_b/T_0	0.37	Comparado a 2.3, se podría deducir que en el filtro lento existe poca recirculación de las corrientes de flujo, evidenciando un bajo nivel de mezcla, el trazador aparece muy rápido.
E	0.21	Este valor hace referencia a que en el filtro lento existe baja recirculación, cortocircuito hidráulico y existe predominio del flujo pistón.

4.1.3 Calidad físico química y microbiológica del agua filtrada en la PTAP

Tucuri.

El procedimiento, los puntos de muestreo y los parámetros que se analizarán para determinar la calidad físico química y microbiológica del agua filtrada en la PTAP, se encuentran descritos en el ítem 3.3.2 en la etapa número 3.

Se presentan los resultados del análisis microbiológico de las muestras tomadas en **temporada de sequía** durante el mes de octubre del 2025, que fueron enviadas al laboratorio LOUIS PASTEUR en la ciudad de Cusco (ver Apéndice H, I y J), asimismo se da a conocer los resultados de los análisis fisicoquímicos utilizando los equipos de la EPS. EMPSSAPAL S.A. en los puntos de muestreo (ver Apéndice K), ambos resultados se representan en la Tabla 28 y 29.

Tabla 28

Análisis microbiológico de los puntos de muestreo durante la temporada de sequía (28/10/2025).

Puntos de muestreo	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	Bacterias heterotróficas (UFC/mL)	Norma a comparar (como base técnica)
Ingreso al sedimentador	3500	< 1.8	220	Cumple con los ECA del D.S. N° 004 -2017- MINAM, Categoría A2.
Ingreso al filtro lento de arena.	110	< 1.8	26	No cumple con los valores de referencia del D.S. N° 031-2010 -SA.
Salida del filtro lento de arena	4.5	< 1.8	21	No cumple con los valores de referencia del D.S. N° 031-2010 -SA.

Nota. La muestra correspondiente a la salida del filtro lento fue tomada antes del proceso de desinfección mediante cloración.

En la Tabla 28 se observa una mayor concentración de coliformes totales con un total de 3500 NMP /100 mL en el ingreso al sedimentador, lo cual indica la presencia de

contaminación microbiológica inicial del agua cruda. Asimismo, se evidencia una reducción progresiva en los puntos posteriores del tratamiento.

Tabla 29

Análisis fisicoquímico de los puntos de muestreo durante la temporada de sequía, realizado el 28/10/2025 y 31/10/2025.

Puntos de muestreo	Fecha	pH (Unidad de pH)	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Turbiedad (UNT)	Norma a comparar (como base técnica)
Ingreso al sedimentador	28/10/2025	8.62	78.5	0.65	Cumple con los ECA del D.S. N° 004 - 2017- MINAM, Categoría A2.
	31/10/2025	8.26	78.5	0.64	
Ingreso al filtro lento de arena.	28/10/2025	8.56	78.7	0.84	No cumple con los valores de referencia del D.S. N° 031- 2010 -SA.
	31/10/2025	8.28	771	1.24	Cumple con los valores de referencia del D.S. N° 031- 2010 -SA.
Salida del filtro lento de arena.	28/10/2025	8.04	75.2	0.62	Cumple con los valores de referencia del D.S. N° 031- 2010 -SA.
	31/10/2025	7.89	79.7	0.88	

Nota: La muestra correspondiente a la salida del filtro lento fue tomada antes del proceso de desinfección mediante cloración.

En la Tabla 29 se observa un pH de 8.56 en el ingreso al filtro lento, sin embargo, la diferencia observada es de 0.06 unidades mínima y ello se debe a la continua proliferación de algas en la fuente superficial, durante la época de sequía. La actividad fotosintética de estos

organismos genera la reducción del CO₂ disuelto por ello se muestra el incremento en el pH del agua.

Se presentan los resultados del análisis microbiológico de las muestras tomadas en **temporada de lluvia** durante el mes de febrero del 2026, que fueron enviadas al laboratorio MICROLAB en la ciudad de Cusco (ver anexo L, M y N); asimismo, se da a conocer los resultados de los análisis fisicoquímicos analizados en el laboratorio de Análisis químico del Departamento Académico de Química de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco ver Apéndice O.

Tabla 30

Análisis microbiológico de los puntos de muestreo durante la temporada de lluvia (19/02/2026).

Puntos de muestreo	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	Bacterias heterotróficas (UFC/mL)	Norma a comparar (como base técnica)
Ingreso al sedimentador	150	93	1200	Cumple con los ECA del D.S. N° 004 -2017- MINAM, Categoría A2.
Ingreso al filtro lento de arena.	93	75	900	No cumple con los valores de referencia del D.S. N° 031-2010 -SA.
Salida del filtro lento de arena	28	23	400	No cumple con los valores de referencia del D.S. N° 031-2010 -SA.

Nota. La muestra correspondiente a la salida del filtro lento fue tomada antes del proceso de desinfección mediante cloración.

En la Tabla 30 se observa una mayor concentración de coliformes totales y termotolerantes en el ingreso al filtro lento, así como en su salida, lo cual indica la presencia de contaminación microbiológica. Asimismo, se evidencia mayor cantidad de bacterias heterotróficas (900 UFC/mL) en el ingreso al filtro lento, lo que sugiere un incremento en la actividad microbiológica posiblemente asociado a la presencia de materia orgánica.

Tabla 31

Análisis fisicoquímico de los puntos de muestreo durante la temporada de lluvia
(20/02/2026).

Puntos de muestreo	pH (Unidad de pH)	Conductividad (μ S/cm)	Turbiedad (UNT)	Norma a comparar
Ingreso al sedimentador.	6.95	57.80	139.5	No cumple con los ECA del D.S. N° 004 -2017-MINAM, Categoría A2.
Ingreso al filtro lento de arena.	6.88	55.20	133.5	No cumple con los valores de referencia del D.S. N° 031-2010 -SA.
Salida del filtro lento de arena.	6.86	62.80	60.77	No cumple con los valores de referencia del D.S. N° 031-2010 -SA.

Nota. La muestra correspondiente a la salida del filtro lento fue tomada antes del proceso de desinfección mediante cloración.

En la Tabla 31 se observa que los valores de turbiedad en los tres puntos de muestreo son muy altos por encima de los valores de referencia, en cuanto a los resultados en el ingreso al sedimentador, se observa que se tiene 139.5 UNT de turbiedad excediendo en un 39.5 UNT de la norma establecida para los ECA del D.S. N° 004 -2017-MINAM, Categoría A2 y en la salida de filtro lento excede en un 55.77 UNT del valor de referencia del D.S. N° 031-2010-SA.

Esto se debe a que en épocas de lluvias intensas y al ser una fuente de agua superficial, el río Tucuirí arrastra partículas en suspensión como arcilla, limo, materia orgánica y microorganismos, lo cual contribuye al incremento de la turbiedad en el sistema de tratamiento de agua.

En conjunto, los resultados muestran que, aunque existe una reducción progresiva de contaminantes a lo largo del tratamiento y en ocasiones un incremento de los parámetros a salida de filtro lento, la planta tiene un comportamiento irregular, el sistema no garantiza el cumplimiento de los valores de referencia del reglamento de calidad de agua en todos los puntos evaluados, especialmente en condiciones de lluvia, aún existen condiciones que pueden afectar la calidad del agua filtrada antes del proceso de desinfección como es el caso de valores elevados de turbiedad y a la ausencia de cerco perimétrico que expone a la infraestructura al sobrepastoreo de ganado vacuno y al ingreso no autorizado de personas externas, lo que podría comprometer la calidad del agua filtrada.

El D.S. N.º 031-2010-SA establece un valor máximo permisible de 5 UNT para la turbiedad en agua destinada al consumo humano (Dirección General de Salud Ambiental, 2011). El mantenimiento de un desinfectante residual adecuado depende del tratamiento previo para reducir la turbiedad al nivel más bajo por ello, la turbidez debe mantenerse por debajo de 1 UNT para lograr una desinfección eficaz. Cuando esto no resulte práctico, el objetivo deberá ser mantener la turbidez por debajo de 5 UNT, para garantizar el abastecimiento de agua de consumo humano segura (OMS, 2018).

4.2 Evaluación de las deficiencias técnicas que presentan el sedimentador y filtro lento que afectan a la calidad de agua filtrada.

Los pasos que se realizaron para la evaluación de las deficiencias técnicas en ambos procesos y las ecuaciones que se utilizaron para los cálculos de la capacidad del sedimentador y filtro lento, así como, también la evaluación de la eficiencia en ambos procesos se presenta en el ítem 3.3.3 en cada uno de los pasos 1,2,3 y 4.

4.2.1 Evaluación hidráulica del sistema sedimentador y filtro lento en la PTAP Tucurí

Se evaluó según los criterios de diseño establecidos en el D.S. N° 011-2006-VIVIENDA del Reglamento Nacional de Edificaciones en el sedimentador y filtro lento de arena tal como se describe en el ítem 3.3.3 en el paso 1, los resultados de la evaluación hidráulica del proceso de sedimentación y filtro lento se observa en la Tabla 32 y 33.

4.2.2 Cálculo de la capacidad estimada del sedimentador y filtro lento.

Para los cálculos de la capacidad estimada se da en función al área superficial total del sedimentador y filtro lento existente, para ello se utilizó la ecuación 18 y 19 que se encuentran en el ítem 3.3.3 en el paso número 2.

Los resultados de la capacidad estimada que tiene el sedimentador y filtro lento se representan en la Tabla 34 y 35.

Tabla 32

Comparación de los criterios de diseño establecidos por la normativa vigente con las condiciones de operación del sedimentador sin coagulación previa en la PTAP Tucui.

D.S. N° 011-2006-			
Parametro	VIVIENDA del Reglamento Nacional de Edificaciones	Sedimentador de la PTAP Tucui	Análisis
Turbiedad.	La turbiedad máxima del efluente debe ser de 50 UNT.	El valor máximo fue de 139.5 UNT.	No cumple con el criterio de diseño.
Periodo de retencion.	Debe considerarse un valor minimo de 2 horas.	En la prueba de trazabilidad al máximo pico que alcanzo fue a los 16 min.	No cumple con el criterio de diseño salió muy rápido el trazador evidenciando deficiencias en el sedimentador (cortocircuito hidráulico).
Velocidad horizontal.	Debe ser menor o igual a 0.55 cm/s.	0.32 cm/s	Si cumple es menor al criterio de diseño.
La razón entre la velocidad horizontal y la velocidad de sedimentación.	Debe estar en el rango de 5 a 20	2.53	No cumple con el criterio esto se debe a que la velocidad de sedimentación es menor a la velocidad horizontal.
La profundidad del sedimentador.	Debe estar en el rango 1.5 a 3 m	2.88 m	Si cumple con el criterio de diseño.
Estructura de entrada.	Debe comprender un vertedero a todo lo ancho de la unidad y una pantalla perforada.	Tiene un vertedero y una pantalla perforada.	Si cumple con el criterio de diseño.
Longitud del tanque	Deberá ser de 2 a 5 veces su ancho.	2.74 veces su ancho.	Si cumple con el criterio de diseño.

Tabla 33

Comparación de los criterios de diseño establecidos por la normativa vigente con las condiciones de operación del filtro lento de la PTAP Tucurí.

Parámetros	D.S. N° 011-2006- VIVIENDA del Reglamento Nacional de Edificaciones	Filtro lento de la PTAP Tucurí	Análisis
Turbiedad	La turbiedad sedimentada del afluente debe ser no mayor a 100 UNT por pocas horas no más de 4 horas.	El valor máximo fue de 133.5 UNT durante el día.	Excede la criterio de diseño.
Filtro lento	Debe proyectarse para operar las 24 horas.	Opera las 24 horas.	Si cumple el criterio de diseño.
Tasa de filtración	Considerando el tratamiento preliminar se podrá emplear tasas de 5 a 8 m ³ /m ² · d o de 0.20 m/h a 0.33 m/h.	Los valores hallados en planta se encuentran en un rango de 0.73 a 2.33 m/h y el manual de operación indica un valor de 0.728 m/h.	En ambos casos se puede apreciar que no cumplen con el criterio de diseño reduciendo la eficiencia del filtro debido a la disminución del tiempo de contacto en el filtro.
Número de unidades	Se debe tener un mínimo de dos unidades.	Tiene solo una unidad.	No cumple con el criterio de diseño.
Estructura de entrada a la unidad	Debe considerar instalaciones para medir y regular el caudal.	No cuenta con una estructura de medición de caudal.	No cumple con el criterio de diseño.
El espesor de la arena	Deberá ser de 80 a 100 cm y el valor mínimo considerado será de 50 cm.	El valor del espesor de la arena en las dos visitas realizadas fue de 38 cm.	No cumple con el criterio de diseño disminuye la eficiencia del filtro.
Tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad de la arena	El tamaño efectivo debe estar entre 0.2 a 0.3 mm y el coeficiente de uniformidad no mayor a 3.	El tamaño efectivo es de 0.30 mm y coeficiente de uniformidad de 1.43.	Si cumple el criterio de diseño.
Perdida de carga	Deberá tener una regla graduada dentro de la caja de filtración para medir la pérdida de carga por colmatación	No cuenta con regla graduada.	No cumple el criterio de diseño.

Tabla 34*Capacidad del sedimentador de la PTAP.*

Dimensiones y Capacidad	Unidad	Valor
Largo	m	7.3
Ancho	m	2.66
Altura	m	2.88
Area	m ²	19.418
Tasa de decantación	m ³ /m ² · d	10
Capacidad	m ³ /d	194.18
	L/s	2.25

Nota. La tasa de decantación se obtuvo de (Organización panamericana de la salud (OPS) & CEPIS, 2005).

