

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA HIDRAULICA



TESIS

**“EFICIENCIA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA
CRUDA PARA LA CIUDAD DE SAN MARCOS, 2017”**

Para optar el título profesional de:

INGENIERO HIDRÁULICO

Presentado por el Bachiller:

ISPILCO ROJAS PALERMO ALCIDES

Asesorado por:

Dr. Ing. GASPAR VIRILO MÉNDEZ CRUZ

CAJAMARCA-PERU

2018

AGRADECIMEINTO

Agradezco a Dios por este logro, por ser el autor de mis días, el ser supremo que ha estado conmigo en todo momento y guiarme por el sendero correcto.

A mi familia por ser los cimientos de mi desarrollo, todos y cada uno de ustedes han destinado tiempo para enseñarme nuevas cosas, para brindarme aportes invaluable que servirán para toda mi vida.

A las personas que laboran dentro de la Planta de Tratamiento de agua potable de la ciudad de San Marcos, por brindarme la información necesaria, sobre todo la ayuda para realizar este trabajo.

A mi tutor de tesis Dr. Ing. Gaspar V. Méndez Cruz, por guiarme en todo este proceso dedicándome su valioso tiempo para asesorarme en este proyecto.

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado en primer lugar a Dios, por ser el dueño de mi vida, por darme la sabiduría necesaria, y guiarme en todo momento para poder alcanzar la meta establecida.

La presente tesis se lo dedico a mi familia que gracias a sus consejos y palabras de aliento crecí como profesional. A mi padre Lorenzo Ispilco Castrejón y a mi madre María Rojas Chilón, gracias por ayudarme a cumplir mis objetivos como persona y estudiante, gracias por los recursos brindados y estar a mi lado apoyándome y aconsejándome siempre. A mis hermanos por brindarme su apoyo incondicional.

A todas aquellas amistades y personas que siempre estuvieron ahí regalándome un poco de su valioso tiempo y apoyándome en todo momento.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTO.....	I
DEDICATORIA.....	II
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
CAPITULO I. INTRODUCCION.....	1
1.1. PROBLEMA.....	2
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3. ALCANCES.....	3
1.4. LIMITACIONES.....	4
1.5. OBJETIVOS.....	4
1.5.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	4
CAPITULO II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	5
2.2. BASES TEÓRICAS.....	6
2.2.1. AGUA CRUDA.....	6
2.2.2. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA CRUDA.....	8
2.2.3. TIPOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO.....	8
2.2.4. PROCESOS DE LA PTAP CONVENCIONAL.....	9
2.2.5. PRINCIPALES INDICADORES DE CALIDAD DE AGUA.....	24

2.2.6. REPRESENTACION DE FLUJOS EN REACTORES MEDIANTE MODELOS MATEMATICOS	33
2.3. TERMINOS BASICOS	52
CAPITULO III. MATERIAL Y METODOS	55
3.1. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO	55
3.2. MATERIALES Y EQUIPOS	56
3.3. METODOLOGIA	57
3.3.1. CALCULO DEL CAUDAL DE ENTRADA A LA PTAP	57
3.3.2. LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO Y DESCRIPCION DE LA PTAP ..	59
3.3.3. ZONAS DE MUESTREO	64
3.3.4. ANALISIS FISICOQUIMICO DEL AFLUENTE Y EFLUENTE	64
3.3.5. TIEMPO DE RETENCION REAL CON CLORURO DE SODIO (NaCl)...	65
CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	66
CAPITULO V. CONCLUSIONES.....	86
CAPITULO VI. RECOMENDACIONES.....	87
CAPITULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	88
CAPITULO VIII. ANEXOS	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Límites de calidad de agua para plantas de filtración directa	9
Tabla 2: Dimensiones de los aforadores parshall.....	12
Tabla 3: Relación del peso específico y la viscosidad del agua $\sqrt{(\gamma/\mu)}$ para diferentes temperaturas.....	13
Tabla 4: Variación del gradiente de velocidad de acuerdo con el tipo de mezclador	14
Tabla 5: Tipo de Sedimentadores según su forma	18
Tabla 6: Límites de calidad de agua para tratamiento mediante filtración rápida	20
Tabla 7: Límites permisibles para lechos filtrantes	21
Tabla 8: Grado de eficiencia de la filtración y sedimentación	22
Tabla 9: Parámetros que garantizan la eficiencia de la desinfección	24
Tabla 10: Registro de tiempos de desplazamiento del icopor para una longitud de 4m.	57
Tabla 11: Registro de los tirantes en el canal rectangular	58
Tabla 12: Datos obtenidos de la prueba con trazadores para determinar el caudal	59
Tabla 13: Procesamiento de datos para calcular el caudal utilizando NaCl.....	66
Tabla 14: Características del pre-sedimentador y del afluente.....	70
Tabla 15: Prueba de trazadores en el pre-sedimentador	71
Tabla 16: Valores obtenidos de la figura (19).	72
Tabla 17: Análisis de flujo para el pre-sedimentador.....	72
Tabla 18: Valores obtenidos de la figura (20).	73
Tabla 19: Parámetros hidráulicos del floculador.....	74
Tabla 20: Perdidas de carga en el floculador.....	74
Tabla 21: Gradiente de velocidad en el floculador.....	74
Tabla 22: Características del floculador y del afluente	74
Tabla 23: Prueba de trazadores en el floculador.....	75
Tabla 24: Valores obtenidos de la figura (21)	76
Tabla 25: Análisis de flujo para el floculador	76
Tabla 26: Valores obtenidos de la figura (22)	77
Tabla 27: Características del sedimentador	78
Tabla 28: Prueba de trazador en el sedimentador.....	78
Tabla 29: Valores obtenidos de la figura (23)	79

Tabla 30: Análisis de flujo para el sedimentador	80
Tabla 31: Valores obtenidos de la figura (24)	80
Tabla 32: Concentración de cloro residual a la salida del reservorio	81
Tabla 33: Resultados de la dosis optima de coagulante con la prueba de jarras	82
Tabla 34: Resultados del pH optimo	83
Tabla 35: Promedio del análisis fisicoquímico de las muestras	84
Tabla 36: Comparación de los resultados del análisis fisicoquímico promedio M5 con el Reglamento de calidad del agua para consumo humano.	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Geometría del canal parshall	11
Figura 2: Reactor de flujo mezclado	35
Figura 3: Variación de la concentración vs tiempo de retención	37
Figura 4: Reactores en serie	38
Figura 5: Curva de 1-F(t) cantidad de trazador que permanece en el reactor.	41
Figura 6: Concentración del trazador en el efluente de un reactor	43
Figura 7: Índice de Morrill.....	45
Figura 8: Ubicación política de la zona de estudio	55
Figura 9: Cámara de entrada	60
Figura 10: Canal parshall	61
Figura 11: Depósito para preparar la solución de coagulante	61
Figura 12: Pre-sedimentador	62
Figura 13: Detalle geométrico del floculador horizontal	62
Figura 14: Perfil del sedimentador	63
Figura 15: Filtro lento	63
Figura 16: Sistema de cloración	64
Figura 17: Variación de la conductividad con respecto al tiempo para la determinación del caudal.....	67
Figura 18: Geometría del canal parshall	68
Figura 19: Incremento de la conductividad con respecto al tiempo en el pre-sedimentador	72
Figura 20: Análisis de tendencia para el pre-sedimentador	73
Figura 21: Incremento de la conductividad con respecto al tiempo en el floculador.....	76
Figura 22: Análisis de tendencia para el floculador.....	77
Figura 23: Incremento de la conductividad con respecto al tiempo en el sedimentador	79
Figura 24: Análisis de tendencia para el sedimentador.....	80
Figura 25: Test colorimétrico para medir cloro residual con pastillas DPD.....	81
Figura 26: Modelo matemático para la determinación de la dosis optima de coagulante a añadir	83

RESUMEN

El presente trabajo se realizó en la planta de tratamiento de agua cruda, ubicado en el departamento de Cajamarca provincia de San Marcos y distrito Pedro Gálvez a una altitud de 2358 m.s.n.m, que distribuye el agua tratada a la ciudad de San Marcos. Tiene como finalidad estimar las eficiencias de las estructuras que involucran el tratamiento químico (mezclador hidráulico, pre-sedimentador, floculador, sedimentador y filtro lento) mediante un análisis fisicoquímico de las muestras obtenidas a la entrada y salida de las estructuras que conforman la planta de tratamiento de agua cruda. Adicional a ello se utilizó la metodología de modelos matemáticos propuesto por David Wolf y William Resnick para el análisis del tipo de flujo presentes en las estructuras en estudio. La eficiencia en función a la remoción de turbiedad para el pre-sedimentador, floculador, sedimentador y filtro lento fueron 45.20%, 26.99%, 44.58% y 95.59% respectivamente. El tiempo de retención teórico para pre-sedimentador, floculador y sedimentador fue 24.5 min, 19.26 min y 80.75 min respectivamente y el tiempo de retención real fue 26 min, 48 min y 68 min respectivamente. Mediante el modelo matemático propuesto por Wolf y Resnick se obtuvo los siguientes tipos de flujo en el pre-sedimentador un flujo pistón 66.40%, flujo mezclado 33.60 % y 15.70% zonas muertas; el floculador presentó flujo pistón 89.40%, flujo mezclado 10.60 % y 0% zonas muertas, el sedimentador cuenta con un flujo pistón 69.0%, flujo mezclado 31.0 % y 12.0% zonas muertas.

PALABRAS CLAVE: Eficiencia, gradiente de velocidad, tiempo de retención, flujo pistón, flujo mezclado.

ABSTRACT

The present work was carried out in the raw water treatment plant, located in the department of Cajamarca, province of San Marcos and Pedro Gálvez district, at an altitude of 2358 m.s.n.m. Which distributes the treated water to the city of San Marcos. Its purpose is to estimate the efficiencies of the structures that involve the chemical treatment (hydraulic mixer, pre-settler, flocculator, settler and slow filter) by a physicochemical analysis of the samples obtained at the entrance and exit of the structures that make up the plant. raw water treatment. In addition, the methodology of mathematical models proposed by David Wolf and William Resnick was used to analyze the type of flow present in the structures under study. The efficiency in terms of the removal of turbidity for the pre-settler, flocculator, settler and slow filter were 45.20%, 26.99%, 44.58% and 95.59% respectively. The theoretical retention time for pre-settler, flocculator and settler was 24.5 min, 19.26 min and 80.75 min respectively and the actual retention time was 26 min, 48 min and 68 min respectively. Using the mathematical model proposed by Wolf and Resnick, the following flow types were obtained in the pre-settler: a 66.40% piston flow, mixed flow 33.60% and 15.70% dead zones; the flocculator presented 89.40% piston flow, 10.60% mixed flow and 0% dead zones, the sedimentator has a 69.0% piston flow, mixed flow 31.0% and 12.0% dead zones.

KEY WORDS: Efficiency, speed gradient, retention time, piston flow, mixed flow

CAPITULO I. INTRODUCCION

La calidad del agua cruda oscila grandemente de una fuente a otra; por ello, el tipo de tratamiento requerido para producir agua potable también varía. Dependiendo de la calidad del agua cruda, el grado de complejidad del tratamiento es diferente. El diseño de una planta de tratamiento eficiente y económico requiere de un estudio de ingeniería cuidadoso basado en la calidad de la fuente y en la selección apropiada de los procesos y operaciones de tratamiento más adecuado y económico para producir agua de la calidad requerida (ROMERO, JA. 1999).

La coagulación-floculación del agua constituye el proceso básico que determina en gran parte las condiciones de operación de la planta de tratamiento. De aquella depende casi por completo la mayor o menor eficiencia del proceso subsiguiente: el de la separación de sólidos por sedimentación y filtración. La remoción de turbiedad en los sedimentadores y en los filtros, así como la calidad del agua que se obtenga en ellos, se relacionan directamente con la manera como las partículas se han desestabilizadas y con la intensidad de las fuerzas que las aglutinan. Por tanto, el cuidadoso control del proceso de coagulación-floculación, debe constituir una de las principales preocupaciones en la operación de plantas de tratamiento (ARBOLEDA, J. 2000).

El estudio de la calidad del agua se funda en la eficiencia de cada una de las estructuras que conforman el proceso de tratamiento, si uno de estos no trabaja eficientemente, entonces la calidad del agua entregada a la población será baja. Por otro lado, también tenemos que estudiar las características físico-químicas de la fuente ya sea subterránea, superficial o de precipitación pluvial. Para verificar si el agua es o no apta para el consumo humano, debe satisfacer determinados requisitos de potabilidad, denominadas normas de calidad del agua, esto en virtud de que en la actualidad ya no es tan fácil disponer de una fuente de aprovechamiento de agua, apropiada para dotar a una población de dicho líquido potable, pues en los últimos años debido al crecimiento de las ciudades, de las industrias, etc. las cuales vierten sus aguas residuales sin tratamiento a las corrientes naturales, tales como ríos, lagos y lagunas las han llevado a contaminar en gran medida que ya no es posible su aprovechamiento. La preocupación más inminente siempre ha sido por la cantidad del agua, y no por su calidad, pero pasado los años cuando se presente el problema de la contaminación, obliga a preocuparse también por la calidad y es esta la

etapa actual que requiere una atención urgente para evitar “la crisis del agua”. Para conocer las características del agua es necesario hacer una serie de análisis fisicoquímicos al agua para finalmente definir su calidad.

1.1. PROBLEMA

El funcionamiento y comportamiento hidráulico de las estructuras que conforman la planta de tratamiento de agua potable, se encuentran operando sin asistencia técnica que pueda mejorar el proceso de tratamiento, esto implica que el agua entregada a la población no cumpla con los estándares de calidad de agua, debido a un mal manejo de los productos químicos utilizados en el proceso de tratamiento. La PTAP actualmente no cuenta con equipos y/o estructuras en funcionamiento que permitan cuantificar el caudal de ingreso, tampoco está en funcionamiento la estructura para generar un resalto hidráulico y con ello poder homogenizar la mezcla de coagulantes, esto hace que la operación en cuanto a la dosificación de coagulantes sea deficiente ya que el proceso coagulación - floculación es fundamental para el buen funcionamiento de las estructuras subsiguientes. El problema más frecuente se da en épocas lluviosas debido a un incremento en la turbiedad del afluente y para ello los operadores hacen una dosificación de sulfato de aluminio en función a su criterio personal, esto hace que la cantidad de coagulante sea mucho mayor de la dosis óptima, generando un costo elevado en el proceso de tratamiento. Con el fin de hacer una estimación de la eficiencia de la planta, lo que se pretende es, tomar muestras de agua a la salida y entrada de cada estructura que conforma el tratamiento para estimar la eficiencia en función a su finalidad.

Por tanto, es necesario comprender que no es suficiente con la optimización física de la infraestructura o ampliación de la misma, sino que también se debe contar con una gestión operacional eficiente por parte de los prestadores de servicio de agua. Que se refleje en mayores coberturas, calidad, continuidad, a través de la certificación del personal operador de la infraestructura con el fin de fortalecer la administración y mantenimiento de los sistemas y así garantizar la eficiencia en las operaciones y por ende en calidad de agua.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Proporcionar agua potable a las grandes y pequeñas ciudades es una de las necesidades prioritarias para garantizar el desarrollo y el bienestar de estas ciudades. Pero debido al mal uso que se hace del recurso hídrico (vertimiento de aguas negras, erosión de cuencas abastecedoras, alteraciones en el cauce, etc.) la mayoría de las veces la calidad del agua cruda no cumple con los requisitos físico-químicos-bacteriológicos para considerarlo como agua potable, por lo cual se debe realizar una serie de tratamientos para poder abastecer a las ciudades.

La PTAP de la ciudad de San Marcos, no cuenta con la estructura adecuadas y parámetros hidráulicos requeridos para la generación de mezcla rápida, esto hace que se dificulte el proceso de sedimentación y con ello un periodo de mantenimiento más corto, para ello, lo que se pretende es dar una propuesta de solución, con el fin de aumentar la eficiencia en el tratamiento. Además de estimar la eficiencia de cada una de las estructuras involucradas en el proceso.

Con el presente trabajo lo que se busca es mejorar la calidad de agua potable, mediante los procesos de tratamiento y con ello generar mejor calidad de vida en sus habitantes traducido en progreso y bienestar.

1.3. ALCANCES

Para el estudio de la eficiencia en la calidad de agua de la planta de tratamiento, se tomaron muestras de agua en puntos estratégicos de las estructuras (pre-sedimentador, floculador, sedimentador y filtro lento), estas muestras serán evaluadas por el laboratorio de control de calidad de SEDACAJ, algunos parámetros fisicoquímicos que involucran la eficiencia se tomaron in situ con un equipo multiparámetro, con el cual también se tomaran datos de la conductividad eléctrica en el ensayo realizado para el cálculo del tiempo de retención real para pre-sedimentador, floculador y sedimentador se realizó con un trazador (NaCl). Con los resultados obtenidos serán analizados para una propuesta de mejora en las estructuras que se encuentren operando con deficiencia en el tratamiento con la finalidad de ofrecer mejor calidad de agua a la población.

1.4. LIMITACIONES

En el presente trabajo se evaluó la eficiencia de la planta de tratamiento de agua cruda, mediante un análisis fisicoquímico del agua, teniendo en cuenta solamente un parámetro (turbiedad), ya que este es el principal problema en épocas de lluvia, la toma de muestras para su respectivo análisis se realizó durante los meses enero - mayo meses con mayor precipitación y por ende aumentando la turbiedad del agua a ser tratada. Adicional a ello, con los parámetros fisicoquímicos obtenidos solamente se hizo una comparación con el Reglamento de Calidad del Agua para Consumo Humano, de esta manera identificar los parámetros que necesitan ser controlados.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. OBJETIVO GENERAL

Estimar la eficiencia en la planta de tratamiento de agua cruda de la ciudad de San Marcos

1.5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar la planimetría y altimetría de la planta de tratamiento de agua cruda, de la ciudad de San Marcos.
- Determinar las zonas de muestreo y evaluar las características fisicoquímicas del agua del afluente y efluente.
- Determinar los parámetros de funcionamiento, tales como tipos de flujo, espacios muertos y tiempos reales de retención mediante trazadores.