Tabla 35*Capacidad del filtro lento de la PTAP.*

Dimensiones y Capacidad	Unidad	Valor
Largo	m	7.3
Ancho	m	4.5
Altura	m	2.66
Area	m ²	32.85
Tasa de filtración	m ³ /m ² · d	8
Capacidad	m ³ /d	262.8
	L/s	3

Nota. La tasa de filtración se obtuvo de (Barraza Soto, 2006).

Como se observa en la Tabla 34 y 35 el resultado de la capacidad de la planta es de 3 L/s como máximo, por ende, la planta no está diseñada para trabajar con caudales mayores al de su capacidad.

4.2.3 Comparación de caudales según el manual de operativos, prueba de trazabilidad y criterio normativos en las unidades de tratamiento.

Para la comparación de los caudales se tomó en consideración lo descrito en el ítem 3.3.3 en el paso número 3.

Tabla 36

Comparación de caudales en las unidades de tratamiento.

Unidad de tratamiento	Caudal según el manual de operaciones EPS.	Caudal por trazabilidad	Caudal normativo	CEPIS
Sedimentador	13.3 L/s	7 L/s	2.25 L/s	3.65 L/s
filtro lento	13.3 L/s	7 L/s	3.00 L/s	3.65 L/s

Nota. CEPIS: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

Como se observa en la Tabla 36 los caudales en las unidades de tratamiento exceden el caudal de diseño, esto se debe a que el manual de operaciones trabaja con una tasa de filtración de 0.728 m/h por encima del valor establecido por el D.S. N° 011-2006-VIVIENDA del Reglamento Nacional de Edificaciones, que indica una tasa de filtración en el rango de 0.20 a 0.33 m/h para filtros lentos, por consiguiente, el filtro lento opera a tasas superiores a las óptimas y esta sobrecargado. Esta condición reduce la eficiencia del proceso de filtración, debido a la disminución del tiempo de contacto entre el agua y el medio filtrante, limitando los procesos físicos, químicos y biológicos responsables de la remoción de contaminantes, esto explica las altas velocidades de filtración y el mal desempeño del sedimentador puesto a que la velocidad de sedimentación es menor a la velocidad horizontal lo que provoca el arrastre de partículas sólidas y la sobrecargando al filtro lento.

4.2.4 Evaluación de la eficiencia del sistema sedimentador y filtro lento en la PTAP Tucuri.

Para la evaluación de la eficiencia del sistema sedimentador y filtro lento se utilizó la ecuación 20 y la Tabla 10 que se encuentran en el ítem 3.3.3 en el paso número 4.

Eficiencia del sedimentador.

Se presentan en la Tabla 37 los resultados de la eficiencia en el sedimentador en la temporada de estiaje y lluvia.

Tabla 37

Determinación de la eficiencia de remoción analizados en el sedimentador.

Parámetros	% de eficiencia de remoción	
	Estiaje	Lluvia
Temporada		
Turbiedad	0	4.30
Coliformes Totales	96.86	38.00
Coliformes Termotolerantes	0	19.35
Bacterias Heterotróficas	88.18	25

En la Tabla 37 se observa que con respecto al parámetro de turbiedad en la temporada de estiaje no se logró remover la turbiedad y en temporada de lluvia solo se observa un valor de 4.3% de remoción lo cual es menor a lo esperado. En cuanto a la remoción de los microorganismos del agua en la temporada de estiaje tiene un mayor porcentaje de eficiencia en coliformes totales con 96.86% a diferencia de los coliformes fecales que no se logró remover nada. Asimismo, se observa que en temporada de lluvia el porcentaje de remoción de microorganismos es mínimo menor al 50%.

Eficiencia del filtro lento.

Se presentan en la Tabla 38 los resultados de la eficiencia del filtro lento de arena en la temporada de estiaje y lluvia.

Tabla 38

Determinación de la eficiencia de remoción analizados en el filtro lento.

Parámetros	% de eficiencia en el filtro lento	
	Estiaje	Lluvia
Temporada		
Turbiedad	26.19	54.48
Coliformes Totales	95.91	69.89
Coliformes Termotolerantes	0	69.33
Bacterias Heterotróficas	19.23	55.56

En la Tabla 38 se observa la comparación de la eficiencia de remoción de los parámetros en las dos temporadas del año, la mayor eficiencia de remoción se dio en la temporada de lluvia con valores mayor al 50%. Este comportamiento, aunque contrario a lo esperado en temporada de lluvia, puede explicarse debido a que el agua del río Tucurí trae más partículas (arena y materia orgánica), muchas de esas partículas son más grandes y pesadas, por lo tanto, quedan atrapadas más fácilmente en el filtro y los coliformes asociados a las partículas sólidas se eliminan junto con ellos lo que favorece su remoción de los parámetros en el filtro.

Sin embargo, pese a esta mayor eficiencia de remoción, los valores obtenidos de estos parámetros no cumplen con los valores de referencia del D.S. N° 031-2010-SA. para agua en tratamiento, antes del proceso de desinfección, lo cual puede estar asociado a la sobrecarga del caudal de diseño en ambos sistemas o la mayor presencia de partículas sólidas en el agua, lo que presenta deficiencias en su funcionamiento del sistema, relacionadas con la colmatación del filtro o la presencia de caminos preferenciales del flujo de agua a través de los sistemas y regiones donde el flujo de agua se queda demasiado tiempo, lo que produce tiempos de retención inadecuados.

Comparando los resultados obtenidos con Romero Giráldez (2021) donde se observa que la planta de tratamiento ingresa un caudal de 68 L/s, lo cual es superior a la

capacidad de dicha planta, puesto que el caudal de diseño es de 58.85 L/s, por ende, cada unidad no trabaja eficientemente; asimismo, las infraestructuras se encuentran deterioradas y no se tiene un adecuado manejo en cuanto a los insumos químicos, es por ello, que se desarrollaron los dimensionamientos adecuados de cada unidad o proceso de la planta; teniendo en consideración un caudal de 82.05 L/s.

Comparando los resultados obtenidos con Llamocca Tupayachi y Paliza Chino (2020) teniendo como resultado que, durante los meses con abundante precipitación pluvial, la PTAP Santa Ana, no cumple con los parámetros establecidos por la norma debido a que la turbiedad es abundante, por consecuencia la eficiencia del filtro se reduce.

Por tanto, se concluye que las investigaciones presentan similitud en cuanto a la sobrecarga del caudal de ingreso a la planta y a las dificultades que presentan las plantas en la temporada de lluvia, asimismo, los valores obtenidos de eficiencia del sedimentador y filtro lento, varían de acuerdo con el estado meteorológico de la región del Cusco, causando de esta manera la deficiencia en las plantas. Esto evidencia la necesidad de mejorar las unidades de tratamiento, para mejorar la remoción de turbiedad y microorganismos presentes en el agua cruda.

4.3 Determinación de las características técnicas de un sistema de coagulación-floculación.

Las ecuaciones que se utilizaron para las características técnicas del sistema de coagulación y floculación se encuentran en el ítem 3.3.4.

Cálculo del caudal máximo diario

En el padrón registrado de la EPS. EMPSSAPAL SA. con respecto a la planta Tucui se tiene una población de 1650 habitantes, debido a que la población de estudio está por debajo del rango mínimo establecido en el reglamento nacional de edificaciones, se consideró el

intervalo más cercano de 2000 a 10000 habitantes, que corresponde a una dotación de 120 L/hab/día en un clima frío, este valor se representa en la Tabla 39, a fin de garantizar el caudal máximo diario para la población de estudio.

Asimismo, el valor de dotación de 120 L/hab/día, se encuentra dentro del rango recomendado por CEPIS para poblaciones pequeñas la cual indica un rango de 80 a 120 L/hab/día, lo que respalda técnicamente la utilización de este valor en el presente estudio (OPS & CEPIS, 2005).

Tabla 39

Dotación por el número de habitantes.

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

Nota. Fuente: Tomado del reglamento nacional de edificaciones por él (Ministerio de Vivienda Construcion y Saneamiento, 2018).

Para el cálculo del caudal máximo diario, se empleará las ecuaciones 21 y 22 los resultados se presentan en la Tabla 40.

Tabla 40

Cálculo del caudal máximo diario.

Variable	Valor	Unidad
Dotación	120	L/hab/día
Población	1650	hab.
Caudal promedio diario anual	2.29	L/s
Caudal Maximo diario	2.98	L/s

Nota. El caudal con el que se trabajará para la caracterización del sistema de coagulación y floculación será de 3 L/s (10.8 m³/h), debido a que las unidades existentes que consta de un sistema de sedimentación y filtración lenta, fueron originalmente dimensionadas para dicho caudal y un incremento del caudal podría alterar las condiciones hidráulicas y la eficiencia operacional de las unidades existentes.

4.3.1 Cálculo de las características técnicas del dosificador en solución (para el proceso de coagulación).

Para el cálculo de las características del dosificador se tomó en consideración el Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú, el cual establece la determinación de la calidad y cantidad de coagulante requerida por el agua cruda, dosificación y almacenamiento, para ello se considera lo siguiente:

- Se recomienda en general el uso de sales metálicas, especialmente compuestos de Al³⁺ o Fe³⁺.
- El coagulante siempre deberá ser agregado en solución, cuando los ensayos de prueba de jarras no hayan sido efectuados, la concentración empleada deberá ser de 1 a 2%.
- Dosis máxima: correspondiente a la mayor turbiedad o color representativo de la época de lluvia.
- Dosis mínima: correspondiente a la turbiedad o color mínimo que se presente en la fuente.
- Los dosificadores en solución, preferentemente deberán ser de los que operan bajo el principio de orificio de carga constante (Barraza Soto, 2006).

Asimismo se consideró la presente Norma Técnica peruana (NTP 311.95:1999) donde se establece las especificaciones del sulfato de aluminio, para ser usado en el tratamiento de agua para consumo humano, los requisitos que debe cumplir el sulfato de aluminio tipo A según

la norma debe presentar un contenido de aluminio soluble en agua, mínimo del 9% como aluminio, o del 17% como Al_2O_3 ; como máximo 0.05% de hierro total como Fe_2O_3 ; tendrá máximo 0.5% de materia insoluble en agua (Norma Técnica Peruana (NTP 311.095), 1999).

- Cálculo del caudal de solución promedio

Para determinar el caudal de solución promedio mediante la ecuación 23, se consideró la dosis promedio de 38 mg/L, valor tomado como referencia del ensayo de jarras con el coagulante Sulfato de Aluminio tipo A ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$) de la investigación realizada por (Perez Garay, 2015), debido a que su investigación consta de una fuente superficial y las características de la fuente como turbiedad, pH, conductividad y color son similares a las características que se tiene en el río Tucuirí, por ello se tomó este dato al tratarse de una fuente similar a la fuente de estudio (río Tucuirí), se consideró la dosis correspondiente a la turbiedad máxima de la fuente de estudio, garantizando de esta manera la coherencia en el cálculo de las características del dosificador en solución.

Asimismo, se consideró una concentración del 1.5 % que equivale a 15000 mg/L, conforme a lo establecido en el Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú, debido a que no se realizaron ensayos de jarras para este estudio el resumen de datos se representa en la Tabla 41.

Tabla 41

Cálculo del caudal de solución promedio.

Variable	Valor	Unidad
Caudal de diseño (Q)	259.2	m ³ /dia
Dosis promedio (D)	38	mg/L
Concentración de coagulante (C)	15000	mg/L
Caudal de solución promedio (q)	0.6566	m³/dia

Cálculo del volumen del tanque de solución, consumo promedio diario de coagulante, consumo de coagulante por tanque de solución, caudal máximo dosificado, caudal mínimo dosificado y rango de dosificador, para los cálculos, se empleó las siguientes ecuaciones 24, 25, 26, 27, 28 y 29 los resultados se representan en la Tabla 42.

Tabla 42

Cálculo de parámetros de las características técnicas del dosificador en solución.

Parámetros	Valor	Unidad
Caudal de solución promedio (q).	0.6566	m ³ /dia
Intervalo de tiempo (T ₀).	48	h
Dosis máxima (D _M) correspondiente a 265.7 UNT de turbiedad.	52	mg/L
Dosis mínima (D _m) correspondiente a 8.2 UNT de turbiedad.	24	mg/L
Volumen del tanque de solución (V).	1.31328	m ³
Consumo promedio diario de coagulante (P).	114	mg/s
Consumo de coagulante por tanque de solución (P ₀).	19.6992	kg
Caudal máximo dosificado (q _M).	0.0104	L/s
Caudal mínimo dosificador (q _m).	0.0048	L/s
Rango de dosificador (R).	20.16	L/h
Altura del tanque de forma cilíndrica	154	cm
Ancho del tanque de forma cilíndrica	120	cm

Nota. El volumen del tanque calculado es de 1313.28 L; sin embargo, se tomó en consideración un tanque comercial de 1500 L disponible en el mercado, para la altura y el ancho del tanque de forma cilíndrica se obtuvo de (PROMART, 2026).

4.3.2 Cálculo de las Características técnicas de la unidad para difusor (para el proceso de coagulación).

Para el cálculo del número de orificios se tomaron como referencia los siguientes conceptos:

- El espacio máximo entre dos orificios nunca debe ser superior a 10 cm, para que el coagulante se distribuya de manera uniforme en toda la sección del canal.
- Los chorros de coagulante deben tener una velocidad de 3 m/s y deben dirigirse en sentido perpendicular al flujo.
- Los orificios deben tener un diámetro mínimo de 3 mm.
- La velocidad de la masa del agua donde se distribuyen los chorros deberán ser igual o superior a 2 m/s (Ingeniería Sanitaria, 2011).

Se considerará un difusor de 0.10 m de espaciamiento entre orificios (e) y el diámetro de los orificios de 5 mm, se escogió estos valores debido a que este espacio entre orificios permitirá una mejor distribución del coagulante en el flujo de agua cruda (río Tucuiri) y por ende permita una mayor velocidad del chorro en cada orificio tal como lo menciona el manual de plantas de filtración rápida y CEPIS. Asimismo, se consideró también un coeficiente de distribución de velocidades (R) igual a 0.46 valor tomado como referencia del expediente técnico “Mejoramiento y Ampliación del Sistema Integral de Agua Potable y Saneamiento en las Localidades de Coata, Almohace, Distrito de Coata – Puno” de la investigación realizada por (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2023), para los cálculos, se emplearon las siguientes ecuaciones 30, 31, 32, 33, 34, 35 y 36, los resultados de las características técnicas de la unidad para difusor se representan en la Tabla 43.

Tabla 43

Cálculo de parámetros de las características técnicas de la unidad para difusor.

Parámetros	Valor	Unidad
Espacio entre orificios (e).	0.10	m
Ancho del vertedero (B).	0.60	m
Número de orificios (N).	6	und

Diámetro de los orificios (d_0).	0.005	m
Área de orificios (A_0).	0.00002	m ²
Caudal promedio de solución por aplicar (q').	0.0000076	m ³ /s
Velocidad en los orificios (V_0).	0.065	m/s
Velocidad en la tubería (V_t).	0.030	m/s
Área de la tubería difusora (A_t).	0.00026	m ²
Diámetro de la tubería difusora (D_t).	0.0181	m
Diámetro corregido del difusor.	3/8	pulg

4.3.3 Evaluación de las características hidráulicas del vertedero triangular existente.

Para la evaluación de las características hidráulicas del vertedero existente como unidad de mezcla rápida se tomó como referencia los siguientes conceptos:

- Número de Froude de 4.5 a 9 (salto estable).
- Gradiente de velocidad de 700 a 1,300 s⁻¹.
- Tiempo de retención instantáneo de menos de 0,1 a 7 s como máximo.

Datos obtenidos del Reglamento Nacional de Edificaciones (Barraza Soto, 2006), para los cálculos, se empleó las siguientes ecuaciones 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48 y 49 que se encuentran en el ítem 3.3.4 los resultados se representan en la Tabla 44.

En la Tabla 44 se observa que el número de Froude se encuentra dentro del rango de 4.5 a 9 (salto estable) con un valor de 6.65, establecido por el D.S. N°011-2006-VIVIENDA del Reglamento Nacional de Edificaciones, en el ítem 5.8 mezcla rápida de la NORMA OS. 020. Asimismo, sucede con el tiempo de mezcla que tiene un valor menor a 0.1 s y el gradiente de velocidad de 777.6 s⁻¹ se encuentra dentro del rango de 700 a 1,300 s⁻¹. Lo cual indica que el vertedero triangular existente si cumple con las condiciones hidráulicas para que la mezcla sea adecuada.

Tabla 44

Cálculo de parámetros de las características hidráulicas del vertedero triangular existente.

Parametros	Valor	Unidad
Caudal de diseño (Q)	3	L/s
Altura de la lámina de agua sobre el vertedero (h)	0.147	m
Ancho de la lámina vertiente(L)	0.40	m
Ancho del canal (B)	0.60	m
Caudal unitario promedio(q)	0.0075	m ³ /s · m
Altura critica (h _c)	0.0179	m
Altura al inicio del resalto (h ₁)	0.0051	m
Velocidad al inicio del resalto (V ₁)	1.4832	m/s
Número de froude (F1)	6.6593	
Altura de agua después del resalto (h ₂)	0.0161	m
Velocidad al final del resalto (V ₂)	0.4659	m/s
Energía disipada en el resalto (h _p)	0.0041	m
Longitud del resalto (L _m)	0.0662	m
Distancia del vertedero a la sección 1 (L')	0.1050	m
Velocidad media (V _m)	0.9745	m/s
Tiempo de mezcla (T)	0.0680	s
Viscosidad dinámica del agua (μ)	0.001002	N · s / m ²
Peso específico del agua (γ)	9810	N/m ³
(γ/μ) ^{0.5}	3128.96455	
Gradiente de velocidad	771.6177	s⁻¹

4.3.4 Cálculo de las características técnicas de la unidad de floculación

- Características de un floculador hidráulico de flujo horizontal.

Para el cálculo de la longitud de canales del tramo se tomó como referencia los siguientes conceptos:

- Las unidades de flujo horizontal son apropiadas para sistemas de menos de 50 L/s de capacidad, se puede considerar un rango de gradientes de velocidad de 70 a 20 s⁻¹ y un tiempo de retención promedio de 20 minutos (Barraza Soto, 2006).
- Los gradientes de velocidad deberán disponerse en sentido decreciente, para acompañar el crecimiento y formación del floculo y el coeficiente de pérdida de carga en las vueltas (K) debe ser igual a 2 (Barraza Soto, 2006).
- Se debe diseñar con tirantes de agua de 1 a 3 m, dependiendo del material de la pantalla, datos obtenidos del Reglamento Nacional de Edificaciones (Barraza Soto, 2006).
- Se recomienda un mínimo de 3 tramos y la cantidad de unidades depende de la cantidad de tratamiento.
- Se toma un valor inicial de velocidad (V) que debe estar entre 0.10 a 0.60 m/s (Huamani Taco, 2019).
- Coeficiente de rugosidad del PVC ($\eta = 0.009$) (Mejia Orellana, 2022).
- Espesor de las pantallas ($e = 0.006$), se adoptó este valor para la pantalla del floculador horizontal de acuerdo con el criterio de diseño propuesto por (Cahuata Corrales & Borda Choque, 2021). Se tomó cada uno de estos criterios debido a que el caudal de diseño de la PTAP Tucuri es de 3 L/s lo que es adecuado para un floculador hidráulico horizontal, tal como indica el Reglamento Nacional de Edificaciones, para los cálculos de las características del floculador, se empleó las siguientes ecuaciones 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62 y 63, los resultados de las características técnicas de los 3 tramos del floculador se representan en la Tabla 45, 46 y 47.

Tabla 45

Cálculo de parametros de las características técnicas de la unidad de floculación tramo 1.

Parametros	Valor	Unidad
Caudal de diseño (Q)	3	L/s

Tiempo total de floculación (T)	20	min
Rango de gradiente de velocidad	70 a 20	s ⁻¹
Velocidad del tramo 1 (V₁)	0.17	m/s
Tiempo de floculación del tramo 1 (T₁)	5	min
Longitud de canales del tramo 1 (l ₁)	51	m
Sección del canal del tramo 1 (A ₁)	0.02	m ²
Altura del canal del tramo 1 (H ₁)	1.10	m
Ancho del canal del tramo 1 (a ₁)	0.016	m
Ancho de vueltas del tramo 1 (d ₁)	0.02	m
Ancho total útil de la lámina (b)	1.58	m
Ancho del floculador (B₁)	1.60	m
Número de canales del tramo 1 (N ₁)	32	und
Número de tabiques o pantallas	31	und
Espesor de las pantallas (e)	0.006	m
Longitud del tramo 1 (L₁)	0.69	m
Perímetro mojado de la sección del tramo 1 (P ₁)	2.22	m
Radio hidráulico de los canales tramo 1 (Rh ₁)	0.01	m
Aceleración de la gravedad (g)	9.81	m/s ²
Coefficiente de pérdida de carga en las vueltas (K)	2	
Pérdida de carga en las vueltas de tramo 1 (h ₁)	0.09	m
Coefficiente de manning (η)	0.009	
Pérdida de carga en los canales del tramo 1 (h ₂)	0.08	m
Pérdida de carga total en el tramo (hf _{T1})	0.17	m
Viscosidad dinámica del agua (μ)	0.00114	kg/ m · s
Peso específico del agua (γ)	9802	kg/ m ³
Tiempo que el agua tarda en recorrer el tramo 1 (t ₁)	300.00	s
Gradiente de velocidad en el tramo 1 (G₁)	68.93	s⁻¹

Tabla 46

Cálculo de parametros de las características técnicas de la unidad de floculación tramo 2.

Parametros	Valor	Unidad
Caudal de diseño (Q)	3	L/s
Tiempo total de floculación	20	min
Rango de gradiente de velocidad	70 a 20	s ⁻¹

Velocidad del tramo 2 (V_2)	0.14	m/s
Tiempo de floculación del tramo 2 (T_2)	7	min
Longitud de canales del tramo 2 (l_2)	58.8	m
Sección del canal del tramo 2 (A_2)	0.02	m ²
Altura del canal del tramo 2 (H_2)	1.10	m
Ancho del canal del tramo 2 (a_2)	0.019	m
Ancho de vueltas del tramo 2 (d_2)	0.03	m
Ancho total útil de la lámina (b_2)	1.58	m
Ancho del floculador (B_2)	1.60	m
Número de canales del tramo 2 (N_2)	37	und
Número de tabiques o pantallas	36	und
Espesor de las pantallas (e)	0.006	m
Longitud del tramo 2 (L_2)	0.93	m
Perímetro mojado de la sección del tramo 2 (P_2)	2.22	m
Radio hidráulico de los canales tramo 2 (R_{h2})	0.01	m
Aceleración de la gravedad (g)	9.81	m/s ²
Coefficiente de pérdida de carga en las vueltas (K)	2	
Pérdida de carga en las vueltas de tramo 2 (h_2)	0.07	m
Coefficiente de Manning (n)	0.009	
Pérdida de carga en los canales del tramo 2 (h_2)	0.05	m
Pérdida de carga total en el tramo (hf_{T2})	0.12	m
Viscosidad dinámica del agua (μ)	0.00114	kg/ m · s
Peso específico del agua (γ)	9802	kg/ m ³
Tiempo que el agua tarda en recorrer el tramo 2 (t_2)	420.00	s
Gradiente de velocidad en el tramo 2 (G_2)	48.87	s⁻¹

Tabla 47

Cálculo de parámetros de las características técnicas de la unidad de floculación tramo 3.

Parámetros	Valor	Unidad
Caudal de diseño (Q)	3	L/s
Tiempo total de floculación	20	min
Rango de gradiente de velocidad	70 a 20	s ⁻¹

Velocidad del tramo 3 (V_3)	0.10	m/s
Tiempo de floculación del tramo 3 (T_3)	8	min
Longitud de canales del tramo 3 (l_3)	48	m
Sección del canal del tramo 3 (A_3)	0.03	m ²
Altura del canal del tramo 3 (H_3)	1.10	m
Ancho del canal del tramo 3 (a_3)	0.027	m
Ancho de vueltas del tramo 3 (d_3)	0.04	m
Ancho total útil de la lámina (b_3)	1.58	m
Ancho del floculador (B_3)	1.60	m
Número de canales del tramo 3 (N_3)	30	und
Número de tabiques o pantallas	29	und
Espesor de las pantallas (e)	0.006	m
Longitud del tramo 3 (L_3)	0.99	m
Perímetro mojado de la sección del tramo 3 (P_3)	2.23	m
Radio hidráulico de los canales tramo 3 (R_{h3})	0.01	m
Aceleración de la gravedad (g)	9.81	m/s ²
Coefficiente de pérdida de carga en las vueltas (K)	2	
Pérdida de carga en las vueltas de tramo 3 (h_3)	0.03	m
Coefficiente de manning (η)	0.009	
Pérdida de carga en los canales del tramo 3 (h_2)	0.01	m
Pérdida de carga total en el tramo (hf_{T3})	0.04	m
Viscosidad dinámica del agua (μ)	0.00114	kg/ m · s
Peso específico del agua (γ)	9802	kg/ m ³
Tiempo que el agua tarda en recorrer el tramo 3 (t_3)	480.00	s
Gradiente de velocidad en el tramo 3 (G_3)	27.30	s⁻¹

Como se puede observar en los datos obtenidos en la Tabla 45, 46 y 47, los cálculos cumplen con los criterios establecido por el D.S. N° 011-2006-VIVIENDA del Reglamento Nacional de Edificaciones, en el ítem 5.9 Floculación de la NORMA OS. 020 como es el caso de los gradientes de velocidad de 68.93; 48.87 y 27.30 s⁻¹ que se encuentra entre el rango de 70 a 20 s⁻¹. Asimismo, el gradiente de velocidad se encuentra en forma decreciente tal como lo

exige la norma. Los criterios establecidos del floculador horizontal se hicieron cumplir para que se logre el crecimiento y la formación de flóculos, para que el agua sedimente con mayor eficiencia y mejore la calidad del agua filtrada en la PTAP Tucurí.

Los lodos que se generarán en los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtro lento debido al uso del coagulante de sulfato de aluminio tipo A, serán conducidos a un tanque de espesamiento por gravedad. Este proceso permitirá separar el agua contenida en el lodo y aumentar la concentración de sólidos, reduciendo así su volumen y facilitando su manejo posterior. El sobrenadante separado será evaluado para determinar su posible recirculación, mientras que el lodo espesado será conducido a una etapa posterior de deshidratación mediante lechos de secado donde se colocara sobre una capa de arena y grava con sistema de drenaje el lodo seco luego será caracterizado antes de definir su disposición (Sandoval, Alejandra, Piña, & Montellano, 2007).