CAPITULO II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

El estudio realizado en Colombia por Imelda Díaz Mossos en el 2006, describe un procedimiento para el funcionamiento operativo de la planta de agua potable de Tolima, basado en los problemas que involucran a la planta de tratamiento del Municipio en cuanto a la estandarización de su proceso e incumpliendo en su producto final "agua potable para consumo humano" con las normas vigentes del sector de agua potable, además no cuenta con un diseño de procedimiento adecuado de operación que incluya indicadores de gestión, de operación y de calidad del servicio de agua potable suministrada a sus clientes.

Luego de definido el problema la metodología de sintetiza en la prioridad de medir algunos aspectos y puntos relevantes que son Control de Calidad y Control de Proceso basados en un grupo de indicadores: Continuidad, Cantidad, Agua Improductiva (Agua de lavado + Agua Consumo planta/ Agua Filtrada), Reducción de Costos químicos, Producto no Conforme y Análisis Microbiológicos.

En este estudio cabe mencionar que hay dos conclusiones importantes a la cual la autora llega:

- Aunque la planta de tratamiento de no cuenta actualmente con inversión en el mejoramiento de su infraestructura los instructivos de operación permitirán hacer un uso adecuado de lo que se tiene en busca de mejoramiento y permitirá a pesar de los constantes cambios administrativos llevar una continuidad en su adecuado funcionamiento.
- El adecuado uso de la prueba de floculación con el ensayo de Jarras marca la diferencia en el proceso y en la economía del tratamiento pues no se realizaba generando exceso o defecto del producto coagulante que se manifestaba tanto en calidad como en presupuesto.

La investigación realizada en Lima -Perú por Lidia Cánepa de Vargas en el 2006 en la cual hizo una evaluación de las plantas de tratamiento de Agua Potable de la empresa prestadora de servicios de Cañete- Lima en la cual describe un procedimiento de evaluación enfocado a determinar los niveles de eficiencia de la planta de tratamiento,

midiendo los parámetros operacionales y procesos, además de estudiar sus características hidráulicas. La principal conclusión a la que se llega en esta evaluación es:

- Para poder mejorar las condiciones de operación es necesario capacitar al personal profesional y técnico a cargo del funcionamiento del sistema de tratamiento.

También realizó una evaluación a la planta de tratamiento de agua de Huancavelica – Perú, donde tiene como objetivo evaluar cada uno de los procesos de tratamiento y determinar las condiciones como se desarrollan las actividades de operación mantenimiento y control de calidad en la planta de tratamiento de agua de la ciudad de Huancavelica.

Se realizó la evaluación de la calidad fisicoquímica y bacteriológica al Río Ichu y el riachuelo Callqui fuentes de abastecimiento a la planta y también realiza un diagnóstico a cada una de las estructuras del sistema de tratamiento, llegando a conclusiones y recomendaciones tales como:

- Llevar un registro estadístico de la cantidad de agua tratada, así como de la calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua cruda, efluente de los procesos de tratamiento y del agua producida.
- Utilizar difusores como dispositivos de aplicación de coagulantes y cal. Estos dispositivos permitan realizar una aplicación uniforme en toda la masa de agua.
- Es necesario que la planta cuente con sistema de medición de caudal. La canaleta Parshall no indica valores reales de caudal por estar trabajando ahogada.

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. Generalmente se encuentra en fuentes y reservas naturales de aguas superficiales y subterráneas. También se llama así toda agua que entra en las plantas de tratamiento. Antes de poder ser considerada como potable, el agua bruta debe pasar por una serie de pruebas, entre las que se cuentan análisis de turbiedad, de flora microbiana (para determinar la posible presencia de microorganismos patógenos) y de detección de diferentes compuestos tóxicos. A partir de estos análisis se determinará el

tipo de tratamiento a realizar para desinfectar el agua y prepararla para el consumo público, o para el uso industrial que se le quiera dar.

Estudio del agua cruda

Para el análisis de las características del agua cruda se deberán tomar en cuenta los siguientes factores (NORMA OS.020, 2006).

- Estudio de la cuenca en el punto considerado, con la apreciación de los usos industriales y agrícolas que puedan afectar la cantidad o calidad del agua.
- Usos previstos de la cuenca en el futuro, de acuerdo a regulaciones de la entidad competente.
- Régimen del curso de agua en diferentes períodos del año.
- Aportes a la cuenca e importancia de los mismos, que permita realizar el balance hídrico.

Tipos de tratamiento a utilizar según los ECA del agua cruda

a) Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfectados

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.

b) Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional

Entiéndase como 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.

c) 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 (MINAM, 2017).

2.2.2. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA CRUDA

Una planta de tratamiento de agua potable es una secuencia de operaciones o procesos unitarios que trabaja en conjunto y concordancia, siendo seleccionada convenientemente cada unidad de proceso de la que estará compuesta la planta, a partir de las características del agua a tratar (CÁNEPA, L. 2004).

Para potabilizar el agua existen varios métodos, procesos y tecnologías, pero todos deben cumplir con los mismos estándares como son:

- Mezcla de barreras variadas con diferentes etapas dentro del proceso de potabilización, para alcanzar mayor eficiencia.
- Tratamiento integrado de varias unidades operacionales para producir la purificación deseada.
- Se debe determinar el tratamiento en base al objetivo final que estará destinada el agua que va a ser purificada.

2.2.3. TIPOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO

Según las plantas se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de proceso que conforman, en plantas convencionales antiguas, en plantas convencionales con tecnología apropiada, en plantas de filtración rápida y plantas de filtración lenta (CEPIS, 2006)

PTAP de tecnología convencional

Este tipo de planta, realiza el tratamiento al agua cruda bajo los siguientes procesos unitarios: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

PTAP de filtración rápida

Este tipo de planta, se denominan así debido a que sus filtros operan con velocidades entre 80 y 300 m³ /m² *d, de acuerdo a las características de la calidad del agua, del medio filtrante y recursos disponibles para operar. Por el motivo de las altas velocidades con las que operan estos filtros, se colmatan en un lapso de 40 a 50 horas en promedio. Por lo cual se necesita un retro lavado o lavado ascensional de la unidad durante un lapso de 5 a 15 minutos (dependiendo del tipo de sistema de lavado) para descolmatar el medio filtrante y volviendo el lecho filtrante a su estado inicial.

PTAP de filtración directa

Este tipo de planta se utiliza en aguas con poca o escasa turbiedad o cuando la fuente de abastecimiento es confiable, en caso de que la cuenca sea virgen o bien protegida, en la que la turbiedad no supera de 10 a 20 NTU en 80% y no supera los 30 NTU en 90% del tiempo. Los procesos unitarios considerados son: coagulación-decantación y filtración rápida. De ser necesario se puede adicionar el proceso de floculación.

Tabla 1: Límites de calidad de agua para plantas de filtración directa

Alternativa	Parámetros	90% del tiempo	80% del tiempo	Esporádicamente
Filtración Directa Descendente	Turbiedad (UNT)	25 - 30	< 20	< 50
	Color (UC)	< 25		
	NMP de coliformes termotolerantes /100 ml	< 2500		
	Concentración de algas (unidades/ml)	< 200		

Fuente: (CÁNEPA, L. 2004)

La parte economía a considerar en este tipo de plantas, contempla un costo inicial en dos procesos como la operación y mantenimiento de la planta, generando un ahorro de 40% a 50% de sustancias químicas, disminuyendo ampliamente el costo de los estudios.

PTAP de filtración Lenta

Este tipo de planta opera con tasas que normalmente varían entre 0,10 y 0,30 m/h, que son tasas menores al promedio de las empleadas en filtros rápidos. Los filtros lentos simulan a los procesos de tratamiento que se efectúan en la naturaleza en forma directa y espontánea. Con el tren de procesos de los filtros lentos se pueden remover hasta 500 NTU, teniendo en cuenta que el material coloidal no debe superar los 50 NTU.

2.2.4. PROCESOS DE LA PTAP CONVENCIONAL

Esta tecnología se empezó a desarrollar en la década de 1970 y se ha ido perfeccionando cada vez más. Las unidades son de alta tasa, ocupan una extensión que constituye el 25% ó 30% del área que ocupa un sistema convencional de la misma capacidad. La reducción del área se debe al empleo de floculadores verticales que por su mayor profundidad ocupan menos área que los horizontales y permiten optimizar el área de implantación de la PTAP. Los procesos que contiene la planta convencional se definen a continuación:

Coagulación

El agua puede contener una variedad de impurezas, solubles e insolubles; entre estas últimas destacan las partículas coloidales, las sustancias húmicas y los microorganismos en general. Tales impurezas coloidales presentan una carga superficial negativa, que impide que las partículas se aproximen unas a otras y que las lleva a permanecer en un medio que favorece su estabilidad. Para que estas impurezas puedan ser removidas, es preciso alterar algunas características del agua, a través de los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración (BARRENECHEA, A. 2004)

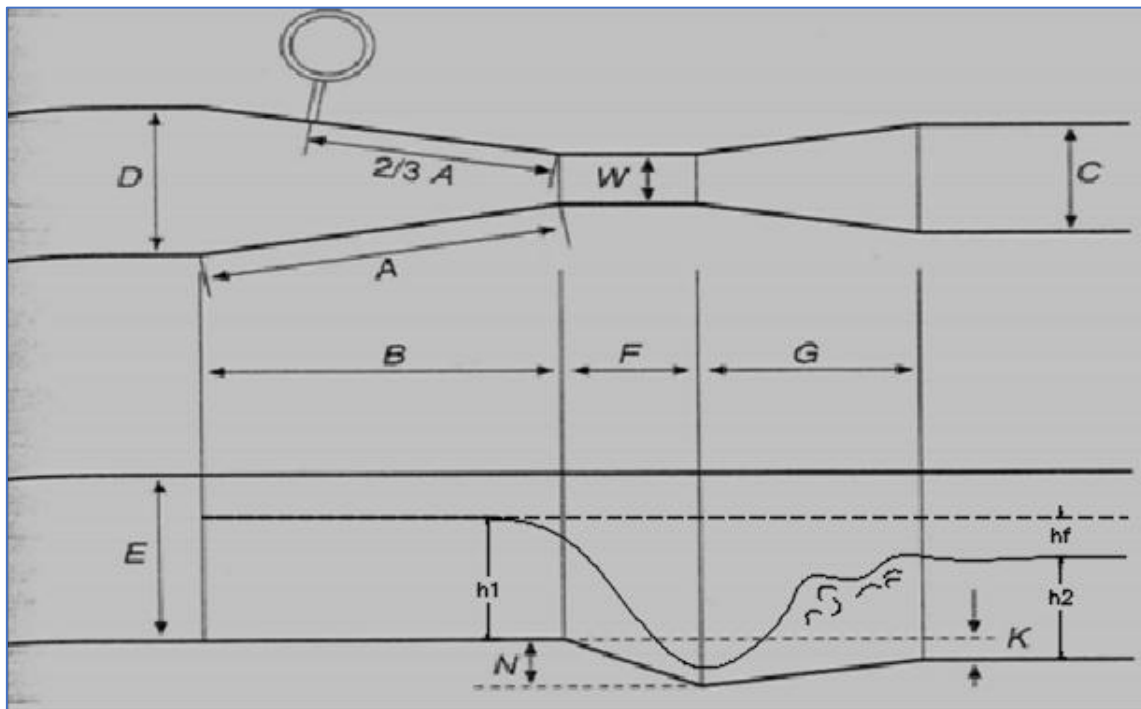
La coagulación se lleva a cabo generalmente con la adición de sales de aluminio y hierro. Este proceso es resultado de dos fenómenos:

- El primero, esencialmente químico, consiste en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva. Este proceso depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla.
- El segundo, fundamentalmente físico, consiste en el transporte de especies hidrolizadas para que hagan contacto con las impurezas del agua.

a. Canal parshall como mezclador de coagulante

El aforador parshall en plantas de tratamiento de agua potable se utiliza como un dispositivo de mezcla rápida para la dispersión de coagulantes, la estructura hidráulica constituye una contracción en la corriente que provoca que el flujo alcance su profundidad crítica dentro de la misma, produciendo un resalto hidráulico al final de esta. Consta de una sección convergente, una garganta o estrangulación y una sección divergente. Su geometría puede observarse en la siguiente figura:

Figura 1: Geometría del canal parshall



Fuente: (AZEVEDO, JM. 1998)

A es la longitud de las paredes de la sección convergente

B es la longitud de la sección convergente

C es el ancho de la salida

D es el ancho de la entrada a la sección convergente

E es la profundidad total

F es la longitud de la garganta

G es la longitud de la sección divergente

K es la diferencia de elevación entre la salida y la cresta

N profundidad de la cubeta

W ancho de la garganta

El caudal puede determinarse con la siguiente expresión:

$$Q = \lambda H^n \quad (1)$$

Donde:

Q = caudal en m³/s

H = calado del agua en la sección convergente del aforador en (m)

λ y **n** = constantes que dependen de las dimensiones del aforador.

Tabla 2: Dimensiones de los aforadores parshall.

W		A	B	C	D	E	F	G	K	N	λ	n
pulgadas	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)		
1"	2,5	36,3	35,6	9,3	16,8	22,9	7,6	20,3	1,9	2,9	-	-
3"	7,6	46,6	45,7	17,8	25,9	45,7	15,2	30,5	2,5	5,7	0.176	1.547
6"	15,2	61,0	61,0	39,4	40,3	61,0	30,5	61,0	7,6	11,4	0.381	1.580
9"	22,9	88,0	86,4	38,0	57,5	76,3	30,5	45,7	7,6	11,4	0.535	1.530
1'	30,5	137,2	134,4	61,0	84,5	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	0.690	1.522
1 1/2'	45,7	144,9	142,0	76,2	102,6	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	1.054	1.538
2'	61,0	152,5	149,6	91,5	120,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	1.426	1.550
3'	91,5	167,7	164,5	122,0	157,2	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	2.182	1.566
4'	122,0	183,0	179,5	152,5	193,8	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	2.935	1.578
5'	152,5	198,3	194,1	183,0	230,3	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	3.728	1.587
6'	183,0	213,5	209,0	213,5	266,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	4.515	1.595
7'	213,5	228,8	224,0	244,0	303,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	5.306	1.601
8'	244,0	244,0	239,2	274,5	340,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	6.101	1.606
10'	305,0	274,5	427,0	366,0	475,9	122,0	91,5	183,0	15,3	34,3	-	-

Fuente: (AZEVEDO, JM. 1998)

Hidráulicamente la forma más eficiente de lograr una distribución homogénea y rápida de una sustancia en un cuerpo de agua es a través de unas condiciones turbulentas de mezcla adecuadas para el depósito. Y una de las formas de calcular la eficiencia de esta mezcla es mediante la determinación del gradiente de velocidad (G). Este gradiente puede calcularse por la expresión (CÁNEPA, L. 2004).

$$G = \sqrt{\frac{\gamma * hf}{\mu * T}} \quad (2)$$

Donde:

γ = peso específico do líquido, en kg /m³

μ = viscosidad dinámica kg/s*m.

$T = 2L / (v_2 + v_1)$, que viene hacer el tiempo de retención del agua en el resalto en (s).

h_f = pérdida de carga en (m).

h_1 = tirante de agua en la zona de convergencia (m).

h_2 = tirante de agua en la zona de divergencia (m).

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

Para hacer el cálculo de la gradiente de velocidad nos apoyamos en la tabla (3) en el cual nos da una relación de la raíz cuadrada del peso específico del agua con la viscosidad dinámica.

Tabla 3: Relación del peso específico y la viscosidad del agua $\sqrt{(\gamma/\mu)}$ para diferentes temperaturas.

Temperatura C°	$\sqrt{(\gamma/\mu)}$
0	2336.94
4	2501.56
10	2736.53
15	2920.01
20	3114.64
25	3266.96

Fuente: (CÁNEPA, L. 2004)

Para números de Froude iguales o mayores a 4,5 la longitud L del resalto se determina por la fórmula:

$$L = 6 (h_2 - h_1) \approx 6,1 h_2 \quad (4)$$

Para resalto débil, con números de Froude entre 1,7 a 2,5 la extensión del resalto se estima por la fórmula:

$$L = 4,5 h_2 \quad (5)$$

El salto hidráulico es un fenómeno que se produce cuando la corriente pasa desde el régimen supercrítico al subcrítico, pasando a lo largo de su desarrollo, por el punto crítico de la corriente. Para ir de un punto a otro se establece que:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1) \quad (6)$$

o

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8F_2^2} - 1) \quad (7)$$

Donde:

$$Fi = \frac{Vi}{\sqrt{g * Yi}} \quad (8)$$

Para que un canal parshall funcione eficientemente los parámetros que requiere son los siguientes:

El gradiente de velocidad, para que el proceso sea óptimo, debe variar entre 700 y 1.200 s-1, y el tiempo de retención, que debe variar entre décimas de segundo y siete segundos, dependiendo del mecanismo de coagulación predominante. También existe un rango de gradiente de velocidad de 3.000 a 5.000, que adicionalmente optimiza el proceso. A su vez, cada tipo de unidad optimiza su comportamiento con un determinado rango de gradientes de velocidad, criterio que es necesario tener muy en cuenta en el ámbito de la operación.

Tabla 4: Variación del gradiente de velocidad de acuerdo con el tipo de mezclador

Tipo de mezclador	G s-1
Retromezcladores	500 - 1000
Resalto hidráulico	700 - 1200
Difusores	700 - 1000
Mezcladores en línea	3000 - 5000

Fuente: (OPS, 2006)

Pre-Sedimentador

La pre-sedimentación sirve principalmente al propósito de reducir la turbiedad y de eliminar las sustancias en suspensión que pueden separarse, en un tiempo razonable, por la sola acción de la gravedad. Generalmente en épocas lluviosas la turbiedad normal del líquido a tratar. Si el material en suspensión se asienta rápidamente, formándose una interface sólido-líquido, se considera que el líquido contiene material silíceo de tamaño reducido, pero de masa específica elevada, que es la que produce ese fenómeno.