Análisis comparativo con antecedentes

El antecedente de Cahuata Corrales y Borda Choque (2021) presentó similitud con la presente investigación debido a que ambos estudios emplearon un floculador hidráulico horizontal como unidad de tratamiento. Se diseñó un sistema de coagulación- floculación que consta de un dosificador hidráulico, un vertedero triangular y un floculador de flujo horizontal que presenta un caudal de diseño de 8.125 L/s, 73 pantallas de floculación con un espesor (e) de 0.006 m, un coeficiente de fricción de Manning (n) de 0.015 y un tiempo de residencia de 15 minutos con un gradiente de velocidad de 81.89 s^{-1} para ser implementados en la planta. No obstante, el antecedente estuvo dirigido a mejorar la remoción de color parámetro que guarda relación con la turbiedad, ya que ambos influyen en las características físicas y calidad del agua tratada, mientras que la presente investigación priorizó la reducción de turbiedad y coliformes, adaptando los parámetros de las características del floculador a dichas condiciones de calidad del agua.

Comparando los resultados obtenidos con García Ávila (2014), donde se evidenciaron que el valor del gradiente de velocidad para la mezcla rápida es de 1703 s^{-1} para un vertedero rectangular, el tiempo de retención de 0.55 s, la velocidad en el punto de mezcla es de 2.6 m/s, el floculador hidráulico de flujo vertical presenta un caudal de diseño de 10 L/s, tiene 60 pantallas de floculación de asbesto cemento planas, con un espesor (e) de 0.008 m, el coeficiente de fricción de Mannig (n) de 0,012, el tiempo de retención de 20 minutos y el valor del gradiente de velocidad es de $38,9 \text{ s}^{-1}$. Los resultados obtenidos difieren con la presente investigación debido a que dicho autor empleó un floculador vertical, mientras que en la presente investigación se diseñó un floculador horizontal. Sin embargo, ambos sistemas tuvieron como finalidad mejorar la calidad del agua mediante el proceso de floculación, favoreciendo la remoción de partículas responsables de la turbiedad.

El estudio de Yovera Rodríguez y Castro Villacorta (2020), propuso la conversión de un floculador horizontal a vertical con pantallas móviles constituida por tabloncillos de concreto, con el propósito de optimizar la calidad del agua tratada de las cuales se obtuvo las siguientes características del nuevo floculador de flujo vertical que presenta un caudal de diseño de 185 L/s, con pantallas móviles constituidas por tabloncillos de concreto, un coeficiente de fricción de Manning (n) de 0.013 la cual está compuesta de 3 tramos con los siguientes gradientes de velocidad 60; 44 y 23 s^{-1} , los tiempos de residencia fueron de 5.99, 6.64 y 6.94 min. En contraste, la presente investigación mantuvo un diseño horizontal con pantallas móviles constituida por PVC.

Asimismo, el dimensionamiento y cálculo del floculador horizontal se desarrolló considerando los criterios propuestos por Benites, Machuca y Sabino (2018), de las cuales se obtuvo las siguientes características del floculador de flujo horizontal la cual está compuesta de 3 tramos con los siguientes gradientes de velocidad 67.19; 44.81 y 31.55 s^{-1} , los tiempos de residencia fueron de 5, 7 y 8 min. los cuales sirvieron como base metodológica para la

caracterización del floculador en la presente investigación se mantuvo un diseño horizontal con pantallas móviles constituida por PVC, que presenta un caudal de diseño de 3 L/s, con espesor de 0.006 m, un Coeficiente de rugosidad del PVC (η) de 0.009, la cual está compuesta de 3 tramos con los siguientes gradientes de velocidad 68.93; 48.87 y 27.30 s^{-1} , los tiempos de residencia fueron de 5, 7 y 8 min. Los resultados obtenidos presentan similitud con el autor, puesto que su gradiente de velocidad, se encuentra dentro del rango de 70 a 20 s^{-1} y se halla en forma decreciente tal como lo exige la norma vigente. La aplicación de dichos parámetros permitió obtener resultados favorables en la reducción de turbiedad y coliformes.

En conjunto, Se concluye que los antecedentes analizados y los criterios de las características del floculador empleados evidencian la importancia del proceso de coagulación y floculación. Asimismo, los resultados muestran que tanto los sistemas verticales como horizontales pueden contribuir eficientemente al mejoramiento notable de las características de la calidad del agua tratada, siempre que las características del floculador y las condiciones operacionales sean adecuadas.

Se representa el diagrama de flujo de proceso de la mejora implementada en la PTAP ver Figura 28.

Asimismo, se presenta dos planos en AutoCAD 2D, correspondientes al estado antes y después de la implementación del sistema de coagulación-floculación, donde se visualiza la gráfica de la propuesta de mejora planteada ver Figura 28 y 29.

Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de agua potable Tucurí con inclusión de los procesos de coagulación y floculación.

En la Figura 28 se muestra el diagrama de flujo de la planta para la potabilización de agua.

Figura 28

Diagrama de flujo del proceso de potabilización de agua en la PTAP Tucuirí con inclusión de los procesos de coagulación y floculación.

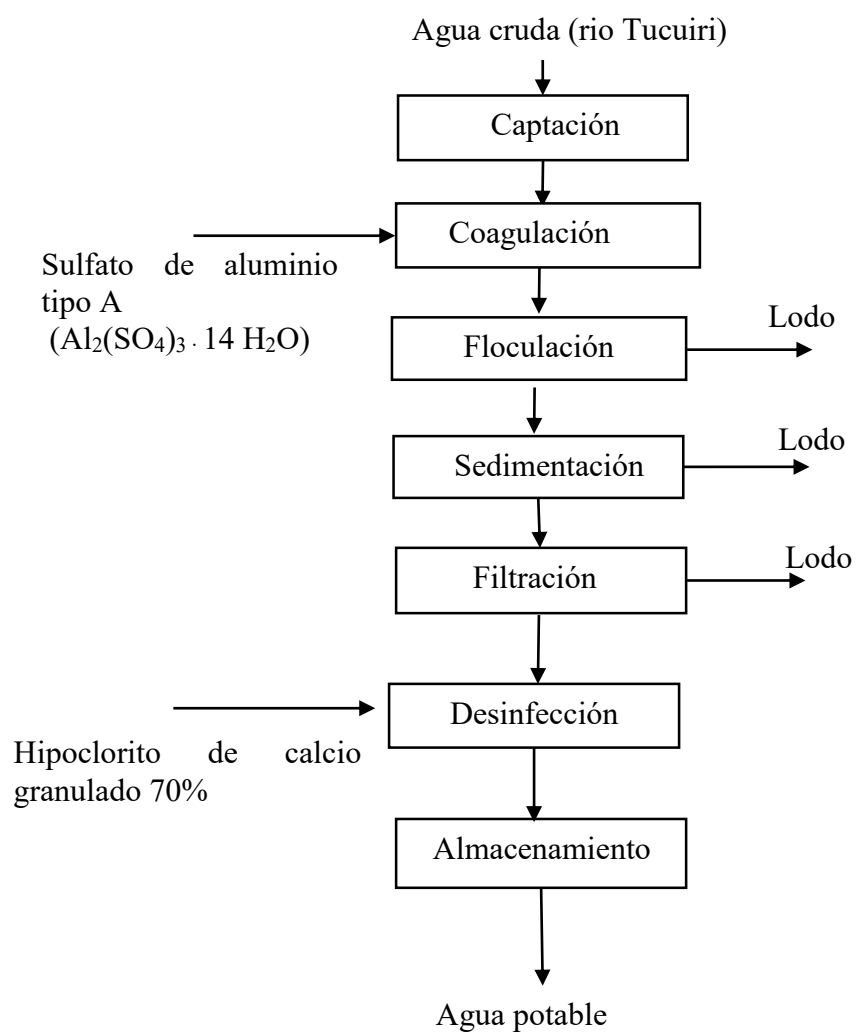
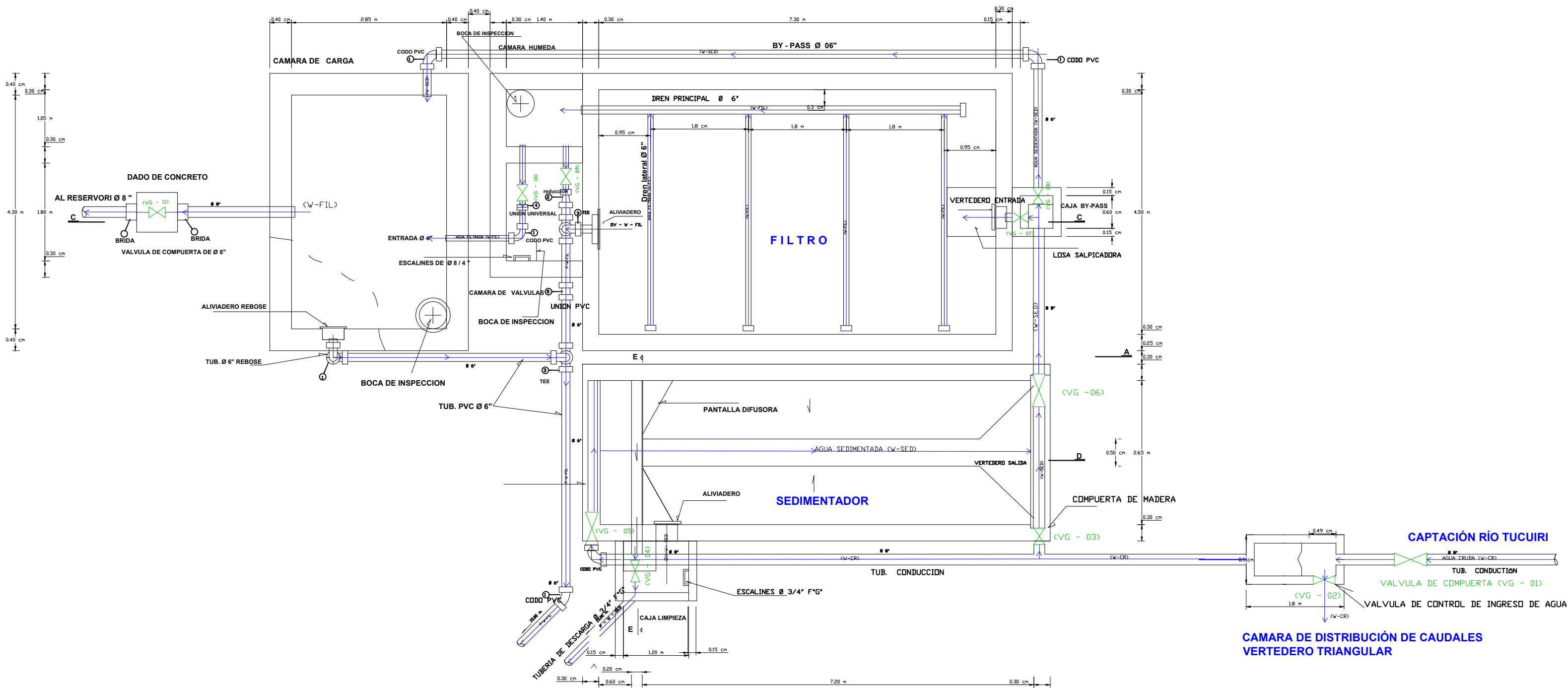


Figura 29

Plano 1: Planta de tratamiento de agua potable Tucuiiri actual

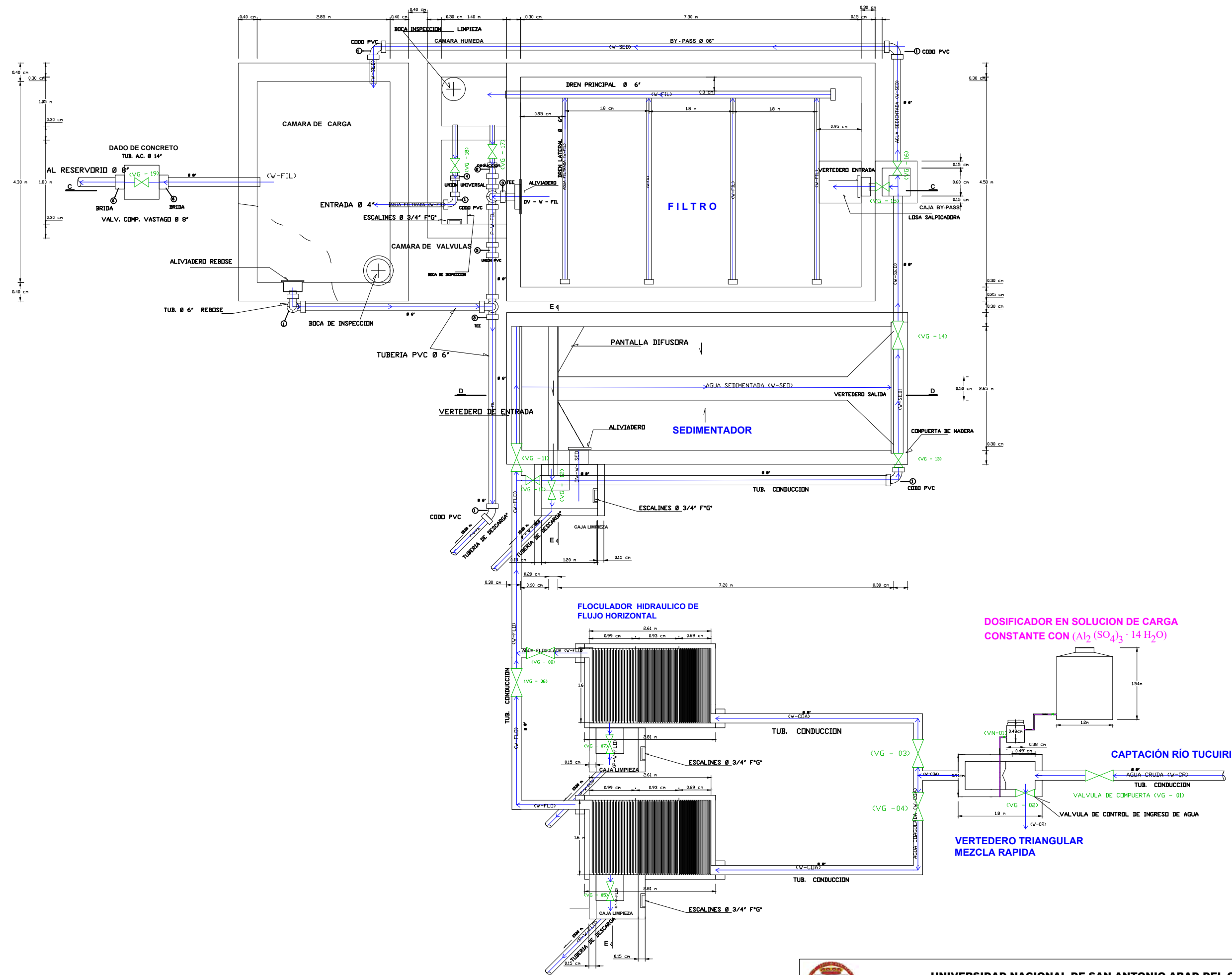


LEYENDA DE SINBOLOGÍA
W - CR : Agua cruda
W - SED : Agua sedimentada.
W - FIL : Agua filtrada.
P- W - SED : Purga de agua sedimentada.
OV- W - SED : Aliviadero de agua sedimentada.
P- W - FIL : Purga de agua filtrada.
OV- W - FIL : Aliviadero de agua filtrada.
VG : Valvula de compuerta.

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS ESCUELA PROFECIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA 			
LOCALIDAD :	PROYECTO : PROPUESTA DE MEJORA DE LA CALIDAD DEL AGUA FILTRADA EN LA PTAP TUCUIRI MEDIANTE UN SISTEMA DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN, SANTO TOMAS, CHUMBIVILCAS.		
SANTO TOMAS			
DISTRITO :	PLANO DE : PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE TUCUIRI ACTUAL		
SANTO TOMAS			
PROVINCIA :			
CHUMBIVILCAS			N° LAMINA
DEPARTAMENTO :			01/02
CUSCO			
DISEÑADO POR:	REVISADO POR:	DIGITALIZADO POR :	FECHA :
ELIZABETH TTITO NUÑEZ		ELIZABETH TTITO NUÑEZ	13/08/2026

Figura 30

Plano2: Propuesta de mejora de la calidad de agua filtrada en la PTAP Tucuri mediante un sistema de coagulación- floculación.



LEYENDA DE SINBOLOGÍA
W - CR : Agua cruda
W - COA : Agua coagulada
W - FLO : Agua floculada.
W - SED : Agua sedimentada.
W - FIL : Agua filtrada.
P- W - FLO : Purga de agua floculada.
P- W - SED : Purga de agua sedimentada.
OV- W - SED : Aliviadero de agua floculada.
P- W - FIL : Purga de agua filtrada.
OV- W - FIL : Aliviadero de agua filtrada.
VG : Valvula de compuerta.
VL : Valvula de globo.
VN : Valvula de aguja.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS ESCUELA PROFECIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA			
LOCALIDAD :	PROYECTO :		
SANTO TOMAS			
DISTRITO :			
SANTO TOMAS			
PROVINCIA :	PLANO DE :		N° LAMINA
CHUMBIVILCAS			
DEPARTAMENTO :			
CUSCO			02/02
DISERADO POR:	REVISADO POR:	DIGITALIZADO POR :	FECHA :
ELIZABETH TTITO NUÑEZ		ELIZABETH TTITO NUÑEZ	13/08/2026

CONCLUSIONES

1. Se propone un sistema de coagulación y floculación que mejore la calidad del agua filtrada, para la reducción de los parametros de turbidez, coliformes totales, coliformes termotolerantes y de las bacterias heterotroficas presentes con mayor carga en temporada de lluvia.

2. Se determinó que la planta actualmente, presenta problemas en la operación del sistema sedimentador y filtro lento. Los caudales de ingreso de agua son de 6.83 L/s a 24.85 L/s. En el sedimentador la velocidad de sedimentación es menor a la velocidad horizontal, las velocidades de filtración son superiores a las óptimas y el tiempo de retencion hidráulico real es menor que el tiempo de retencion teórico; evidenciando la presencia de caminos preferenciales del flujo de agua a través de los sistemas y zonas muertas. El agua presenta problemas de turbiedad coliformes totales, termotolerantes y bacterias heterotroficas durante el periodo de lluvia.

3. Se evaluaron las deficiencias técnicas en el sedimentador y filtro lento evidenciando un comportamiento irregular, el sistema no garantiza el cumplimiento de los valores de referencia del reglamento de calidad de agua; no cumple con los criterios de diseño establecidos en la normativa vigente; la planta opera a caudales superiores a los de diseño y a tasas superiores a las óptimas. La eficiencia de remocion en temporada de lluvia del sedimentador es menor al 50% y en el filtro lento es mayor al 50%, sin embargo, pese a esta mayor eficiencia, los valores obtenidos de los parametros no cumplen con los valores de referencia del D.S. N° 031-2010 -SA. El sistema evidencia la necesidad de mejorar las unidades de tratamiento, para la remoción de turbiedad y microorganismos antes de la etapa de desinfección.

4. Se determinaron las características técnicas del sistema de coagulación y floculación, para una población de 1650 habitantes: caudal de diseño 3 L/s y dosis promedio de 38 mg/L de sulfato de aluminio tipo A; obteniéndose un caudal de solución promedio de 0.66 m³/dia. El consumo de coagulante por tanque de solución es 19.69 kg, el caudal máximo dosificado de 0.1 L/s. Se utilizará un tubo difusor con 6 orificios con una velocidad de 0.065 m/s. Se realizará la mezcla rápida en el vertedero triangular, con un gradiente de velocidad de 777.6 s⁻¹. El sistema de floculación horizontal de 3 tramos tiene los gradientes de velocidad: tramo 1 de 68.93 s⁻¹, tramo 2 de 48.87 s⁻¹ y tramo 3 de 27.30 s⁻¹; los cuales se encuentran en sentido decreciente conforme a la normativa vigente.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda aplicar el estudio realizado para corregir el tratamiento actual del proceso, al implementar un sistema de coagulación y floculación que servirá para mejorar la remoción de turbiedad y microorganismos del agua antes de la etapa de desinfección.
- Se recomienda realizar las pruebas de tratabilidad en el tratamiento de agua de la PTAP Tucuirí, para lograr obtener la concentración promedio del coagulante con mayor exactitud.
- Se recomienda completar la altura del lecho filtrante de arena a 100 cm de espesor, para mejorar la eficiencia del filtro y producir agua de mejor calidad y apariencia.
- Se recomienda la capacitación de todo el personal operático a cargo de la planta, sobre los procesos que se llevan a cabo en cada unidad de tratamiento y el correcto mantenimiento que se debe realizar para mejorar la eficiencia de la PTAP y asegura la calidad del agua para consumo humano.
- El Sistema de Abastecimiento de Agua para el Consumo Humano debe contar con los servicios de personal especialista, capacitado en operación, mantenimiento y administración para mejorar los procesos de producción de agua.
- En caso de incremento de la demanda futura, se recomienda evaluar la ampliación hidráulica integral de la planta, especialmente las unidades de sedimentación y filtración lenta.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aguilar herrera, W. (2019). Evaluacin de la calidad de agua para consumo humano obtenida en una micrlanta utilizand filtr lento de arena. peru.
- Arocha, S. (2011). Acueductos: Fundamentos Teóricos-Prácticos. Caracas, Venezuela: Oikos Impresos ,C.A.
- Barraza Soto, G. (08 de 06 de 2006). Reglamento nacional de edificaciones. Lima.
- Benavente Garcia, M. (2019). Metodologia de investigacion. Cusco, Peru.
- Benites Bayona, J., Machuca Quiñones, J., & Sabino Barreto, L. (2018). Unidad de mezcla rapida. Huaraz, Peru.
- Blacio Ordoñez, D. A., & Palacios Perez, J. L. (05 de 10 de 2011). Filtracion Biologica para la potabilizacion del agua, posibilidades de uso de filtros lentos de arena con agua superficial de nuestra region. Ecuador.
- Burgos Flores, D., Martin Dominguez, A., & Martin Dominguez, I. (2003). Analisis del comportamiento hidraulico de unidades de tratamiento de agua. Mexico.
- Caceres Schrei, J. A. (2017). Compendio de metodologia para el diseño de sedimentadores de flujo horizontal. Guatemala.
- Cahuata Corrales, R., & Borda Choque, D. F. (agosto de 2021). Evaluacion del proceso de coagulacion- floculacion para la eliminacion de color del agua tratada en la lanta de tratamiento de agua potable de Miskiunu - Santo Tomas. Cusco.
- Cahuata Corrales, R., & Borda Choque, D. F. (2021). Evaluacion del proceso de coagulacion- Floculacion en la planta de tratamiento de agua potable miski unu- Santo Tomas para la eliminacion de color. Cusco, Peru.
- Calle Idrovo, L., & Zambrano Torres, C. (2015). Optimizacion del proceso de Floculacion y coagulacion de la planta potabilizadora de la junta de agua potable de Bayas. Ecuador.

- Canepa de Vargas, L. (1992). programa regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano.
- CEPIS. (1992). Manual de evaluación. Tomo II, Analisis de flujo y factores que determinan los periodos de retencion. Lima.
- Dirección General de Salud Ambiental. (febrero de 2011). *Reglamento de calidad del agua para consumo humano*. Obtenido de http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/Reglamento_Calidad_Agua.pdf
- EMPSSAPAL. (2025). Manual de operacion y mantenimiento de la PTAP Tucuri. CUSCO.
- EMPSSAPAL. (2026). Manual de operacion y mantenimiento de la PTAP Tucuri. CUSCO.
- ENOHSA. (2024). *Capitulo VII. Filtracion Lenta de la Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento*. Obtenido de <http://www.elaguapotable.com/Filtracion%20lenta%20ENOHSA.pdf>
- Escobar Arango, J. (2021). Diseño de filtro como alternativa de tratamiento de agua potable en respuesta a la problematica del sector Carpinelo II. Colombia.
- Estandares de Calidad Ambiental (ECA). (2017). *Aprueban estandares de calidad ambiental (ECA) para agua y establecen disposiciones complementarias*. Obtenido de <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- Fernando Quintero, D., & Armado Alferez, G. (2008). Evaluacion de la eficiencia de filtro lento de arena vs filtro de fique en el tratamiento de agua subterranea. Bogota.
- FILTERMEDIA. (2022). Ficha tecnica del producto arenas para filtros lentos.
- García Ávila, F. (15 de diciembre de 2014). Diseño de una planta de tratamiento con filtración rápida para reenplazar a un sistema de filtración lenta. Ecuador.
- Gonsalez Herrera, A. (2023). ¿Como purificar agua usando un filtro lento de arena en mi escuela? Mexico.

- Guaman Guaman, W., & Roman Sarmiento, C. (abril de 2023). Evaluacion tecnica y operativa de la planta de tratamiento de agua potable " la loma " del canton NAbon ,provincia del Azuay. Ecuador.
- Huamani Taco, G. (marzo de 2019). Mejoramiento y anpliacion del sistema de abastesimiento de agua potable ara los asentaientos humanos del centro poblado Pucchun en el distrito de Mariscal, Caceres,provincia de Camana Arequipa. Arequipa.
- Ingenieria Sanitaria. (2011). *Manual de plantas de filtracion rapida capitulo2: Mezcladores*. Obtenido de https://ingenieriasanitaria.com.pe/site/index.php/manuales/plantas-de-filtracion-rapida?utm_source=chatgpt.com
- Llamocca Tupayachi, M., & Paliza Chino, D. (2020). Evaluacion de la eficiencia del roceso de filtracion de la planta de tratamiento de agua potable Santa Ana-Cusco aplicando la norma OS.020 y el reglamento tecnico del sector de agua potable y saneamieto basico RAS 2000. Cusco, Peru.
- Llanos Angeles, S. M., & Mirano Celis, H. (2018). Elavoracion de la eficiencia de filtro de arena y filtro de piedra caliza, en la remocion de parametros fisicos, de las aguas de la quebrada la oyada, Moyobamba,Peru. Moyobamba, Peru.
- Maiyo, J. K., Dasika, & Jafvert, C. (2023). Filtros de arena lentos para el sigl XXI: una revicion. *MDPI*, 26.
- Manrique Andrade, V. A. (2013). Comportamiento del resalto hidráulico en canales con endiete y seccion rectangular. Colombia.
- Marchand Pajares, E. O. (2002). Microorganismos indicadores de la calidad del agua de consumo humano en Lima Metropolitana. Lima.
- Marron, C. (1999). Plantas de tratamiento por filtracion lenta: diseño,operacion y manteniiento. Lima.