Generalmente las partículas discretas que sedimentan en ese corto tiempo, tienen un tamaño cercano a 0.01 mm y una masa específica aproximada de 2,650 kg/m³, similar a la de la arena. Al igual que los desarenadores, los tanques de sedimentación son bastante eficientes en la remoción de sólidos relativamente pesados y grandes, tales como son los granos de arena. La materia inorgánica con tamaño mayor a 0.02 mm por lo general puede ser removida por sedimentación natural, sin el uso de coagulantes químicos.

La pre-sedimentación debe emplearse cuando la turbiedad del agua interfiera con los procesos de tratamiento convencional y la sedimentación simple de partículas remueva al menos el 40% de la turbiedad. Se recomienda el uso de pre-sedimentadores cuando la turbiedad del agua es muy elevada, mayor de 1000 UNT (RAS, 2000).

Pero las normas peruanas establecen que Este tipo de unidades deben ser consideradas en el diseño de una planta cuando es posible obtener remociones de turbiedad de por lo menos 50%, o cuando la turbiedad de la fuente supera las 1,500 UNT, y el tiempo de retención debe definirse en función de una prueba de sedimentación. Normalmente el tiempo en el cual se obtiene la máxima eficiencia varía de 1 a 2 horas, (NORMA OS.020, 2006)

Para la determinación de la eficiencia del reactor se utilizó la siguiente expresión:

$$\text{Eficiencia del pre - sedimentador} = \frac{Tb - Ts}{Tb} \quad (9)$$

Donde:

Tb = Turbidez del agua bruta

Ts = turbidez del agua sedimentada.

Floculación

El objetivo del floculador es proporcionar a la masa de agua coagulada una agitación lenta aplicando velocidades decrecientes, para promover el crecimiento de los flocs y su conservación, Después que el agua es coagulada es necesario que se produzca la aglomeración de los micro flóculos. Para que esto suceda se produce primero la floculación pericinética luego se produce la floculación ortocinética (ANDIA, Y. 2000).

a. Floculación Pericinética

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

b. Floculación Ortocinética

Se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, el que es inducido por una energía exterior a la masa de agua y que puede ser de origen mecánico o hidráulico.

Eficiencia de un floculador

En las unidades hidráulicas de un floculador con flujo horizontal, el gradiente de velocidad es una función de la pérdida de carga que es representada por la ecuación (2):

$$G = \sqrt{\frac{\gamma * hf}{\mu * T}}$$

Donde:

T = tiempo de detención

La pérdida de carga se produce a lo largo de los canales y principalmente en las vueltas, por lo que la pérdida de carga total en el tramo es $h_f = h_1 + h_2$.

$$h_1 = \left(\frac{n * v}{r^{\frac{2}{3}}} \right)^2 * l \quad (10)$$

Donde:

h_1 = pérdida de carga a lo largo de los canales del floculador (m).

h_2 = pérdida de carga en las vueltas de los canales del floculador (m).

n = coeficiente de pérdida de carga de Manning ($n = 0,013$)

v = velocidad en los canales (m/s)

g = aceleración de la gravedad (m/s²)

r = radio hidráulico del canal (m)

l = longitud total en el tramo (m)

$$h_2 = \frac{k * v^2}{2g} * N \quad (11)$$

Donde:

$K = 2$, coeficiente de pérdida de carga en las curvas.

N = número de vueltas o pasos entre canales.

La velocidad promedio en los canales del floculador puede variar entre 0,10 a 0,60 m /s. ya que: $v < 0,10$ m /s: sedimentación del floc y $v > 0,60$ m /s: rompimiento del floc.

En sistemas de menos de 50 l/s de capacidad, se puede considerar un rango de gradientes de velocidad de 20 a 70 s⁻¹ y un tiempo de retención promedio de 20 minutos.

Los gradientes de velocidad deberán disponerse en sentido decreciente, para acompañar el crecimiento y formación del floculo (Norma OS.020, 2006).

Sedimentación

La sedimentación es el proceso por el cual el sedimento en movimiento se deposita. Un tipo común de sedimentación ocurre cuando el material sólido, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo de un río, embalse, canal artificial, o dispositivo construido especialmente para tal fin.

Los decantadores o sedimentadores son de placas inclinadas a 60°, de tal modo que el área de decantación real es la suma de las proyecciones horizontales de todas las placas, lo que equivale a la superficie del fondo del decantador convencional (OPS, 2006)

Tabla 5: Tipo de Sedimentadores según su forma

Sentido de Flujo	Ejemplo	Rata de flujo m ³ /m ² /día
Sedimentadores Horizontales	Desarenadores	200 - 420
		15 - 30
Sedimentadores verticales	Manto de Lodos	45 - 60
Inclinado	Decantadores de módulos	120 - 180

Fuente: (ARBOLEDA, J. 2000)

a. Eficiencia de los sedimentadores

La eliminación de turbidez y color en plantas de tratamiento convencionales, se limita a los procesos de sedimentación y filtración, considerando a los procesos de coagulación y floculación, como acondicionamiento previo del agua para la separación efectiva de partículas. Respecto a la turbidez, esta ha sido una característica ampliamente aplicada como criterio de calidad de agua, tanto en las fuentes de abastecimiento como en los procesos de potabilización y sistemas de distribución, por lo tanto, es importante conocer la porción de turbidez que deben eliminar los sedimentadores y en consecuencia la porción restante a eliminar por filtración, de modo de lograr en conjunto la eficiencia esperada del sistema (RÍOS, DA. 1998)

La eficiencia de los sedimentadores se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Eficiencia de los sedimentadores} = \frac{Tb - Ts}{Tb} \quad (12)$$

Donde:

Tb = Turbidez del agua bruta

Ts = turbidez del agua sedimentada.

La eficiencia de los sedimentadores es adecuada si el mismo remueve por lo menos el 90% de la turbidez del agua cruda, además el agua sedimentada debe tener un color bajo, de 5 a 10 UC como máximo, y la turbidez debe ser baja; idealmente, no mayor de 2 UNT (CEPIS, 2004)

Una turbidez o color elevado puede significar que la decantación no es eficiente debido a alguna de las siguientes razones:

- Dosis de coagulante inadecuada.
- pH óptimo de coagulación erróneo.
- Problemas de diseño o de mantenimiento del floculador.
- Decantadores sucios.

Filtración

Proceso físico químico de clarificación para remover materia sólida en suspensión y coloidal a través del paso del agua en medios porosos. Es uno de los métodos más antiguos de tratamiento, elimina turbiedad, bacterias, color, olor y sabor del agua (OPS, 2004).

Los sistemas de Filtrado pueden ser clasificados de varias formas, teniendo en cuenta el tipo de lecho filtrante, el sentido de flujo durante la filtración, la forma de cargar el agua sobre el lecho filtrante y formas operacionales de control.

Tipo de filtración

Los filtros esencialmente constan de un tanque rectangular de concreto en el cual se coloca material (arena, antracita) sobre un sistema de suelo falso. El sistema consta de cuatro flujos básicamente:

- Un flujo de entrada de agua sedimentada
- Un flujo de salida del agua ya filtrada
- Un flujo de entrada del agua de lavado del filtro para hacer la limpieza del medio filtrante
- Un flujo de desagüe del agua sucia proveniente del lavado de la unidad

Los filtros rápidos cualquiera que sea su medio filtrante, requieren de algún sistema de control para regular la hidráulica del proceso.

La característica principal es que el nivel del agua en cada unidad de filtración varía desde un valor mínimo, cuando el medio filtrante se encuentra limpio, hasta un valor máximo cuando el filtro requiere ser lavado (CEPIS, 2004)

Las plantas de filtración rápida completa están constituidas por procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

Para la utilización de estos procesos se debe tener en cuenta las características del agua cruda o el terreno en donde se implanta el proyecto. En la siguiente tabla, se indican los rangos de calidad de agua aceptable, para el tratamiento con este tipo de filtros.

Tabla 6: Límites de calidad de agua para tratamiento mediante filtración rápida

Parámetros	90% del tiempo	80% del tiempo	Esporádicamente
Turbiedad (UNT)	< 1000	< 800	< 1500, si excede considerar sedimentación
Color (UC)	< 150	< 70	
NMP de coliformes termotolerantes /100 ml	< 600		si excede de 600 se debe considerar predesinfección

Fuente: (OPS, 2006)

Material filtrante

Los filtros pueden estar compuestos de material filtrante como antracitas, arena de manera estratificada. Los filtros rápidos por lo general cuentan con una capa superior de antracita como material filtrante con una altura de 0,40 m que tiene un tamaño efectivo de 0,9 mm con un rango de 0,8 a 1,1 mm. Su coeficiente de uniformidad es menor a 1,65 (rango aceptable de 1,3 a 1,7). El lecho filtrante de antracita descansa sobre una arena sílice con una altura de 0,25 m. La arena de filtro tiene un tamaño efectivo de 0,4 mm (rango recomendado de 0,45 a 0,55 mm) Su coeficiente de uniformidad es menor que 1,65.

La siguiente tabla muestra los límites permisibles recomendados para lechos filtrantes.

Tabla 7: Límites permisibles para lechos filtrantes

Características	Símbolo	Arena	Antracita
Espesor (cm)	L	15 - 30	45 - 60
Tamaño Efectivo (mm)	Te	0.5 - 0.6	0.8 - 1.10
Coefficiente de Uniformidad	C.U.	< 1.65	< 1.5
Tamaño más grueso (mm)	D90	1.41	2

Fuente: (OPS, 2006)

Tasa de filtración

Deberá fijarse de acuerdo al tamaño del material empleado y profundidad del lecho, preferentemente mediante ensayos en filtros piloto. Estos valores se encuentran entre los siguientes límites (NORMA OS.020, 2006).

Material fino y bajo nivel de operación y mantenimiento

Mínima: $180 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$

Material grueso y condiciones excepcionales de operación y mantenimiento.

Máxima: $300 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$

Material grueso y condiciones normales de operación y mantenimiento.

Normal: $200 - 240 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$

Lavado del filtro

El lavado debe hacerse cada vez que la pérdida de carga es igual a la presión estática sobre el fondo del hecho, o la calidad del afluente desmejore. La mayoría de los problemas del filtro se originan en un lavado deficiente incapaz de desprender la película que recubre los granos del lecho.

a. Eficiencia de la filtración

Al ser la filtración el paso final en el proceso de remoción de sólidos que se inició con la coagulación y se hace avanzar a través de la floculación y la sedimentación, es la responsable principal de la producción de agua de calidad coincidente con los estándares de potabilidad ya que en el filtro hasta el 99,5% de los sólidos suspendidos en el agua se

puede eliminar, incluyendo: minerales, flóculos y microorganismos (MALDONADO, V. 2004).

Si hablamos en términos de turbidez, hay que determinar específicamente que grado de remoción se debe exigir a cada unidad de tratamiento, para obtener un valor de turbidez aceptable en la salida de la planta.

La eficiencia de los filtros se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Eficiencia de los filtros} = \frac{T_p - T_f}{T_p} \quad (13)$$

Donde:

T_p = Turbidez del agua pre-filtrada

T_f = turbidez del agua filtrada.

Tabla 8: Grado de eficiencia de la filtración y sedimentación

Grado de Eficiencia	> 90	80-90	70-80	< 70
Clasificación	Excelente	Muy buena	Buena	Regular

Fuente: (ARBOLEDA, J. 2000)

Desinfección

Los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración remueven con mayor o menor eficiencia, la mayoría de bacterias y virus presentes en el agua. Desde este punto de vista pueden ser considerados como procesos preparatorios para la desinfección pues cumplen dos objetivos:

- Disminuir la carga bacteriana del agua.
- Hacen más eficientes los métodos de desinfección.

Debe considerarse que los microorganismos son partículas coloidales y que como tales quedan sometidas a los mismos procesos de remoción que afectan a los otros coloides, es de esperarse que al progresar el aglutinamiento de las partículas tanto las bacterias como los virus queden incorporados dentro del floc y sedimentan con el mismo, cabe recalcar

que los lodos sedimentados contienen bacterias y virus por lo cual se debe realizar un manejo cuidadoso de los mismos.

La desinfección del agua se refiere a la destrucción del organismo causante de enfermedades o patógenas presentes en ella los principales son: bacterias, protozoarios, virus, trematodos.

Las condiciones que debe tener un desinfectante ideal para ser usado en las plantas de tratamiento son:

- Capaz de destruir los organismos causantes de enfermedades
- No debe cambiar las características como: sabor, olor y toxicidad.
- Ser de fácil obtención, sencillo manejo y bajo costo.

La efectividad de un proceso de desafección se mide por el porcentaje de organismos muertos dentro de un tiempo, de una temperatura y un pH prefijados. La cloración es un proceso de desinfección que hasta el presente reúne las mayores ventajas: es eficiente, fácil de aplicar, y deja un efecto residual que se puede medir por sistemas muy simples y alcance para todos. De igual manera, como todo proceso, tiene sus desventajas como las de ser un agente corrosivo y especialmente formar sub productos peligrosos para la salud (OPS, 2006).

Estudios realizados concluyen que el cloro libre fue mucho más eficiente para matar los diferentes tipos de bacterias que las cloraminas, pues se necesitaron dosis más altas y mayor tiempo de contacto para completar el proceso de desinfección. La eficiencia del cloro libre disminuye al aumentar el pH. Por ejemplo, con 3 minutos de tiempo de contacto para un pH de 7, se necesitaron 0.05 mg/l de cloro para matar el 100% de las bacterias; en cambio para el mismo tiempo de contacto y pH=9.8, se necesitaron 0.45 mg/l (8 veces más). Esto se debe a que a pH=7 la proporción de HOCl es del 75% y de OCl⁻ del 25%; en cambio, a pH=9.8 todo el cloro libre está en la forma de OCl⁻, compuesto que es definitivamente más ineficiente. Desde un punto de vista general la eficiencia de la desinfección se verificará cuando se cumplan los siguientes parámetros:

Tabla 9: Parámetros que garantizan la eficiencia de la desinfección

Turbidez	< 0.5 UNT
Ph	< 8
Tiempo de contacto	>30 min
Cloro residual	> 0.5 mg/l

Fuente: (OPS, 2004)

2.2.5. PRINCIPALES INDICADORES DE CALIDAD DE AGUA

Indicadores Físicos

a. Sólidos totales.

Es el residuo remanente después de evaporar una muestra de agua a 103°C – 105°C. En general, la presencia de estos sólidos produce la turbiedad del agua. Incluye los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos totales, los sólidos disueltos totales y los coloidales. La diferencia entre uno y otro es el tamaño de partícula, siendo los de mayor tamaño los sólidos sedimentables con un diámetro mayor a 10 µm; y los más pequeños los sólidos disueltos totales (SDT), con un diámetro menor a 0.001 µm. Estos últimos son una medida de la concentración total de iones en solución, principalmente de sales minerales (CHÁVEZ, AM. 2012).

La potabilidad del agua con una concentración de SDT menor que 600 mg/l suele considerarse buena, pero a concentraciones mayores de aproximadamente 1000 mg/l la potabilidad del agua de consumo disminuye significativa y progresivamente. Los consumidores también pueden considerar inaceptable la presencia de concentraciones altas de SDT debido a que genera excesivas incrustaciones en tuberías, calentadores, calderas y electrodomésticos (OMS, 2008)

b. Turbiedad

Según la Organización Mundial de Salud, La turbiedad se origina por partículas en suspensión o coloidales (arcillas, limo, tierra finamente dividida, etc.), que pueden proceder del agua de origen, como consecuencia de un filtrado inadecuado, o debido a la suspensión de sedimentos en el sistema de distribución. Otra posible causa es debido a la presencia de partículas de materia orgánica en algunas aguas subterráneas o el

desprendimiento de biopelículas en el sistema de distribución. Asimismo, la Organización Mundial de Salud señala que un agua turbia representa la presencia de partículas que pueden proteger durante la desinfección a los microorganismos, e incluso estimular la proliferación de bacterias. Es por ello que, siempre que se someta el agua a un proceso de desinfección, para que éste sea eficaz, la turbiedad del agua debe ser baja.

Por otro lado, la turbiedad en el agua puede ser también un indicador de la existencia de problemas, sobre todo en la coagulación, sedimentación y en la filtración. Por lo que, es un parámetro operativo de control importante de los procesos de tratamiento. A pesar de todos los problemas que pueden significar un agua turbia, no se ha propuesto ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud. Lo único que se indica es que el aspecto del agua con una turbidez de 5 UNT suele ser aceptable para los consumidores. A su vez, la turbidez mediana debe ser menor que 0,1 UNT para que la desinfección sea eficaz.

c. Color

En cuanto al color del agua de consumo, lo ideal es que no tenga ningún color apreciable, pues influye mucho en la percepción de las personas sobre la calidad del agua, actuando, así como un indicador de aceptabilidad. Según la Organización Mundial de la Salud el color del agua se debe principalmente a la presencia de materia orgánica coloreada, presencia de hierro, manganeso y otros metales, bien como impurezas naturales o como resultado de la corrosión. De igual manera, otra posible causa es la contaminación de la fuente de agua con vertidos industriales. En general, se puede deber a diversas causas, es por ello necesario determinar el origen de la coloración y actuar sobre ello. Por otro lado, existen dos tipos de color: color verdadero y color aparente. El color verdadero depende sólo del agua y la materia suspendida y disuelta. Una vez eliminado el material suspendido, el color remanente se le conoce como color aparente, producto pues de suspensiones no naturales que a su vez generan turbiedad (CHAVEZ, AM. 2012).

Tal como lo indica la Organización Mundial de la Salud las personas pueden percibir niveles de color mayores que 15 unidades de color verdadero (UCV) en un vaso de agua. De tal manera que los consumidores suelen considerar aceptable, niveles de color menor que 15 TCU. Sin embargo, se debe considerar que la aceptabilidad puede variar.

d. Olor y Sabor

El olor y sabor es de suma importancia pues actúan como indicadores de aceptabilidad, siendo pues posibles motivos de rechazo. Por lo general, las personas relacionan la usencia de olor con ausencia de contaminantes; incluso generalmente se emiten juicios sobre la calidad del agua por el olor o sabor de la misma, cuando en realidad puede pasar que tenga un buen sabor y olor, sin embargo, es de muy mala calidad. De esta manera, dan solo una primera idea de la calidad del agua. Muchas veces pueden revelar la existencia de algún tipo de contaminación, o el funcionamiento deficiente de algún proceso durante el tratamiento o la distribución de ésta (CHAVEZ, AM. 2012).