- Martinez Garcia, J., & Gonzales Silgado, L. (2012). *Evaluación del poder Coagulante de la Tuna (opuntia ficus indica) para la remoción de turbidez y color en aguas crudas. Cartagena. cartagena.*
- Martinez Garcia, J., & Gonzales Silgado, L. E. (2012). *Evaluación del poder Coagulante de la Tuna (opuntia ficus indica) para la remoción de turbidez y color en aguas crudas. Cartagena. Cartagena.*
- Mejia Orellana, J. F. (09 de mayo de 2022). Estudio de las condiciones de flujo en un floculador hidraulico horizontal de tabiques mediante modelo numerico. Ecuador.
- Ministerio de Vivienda Construcion y Saneamiento. (abril de 2018). Norma tecnica de diseño: opciones tecnologicas para sistemas de saneamiento en el ambiente rural. Peru.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2023). *SCRIBD*. Obtenido de https://es.scribd.com/document/657079836/3-Memoria-de-Calculo-Ptap-Mezcla-Rapida?utm_source=chatgpt.com
- Morelio Leon, L. (2012). Hidrologia de trazadores en la gestion ambiental de yacimientos de etroleo onshore. *MAPPING*, 44.
- NORMA OS.020. (2016). *Planta de tratamiento de agua para consumo humano*. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/munisantamariadelmar/informes-publicaciones/2619683-os-020-plantas-de-tratamiento-de-agua-potable-ds-n-024-2009>
- Norma Tecnica Peruana (NTP 311.095). (1999). Sulfato de aluminio para tratamiento de agua. Peru.
- OMS. (2018). Guías para la calidad del agua de consumo humano. Ginebra.
- OPS & CEPIS. (2005). Guia para el diseño de tecnologias de alcantarillado. Lima, Peru.
- Organización panamericana de la salud (OPS) & CEPIS. (2005). Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores. Lima.

- Ortiz Hernandez, K. P. (mayo de 2020). Estimacion de la velocidad de sedimentacion en condiciones de flujo estratificado no estacionario en zona de maxima Turbidez. Colombia.
- Perez farras, L. (08 de 2005). Teoria de la sedimentacion.
- Perez Garay, I. F. (2015). Optimizacion de la disifcacion de sulfato de aluminio para el tratamiento de agua potable del distrito de Vilcacoto. Huancayo, Peru.
- PROMART. (2026). *PROMART*. Obtenido de https://www.promart.pe/tanque-gdpv-tricapa-1500-litros/p?utm_source=chatgpt.com
- PVICA. (2026). programa de vigilancia y calidad de agua de la Red de servicios de Salud de Chumbivilcas. Cusco, Chumbivilcas.
- Quintero, D., & Alferez, G. (2008). Evaluacion de la eficiencia de filtros lentos de arena vs. filtros de fique en el tratamiento de agua lluvia y agua subterranea. Bogota, Colombia.
- Romero Giraldez, M. (2021). Propuesta de mejora de la planta de tratamiento de agua potable de la ciudad de Ayaviri, Melgar, Puno -2018. PUNO.
- RSSCH. (2026). Red de Servicios de Salud Chumbivilcas, Unidad Ejecutora 411 Salud Chumbivilcas.
- Salazar, R. E. (2023). Diseño hidraulico de una planta de tratamiento de agua potable para el consumo humano en el recinto San Lorenzo del canton Pajan. Jipijapa, Manabi, Ecuador.
- Saldaña Marin, A. M. (2019). CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD Y EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DADO AL AGUA PARA CONSUMO DOMÉSTICO EN LA CIUDAD DE CELENDÍN – CAJAMARCA. Cajamarca.
- Sanchez, P. D. (diciembre de 2012). Determinacion de la distribucion de velocidades en un cuenco de disipacion de energia de un vertedero de caida libre. Cartagena, Colombia.

- Sandoval, L., Alejandra, M., Piña, M., & Montellano, L. (21 de 04 de 2007). Estudio piloto para reducir el volumen de lodos de plantas potabilizadoras. México.
- SICAP. (2025). información de la Entidad Prestadora de Servicios de Saneamiento (EPS) EMPSSAPAL. Cusco.
- SINIA. (2017). *Aprueban estándares de calidad ambiental (ECA) para agua y establecen disposiciones complementarias*. Obtenido de <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-agua-establecen-disposiciones>
- Tavares, S., & Concepcion, D. (2022). Rendimiento de filtro lento con medios filtrantes de mezcla de arenas naturales sostenibles. *AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: investigación, desarrollo y práctica*, 15.
- Toapanta Arce, P. M., & Tualombo Amagua, D. J. (diciembre de 2018). Evaluación de los procesos de potabilización de la planta de Troje-EPMAPS-Quito por medio de pruebas de tratabilidad y ensayos con trazadores. Quito, Ecuador.
- Vargas C., M., & Romero E., L. G. (2012). *Desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en países en desarrollo*. Obtenido de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/5784/desarrollo-coagulantes-floculantes-tratamiento-aguas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Visser, J., Paramasivam, R., Raman, A., & Heijnen, H. (1992). *Filtración lenta en arena para el tratamiento de agua para comunidades*. Cali, Colombia: Cinara (centro internacional de abastecimiento y remoción de agua). Obtenido de <https://www.ircwash.org/sites/default/files/255.1-92FI-11389.pdf>
- Yovera Rodríguez, R., & Castro Villacorta, J. C. (Febrero de 2020). Proyecto de optimización de la planta de filtración rápida Los Molinos -Semapa. Huacho, Perú.

APÉNDICES

Apéndice A:

Análisis granulométrico de arena cuarsoza gris

 REPORT DE GRANULOMETRIA Y CONTROL DE CALIDAD		CODIGO CEA-CC-F-01
		VERSION 1
		FECHA 01-10-16
		PAGINA 01 de 02

CEA FILTRATION EIRL
 RUC: 20603165102
 www.filtermedia.com.pe
 Depto. de Control de Calidad
 Lima 12 - Perú
 LABORATORIO

ANALISIS GRANULOMETRICO

MATERIAL	Arenas cuarzosas		Analista	Roberto	Operario	-
PTAP	EMPSSAPAL		FECHA	20-Nov-22		
Contacto	RONALD QUISPE		PESO	88.3	gramos	
MALLA serie USA	Porcentaje retenido	Peso retenido	Peso retenido acumulado	Peso pasante acumulado	Tamaño de abertura	Porcentaje pasante
Std ASTM E-11-51	%	gramos	gramos	gramos	mm.	%
6	0%	0.0	0.0	88.3	3.360	100.00
8	0%	0.0	0.0	88.3	2.380	100.00
10	0%	0.0	0.0	88.3	2.000	100.00
12	0%	0.0	0.0	88.3	1.680	100.00
14	0%	0.0	0.0	88.3	1.410	100.00
16	0%	0.0	0.0	88.3	1.190	100.00
18	0%	0.0	0.0	88.3	1.000	100.00
20	0%	0.0	0.0	88.3	0.840	100.00
25	0%	0.0	0.0	88.3	0.710	100.00
30	0%	0.0	0.0	88.3	0.590	100.00
35	12%	10.3	10.3	78	0.500	88.34
40	32%	28.0	38.3	50	0.420	56.63
45	35%	31.0	69.3	19	0.350	21.52
50	12%	11.0	80.3	8	0.297	9.06
60	7%	6.0	86.3	2	0.250	2.27
70	2%	2.0	88.3	0	0.210	0.00
80	0%	0.0	88.3	0	0.177	0.00
100	0%	0.0	88.3	0	0.149	0.00
120	0%	0.0	88.3	0	0.125	0.00
140	0%	0.0	88.3	0	0.105	0.00
170	0%	0.0	88.3	0	0.088	0.00
		88.3				

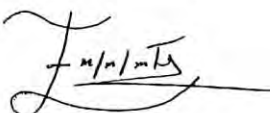
Diámetro efectivo al 10% = D(10) =	0.30	mm
Diámetro efectivo al 60% = D(60) =	0.43	mm
Coefficiente de Uniformidad = C.U. =	D(90) / D(10)	1.43

copia: Archivo Observaciones:	Interpolación	Diámetro	% Acum. Pas	Proporción
		0.50	88.34	
		0.42	56.63	0.16
		0.08	21.52	
	Diferencia			
	D.E. al 60%	0.43		
		Diámetro	% Acum. Pas	Proporción
		0.30	9.06	
		0.25	2.27	1.14
	Diferencia	0.047	6.80	
	D.E. al 10%	0.30		

Nota. Fuente: Informe técnico de resultado de análisis granulométrico registrados por (FILTERMEDIA, 2022), proporcionado por la empresa (EMPSSAPAL, 2026). Aunque el análisis corresponde al año 2022, la arena comenzó a ser utilizada en el proceso de filtración lenta de la planta de tratamiento de agua Tucuirí a partir del 1 de enero de 2024.

Apéndice B:

Solicitud de autorización para el ingreso a la PTAP Tucuri en la EPS. EMPSSAPAL S.A. en el mes de octubre del 2025.

EMPRESA MUNICIPAL PRESTADORA DE SERVICIO DE SANEAMIENTO DE LAS PROVINCIAS ALTO ANDINAS S.A. (EMPSSAPAL S.A.)	
Santo Tomas, 22 de octubre de 2025	
Señora: Bach. Cont. Soledad Batállanos Mendoza Administradora de la EPS.EMPSSAPAL S.A. de la Oficina Zonal Santo Tomas - Chumbivilcas	
Asunto: Solicitud de Autorización para ingreso a la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tucuri	
De mi mayor consideración:	
Yo, ELIZABETH TTITO NUÑEZ , identificado(a) con DNI N.º46418401, Bach de la carrera de Ingeniería Química en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco , me dirijo a usted con el debido respeto para solicitar la autorización de ingreso a la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tucuri con el fin de realizar pruebas en planta y recolectar información en campo en el sistema sedimentador y filtración lenta de la PTAP Tucuri, necesarias para el desarrollo de mi tesis titulada “ MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA FILTRADA EN LA PTAP TUCURI MEDIANTE UN SISTEMA DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN, SANTO TOMAS, CHUMBIVILCAS ”.	
Las actividades en campo se realizarán los días lunes 27/10/2025 al viernes 31/10/2025 en coordinación con el personal responsable, cumpliendo con todas las normas de seguridad y protocolos internos establecidos por la planta.	
Agradezco de antemano su atención y el apoyo brindado a la investigación universitaria. Quedo atenta/o a cualquier requerimiento adicional o documentación que se necesite para formalizar esta solicitud.	
Sin otro particular, me despido cordialmente.	
Atentamente,	
	
ELIZABETH TTITO NUÑEZ DNI N.º 46418401 Teléfono: 984024434 Correo electrónico: elizabethttitonunez@gmail.com	
EMPSSAPAL S.A.	
Fecha: 22 / 10 / 2025	
Derivado a: Gerencia de operaciones	

Apéndice C:

Permiso firmado de la EPS. EMPSSAPAL S.A. en el mes de octubre del 2025.



EMPRESA MUNICIPAL PRESTADORA DE SERVICIO DE SANEAMIENTO DE LAS PROVINCIAS ALTO ANDINAS S.A. (EMPSSAPAL S.A.)

Para: Bach. Ing. ELIZABETH TTITO NUÑEZ

De: QUIM. MARIBEL DELGADO MONTESINOS

JEFE DE DEPARTAMENTO DE PRODUCCION DE LA EPS EMPSSAPAL S.A.

Asunto: Respuesta a solicitud de ingreso a la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tucuri

Fecha: 24/10/2025

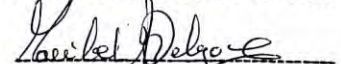
Estimada Elizabeth Ttito Nuñez:

En atención de su solicitud de fecha 22 de octubre del 2025, mediante la cual solicita autorización para el ingreso a la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tucuri, me permito informarle que su petición ha sido aprobada, conforme a las políticas de seguridad y operación establecidas para la planta, accediendo al ingreso a Planta de Tratamiento de agua Potable Tucuri los días lunes 27 de octubre del 2025 al viernes 31 de octubre del 2025, debiendo cumplir con todos los protocolos de seguridad y las indicaciones del personal autorizado.

Sin otro particular, agradezco su atención.

Atentamente

EPS. EMPSSAPAL S.A.


Quim. Maribel Delgado Montesinos
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE PRODUCCION



C.C.

G.O.

Adm. Santo Tomas.

Apéndice D:

Solicitud de autorización para el ingreso a la PTAP Tucuri de la EPS. EMPSSAPAL S.A en el mes de febrero del 2026.