Según la Organización Mundial de la Salud, el sabor y el olor del agua podrían originarse por contaminantes químicos naturales, orgánicos e inorgánicos, por fuentes o procesos biológicos (por ejemplo, microorganismos acuáticos) o por contaminación debida a sustancias químicas sintéticas. Pueden también ser resultado de la corrosión o del tratamiento del agua (por ejemplo, la cloración). De igual manera, se podría haber originado durante el almacenamiento y la distribución debido a la actividad microbiana. Tal como se puede apreciar, el olor y sabor pueden tener diversas causas; es por ello que, ante la presencia de estos, lo más recomendable es realizar pruebas para investigar su causa y poder eliminarlos.

e. Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros más importantes de la calidad del agua, pues tal como lo indica la Organización Mundial de la Salud a elevadas temperaturas puede ocurrir la proliferación de microorganismos. Asimismo, puede aumentar los problemas de sabor, olor, color y corrosión. A su vez indican que la temperatura tiene una gran influencia sobre otros parámetros como el pH, el déficit de oxígeno, la conductividad eléctrica y otras variables fisicoquímicas (RODRIGUEZ, P. 2001).

De igual manera, puede influir en el retardo o aceleración de la actividad biológica como sobre otras reacciones químicas. He aquí la gran importancia de este parámetro como indicador de la calidad de agua.

Indicadores químicos

a. PH

Según la Organización Mundial de la Salud, aunque el pH no suele afectar directamente a los consumidores, es uno de los parámetros operativos más importantes de la calidad del agua, ya que determinados procesos químicos ocurren tan solo a un determinado pH. Por ejemplo, para que las desinfecciones con cloro sean eficaces es necesario que el pH se encuentre entre un valor de 6.5 y 8. de esta manera, se debe prestar mucha atención al control del pH en todas las fases del tratamiento del agua para garantizar que su clarificación y desinfección sean satisfactorias. Además, el pH de la misma se debe controlar durante su sistema de distribución para evitar la corrosión e incrustaciones en las redes de distribución, ya que el agua con un pH bajo será probablemente corrosiva. El reglamento de calidad del agua para consumo humano establece que el rango de pH debe estar entre 6.5-8.5.

b. Aceites y Grasas

Las grasas y aceites son compuestos orgánicos constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal y vegetal, así como los hidrocarburos del petróleo. Algunas de sus principales características son: poca solubilidad en el agua, baja densidad y baja o nula biodegradabilidad. Es por ello que, si no son controladas debidamente se acumulan en el agua formando natas en la superficie del líquido, alterando así la calidad estética del agua (olor, sabor y apariencia). Debido a que influye directamente en la percepción que tienen las personas sobre la calidad del agua, lo más recomendable es que no haya presencia de aceites ni grasas en la misma (CHAVEZ, AM. 2012).

c. Dureza

La dureza del agua hace referencia a la concentración de compuestos minerales de cationes polivalentes (principalmente bivalentes y específicamente los alcalinotérreos) que hay en una determinada cantidad de agua, principalmente Ca^{2+} y Mg^{2+} , expresados como mg/l CaCO_3 , que ingresan al agua en el proceso natural de disolución de las formaciones rocosas presentes en el suelo (CHAVEZ, AM. 2012).

La organización Mundial de la Salud indica que el valor del umbral gustativo del ion calcio se encuentra entre 100 y 300 mg/l dependiendo del anión asociado, mientras que el del magnesio es probablemente menor que el del calcio. En algunos casos, los

consumidores toleran una dureza del agua mayor que 500 mg/l; esto se encuentra en función de las condiciones locales. No obstante, no se propone ningún valor de referencia para la dureza del agua de consumo basado en efectos sobre la salud. Por otro lado, la OMS resalta que es importante determinar este parámetro para determinar la calidad del agua, ya que a elevadas temperaturas y en función de la interacción de otros factores, como el pH y la alcalinidad, puede formar incrustaciones en los equipos mecánicos, instalaciones de tratamiento, el sistema de distribución y las tuberías.

d. Conductividad

La conductividad de una muestra de agua es una medida de la capacidad para transportar una corriente eléctrica, varía con el tipo y cantidad de iones que contenga y depende de la Temperatura. Una solución 0.01 N de KCl tiene una conductividad de 1411.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C. El reglamento de calidad del agua para consumo humano establece que la conductividad debe ser 1500 $\mu\text{mho}/\text{cm}$ a una temperatura de 25 °C.

e. Nitritos

Su presencia indica procesos biológicos activos en el agua, son indicadores de contaminación fecal a medio o corto plazo. Se oxidan rápida y fácilmente a nitratos, constituyen un paso intermedio en el proceso de oxidación de la materia fecal, por lo que el contenido es variable (RODRÍGUEZ, GA. 2001)

f. Nitratos

El uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, incluyendo el amoníaco, y la contaminación causada por la acumulación de excretas humanas y animales pueden contribuir a elevar la concentración de nitratos en agua. Generalmente, los nitratos son solubles, por lo que son movilizados con facilidad de los sedimentos por las aguas superficiales y subterráneas. Pueden considerarse como indicadores de contaminación fecal a largo plazo, pues es el estado más oxidado del amonio. Sin embargo, su uso como abono agrícola, hace que hayan perdido gran parte de su valor como indicadores de contaminación fecal (Barrenechea, 2016). Al presentarse los nitratos en agua potable se relaciona con los efectos tóxicos (metahemoglobinemia) producidos por un exceso de nitrato en la dieta, y pueden causar la formación endógena de nitro-compuestos, de efectos cancerígenos, como las nitrosaminas (RODRÍGUEZ, GA. 2001)

g. Cloruros

La Organización Mundial de la Salud señala que las altas concentraciones de cloruro confieren un sabor salado al agua y las bebidas. A concentraciones superiores a 250 mg/l es cada vez más probable que los consumidores detecten el sabor del cloruro. En general, para el anión cloruro depende con qué catión esté asociado para determinar su sabor.

No se propone ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud para el cloruro en el agua de consumo.

h. Sulfatos

Según la Organización Mundial de Salud, la presencia de sulfato en el agua de consumo puede generar un sabor apreciable y en niveles muy altos un efecto laxante en consumidores no habituados. Por lo general, se considera que el deterioro del sabor es mínimo cuando la concentración es menor que 250 mg/litro. Sin embargo, varía en función de la naturaleza del catión asociado. Asimismo, no se ha calculado ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud para el sulfato.

i. Aluminio

Las fuentes más comunes de aluminio en el agua de consumo son el aluminio de origen natural y las sales de aluminio utilizadas como coagulantes en el tratamiento del agua. La presencia de aluminio en concentraciones mayores que 0,1–0,2 mg/l suele ocasionar quejas de los consumidores como consecuencia de la precipitación del flóculo de hidróxido de aluminio en los sistemas de distribución y el aumento de la coloración del agua por el hierro. Por lo tanto, es importante optimizar los procesos de tratamiento con el fin de reducir al mínimo la presencia de residuos de aluminio en el sistema de abastecimiento. En buenas condiciones de funcionamiento, pueden alcanzarse, en muchas circunstancias, concentraciones de aluminio menores que 0,1 mg/l. Los datos científicos disponibles no permiten calcular un valor de referencia basado en efectos sobre la salud para el aluminio en el agua de consumo. El reglamento de calidad del agua para consumo humano establece que la concentración de aluminio debe ser menor a 0.2 ppm.

j. Cobre

La presencia de cobre en un sistema de abastecimiento de agua de consumo se debe, por lo general, a la acción corrosiva del agua que disuelve las tuberías de cobre. Las concentraciones pueden sufrir variaciones significativas en función del tiempo que el

agua haya estado retenida en contacto con las tuberías; por ejemplo, una muestra de agua tomada nada más abrir el grifo tendrá, previsiblemente, una concentración de cobre mayor que una tomada después de que haya corrido el agua abundantemente. Las concentraciones altas pueden interferir con los usos domésticos previstos del agua. El cobre en el agua de consumo puede aumentar la corrosión de accesorios de acero y hierro galvanizados. Cuando la concentración de cobre del agua es mayor que 1 mg/l, mancha la ropa lavada y los aparatos sanitarios. A niveles mayores que 5 mg/l, el cobre también tiñe el agua y confiere un sabor amargo no deseado. Aunque el cobre puede conferir sabor al agua, es seguramente aceptable a concentraciones iguales al valor de referencia basado en efectos sobre la salud. El reglamento de calidad del agua para consumo humano establece que debe ser menor a 2.0 ppm.

k. Hierro

En las aguas subterráneas anaerobias puede haber concentraciones de hierro ferroso de hasta varios miligramos por litro sin que se manifieste alteración alguna del color ni turbidez al bombearla directamente desde un pozo. Sin embargo, al entrar en contacto con la atmósfera, el hierro ferroso se oxida a férrico, tiñendo el agua de un color marrón rojizo no deseable.

El hierro también potencia la proliferación de bacterias ferruginosas, que obtienen su energía de la oxidación del hierro ferroso a férrico y que, en su actividad, depositan una capa viscosa en las tuberías.

En niveles por encima de 0,3 mg/l, el hierro mancha la ropa lavada y los accesorios de fontanería. Por lo general, no se aprecia ningún sabor en aguas con concentraciones de hierro menores que 0,3 mg/l, aunque pueden aparecer turbidez y coloración.

l. Manganeso

La presencia de manganeso a concentraciones mayores que 0,1 mg/l en sistemas de abastecimiento de agua produce un sabor no deseable en bebidas y mancha la ropa lavada y los aparatos sanitarios. Al igual que sucede con el hierro, la presencia de manganeso en el agua de consumo puede dar lugar a la acumulación de depósitos en el sistema de distribución. Las concentraciones menores que 0,1 mg/l suelen ser aceptables para los consumidores. Incluso en una concentración de 0,2 mg/l, el manganeso formará con frecuencia una capa en las tuberías, que puede desprenderse en forma de precipitado

negro. El reglamento de calidad del agua para consumo humano establece que debe ser menor a 0.4 ppm.

m. Zinc

El cinc confiere al agua un sabor astringente indeseable y su umbral gustativo (como sulfato de zinc) es de aproximadamente 4 mg/l. El agua con concentraciones de cinc mayores que 3–5 mg/l puede tener un color opalino y producir una película oleosa al hervir. El reglamento de calidad del agua para consumo humano establece que debe ser menor a 3.0 ppm. Aunque el agua de consumo rara vez contiene Zinc en concentraciones mayores que 0,1 mg/l, los niveles en el agua de grifo pueden ser sustancialmente mayores debido al zinc utilizado en materiales de fontanería galvanizados antiguos. No se ha propuesto ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud para el zinc en el agua de consumo.

n. Cloro

La mayoría de las personas pueden detectar, mediante el olfato o el gusto, la presencia en el agua de consumo de concentraciones de cloro bastante menores que 5 mg/l, y algunas incluso pueden detectar hasta 0,3 mg/l. Si la concentración de cloro libre residual alcanza valores de 0,6 a 1,0 mg/l, aumenta la probabilidad de que algunos consumidores encuentren desagradable el sabor del agua. El umbral gustativo del cloro es menor que su valor de referencia basado en efectos sobre la salud.

Indicadores Microbiológicos

Según la Organización Mundial de la Salud, Los riesgos para la salud relacionados con el agua de consumo más comunes y extendidos son las enfermedades infecciosas ocasionadas por agentes patógenos como bacterias, virus y parásitos (por ejemplo, protozoos y helmintos). La carga para la salud pública es función de la gravedad de la enfermedad o enfermedades relacionadas con los agentes patógenos, de su inefectividad y de la población expuesta.

El agua es considerada uno de los vehículos más comunes de transmisión de enfermedades. Sin embargo, esto dependerá de ciertos factores como: los hábitos de la población, el uso de aguas residuales, la calidad del agua potable, la cantidad de pobladores, cantidad de animales, la variabilidad de la inmunidad de las personas, etc. Para evitar el surgimiento de epidemias o enfermedades, es imprescindible mejorar la

calidad del agua y su distribución, así como los sistemas de eliminación de excrementos y la higiene en general.

Bacterias

Para la Organización Mundial de la Salud, la mayoría de bacterias patógenas pueden ser transmitidas por el agua, causando graves enfermedades o lesiones al aparato respiratorio e incluso al cerebro. Por ello, es de vital importancia asegurar la calidad del agua de consumo.

Para esto, se toman en cuenta una serie de indicadores microbiológicos, cuya interpretación debe ser muy cuidadosa y según las circunstancias de lugar y tiempo en que se tomen las muestras, ya que la calidad del agua puede variar con gran rapidez y todos los sistemas pueden presentar fallos ocasionales. Por ejemplo, la lluvia puede hacer aumentar en gran medida la contaminación microbiana en el agua de origen, haciendo frecuentes los brotes de enfermedades transmitidas por la misma.

a. Coliformes fecales o termotolerantes

Para la Organización Mundial de la Salud, los coliformes termotolerantes representan un grupo de bacterias indicadoras de contaminación fecal.

Generalmente la bacteria que predomina en la mayoría de las aguas, es *Escherichia*; incluso ésta está presente en concentraciones muy grandes en las heces humanas y animales, y raramente se encuentra en ausencia de contaminación fecal. Sin embargo, no se debe dejar de mencionar que también las bacterias *Citrobacter*, *Klebsiella* y *Enterobacter* son termotolerantes.

b. *Escherichia coli*

Según la Organización Mundial de la Salud, esta bacteria está presente en grandes cantidades en la microflora intestinal de las personas y animales donde suele ser inocua. Es por ello, que es el índice de contaminación fecal más adecuado.

Por otro lado, se debe considerar que estos microorganismos también se utilizan como indicadores de desinfección, pero los análisis son mucho más lentos y menos fiables. Asimismo, *Escherichia coli* es mucho más sensible a la desinfección que los protozoos y virus entéricos.

Esta bacteria al estar presente en otras partes del cuerpo puede causar enfermedades graves, como infecciones de las vías urinarias y diarreas agudas. La infección se asocia al consumo de agua contaminada, contacto con animales y transmisión de persona a persona.

Para evitar su brote se recomienda la protección de las fuentes de agua de los residuos humanos y animales, tratamiento adecuado y protección del agua durante su distribución. Los análisis de Coliformes termotolerantes son un índice que determina la presencia o no de esta bacteria.

Prueba de Jarras para la Determinación de dosis Óptima de Coagulante ($Al_2(SO_4)_3$)

La prueba de jarras es un procedimiento de laboratorio que se usa con el fin de determinar la dosificación óptima de coagulante y pH. Este método permite realizar ajustes en el pH, las variaciones en la dosis de coagulante o polímero, alternando velocidades de mezclado, o la prueba de coagulante o diferentes tipos de polímeros, a pequeña escala con el fin de predecir el funcionamiento de una operación a gran escala de tratamiento. Una prueba de jarras simula los procesos de coagulación y floculación que fomentan la eliminación de los coloides en suspensión y materia orgánica que puede conducir a problemas de turbidez, olor y sabor. Para hacer este ensayo se tomaron 10 muestras de agua a la entrada de la planta de tratamiento de agua cruda con fechas distintas. Además, se contó con el apoyo del laboratorio de calidad de agua SEDACAJ.

2.2.6. REPRESENTACION DE FLUJOS EN REACTORES MEDIANTE MODELOS MATEMATICOS

MODELOS DE FLUJO EN REACTORES

En las unidades de tratamiento de una planta, desde el punto de vista hidráulico, el flujo del líquido puede ser de dos tipos: discontinuo o intermitente y continuo.

Flujo intermitente

El flujo de tipo discontinuo o intermitente es el menos habitual y consiste en llenar la unidad y dejar un tiempo el líquido en ella mientras se produce el proceso correspondiente, que puede realizarse con o sin mezcla, vaciar la unidad y repetir el ciclo.

Este tipo de flujo, en la mayoría de los casos, no es práctico y generalmente los procesos en una planta de tratamiento son de flujo continuo, salvo que el proceso de tratamiento en sí exija la discontinuidad, o se trate de experiencias piloto o pruebas de laboratorio.

Un ejemplo de este tipo de flujo lo constituye la prueba de jarras, en la cual los vasos se llenan con un volumen (V) de líquido, se someten a un proceso de tratamiento durante un tiempo de retención (t_0), terminado el cual se vacían y se preparan para una nueva prueba. En este caso, toda la masa líquida permanece en el reactor durante todo el tiempo de retención

Flujo continuo

Este tipo de flujo es el habitual en las plantas de tratamiento de agua. Teniendo en cuenta esta característica, los reactores pueden ser de flujo de pistón, mezclado y no ideal.

a. Flujo de pistón

Se describe como aquel en el que todas las partículas de fluido que entran a la unidad permanecen en ella el mismo tiempo. De esta manera, los elementos de fluido pasan a través del sistema y son descargados en la misma secuencia en que fueron introducidos y no hay ningún tipo de mezcla entre el fluido que ingresa y el fluido que está en la unidad.

En la práctica es muy difícil lograr un flujo con estas características. Se presenta con bastante aproximación en unidades hidráulicas como los canales Parshall, los vertederos, los floculadores hidráulicos de pantallas y en los decantadores con una relación largo/ancho bastante mayor de 1.

b. Flujo mezclado

Un reactor con flujo mezclado es aquel en el que todo elemento que ingresa al reactor se dispersa inmediatamente dentro de él. Además, se cumplirá que la concentración de una sustancia a la salida de la unidad es igual a la existente en todo el reactor. En la práctica es muy difícil lograr un flujo con estas características; solo se presentará bajo condiciones ideales. Se encuentra con bastante aproximación en retomezcladores o floculadores mecánicos con pocas cámaras en serie.

c. Flujo no ideal

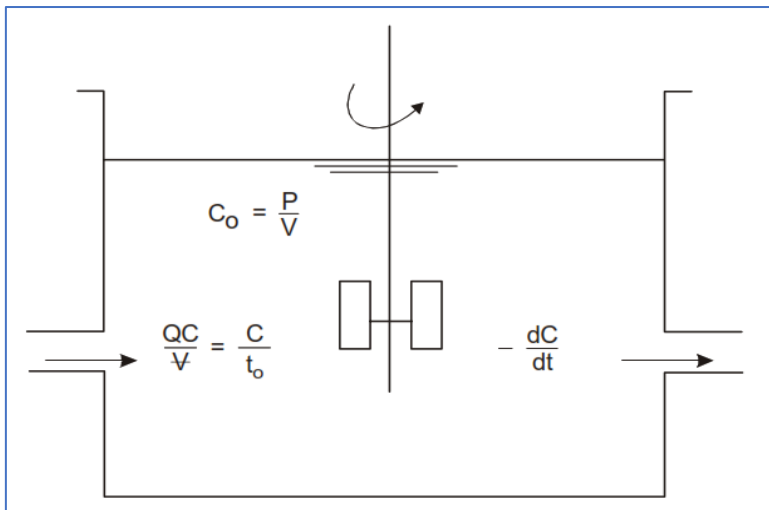
Este tipo de flujo corresponde a cualquier grado intermedio entre flujo a pistón y mezcla completa con otras posibles alteraciones como la presencia de zonas muertas,

cortocircuitos hidráulicos, recirculación. Viene a ser el tipo de flujo con el que nos encontraríamos usualmente en las unidades de tratamiento en las plantas.

MODELOS MATEMATICOS APLICADOS AL ANALISIS DE REACTORES

Supongamos el caso de un reactor que tenga un volumen de agua (V), al cual se le aplica una cantidad (P) de una sustancia química (trazador), la cual se disuelve y mezcla completamente en toda la masa de agua. En este caso, la concentración de esa sustancia en el volumen (V) será $C_0 = P / V$. Si en ese reactor se introduce el flujo Q en el tiempo ($t = 0$) y toda el agua que entra se mezcla completa e instantáneamente con el agua que había en el reactor, al medir la concentración de dicha sustancia a la salida de dicho reactor, se encontrará que la concentración (C) va disminuyendo progresivamente a través del tiempo.

Figura 2: Reactor de flujo mezclado



Fuente: (PÉREZ, J. 1992)

La grafica anterior representa el reactor de mezcla completa, representando una reacción de primer orden, con lo que se plantea un balance de masas considerando lo que entra y sale del reactor de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

Así, la cantidad de trazador que entra es:

$$C_0 = \frac{P}{V} = \frac{QC}{V} \quad (14)$$

El tiempo de residencia media se expresa con la siguiente ecuación:

$$t_0 = \frac{V}{Q} \quad (15)$$

Concentración inicial de sales:

$$C_0 = \frac{C}{t_0} \quad (16)$$

Cantidad de trazador que sale:

$$C_f = -\frac{dC}{dt} \quad (17)$$

Por lo tanto, al igualar las ecuaciones (15) y (16) anteriores resulta la expresión siguiente:

$$\frac{C}{t_0} = -\frac{dC}{dt} \quad (18)$$

Integrando tenemos:

$$\frac{dC}{C} = -\frac{dt}{t_0}$$

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = -\int_0^1 \frac{dt}{t_0}$$

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = -\frac{1}{t_0} \int_0^1 dt$$

$$\ln C - \ln C_0 = -\frac{t}{t_0}$$

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{t}{t_0}} \quad (19)$$

Donde:

C = concentración que permanece en el reactor en el tiempo

C₀ = la concentración aplicada el tiempo (t=0)

Al aplicar la ecuación (18) variando los valores t/t_0 se obtienen valores de C/C_0 con lo que se construye curvas que muestran el comportamiento del flujo con el trazador, esto lo podemos apreciar mejor en la figura 3, siendo C/C_0 igual a 1, el valor más alto cuando t/t_0 es igual a 0, justificando así el descenso conforme pasa el tiempo.

Con lo que se obtiene una curva $M = 0$ para un reactor de flujo mezclado y una curva $m = \infty$ para un reactor tipo pistón (CEPIS, 2004)

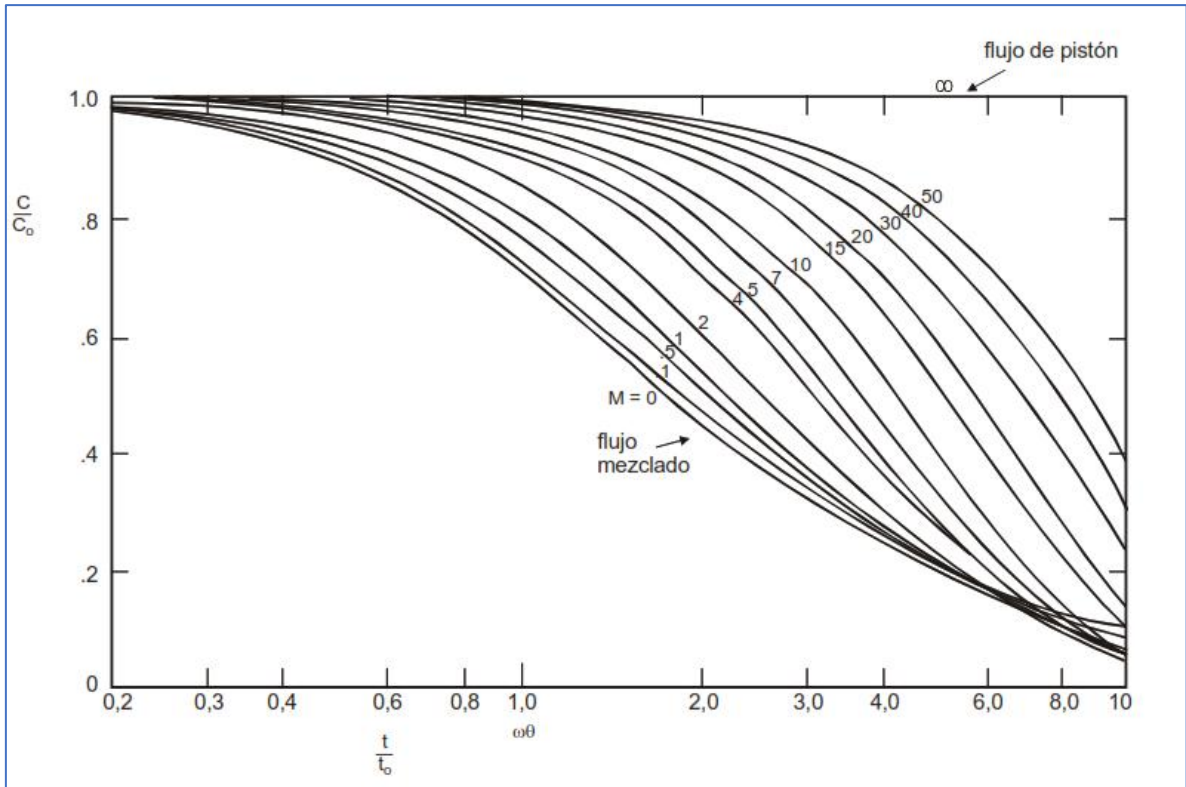


Figura 3: Variación de la concentración vs tiempo de retención

FUENTE: (PÉREZ, J. 1992)

Si tenemos dos reactores idénticos con tiempo de retención ($t_0/2$) entonces se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{C}{C_0} = - \left(\frac{dC_1}{dt} \right) \left(\frac{dC_2}{dt} \right) \quad (20)$$

Donde:

C = concentración que sale del primer reactor y entra l segundo.

C_1 = concentración inicial del segundo reactor, cuyo efluente tendrá la concentración C_2

Entonces, si se tiene una serie de reactores (n) idénticos con un tiempo de retención cada uno de (t₀/n), obtenemos la fórmula general.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{-n(n - T)^{n-1}}{(n - 1)!} \theta^{-nT} \quad (21)$$

Donde:

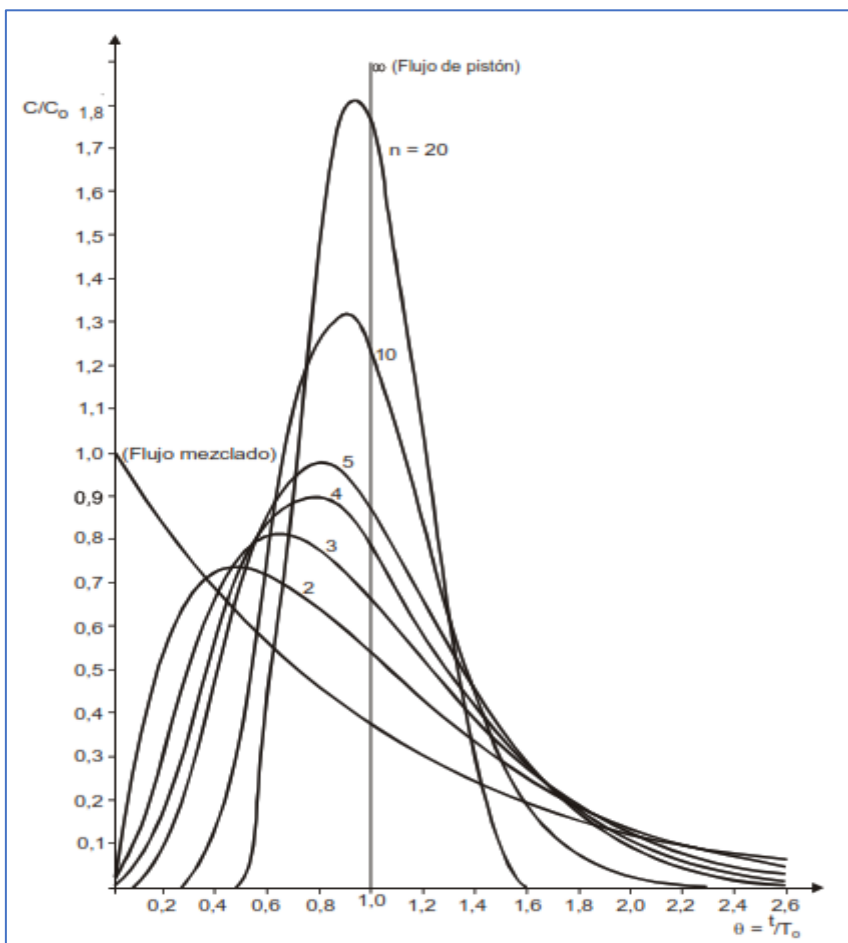
$$T = t/t_0$$

Graficando estos valores para diferentes valores de n, se tiene una familia de curvas en la cual, para n=1 se obtiene la siguiente expresión que representa la ecuación (18).

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{t}{t_0}}$$

Y para n = ∞, C/C₀ = ∞, se tiene una recta vertical que pasa por el punto (t/t₀=1).

Figura 4: Reactores en serie



Fuete: (PÉREZ, J. 1992)

La determinación de la proporción de flujo de pistón en flocluladores y sedimentadores tiene una gran importancia, pues mide la fracción del volumen de agua que pasa por el reactor y que ha permanecido durante todo el tiempo de retención sometida al tratamiento deseado. En cambio, cuanto más flujo mezclado haya en un floclulador o sedimentador, se puede considerar que una fracción mayor de la masa de agua ha sufrido un tratamiento más corto o más largo del que se desea, lo que en muchos casos es objetable.

Por eso, es ideal que en las plantas de tratamiento se diseñen los reactores de manera que presenten el máximo de flujo de pistón, pues con eso se garantiza que el agua tenga el tratamiento que se busca durante el periodo de retención proyectado.

En reactores no ideales, además de flujo de pistón y flujo mezclado, puede suceder que parte del volumen del agua que entra atraviese el tanque con tanta rapidez que salga instantáneamente, sin permanecer almacenado en él.

Este fenómeno se llama cortocircuito y se presenta debido a defectos en el diseño de la estructura de entrada y salida que permiten el paso directo del agua entre unas y otras, por corrientes de densidad de origen térmico o por variación de concentración, así como por efecto de la rotación de paletas en flocluladores mecánicos, que impulsan parte de la masa líquida para que salga tan pronto como entra. El cortocircuito hidráulico se define por eso como aquella parte del flujo que tiene una velocidad infinita y un tiempo de retención cero.

a. Modelo simplificado de la teoría de Wolf – Resnick

Es evidente que cuando no hay espacios muertos, la fracción de flujo de pistón (p) y la fracción de flujo de no pistón (1-p) deben ser iguales a la unidad:

$$\text{Flujo de pistón} + \text{flujo de no pistón} = 1$$

$$p + (1 - p) = 1 \tag{22}$$

Cuando hay espacios muertos, si m es la fracción del volumen considerado como espacio muerto, la fracción que no tiene espacios muertos será igual a 1-m y, por lo tanto:

$$\text{Flujo de pistón} + \text{flujo de no pistón} + \text{espacios muertos} = 1$$

$$(p(1 - m)) + ((1 - p) * (1 - m)) + m = 1 \tag{23}$$

Ahora bien, en la ecuación (18) se estableció que el flujo perfectamente mezclado es igual a:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{t}{t_0}}$$

Si se considera que en el reactor se presenta una combinación de flujos de pistón y mezclado, la ecuación (18) se transforma en:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{1-pt_0}{(1-p)t_0}} \quad (24)$$

Donde:

pto = tiempo de retención correspondiente a flujo de pistón

(1-p) = volumen de mezcla perfecta.

Reordenando y simplificando, tenemos:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{1}{1-p}\left[\frac{t}{t_0}-p\right]} \quad (25)$$

Si se considera que el sistema, además, tiene espacios muertos, habría que introducir en la última ecuación el término (1-m) para considerar la fracción efectiva de flujo con mezcla perfecta. Luego, tendríamos:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{1}{(1-p)(1-m)}\left[\frac{t}{t_0}-p(1-m)\right]} \quad (26)$$

La fracción de la totalidad del trazador que ha salido del reactor será:

$$F(t) = 1 - \frac{C}{C_0} \quad (27)$$

Reemplazando el valor de C/Co, se obtiene:

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{1}{(1-p)(1-m)}\left[\frac{t}{t_0}-p(1-m)\right]}$$

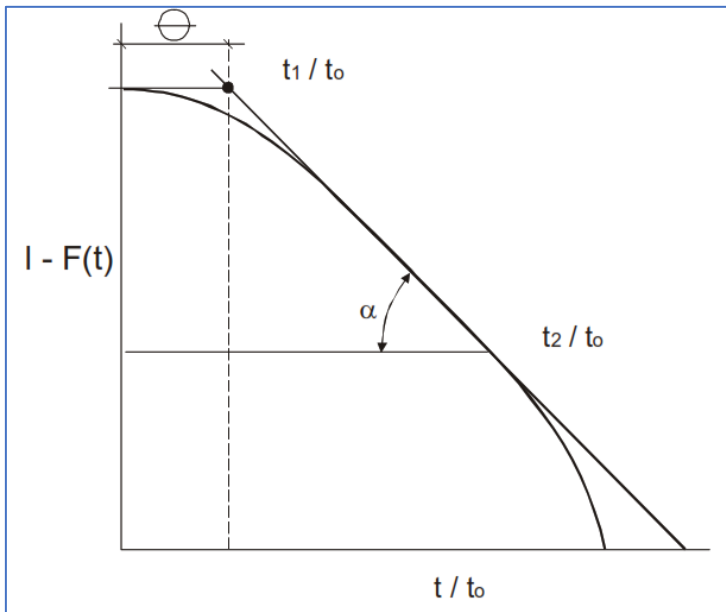
Reordenando términos y tomando los logaritmos de ambos términos, se llega a:

$$\log(1 - F(t)) = \frac{-\log e}{(1 - p)(1 - m)} * \left[\frac{1}{t_0} - p(1 - m) \right] \quad (28)$$

Que corresponde a la ecuación de una línea recta (figura 5), cuya pendiente está dada por:

$$\tan \alpha = \frac{\log e}{(1 - p)(1 - m)} \quad (29)$$

Figura 5: Curva de 1-F(t) cantidad de trazador que permanece en el reactor.



Fuente: (PÉREZ, J. 1992).

Multiplicando y dividiendo para p y sustituyendo el valor de $\text{Log } e = 0,435$, en la ecuación (28) se obtiene:

$$\tan \alpha = \frac{0.435p}{p(1 - p)(1 - m)} \quad (30)$$

Lo que hace:

$$\theta = p(1 - m) \quad (31)$$

Reemplazando en la ecuación (30) y reordenando, tenemos:

$$p = \frac{\theta * \tan\alpha}{0.435 + \theta * \tan\alpha} \quad (32)$$

De la ecuación (30) se puede deducir que el volumen de espacios muertos será igual a:

$$m = 1 - \frac{\theta}{p}$$

Y el flujo mezclado M será igual a:

$$M = 1 - p$$

Los valores de las incógnitas θ y $\tan \alpha$ se obtienen al trazar la curva de $\text{Log}1 - F(t)$ (figura 5), donde:

$$\theta = \frac{t_1}{t_0} \quad (33)$$

$$\tan \alpha = \frac{1}{\frac{t_1 - t_2}{t_0 - t_0}} \quad (34)$$

Ha sido práctica común establecer la eficiencia hidráulica de un reactor analizando la tendencia de la curva de concentración del trazador y relacionar sus diferentes parámetros con condiciones de flujo (PÉREZ, J. 1992).