EMPRESA MUNICIPAL PRESTADORA DE SERVICIO DE SANEAMIENTO DE LAS PROVINCIAS ALTO ANDINAS S.A. (EMPSSAPAL S.A.)	
Santo Tomas, 13 de febrero de 2026	
Señora: Ing. Fanny Ccahuana Condori Administradora de la EPS.EMPSSAPAL S.A. de la Oficina Zonal Santo Chumbivilcas	EMPSSAPAL S.A. MESA DE PARTES Fecha: 13.02.2026, Horas: 12:02 p.m. Tomo: 014, Folios: 01  CIPSA
Asunto: Solicitud de Autorización para ingreso a la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tucuri	
De mi mayor consideración:	
Yo, ELIZABETH TTITO NUÑEZ, identificado(a) con DNI N.º46418401, Bach de la carrera de Ingeniería Química en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, me dirijo a usted con el debido respeto para solicitar la autorización de ingreso a la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tucuri con el fin de realizar pruebas de trazabilidad, análisis físico químico, microbiológico del agua y recolectar información en campo en el sistema sedimentador y filtración lenta de la PTAP Tucuri, necesarias para el desarrollo de mi tesis titulada “ MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA FILTRADA EN LA PTAP TUCURI MEDIANTE UN SISTEMA DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN, SANTO TOMAS, CHUMBIVILCAS”. Las actividades en campo se realizarán los días jueves 19/02/2026 al domingo 20/02/2026 en coordinación con el personal responsable, cumpliendo con todas las normas de seguridad y protocolos internos establecidos por la planta. Agradezco de antemano su atención y el apoyo brindado a la investigación universitaria. Quedo atenta/o a cualquier requerimiento adicional o documentación que se necesite para formalizar esta solicitud. Sin otro particular, me despido cordialmente. Atentamente,  ELIZABETH TTITO NUÑEZ DNI N.º 46418401 Teléfono: 984024434 Correo electrónico: elizabethttitonunez@gmail.com EMPSSAPAL S.A. Fecha: 13 / 02 / 2026 Derivado a: Gerencia de Producción	

Apéndice E:

Permiso firmado de la EPS. EMPSSAPAL S.A. en el mes de febrero del 2026.



EMPRESA MUNICIPAL PRESTADORA DE SERVICIO DE SANEAMIENTO DE LAS PROVINCIAS ALTO ANDINAS S.A. (EMPSSAPAL S.A.)

Para: Bach. Ing. ELIZABETH TTITO NUÑEZ

De: QUIM. MARIBEL DELGADO MONTESINOS

JEFE DE DEPARTAMENTO DE PRODUCCION DE LA EPS EMPSSAPAL S.A.

**Asunto: Respuesta a solicitud de ingreso a la Planta de Tratamiento de Agua Potable
Tucui**

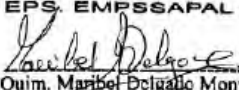
Fecha: 16/02/2026

Estimada Elizabeth Ttito Nuñez:

En atención de su solicitud de fecha 13 de febrero del 2026, mediante la cual solicita autorización para el ingreso a la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tucui, me permito informarle que su petición ha sido aprobada, conforme a las políticas de seguridad y operación establecidas para la planta, accediendo al ingreso a Planta de Tratamiento de agua Potable Tucui los días jueves 19 de febrero del 2026 al viernes 20 de febrero del 2026, debiendo cumplir con todos los protocolos de seguridad y las indicaciones del personal autorizado.

Sin otro particular, agradezco su atención.

Atentamente

EPS. EMPSSAPAL S.A.

Quim. Maribel Delgado Montesinos
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE PRODUCCION



C.C.

G.O.

Adm. Santo Tomas.

Apéndice F:

Evidencia fotográfica del ensayo de trazabilidad en el sistema de sedimentación y filtración lenta de la PTAP Tucui.

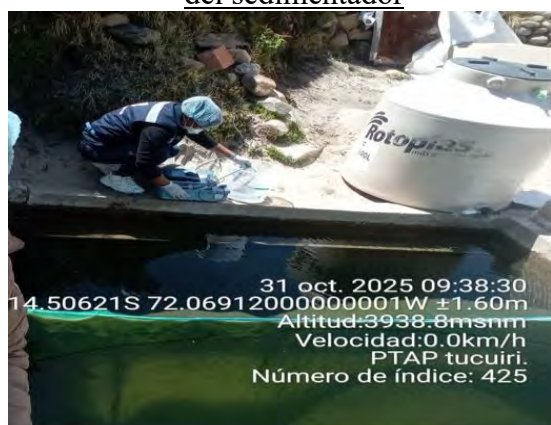
Sustancia trazadora NaCl



Preparación de la solución trazadora



Medicion de la conductividad en la salida del sedimentador



Inyeccion del trazador en el ingreso del filtro lento de la PTAP Tucui



Monitoreo de la conductividad a la salida del filtro lento



Medicion de la conductividad en la salida del sedimentador



Apéndice G:

Evidencia fotográfica de la toma de muestra de agua en la temporada de estiaje y lluvia.

Toma de muestras de agua a ingreso de sedimentador 28/10/2025



Toma de muestras de agua a ingreso de filtro lento 28/10/2025



Toma de muestra de agua a salida del filtro lento 28/10/2025



Toma de muestras de agua a ingreso de sedimentador 19/02/2026



Toma de muestras de agua a ingreso de filtro lento 19/02/2026



Toma de muestra de agua a salida del filtro lento 19/02/2026



Apéndice H:

Resultados del análisis microbiológico al ingreso del sedimentador de la PTAP Tucuiri (28/10/2025).

LABORATORIO LOUIS PASTEUR		LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACION INACAL-DA CON REGISTRO N° LE-042	INACAL DA - Perú Laboratorio de Ensayos Acreditado Registro N° LE - 042
INFORME DE ENSAYO LLP-4914-2025 SO-1294-2025			
Pág. 1 de 1			
INFORMACIÓN DEL CLIENTE Solicitante: ELIZABETH TITO NUÑEZ. Dirección legal: Licenciados Miscahuara Salvador.			
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA Nombre del producto: Agua superficial. Matriz microbiológica: Agua superficial. Fecha de recepción de la muestra: 2025/10/28 Nro. de cotización: 151 - 10 - 2025			
INFORMACIÓN DE LA MUESTRA (Datos declarados por el cliente): Muestreo realizado por: Elizabeth Tito Nuñez. Muestreo realizado según el instructivo: LLP-MP14-I01: Instructivo de muestreo-Preservación de Muestras de alimentos, Aguas y Superficies Laboratorio Microbiológico. Fecha de muestreo: 2025/10/28 Hora de muestreo: 08:17 Procedencia de la muestra: Ingreso de sedimentador Tucuiri - Planta de Tratamiento Tucuiri (PTAP Tucuiri) - Sector Hanansaya Oropoma - Distrito de Santo Tomas - Provincia de Chumbivilcas - Departamento de Cusco. Cantidad y descripción de la muestra: 01 frasco de polietileno estéril de 250 ml - Muestra transportada en cadena de frío. Cadena de custodia LLP-MP14-F04 de fecha: 2025/10/28 Proyecto: "Mejoramiento de la calidad de agua filtrada en la PTAP Tucuiri mediante un sistema de Coagulación y floculación, Santo Tomas Chumbivilcas."			
REPORTE DE RESULTADOS Lugar de ensayo: Laboratorio de microbiología. Fecha de ejecución de ensayo: 2025/10/28 Fecha de finalización de ensayo: 2025/11/01 Fecha de emisión de Informe de ensayo: 2025/11/03			
<u>Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió, de acuerdo a los datos declarados por el cliente.</u>			
RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS			
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)	
Coliformes Totales (NMP)	NMP/100mL	35x10 ²	
Coliformes Fecales (NMP)	NMP/100mL	<1,8	
Recuento de Bacterias Heterótrofas	ufc/ml	22x10	
Métodos de Referencia: Coliformes Totales (NMP) SMEVW-APHA-AWWA-WEF, Part. 9221 B, 24th Ed (2023) Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Standard Total Coliform Fermentation Technique. Coliformes Fecales (NMP) SMEVW-APHA-AWWA-WEF, Part. 9221 E-1, 24th Ed (2023) Multiple Tube fermentation technique for Members of the Coliform Group. Fecal Coliform Procedure. Thermotolerant Coliform Test (EC Medium). Recuento de Bacterias Heterótrofas SMEVW-APHA-AWWA-WEF, Part. 9215 B, 24th Ed (2023) Heterotrophic Plate Count. Pour Plate Procedure.			

Apéndice I:

Resultados del análisis microbiológico al ingreso del filtro lento de la PTAP Tucuiiri
(28/10/2025)

Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda. Urb. Velasco Astete D-18-B Wánchaq – Cusco – Peru Teléfono: 084-771906 Celular: 975713500 – 974787151 laboratoriolouispasteur@yahoo.es www.lablouispasteur.pe	INFORME DE ENSAYO LLP-4915-2025 SO-1294-2025	 LABORATORIO LOUIS PASTEUR
INFORMACIÓN DEL CLIENTE Solicitante: ELIZABETH TITO NUÑEZ. Dirección legal: Licenciados Mischahuara Salvador.		Pág. 1 de 1
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA Nombre del producto: Agua tratada. Fecha de recepción de la muestra: 2025/10/28 Nro. de cotización: 151 – 10 - 2025		
INFORMACIÓN DE LA MUESTRA (Datos declarados por el cliente): Muestreo realizado por: Elizabeth Tito Nuñez. Fecha de muestreo: 2025/10/28 Hora de muestreo: 06:21 Procedencia de la muestra: Ingreso a filtro lento Tucuiiri - Planta de Tratamiento Tucuiiri (PTAP Tucuiiri) - Sector Hanansaya Orocoma - Distrito de Santo Tomas – Provincia de Chumbivilcas – Departamento de Cusco. Cantidad y descripción de la muestra: 01 frasco de polietileno estéril de 250 ml - Muestra transportada en cadena de frío. Cadena de custodia LLP-MP14-F04 de fecha: 2025/10/28 Proyecto: "Mejoramiento de la calidad de agua filtrada en la PTAP Tucuiiri mediante un sistema de Coagulación y floculación, Santo Tomas Chumbivilcas."		
REPORTE DE RESULTADOS Lugar de ensayo: Laboratorio de microbiología. Fecha de ejecución de ensayo: 2025/10/28 Fecha de finalización de ensayo: 2025/11/01 Fecha de emisión de Informe de ensayo: 2025/11/03		
Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió, de acuerdo a los datos declarados por el cliente.		
RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Totales (NMP)	NMP/100mL	11x10
Coliformes Fecales (NMP)	NMP/100mL	<1,8
Recuento de Bacterias Heterótrofas estimado	ufc/ml	26
Métodos de Referencia: Coliformes Totales (NMP) SMEWW-APHA-AWWA-WEF, Part. 9221 B, 24th Ed (2023) Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Standard Total Coliform Fermentation Technique. Coliformes Fecales (NMP) SMEWW-APHA-AWWA-WEF, Part. 9221 E-1, 24th Ed (2023) Multiple Tube fermentation technique for Members of the Coliform Group. Fecal Coliform Procedure. Thermotolerant Coliform Test (EC Medium). Recuento de Bacterias Heterótrofas SMEWW-APHA-AWWA-WEF, Part. 9215 B, 24th Ed (2023) Heterotrophic Plate Count. Pour Plate Procedure.		

Apéndice J:

Resultados del análisis microbiológico a la salida de filtro lento de la PTAP Tucuri (20/10/2025).

Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda. Urb. Velasco Astete D-18-B Wánchaq – Cusco – Peru Teléfono: 084-771906 Celular: 975713500 – 974787151 laboratoriolouispasteur@yahoo.es www.lablouispasteur.pe	 LABORATORIO LOUIS PASTEUR													
INFORME DE ENSAYO LLP-4916-2025 SO-1294-2025														
Pág. 1 de 1														
INFORMACIÓN DEL CLIENTE Solicitante: ELIZABETH TTITO NUÑEZ. Dirección legal: Licenciados Mischahuara Salvador.														
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA Nombre del producto: Agua tratada. Fecha de recepción de la muestra: 2025/10/28 Nro. de cotización: 151 – 10 - 2025														
INFORMACIÓN DE LA MUESTRA (Datos declarados por el cliente): Muestreo realizado por: Elizabeth Tito Nuñez. Fecha de muestreo: 2025/10/28 Hora de muestreo: 08:30 Procedencia de la muestra: Salida de filtro lento Tucuri - Planta de Tratamiento Tucuri (PTAP Tucuri) - Sector Hanansaya Orcocoma - Distrito de Santo Tomas – Provincia de Chumbivilcas – Departamento de Cusco. Cantidad y descripción de la muestra: 01 frasco de polietileno estéril de 250 ml - Muestra transportada en cadena de frío. Cadena de custodia LLP-MP14-F04 de fecha: 2025/10/28 Proyecto: "Mejoramiento de la calidad de agua filtrada en la PTAP Tucuri mediante un sistema de Coagulación y floculación, Santo Tomas Chumbivilcas."														
REPORTE DE RESULTADOS Lugar de ensayo: Laboratorio de microbiología. Fecha de ejecución de ensayo: 2025/10/28 Fecha de finalización de ensayo: 2025/11/01 Fecha de emisión de Informe de ensayo: 2025/11/03														
<u>Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió, de acuerdo a los datos declarados por el cliente.</u>														
RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS														
<table border="1"><thead><tr><th>Ensayo(s)</th><th>Unidad</th><th>Resultado(s)</th></tr></thead><tbody><tr><td>Coliformes Totales (NMP)</td><td>NMP/100mL</td><td>4,5</td></tr><tr><td>Coliformes Fecales (NMP)</td><td>NMP/100mL</td><td><1,8</td></tr><tr><td>Recuento de Bacterias Heterótrofas estimado</td><td>ufo/ml</td><td>21</td></tr></tbody></table>	Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)	Coliformes Totales (NMP)	NMP/100mL	4,5	Coliformes Fecales (NMP)	NMP/100mL	<1,8	Recuento de Bacterias Heterótrofas estimado	ufo/ml	21		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)												
Coliformes Totales (NMP)	NMP/100mL	4,5												
Coliformes Fecales (NMP)	NMP/100mL	<1,8												
Recuento de Bacterias Heterótrofas estimado	ufo/ml	21												
Métodos de Referencia: Coliformes Totales (NMP): SMEWW/APHA-AWWA-WEP, Part. 9221 B, 24th Ed (2023) Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Standard Total Coliform Fermentation Technique.														