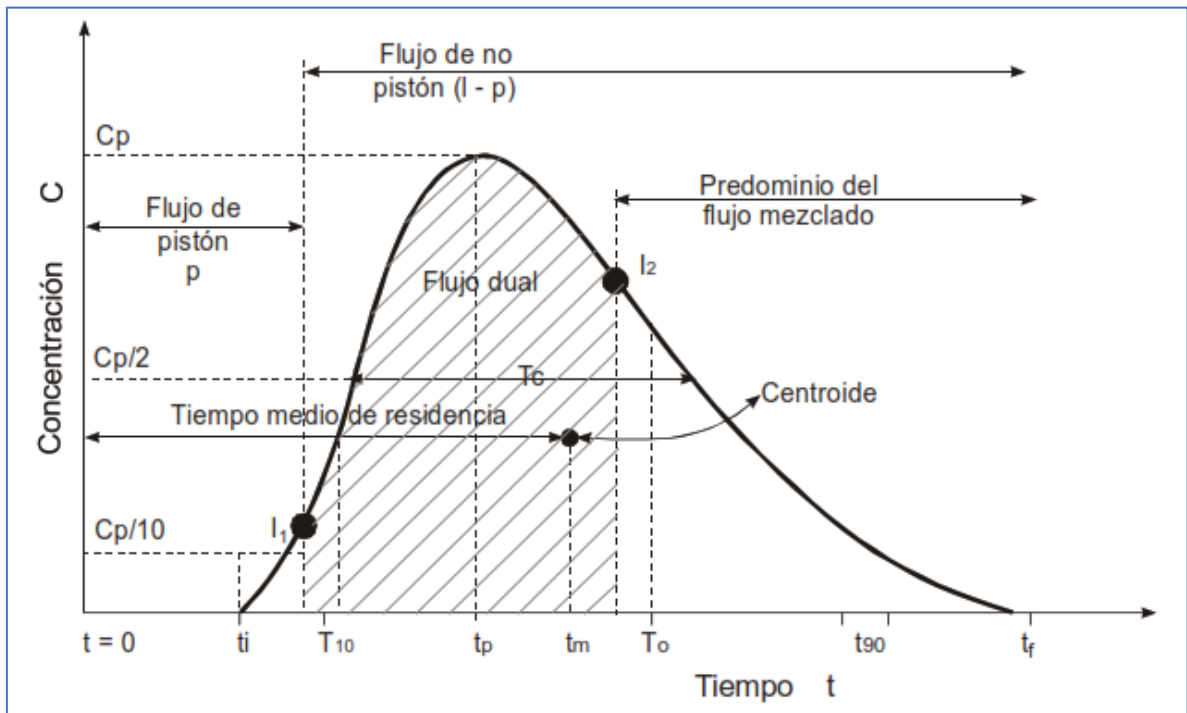
b. Análisis de datos

Análisis de la curva de tendencia de concentración del trazador

Se indica que ha sido práctica común establecer la eficiencia hidráulica de un reactor, analizando la tendencia de la curva de concentración del trazador y relacionando sus diferentes parámetros con condiciones de flujo (CEPIS, 2004)

Al aplicar trazadores a un reactor y analizar las muestras de agua tomadas a la salida, se obtiene una serie de valores de concentración que aumenta con el tiempo hasta llegar a un máximo y luego disminuye progresivamente, originando una curva que se observa en la siguiente figura.

Figura 6: Concentración del trazador en el efluente de un reactor



Fuente: (PÉREZ, J. 1992)

Existen los siguientes parámetros principales:

t_i = Tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente.

t_{10} = Tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total del trazador.

t_p = Tiempo modal, correspondiente a la presentación de la máxima concentración.

t_m = Tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de la cantidad total del trazador.

t_o = Tiempo medio de retención o tiempo teórico de retención = V/Q

t_{90} = Tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total del trazador.

t_f = Tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador el floculador, sedimentador.

C_o = Concentración inicial.

C_p = Concentración máxima a la salida.

Se pueden utilizar los siguientes criterios para analizar los resultados obtenidos de la prueba de trazadores:

d.1. Cortocircuitos hidráulicos grandes. Es igual a 1 para flujo de pistón y 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).

$$t_i / t_o \quad (35)$$

d.2. Si la relación es menor que la unidad (1), existen cortocircuitos hidráulicos. Si es mayor hay errores experimentales o existen zonas en donde el trazador ha quedado retenido durante cierto tiempo (espacios muertos), y luego ha ido saliendo lentamente, con lo que la rama descendente de la curva presente una forma alargada que desplaza el centroide del área y aumenta el valor de t_m , haciendo que $t_m > t_o$.

$$t_m / t_o \quad (36)$$

d.3. Indica la relación de flujo pistón y flujo mezclado. Cuando es igual a 1, existe únicamente flujo pistón y si es igual a 0 flujo mezclado, cuando la relación t_p / t_o se aproxima a 1 y $t_i / t_o > 0,5$ se puede concluir que existe predominio de flujo pistón y cuando se aproxima a 0, existe predominio de flujo mezclado.

$$t_p / t_o \quad (37)$$

d.4. Está relacionado en general con la difusión debida a corrientes de inercia (turbulencia). Es igual al cociente ($\Delta t_o / t_o$) (razón de tiempo de inyección) para el flujo estable ideal y aproximadamente del orden de 0,7 para flujo mezclado.

$$t_c / t_o \quad (38)$$

d.5. Está relacionado con las características de inercia turbulentas y de recirculación grande. Es igual al cociente ($\Delta t_o / t_o$) para el flujo estable ideal y del orden de 2,3 para el flujo mezclado ideal.

$$t_b / t_o \quad (39)$$

d.6. 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.

$$e = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_i)}{t_o} \quad (40)$$

d.7. Índice de Morrill.

Este autor encontró que al acumular los datos sobre cantidad de trazador que pasa, expresado en porcentajes y dibujados en papel que tenga escala de probabilidades en las abscisas y escala logarítmica en las ordenadas para diferentes tiempos, se obtenía aproximadamente una línea recta.

El segmento comprendido entre el 10% y el 90 % es el más regular y por eso Morrill sugirió que la relación entre uno y otro se tomara como índice de depresión así:

$$\text{Índice de Morrill} = \frac{\text{Tiempo en que pasa el 90\%}}{\text{tiempo que pasa el 10\%}} \quad (41)$$

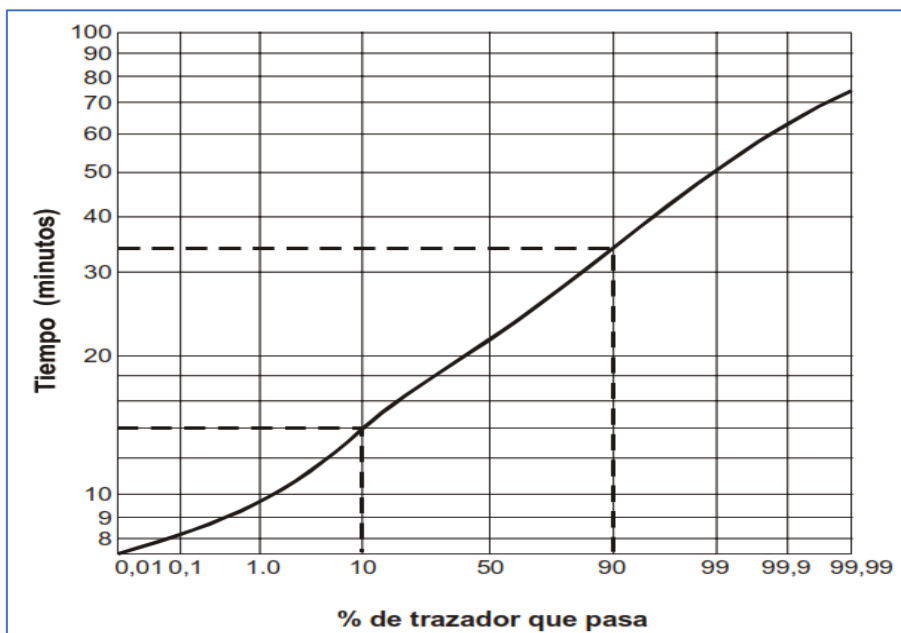


Figura 7: Índice de Morrill

Fuente: (PÉREZ, J. 1992)

Si todo el flujo fuera pistón, la curva sería curva horizontal y el índice de Morrill sería 1, pues todo el trazador saldría en el tiempo $t = t_0$ y no saldría antes. En cambio, a medida que hay más proporción de flujo mezclado, aumenta el ángulo que la curva hace con la horizontal pues hay una distribución más amplia del tiempo de retención.

El estudio de la totalidad de la curva puede suministrar una información más completa que la de las tendencias centrales.

Generalmente, el solo hecho de observar la forma que toma la curva de trazadores, da una primera indicación del comportamiento hidráulico del reactor que se estudia.

El flujo de pistón puro, como se muestra en la figura 6, viene representado por el tiempo que transcurre hasta que aparece el trazador. Algunos autores como Hirsch, considera que este tiempo se puede tomar en el punto de inflexión I_1 , cuando la curva cambia de cóncava a convexa.

De aquí en adelante, el flujo debe considerarse como no de pistón. Entre dicho punto y el punto de inflexión I_2 en la rama descendente, el flujo es dual (pistón y no pistón combinado). A partir del segundo punto de inflexión, el flujo tiene un carácter predominantemente mixto.

TRAZADORES PARA EVALUAR REACTORES

En plantas de tratamiento su uso es muy útil para determinar la distribución del flujo en unidades paralelas y evaluar las condiciones hidráulicas. En la actualidad estos ensayos se utilizan principalmente para determinar los tiempos reales de retención y sus principales características concomitantes: tipos de flujo, espacios muertos y cortocircuitos hidráulicos en unidades de tratamiento como mezcladores rápidos, floculadores, sedimentadores, así como en modelos de reactores en etapa de diseño para conocer su comportamiento hidráulico y deficiencias en forma previa a su construcción, lo cual es de enorme utilidad práctica.

Un ensayo de trazadores consiste en agregar la sustancia trazador en el afluente del tanque o reactor que se quiere analizar, con una concentración conocida y determinando a la salida la forma como dicha concentración se distribuye a través del tiempo (ROJAS, R. 1994).

Para que una sustancia se considere ideal se debe cumplir los siguientes requerimientos:

- De fácil manejo y detención
- No debe afectar el agua evaluada
- Tiene que ser químicamente estable
- De fácil acceso económico
- Debe ser soluble en el agua a ser evaluada a largo plazo

a. Tipo de trazadores

Sales

Una de las sales utilizadas comúnmente es NaCl, su facilidad de manejo, bajo costo, alta solubilidad en agua ($S=50\text{mg/l}$), fácil de detección y fácil acceso lo hacen ideal para ser utilizado como trazador.

Los valores de conductividad, registrados en los ensayos con trazador, pueden transformarse a concentraciones con la siguiente ecuación:

$$\text{Concentración} = K * \text{Conductividad}$$

Otras sales utilizadas pueden ser F^+ , NO_3 de Li o Na.

Soluciones colorantes

Soluciones de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ son utilizados en concentraciones controladas debido a su toxicidad en humanos.

El análisis colorimétrico es empleado para detectar este tipo de trazadores y su concentración es determinada a través de una curva de calibración.

Tintas fluorescentes

Estas tintas absorben luz a una cierta longitud de onda y emitir a otra, entre los más utilizados están: Fluoresceína, Pontancyl Rosado B, Rodamina B y Rodamina WT. Para su análisis se necesita un fluorómetro, cuya medida es proporcional a la concentración del trazador.

Radiactivos

Son sustancias que necesitan ser activados, de tal manera que emitan radiación alfa, beta o gamma generando átomos y radioisótopos en el medio a ser analizados, los trazadores mayormente utilizados son: ^{192}Au , ^{24}Na , ^{58}Fe , ^{27}Mg , ^{82}Br , ^{113}In (Rojas Vargas, 1994)

Antes de elegir el tipo de trazador que se va a utilizar, se debe verificar la concentración de estas sustancias en el agua cruda y seleccionar aquellas que se presenten en concentraciones constantes o muy bajas.

Es conveniente, además, escoger como trazador aquella sustancia que no reaccione con los compuestos que existen en el agua. Por tanto, la concentración total que se determine

a la salida será sensiblemente igual a la que se aplique a la entrada. Esta es la razón por la cual elementos como el cloro son malos trazadores.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, resulta muy común utilizar como sustancia trazadora en las evaluaciones de plantas de tratamiento de agua el ion cloruro obtenido de la aplicación del cloruro de sodio. El cloruro de sodio o sal de mesa o cocina es de fácil obtención y bajo costo. Asimismo, la determinación de la concentración a la salida del reactor es rápida y fácilmente medida a través de la conductividad.

c. Formas de aplicación de trazadores

La aplicación de trazadores puede hacerse de dos maneras distintas:

- En forma instantánea.
- En forma continua.

Dosificación instantánea

Se aplica una concentración (C_0) a la entrada de la unidad en evaluación en un tiempo muy corto, inferior a $1/30$ del tiempo teórico de retención (t_0) y en un punto tal que se mezcle instantáneamente con la masa de agua afluyente de la unidad que se piensa analizar.

En la dosificación instantánea, la concentración (C_0) que se escoja debe ser tal que se pueda determinar con facilidad en el agua. Para el caso del uso del ion cloruro como trazador, es común usar concentraciones de entre 30 y 50 mg/l.

La cantidad de trazador P (kg) que se necesita añadir al reactor en evaluación está dada por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{V * K * C_0}{1000 * I} \quad (42)$$

Donde:

P = peso del trazador por añadir al reactor, kg

V = volumen útil del reactor, m^3

K = constante de corrección.

C_0 = concentración, mg/L o g/m^3

I = grado de pureza del trazador, fracción de la unidad.

$$K = \frac{\text{peso del NaCl}}{\text{peso de Cl}} = \frac{23 + 35.5}{35.5} = 1.65$$

Dosificación continua

Se aplica la concentración (C_0) continuamente, por un tiempo no menor de tres veces el periodo de retención teórico (t_0), y luego se interrumpe bruscamente la dosificación.

La forma continua tiene la ventaja de permitir establecer comparaciones entre las curvas que se presentan a la entrada del trazador (cuando se inicia la dosificación) y al final (cuando el proceso se paraliza).

La cantidad de trazador P (kg/h) que se necesita añadir al reactor en evaluación está dada por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{Q * K * C_0}{1000 * I} \quad (43)$$

Donde:

P = peso del trazador por añadir al reactor, kg/h

Q = caudal de la unidad por evaluar, m^3/s .

K = constante de corrección.

C_0 = concentración, mg/L o g/m^3

I = grado de pureza del trazador, fracción de la unidad.

a. Limitaciones de las pruebas de los trazadores

Las pruebas de trazadores son muy útiles para conocer cómo se desplazan las diferentes masas de agua dentro de los floculadores y sedimentadores, pero los datos obtenidos se

refieren solamente al momento en que se hace la prueba, que no necesariamente representa el comportamiento promedio.

Por otra parte, tampoco dicen nada sobre la eficiencia en la desestabilización o remoción de partículas, pues estos procesos dependen no solo de las características hidráulicas de los floculadores, sedimentadores sino también de las químicas.

Es importante recalcar que este tipo de análisis no determina tampoco las trayectorias de las partículas, de flujo, o de como este se distribuye en el reactor, indicando el tiempo de permanencia, pero no su trayectoria (PEREZ, J. 1992).

Además, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones para obtener resultados significativos:

- El flujo debe ser constante durante la realización del ensayo.
- Si el reactor contiene lodos depositados, puede producir interferencias, especialmente en la comprobación de las ecuaciones de balance de masas, por lo cual deberá ser previamente limpiado.
- De preferencia conviene estabilizar el reactor para evitar interferencias, para lo cual es apropiado dosificar continuamente pequeñas dosis de trazador por un periodo de tiempo igual al del ensayo, antes de la evaluación.
- El uso de altas concentraciones de trazador podría producir corrientes cinéticas por variación de densidad, lo que daría resultados erróneos, por lo cual es preferible el uso de métodos de dosificación continua o con bajas concentraciones.
- La variación de la temperatura del medio ambiente o del agua ocasiona alteraciones en los resultados al producir corrientes térmicas, cuyos efectos se deben considerar. Este fenómeno produce muy marcadas variaciones en los ensayos de trazadores.
- Una solución aproximada, tradicionalmente usada en la aplicación del modelo simplificado de Wolf y Resnick en estas circunstancias, consiste en ajustar una línea tangente por la parte recta de la curva. La pendiente de esta recta es la $\tan \alpha$ y su intersección con el valor de 1,0 en las ordenadas permite calcular el valor de θ . Con estos valores aproximados se pueden Aplicar las ecuaciones correspondientes.

Cálculo del caudal utilizando trazadores

La sustancia trazadora más económica es la sal común. Cuando el trazador se inyecta instantáneamente en la corriente, la cantidad requerida no es muy importante y su detección por el método de conductividad es relativamente sencillo, grado de disolución 360 gramos por litro (LUENGAS, SB. 1990).

La condición fundamental para la selección de los emplazamientos para la medición del caudal mediante el método por dilución, es el de que se produzca una mezcla homogénea de la solución inyectada con el agua de la corriente en un tramo relativamente corto de un canal. Calculo del caudal por el método de inyección continua.

$$Q = \frac{Q_{tr} * C_1}{C_2} \quad (44)$$

En el caso de que la corriente presente algún contenido inicial de la sustancia trazadora la formula se modifica en:

$$Q = q * \frac{(C_1 - C_2)}{(C_2 - C_0)} \quad (45)$$

Calculo del caudal por el método de inyección instantánea

$$Q = \frac{V_1 * C_1}{\int_0^t C_2 * dt} \quad (46)$$

Donde:

Q_{tr} = caudal continuo del trazador inyectado (L/s).

C_1 = Concentración de la solución inyectada (mg/L).

C_2 = Concentración obtenida en la sección de muestreo(mg/L).

q = caudal de la solución inyectada (L/s).

C_0 = Concentración presente del trazador en el flujo (mg/L).

V_1 = volumen de la solución inyectada (L).

t = Tiempo en que toda la solución cruza por el punto de muestreo (s).

2.3. TERMINOS BASICOS

Eficiencia: La eficiencia del sistema de tratamiento, se basa en lograr una determinada calidad de agua deseada, a menor costo de operación posible, también lo podemos definir como la maximización de la producción con un mínimo de insumos químicos utilizados para la obtención de una buena calidad de agua potable.

Flujo pistón: Se describe como aquel en el que todas las partículas de fluido que entran a la unidad permanecen en ella el mismo tiempo

Flujo de mezcla: Flujo mezclado es aquel en el que todo elemento que ingresa al reactor se dispersa inmediatamente.

Flujo no ideal: Este tipo de flujo corresponde a cualquier grado intermedio entre flujo a pistón y mezcla completa con otras posibles alteraciones como la presencia de zonas muertas, cortocircuitos hidráulicos, recirculación.

Agua potable: El agua potable se refiere a un tipo de agua a la cual se le realizan una serie de procedimientos para potabilizarla, para que la misma pueda ser consumida por los seres humanos sin ningún problema, ya que la misma tendrá un contenido de minerales equilibrado. Para que un agua sea considerada como potable, es necesario que la misma tenga un nivel de pH que oscila entre 6.5 y 6.9. El agua potable se caracteriza además porque se encuentra libre de organismos que puedan ser perjudiciales para la salud.

Turbiedad: a medida del grado de transparencia que pierde el agua o algún otro líquido incoloro por la presencia de partículas en suspensión. Cuanto mayor sea la cantidad de sólidos suspendidos en el líquido, mayor será el grado de turbidez. En potabilización del agua y tratamiento de aguas residuales, la turbidez es considerada como un buen parámetro para determinar la calidad del agua, a mayor turbidez menor calidad. Según la (OMS, 2008) la turbidez del agua para consumo humano no debe superar en ningún caso las 2 NTU, y estar idealmente por debajo de 1 NTU.

Retención Hidráulica: Es el tiempo que una unidad de fluido permanece en un recipiente, es decir, el tiempo que el líquido que entra en tu recipiente tarda en salir del mismo.

Gradiente hidráulico: Es la pérdida de energía experimentada por unidad de longitud recorrida por el agua; es decir, representa la pérdida o cambio de potencial hidráulico por unidad de longitud, medida en el sentido del flujo de agua.

Hidrolisis: Es una reacción química entre una molécula de agua y otra molécula, en la cual la molécula de agua se divide y sus átomos pasan a formar unión de otra especie química

Floculación: Es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado.

Agitación hidráulica: Movimiento obtenido al aprovechar la energía del agua para producir turbulencia.

Agitación mecánica: Movimiento obtenido mediante dispositivos mecánicos (paletas, aspas, etc.) para producir turbulencia.

Agua cruda: Agua que no ha sido sometida a proceso de tratamiento.

Carbón activado: Forma de carbón altamente adsorbente, usada para remover material orgánico disuelto causante del mal sabor, color y olor del agua.

Cortocircuito: Condición que ocurre en los tanques cuando parte del agua pasa a una velocidad mayor que el resto del fluido, disminuyendo el tiempo de residencia medio de la masa líquida en el reactor.

Difusor: Dispositivo para dispersar un fluido en otro.

Dosis óptima: Concentración que produce la mayor eficiencia de reacción en un proceso químico.

Efectividad: Es el equilibrio entre eficacia y eficiencia, es decir, es efectivo si es eficaz y eficiente.

Eficacia: Capacidad de lograr el efecto que se desea o se espera

Mezclador: Equipo para producir turbulencia en el agua.

Mezcla rápida: Agitación violenta para producir dispersión instantánea de un producto químico en la masa de agua.

Mezcla lenta: Agitación suave del agua con los coagulantes, con el fin de favorecer la formación de los flóculos.

Reactor: Estructura hidráulica el cual sigue un proceso químico, físico o .

Reactor de flujo de pistón: Aquel en que todas las partículas del fluido tienen igual tiempo teórico de detención.

Resalto hidráulico: Discontinuidad de la superficie del agua en la cual el flujo pasa de una manera abrupta de un régimen rápido (supercrítico) a un régimen tranquilo (subcrítico) y depende del número de Froude.

Tratamiento: Conjunto de operaciones y procesos que se realizan sobre el agua cruda, con el fin de modificar sus características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas, para hacerla potable de acuerdo a las normas establecidas.

Zonas muertas: Sitios en un reactor en donde no hay desplazamiento unidimensional de la masa de agua.

Ensayos con trazador: Pruebas en las que se emplean sustancias, con el fin de observar y estudiar el comportamiento hidrodinámico del fluido.

Polución del agua: Alteración de las características organolépticas, físicas, químicas o microbiológicas del agua como resultado de las actividades humanas o procesos naturales.

Prueba de jarras: Ensayo de laboratorio que simula las condiciones en que se realizan los procesos de oxidación química, coagulación, floculación y sedimentación en la planta.

Registro de control de calidad: Recopilación escrita de los resultados de los análisis del agua que se suministra a la población.

Vigilancia de la calidad del agua: Actividades realizadas por las autoridades competentes para comprobar, examinar e inspeccionar el cumplimiento del reglamento de la calidad del agua para consumo humano.

CAPITULO III. MATERIAL Y METODOS

3.1. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

La planta de tratamiento de agua potable está ubicada en la provincia de San Marcos, distrito Pedro Gálvez, el sector el calvario, el cual se encuentra en la parte alta de la ciudad de San Marcos a una altitud de 2358 m.s.n.m.

- **Ubicación geográfica**

Latitud: 7°19'45" S

Longitud: 78°10'01" W

- **Ubicación política del distrito Pedro Gálvez**

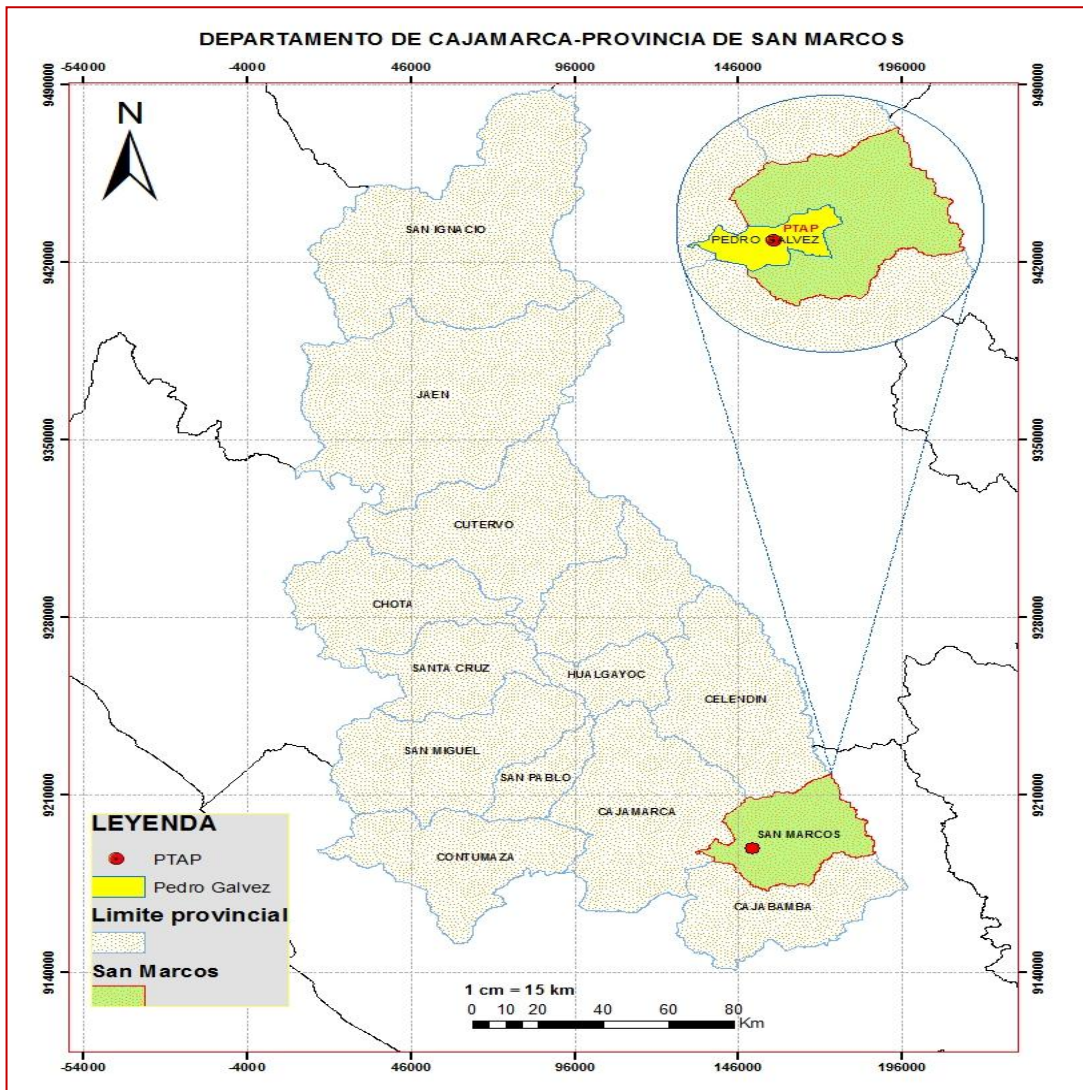


Figura 8: Ubicación política de la zona de estudio

3.2. MATERIALES Y EQUIPOS

Los materiales y equipos utilizados para la obtención de la información de campo y procesamiento de datos en el presente trabajo son los siguientes:

Materiales:

- Unidad de transporte
- Útiles de escritorio: Papel bond 75 g (A-4).
- Un equipo de computo
- Recipientes para toma de muestras

Equipos:

Topográficos

- Estación total
- GPS
- Wincha

Calidad de aguas

- Un medidor multiparámetro

Insumos:

- Cloruro de sodio (sal común)

3.3. METODOLOGIA

3.3.1. CALCULO DEL CAUDAL DE ENTRADA A LA PTAP

La entrada del agua a la PTAP se realiza por medio de una tubería de PVC de 6 pulgadas de diámetro que comunica cámara de entrada con mezcla rápida. Luego se encuentra un canal rectangular en el cual se han realizado los ensayos necesarios para determinar su caudal. La sección es de 0,37 m de ancho, altura de 0,53 m y una longitud de 4,00 m. Los operarios no realizan la medición del caudal de entrada, debido a que no cuentan con las estructuras y/o equipos en condiciones para lograr este fin.

Cálculo del caudal de entrada a ala PTAP con el método del flotador

Con base a las medidas anteriores se calculó el caudal de entrada a la PTAP, para la determinación del tirante se registró durante 10 horas del día, variando con intervalos de 30 minutos, para así tener una idea del comportamiento del caudal de entrada a lo largo de las 10 horas.

El tiempo se calculó, registrando el tiempo de recorrido que una bola de icopor gastó en desplazarse desde la salida del canal hasta el final, resultados registrados a partir la segunda columna., mientras que la velocidad se calculó dividiendo la longitud establecida en el canal entre el tiempo de desplazamiento.

Tabla 10: Registro de tiempos de desplazamiento del icopor para una longitud de 4m.

Prueba N°	Tiempo (s)						
	05/01/2018	26/01/2018	16/02/2018	09/03/2018	30/03/2018	20/04/2018	18/05/2018
1	29.31	28.68	27.03	28.63	26.39	33.41	25.47
2	30.23	29.45	28.31	29.36	28.02	27.13	29.04
3	27.45	28.72	26.45	40.67	23.13	25.14	27.33
4	28.71	27.76	28.47	37.45	26.33	26.91	29.32
5	28.42	28.45	29.62	28.34	31.72	32.34	23.42
6	27.56	29.67	32.46	38.46	33.36	28.12	26.38
7	28.36	29.41	33.21	43.45	33.19	28.13	26.67
8	30.21	27.31	45.12	37.46	24.77	26.90	29.35
9	28.46	29.69	27.46	45.23	31.92	27.66	28.94
10	34.23	27.97	28.06	43.23	29.44	29.42	27.55

Con la velocidad promedio del canal y la sección del canal se procede a calcular el caudal de ingreso a la PTAP monitoreada durante 10 horas, lo que permite tener un dato más real

del caudal de ingreso. La Tabla 11 representa la variación del tirante a lo largo de las 10 horas de registro.

Tabla 11: Registro de los tirantes en el canal rectangular

Hora	Altura del tirante (m)						
	05/01/2018	26/01/2018	16/02/2018	09/03/2018	30/03/2018	20/04/2018	18/05/2018
8:00 a.m	0.50	0.49	0.47	0.49	0.46	0.46	0.44
8:30 a.m	0.48	0.49	0.48	0.48	0.45	0.46	0.44
9:00 a.m	0.49	0.49	0.46	0.49	0.46	0.47	0.44
9:30 a.m	0.48	0.47	0.48	0.47	0.44	0.45	0.46
10:00 a.m	0.49	0.48	0.47	0.48	0.44	0.46	0.46
10:30 a.m	0.48	0.47	0.49	0.49	0.44	0.47	0.45
11:00 a.m	0.49	0.48	0.47	0.47	0.45	0.47	0.45
11:30 a.m	0.49	0.48	0.47	0.48	0.45	0.45	0.47
12:00 p.m	0.48	0.49	0.48	0.49	0.45	0.47	0.47
12:30 p.m	0.50	0.48	0.46	0.48	0.45	0.47	0.46
1:00 p.m	0.50	0.49	0.46	0.48	0.46	0.46	0.47
1:30 p.m	0.50	0.49	0.47	0.48	0.46	0.46	0.47
2:00 p.m	0.49	0.48	0.47	0.48	0.45	0.47	0.45
2:30 p.m	0.48	0.47	0.48	0.47	0.44	0.48	0.45
3:00 p.m	0.47	0.48	0.48	0.47	0.43	0.48	0.45
3:30 p.m	0.48	0.46	0.47	0.47	0.43	0.48	0.46
4:00 p.m	0.47	0.46	0.48	0.48	0.43	0.46	0.47
4:30 p.m	0.47	0.48	0.46	0.48	0.43	0.47	0.47
5:00 p.m	0.49	0.46	0.48	0.49	0.43	0.47	0.47
5:30 p.m	0.48	0.47	0.47	0.49	0.44	0.46	0.47
6:00 p.m	0.49	0.49	0.48	0.49	0.45	0.46	0.47

Cálculo del caudal de entrada a la PTAP con trazador.

Para la medición de caudal por método químico, el utilizar el cloruro de sodio (NaCl), tiene la ventaja de ser detectado en una corriente de agua casi al instante mediante la utilización de un medidor de la conductividad, permitiendo de esta forma estimar el caudal. Por otra parte, es un método que puede resultar económico si se compara con otras metodologías que requieren de otro tipo de trazadores y sobre todo del instrumental requerido para esas determinaciones. Es por ello que la metodología para la estimación del caudal aquí presentada, puede ser de mucha utilidad para caudales pequeños. La preparación de la solución a verter en el canal rectangular se preparó en un volumen de cuatro litros agregando 480 g de sal común, luego medimos la conductividad eléctrica de la solución dando un valor de 176.15 mS/cm. Una vez vertida la solución en el canal se procede a tomar muestras de agua en el efluente y posteriormente con el conductímetro

damos lectura a cada muestra recolectada, los datos obtenidos se representan en la siguiente tabla.

Tabla 12: Datos obtenidos de la prueba con trazadores para determinar el caudal

Muestra N°	Tiempo (s)	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
0	0	275
1	5	275
2	10	465
3	15	734
4	20	856
5	25	1320
6	30	1740
7	35	1216
8	40	823
9	45	642
10	50	456
11	55	432
12	60	386
13	65	342
14	70	275
15	75	275

3.3.2. LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO Y DESCRIPCION DE LA PTAP

La PTAP ha sido construida en el año 1995 y en su totalidad es de concreto armado, con accesorios en acero y PVC. Las estructuras involucradas en el tratamiento son: mezcla rápida, canal parshall, pre-sedimentador, floculador, filtración y proceso de desinfección. Su diseño ha sido elaborado para un caudal de 15 lps, actualmente está operando con un caudal promedio de 23.11 lps, dato que se registró durante los días de estudio, la planta actualmente no cuenta con un medidor de caudal esto implica un mal manejo de los coagulantes. Para las labores en la planta cuenta con 3 personas y tienen 3 turnos al día, en la cual asisten una persona por turno. Los operarios realizan diferentes actividades propias de la planta tales como: mantenimiento, dosificación de coagulante y dosificación de cloro, todos los días. Los operadores carecen de capacitaciones en cuanto al mantenimiento y manejo de los insumos el cual se aplica sin criterios técnicos.

Cámara de entrada

la cámara de entrada es abastecida por una tubería de PVC de 6" y sus dimensiones son de 0.6x0.6m con una profundidad de 1.2 m, también cuenta con una compuerta metálica de 0.60x0.8m el cual se utiliza para evacuar el caudal en demasía.



Figura 9: Cámara de entrada

Canal parshall

El canal parshall se hizo con la finalidad de cuantificar el caudal y agregar la concentración de sulfato de aluminio, pero actualmente esta estructura está trabajando ahogado y no genera ninguna turbulencia para que la adición de coagulante se mezcle correctamente, la adición de coagulante en esta estructura se lo hace de manera superficial y sin tener la consideración del caudal de entrada; los operarios en épocas de lluvia agregan hasta 10 kg/h en promedio de sulfato de aluminio y la variación de esta depende del criterio visual de cada operador.

La adición del coagulante se incorpora en la garganta del canal parshall mediante una manguera de polietileno de 1/2", en el cual tampoco se tiene un equipo para el control del caudal de aplicación por lo que este criterio queda totalmente a disposición del operador.



Figura 10: Canal parshall

Caseta de dosificación de coagulante

La caseta para la dosificación es de 4.0m x 5.35m en ella se almacena el sulfato de aluminio y también se prepara solución de coagulante, para ello se utiliza un depósito de fibra de vidrio de 1,5m³ aproximadamente y la agitación de la solución se realiza por medios mecánicos utilizando una varilla de madera.



Figura 11: Depósito para preparar la solución de coagulante

Pre-sedimentador

El pre-sedimentador está ubicado después de la incorporación de coagulante, con el fin de mejorar el proceso de sedimentación y con ello reducir los sólidos disueltos. Las dimensiones del pre-sedimentador son L=5.50 m, A= 5.00m y una altura de 1.00m, también cuenta con una compuerta metálica de 0.50x0.60m para la evacuación de lodos.



Figura 12: Pre-sedimentador

Floculador

Esta dividido en dos cámaras y sus dimensiones de la primera cámara son 7.40 metros de largo por 2,22 metros de ancho y de la segunda es 7.40 metros de largo y 2,32 metros de ancho y una altura promedio de 1,14 metros de lámina de agua. El número de tabiques en el primer tramo son 33 con una separación entre tabiques de 0.14 metros y en los extremos de 0.22 metros. Para el segundo tramo el número de tabiques son 25 con una separación entre tabiques de 0.19 metros y en los extremos de 0.32 metros.