Apéndice K:

Resultados de los análisis fisicoquímicos en los tres puntos de muestreo (20/10/2025).

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE TUCURI														
PTAP TUCURI	AGUA QUE INGRESA AL SEDIMENTADOR					AGUA QUE INGRESA AL FILTRO LENTO					AGUA QUE SALE DESPUES DEL FILTRO			
FECHA	HORA	TURBIEDAD	COLOR	PH	CONDUCTIVIDAD	HORA	TURBIEDAD	COLOR	PH	CONDUCTIVIDAD	HORA	TURBIEDAD	COLOR	CONDUCTIVIDAD
28/10/2025	10.01	0.65		8.62	78.5	10.15	0.84		8.56	78.7	10.25	0.62		8.04 75.2
30/10/2025	9.15	3.80		8.64	77.5									
31/10/2025	9.13	0.64		8.26	78.5	9.18	1.24		8.28	77.1	9.22	0.88		7.89 79.2

Elizabeth Tito Nuñez

ELIZABETH TITO NUÑEZ
4641801



COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERU
CONSEJO DEPARTAMENTAL CUSCO
Fanny Ccahuana Condori
Ing. Fanny Ccahuana Condori
INGENIERA AGROPECUARIA
CIP 346324

RESPONSABLE DE CONTROL Y CALIDAD
DNI: 46968052



Apéndice L:

Resultados del análisis microbiológico al ingreso del sedimentador de la PTAP Tucuri (19/02/2026).



microlab
LABORATORIO MICROBIOLÓGICO
Telf.: 229773 - RPC. 969 772139
LABORATORIO CATEGORIZADO POR EL MINSA RESOLUCION Nº 0555-2015-DRSC

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DE AGUAS

DATOS:	
PROYECTO	"MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE AGUA FILTRADA EN LA PTAP TUCURI MEDIANTE UN SISTEMA DE CUAGULACION-FLOCULACION, SANTO TOMAS, CHUMBIVILCAS"
Solicita	ANÁLISIS BACTERIOLOGICO
Número de muestra	M1
Comunidad	ORCCOMA
Sector	HANANSAYA ORCCOMA
Distrito	SANTO TOMAS
Provincia	CHUMBIVILCAS
Departamento	CUSCO
Fuente	INGRESO A SEDIMENTADOR DE LA PTAP TUCURI
Fecha de toma de muestra	19 de febrero del 2026
Hora de toma de muestra	16:40 PM

EXAMEN BACTERIOLÓGICO	UNIDADES	RESULTADOS
COLIFORMES TOTALES	NMP/100 ml	150 NMP/100ml
COLIFORMES TERMOTOLERANTES	NMP/100 ml	93 NMP/100ml
BACTERIAS HETERÓTROFAS	UFC/ml	12X10 ² UFC/ml

Conclusión	La muestra de agua, puede ser utilizada para fines de CONSUMO HUMANO, previo tratamiento convencional.
-------------------	--

TABLA DE VALORES NORMALES (ESTANDARES DE CALIDAD AMBIENTAL PARA AGUA-D.S. Nº 004-2017-MINAM)

PARAMETROS en NMP/100 ML	A1	A2	A3
COLIFORMES TOTALES	Hasta 50	No aplica	No aplica
COLIFORMES TERMOTOLERANTES	Hasta 20	Hasta 2000	Hasta 20 000

A1: aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección (cloración).
A2: aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional.
A3: aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado.

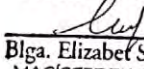
MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO: Los establecidos para cada ensayo.

NOTA:

- Se prohíbe la reproducción parcial o total del presente documento sin la autorización del Laboratorio.
- Los resultados son válidos únicamente para la muestra analizada.
- La toma de muestra no fue realizada por el laboratorio Microlab.

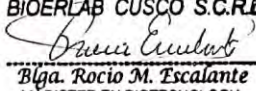
26/02/26

BIOERLAB CUSCO S.C.R.L.



Blga. Elizabeth Samanez Gibaja
MAGISTER EN BIOTECNOLOGIA

BIOERLAB CUSCO S.C.R.L.



Blga. Rocio M. Escalante
MAGISTER EN BIOTECNOLOGIA

Urb. Mariscal Gamarra 1-D (1ra Etapa)
Atención: Lunes a Sábado de 7 a.m. a 8 p.m.
(Horario Corrido)

"Calidad y Rapidez a su Servicio"

Apéndice M:

Resultados del análisis microbiológico al ingreso al filtro de la PTAP Tucuri (19/02/2026).



microlab

LABORATORIO MICROBIOLÓGICO
Telf.: 229773 - RPC. 969 772139

LABORATORIO CATEGORIZADO POR EL MINSA RESOLUCION N° 0555-2015-DRSC

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DE AGUAS

DATOS:	
PROYECTO	"MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE AGUA FILTRADA EN LA PTAP TUCURI MEDIANTE UN SISTEMA DE CUAGULACION-FLOCULACION, SANTO TOMAS, CHUMBIVILCAS"
Solicita	ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO
Número de muestra	M2
Comunidad	ORCCOMA
Sector	HANASAYA ORCCOMA
Distrito	SANTO TOMAS
Provincia	CHUMBIVILCAS
Departamento	CUSCO
Fuente	INGRESO A FILTRO LENTO DE LA PTAP TUCURI
Fecha de toma de muestra	19 de febrero del 2026
Hora de toma de muestra	16:40 PM

EXAMEN BACTERIOLÓGICO	UNIDADES	RESULTADOS
COLIFORMES TOTALES	NMP/100 ml	93 NMP/100ml
COLIFORMES TERMOTOLERANTES	NMP/100 ml	75 NMP/100ml
BACTERIAS HETERÓTROFAS	UFC/ml	9X10 ² UFC/ml

Conclusión	La muestra de agua, puede ser utilizada para fines de CONSUMO HUMANO, previo tratamiento convencional.
------------	--

TABLA DE VALORES NORMALES (ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL PARA AGUA-D.S. N° 004-2017-MINAM)

PARAMETROS en NMP/100 ml	A1	A2	A3
COLIFORMES TOTALES	Hasta 50	No aplica	No aplica
COLIFORMES TERMOTOLERANTES	Hasta 20	Hasta 2000	Hasta 20 000

A1: aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección (cloración).

A2: aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional.

A3: aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado.

MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO: Los establecidos para cada ensayo.

NOTA:

- Se prohíbe la reproducción parcial o total del presente documento sin la autorización del Laboratorio.
- Los resultados son válidos únicamente para la muestra analizada.
- La toma de muestra no fue realizada por el laboratorio MicroLab.

26/02/26

BIOERLAB CUSCO S.C.R.L.

Blga. Elizabeth Samanez Gibaja
MAGISTER EN BIOTECNOLOGÍA

BIOERLAB CUSCO S.C.R.L.

Blga. Rocío M. Escalante
MAGISTER EN BIOTECNOLOGÍA

Apéndice N:

Resultados del análisis microbiológico a salida del filtro lento de la PTAP Tucuri (19/02/2026).





LABORATORIO MICROBIOLÓGICO
Telf.: 229773 - RPC. 969 772139
LABORATORIO CATEGORIZADO POR EL MINSA RESOLUCION N° 0555-2015-DRSC

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DE AGUAS

DATOS:	
PROYECTO	"MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE AGUA FILTRADA EN LA PTAP TUCURI MEDIANTE UN SISTEMA DE CUAGULACION-FLOCULACION, SANTO TOMAS, CHUMBIVILCAS"
<i>Solicita</i>	ANÁLISIS BACTERIOLOGICO
<i>Número de muestra</i>	M3
<i>Comunidad</i>	ORCCOMA
<i>Sector</i>	HANASAYA ORCCOMA
<i>Distrito</i>	SANTO TOMAS
<i>Provincia</i>	CHUMBIVILCAS
<i>Departamento</i>	CUSCO
<i>Fuente</i>	SALIDA DE FILTRO LENTO DE LA PTAP TUCURI
<i>Fecha de toma de muestra</i>	19 de febrero del 2026
<i>Hora de toma de muestra</i>	16:40 PM

EXAMEN BACTERIOLÓGICO	UNIDADES	RESULTADOS
COLIFORMES TOTALES	NMP/100 ml	28 NMP/100ml
COLIFORMES TERMOTOLERANTES	NMP/100 ml	23NMP/100ml
BACTERIAS HETERÓTROFAS	UFC/ml	4X10 ² UFC/ml

Conclusión	La muestra de agua, puede ser utilizada para fines de CONSUMO HUMANO, previo tratamiento convencional.
-------------------	--

TABLA DE VALORES NORMALES (ESTANDARES DE CALIDAD AMBIENTAL PARA AGUA-D.S. N° 004-2017-MINAM)

PARAMETROS en NMP/100 MI	A1	A2	A3
COLIFORMES TOTALES	Hasta 50	No aplica	No aplica
COLIFORMES TERMOTOLERANTES	Hasta 20	Hasta 2000	Hasta 20 000

A1: aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección (cloración).
A2: aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional.
A3: aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado.

MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO: Los establecidos para cada ensayo.

NOTA:

- Se prohíbe la reproducción parcial o total del presente documento sin la autorización del Laboratorio.
- Los resultados son válidos únicamente para la muestra analizada.
- La toma de muestra no fue realizada por el laboratorio MicroLab.

26/02/26

BIOERLAB CUSCO S.C.R.L.

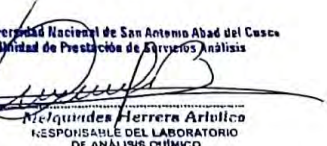
Elizabet Samanez Gibaja
Blga. Elizabet Samanez Gibaja
MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA

BIOERLAB CUSCO S.C.R.L.

Rocio M. Escalante
Blga. Rocio M. Escalante
MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA

Apéndice O:

Resultados de los análisis fisicoquímicos en los tres puntos de muestreo (20/02/2026).

		UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE CIENCIAS Av. de la Cultura 733 - 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	
		Nº0037-26-LAQ	
SOLICITANTE	: ELIZABETH TTITO NUÑEZ		
PROYECTO	: "MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA FILTRADA EN LA PTAP TUCUIRI MEDIANTE UN SISTEMA DE COAGULACION-FLOCULACION SANTO TOMAS CHUMBIVILCAS".		
MUESTRA	: AGUA 1.- AGUA INGRESO A SEDIMENTADOR SUPERFICIAL TUCUIRI, 16:40 Hrs 2.- AGUA INGRESO A FILTRO LENTO TUCUIRI, 16:45 Hrs 3.- AGUA SALIDA DE FILTRO LENTO TUCUIRI, 16:48 Hrs.		
DISTRITO	: SANTO TOMAS		
PROVINCIA	: CHUMBIVILCAS		
REGION	: CUSCO		
FECHA	: C/20/02/2026		
ANÁLISIS FISICOQUÍMICO:			
	1	2	3
pH	6,95	6,88	6,86
C.E. uS/cm	57,80	55,20	62,80
Turbiedad NTU	139,50	133,50	60,77
Métodos: NTP 339.088, NTP 214.003, NTP 214.006.			
Cusco, 23 de Febrero 2026			
		  Melquides Herrera Arbolico RESPONSABLE DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO	

Nota. Las muestras fueron tomadas el 19/02/2026 y analizadas el 20/02/2026

ANEXOS

Anexo A:

Estándares de calidad ambiental (ECA) para el agua.

categoria 1: Poblacional y recreacional		
Subcategoría A: Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable		
Parámetros	Unidad de medida	A2: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional
Físicos –Químicos		
Color	color verdadero escala Pt/Co	100
Conductividad	($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1 600
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	5.5 – 9.0
Turbiedad	UNT	100
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	5
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	20
Nitratos (NO ₃ ⁻) (c)	mg/L	50
Nitritos (NO ₂ ⁻) (d)	mg/L	3
Amoníaco- N	mg/L	1.5
MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICOS		
Coliformes Totales	NMP/100 ml	**
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	2000

Nota. Fuente: Adaptado del (Estándares de Calidad Ambiental (ECA), 2017)

El símbolo ** dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para esta Subcategoría.

Anexo B:

Límites máximos permisibles de parametros de calidad organoléptica 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 ₄ /L	250
Dureza total	mg CaCO ₃ /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. Fuente: Adaptado del (Dirección General de Salud Ambiental, 2011).

Anexo C:

Límites máximos permisibles de parametros microbiológicos y parasitológicos.

Parámetros	Unidad de medida	Límite máximo permisible
Bacterias coliformes Totales	UFC/100 mL a 35°C	0 (*)
E. Coli	UFC/100 mL a 44,5°C	0 (*)
Bacterias Coliformes Termotolerantes o Fecales.	UFC/100 mL a 44,5°C	0 (*)
Bacterias Heterotróficas	UFC/mL a 35°C	500
Huevos y larvas de Helmintos, quistes y ooquistes patógenos.	Nº org/L	0
Virus	UFC / mL	0
Organismos de vida libre, como algas, protozoarios, copépodos, rotíferos, nemátodos en todos sus estadios evolutivos	Nº org/L	0

Nota. Fuente: Adaptado del (Dirección General de Salud Ambiental, 2011)

UFC = unidad formadora de colonias

(*) : En caso de analizar or la tecnica del NMP por tubos multiles = < 1.8/ 100 ml.