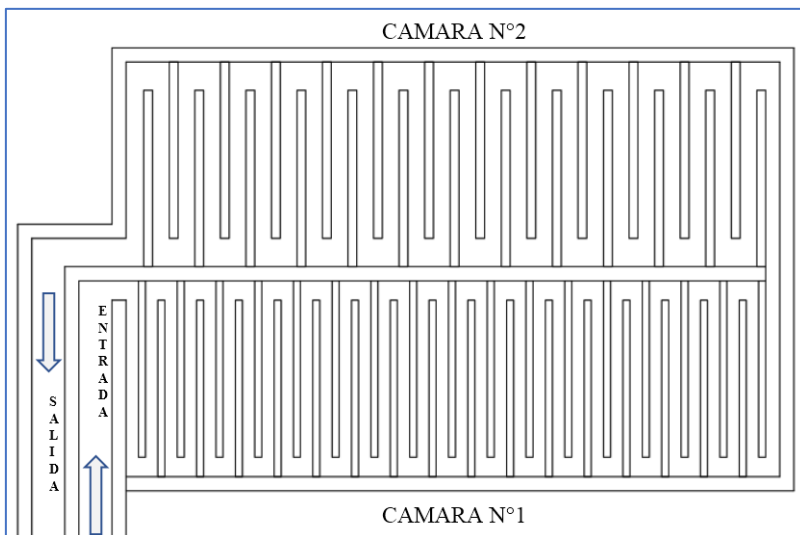


Figura 13: Detalle geométrico del floculador horizontal

Sedimentador

Es un tanque rectangular con una capacidad de 111.97 m^3 , de flujo horizontal y cuenta con un tubo de descarga y purga de 6" en PVC. El agua ingresa por un canal de sección $0.37 \times 0.53 \text{ m}$, posteriormente pasa por cuatro vertederos rectangulares que fijan el agua en el sedimentador, luego el agua se mantiene por un periodo de tiempo para lograr la sedimentación de los flocs y así permitir la remoción de los mismos.

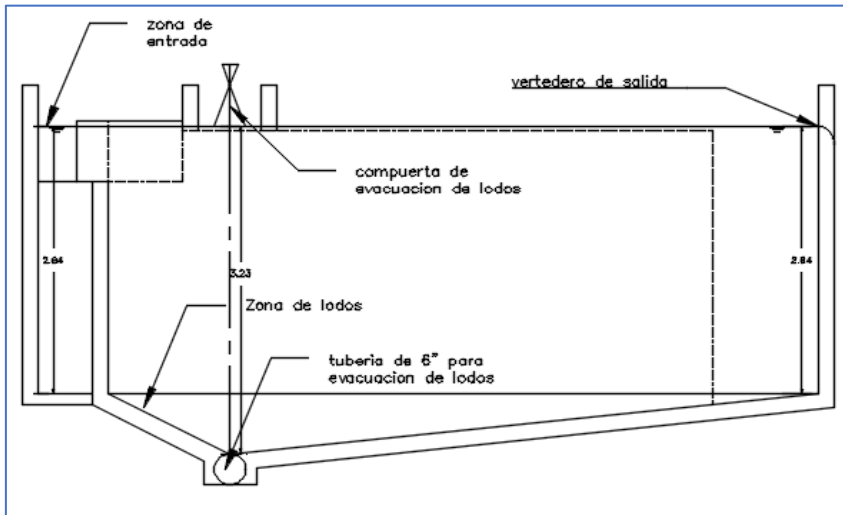


Figura 14: Perfil del sedimentador

Filtro

La planta cuenta con dos filtros lentos de flujo vertical descendentes, cada uno cuenta con $L=8.78 \text{ m}$, $A=7.92$ y una altura de 1.5 m , con lecho filtrante conformado por arena y grava. La primera capa de 15 cm está conformada por gravilla de $\frac{1}{2}''-1''$, la segunda capa de 10 cm por gravilla de $\frac{1}{4}''- \frac{1}{2}''$, y la capa superior de 50 cm está conformado por arena.



Figura 15: Filtro lento

Cloración

La planta cuenta con un sistema de cloración que es el granular y su aplicación de este es por gravedad, la preparación del hipoclorito de calcio se hace en un recipiente de 40 litros para una cantidad de 4kg de desinfectante. Esta solución se vierte un día después de su preparación a un recipiente de 200 litros del cual se aplica directamente al reservorio, y la cantidad abastecerá para todo un día.

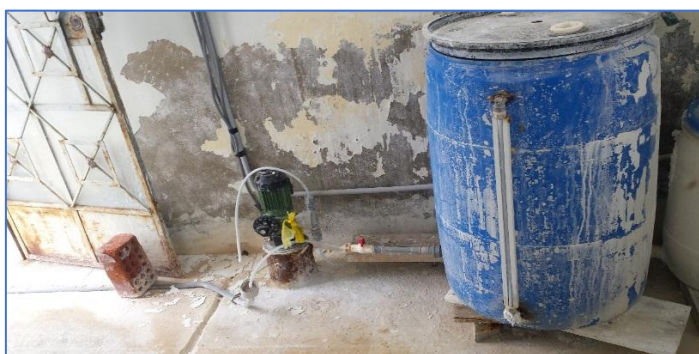


Figura 16: Sistema de cloración

3.3.3.ZONAS DE MUESTREO

Las zonas de muestreo se definieron acorde a las estructuras a ser evaluadas para ello se tomaron muestras de agua al ingreso y salida de cada una de las estructuras en estudio (pre-sedimentador, floculador, sedimentador, filtro lento) con los datos obtenidos del análisis fisicoquímico de las muestras se estimará la eficiencia de las estructuras en función a la remoción de turbiedad y también se hará una comparación con el reglamento de calidad del agua para consumo humano.

3.3.4.ANALISIS FISICOQUIMICO DEL AFLUENTE Y EFLUENTE

Los resultados del análisis fisicoquímico obtenidos en el laboratorio de calidad de agua de la empresa SEDACAJ, se representan en el anexo A, donde M1 representa afluente del pre-sedimentador, M2 afluente del floculador, M3 afluente del sedimentador, M4 afluente del filtro lento, M5 efluente del filtro.

Determinación de la Eficiencia Total de la PTAP

Para la determinación de la eficiencia de la planta de tratamiento de agua cruda, en función de las eficiencias parciales se calculó mediante un promedio ponderado, para ello se utilizó la turbiedad promedio correspondiente a la entrada de cada una de las

estructuras en estudio, luego la cantidad encontrada se multiplicó por la eficiencia de la estructura correspondiente y con ello determinó la eficiencia total.

$$Eft = \frac{(TPS * EPS) + (TFL * EFL) + (TS * ES) + (TF * EF)}{(TPS) + (TFL) + (TS) + (TF)}$$

Donde:

Eft: Eficiencia total de la PTAP

TPS: Turbiedad promedio a la entrada del pre-sedimentador (UNT)

EPS: Eficiencia del pre-sedimentador

TFL: Turbiedad promedio a la entrada del floculador (UNT)

EFL: Eficiencia del floculador

TS: Turbiedad promedio a la entrada del sedimentador (UNT)

ES: Eficiencia del sedimentador

TF: Turbiedad promedio a la entrada del filtro (UNT)

EF: Eficiencia del filtro

3.3.5. TIEMPO DE RETENCION REAL CON CLORURO DE SODIO (NaCl)

En el desarrollo de esta investigación, se realizaron ensayos con trazadores, usando como trazadora sal común o sal de mesa (NaCl), estos ensayos fueron realizados con el objeto de obtener las curvas de distribución de tiempos de residencia en el pre-sedimentador, floculador hidráulico y sedimentador, basándose en la medición de la conductividad del fluido efluente cuando se vierte una cantidad conocida de sal común y además haber determinado su conductividad inicial. La cantidad de sal utilizado para cada estructura ha sido de 12 kg, disueltos en dos recipientes de 18 l cada uno. Luego del vertido de la solución se empieza a tomar muestras en el efluente con el fin de determinar la variación de la conductividad.

CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSION

Cálculo del caudal de ingreso a la PTAP

- **Mediante toma de datos de tirante y velocidad en el canal rectangular**

De la tabla (10) obtenemos una velocidad media, dando un valor numérico de 30.08 s para una distancia de cuatro metros, la tabla (11) nos da un tirante medio de 0.47 m, con estos resultados se calcula el caudal teniendo en cuenta que la base del canal es de 0.37m, siguiendo el procedimiento para la determinación del caudal concluimos que el caudal de ingreso promedio a la PTAP es de 23.11 L/s.

- **Mediante trazador (NaCl)**

Procesamiento de datos de la tabla (12) para la determinación del caudal

Tabla 13: Procesamiento de datos para calcular el caudal utilizando NaCl

Muestra N°	Tiempo (s)	Conductividad (μS/cm)	Δt (s)	Δ Conductividad (μS/cm)	C*Δt (μS*s/cm)
0	0	275	0	0	0
1	5	275	5	0	0
2	10	465	5	190	950
3	15	734	5	459	2295
4	20	856	5	581	2905
5	25	1320	5	1045	5225
6	30	1740	5	1465	7325
7	35	1216	5	941	4705
8	40	823	5	548	2740
9	45	642	5	367	1835
10	50	456	5	181	905
11	55	432	5	157	785
12	60	386	5	111	555
13	65	342	5	67	335
14	70	275	5	0	0
15	75	275	5	0	0
				Σ	30560



Figura 17: Variación de la conductividad con respecto al tiempo para la determinación del caudal

Para la determinación del caudal hacemos uso de la ecuación (46) que corresponde al método de inyección instantánea.

$$Q = \frac{V1 * C1}{\int_0^t C2 * dt}$$

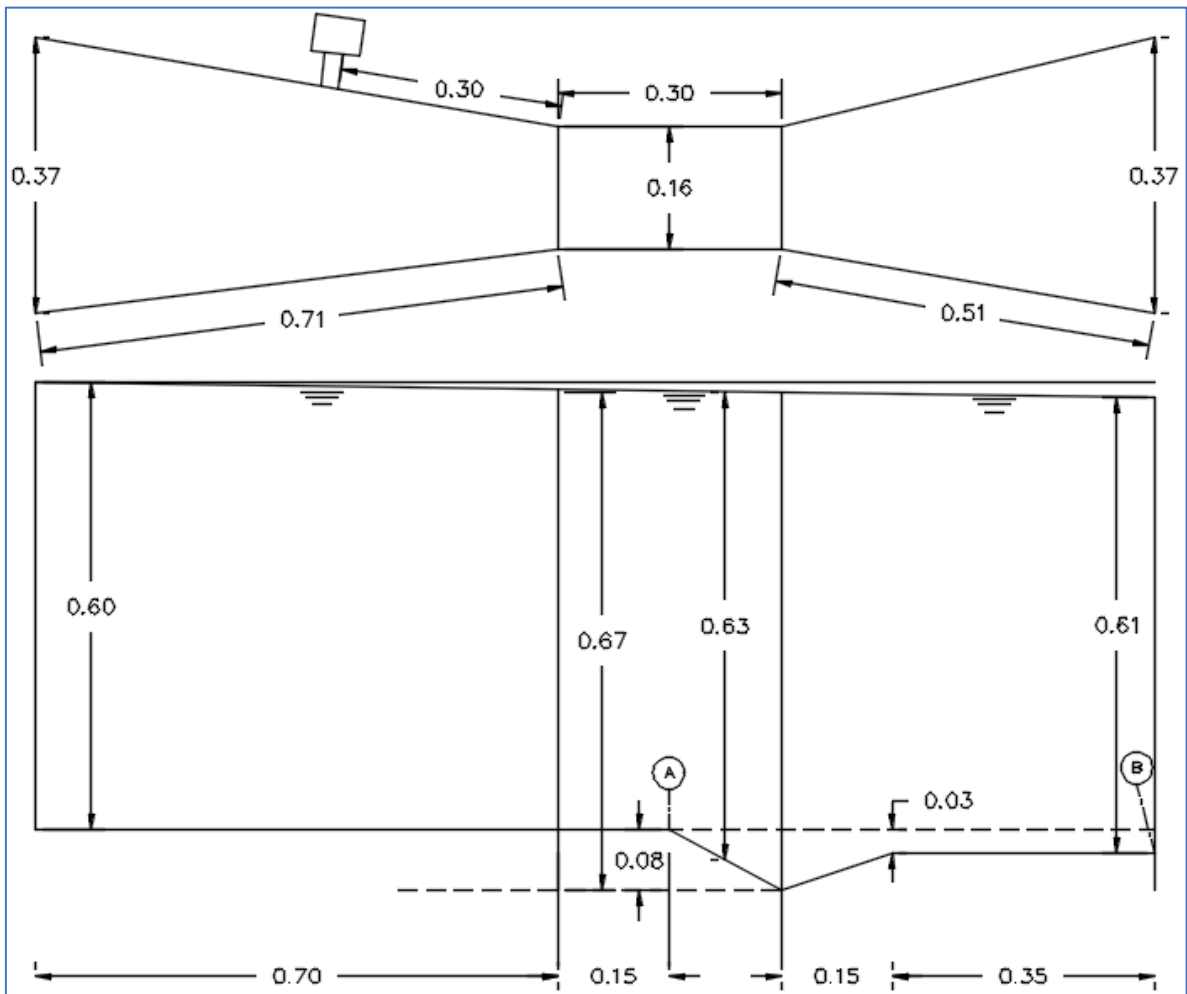
Procesando los datos obtenemos un caudal de 23.06 L/s. la determinación del caudal para los dos métodos no difieren en gran magnitud por lo tanto cualquiera de estos métodos puede utilizarse para determinar el caudal. Para los cálculos posteriores que involucran el caudal se tomara en cuenta el primer valor (23.11 L/s) valor encontrado con el registro de datos tanto para la velocidad como para el tirante en una sección determinada del canal rectangular.

Estimación de la eficiencia del mezclador hidráulico tipo canal parshall

De la tabla (3) encontramos la relación de la raíz cuadrada del peso específico con la viscosidad, para una temperatura de 16 °C, interpolando la tabla (3) tenemos que:

$$\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} = 2958.94$$

Figura 18: Geometría del canal parshall



Cálculo de la velocidad de flujo en la zona supercrítica (v_1) y subcrítica (v_2), como ya tenemos el caudal de entrada a la PTAP (23.11 L/s), se procedió a calcular el área hidráulica en la zona (1) y (2).

$$A_1 = h_1 * b_1 = 0.6 * 0.16 = 0.096m^2$$

$$A_2 = h_2 * b_2 = 0.61 * 0.37 = 0.2257m^2$$

$$V_1 = \frac{Q_e}{A_1} = 0.24 \text{ m/s}$$

$$V_2 = \frac{Q_e}{A_2} = 0.10m/s$$

Cálculo del tiempo de detención en la zona (A) y (B). para ello medimos la distancia entre los puntos de estudio y tenemos que ($L= 0.65 \text{ m}$).

$$T = \frac{2 * L}{V1 + V2} = \frac{1.30}{0.34} = 3.82 \text{ s}$$

Cálculo de la pérdida de carga entre la zona (A) y (B) con la ecuación (3).

$$hf = \frac{(h2 - h1)^3}{4 * h2 * h1} = \frac{(0.01)^3}{1.464} = 6.83 * 10^{-7} \text{ m}$$

Finalmente calculamos el gradiente de velocidad con la ecuación (2).

$$G = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} * \sqrt{\frac{hf}{T}} = 2958.94 * \sqrt{\frac{6.83 * 10^{-7} \text{ m}}{3.82 \text{ s}}} = 1.25 \text{ s}^{-1}$$

Comparado el resultado con lo que establece la norma OS. O20 el canal parshall como mezclador está trabajando deficientemente ya que para generar la mezcla se necesita que el gradiente de velocidad este en un rango de 20 a 70 s^{-1} . Además, no tiene las características que lo definen a un canal parshall haciendo las comparaciones respectivas para un parshall con ancho de garganta de 6" en la tabla 2 tenemos que no cumple con los criterios propuestos. la solución inmediata es levantar la cota de entrada de agua a la PTAP ya que la cota de entrada a la tubería que conduce a la planta esta 5m por encima de la cota de salida en la planta. Aprovechando este desnivel se debe construir un canal parshall que ayude a la planta tanto como mezclador de coagulantes así también como medidor de caudal.

Estimación de la eficiencia en la remoción de la turbiedad del pre-sedimentador

Con los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico de las muestras, calculamos la eficiencia en función de la remoción de los sólidos en suspensión con la siguiente expresión que viene a ser la ecuación (9). Para hacer este cálculo se determinó el promedio de la turbiedad de entrada y de salida de los registros de análisis fisicoquímico del agua durante 5 meses.

$$Ef = \frac{Tb - Ts}{Tb}$$

Reemplazando datos de los registros obtenidos del análisis fisicoquímico del agua para el pre-sedimentador tenemos que la eficiencia es de:

$$Ef = 45.20 \%$$

Este valor indica que el pre-sedimentador está trabajando deficientemente ya que la norma peruana establece un valor mínimo de 50%.

Análisis del tipo de flujo presentes en el pre-sedimentador

Tabla 14: Características del pre-sedimentador y del afluente

Parámetro	Valor
Caudal de ingreso (L/s)	23.11
Área del pre-sedimentador (m ²)	33.31
Altura promedio (m)	1.02
Volumen del pre-sedimentador (m ³)	33.98
Tiempo de detención teórico (min)	24.50
Conductividad del afluente (μS/cm)	275

Tabla 15: Prueba de trazadores en el pre-sedimentador

Muestra N°	Tiempo (min)	Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	T/T0	C-C0	$\Sigma(\text{C-C0})$	F(t)	1-F(t)
1	0	275		0	0	0	100.00
2	4	275	0.16	0	0	0	100.00
3	5	275	0.20	0	0	0	100.00
4	6	308	0.24	33	33	0.943	99.06
5	7	330	0.29	55	88	2.514	97.49
6	8	348	0.33	73	161	4.599	95.40
7	9	346	0.37	71	232	6.627	93.37
8	10	354	0.41	79	311	8.883	91.12
9	11	372	0.45	97	408	11.654	88.35
10	12	384	0.49	109	517	14.767	85.23
11	13	423	0.53	148	665	18.995	81.01
12	14	443	0.57	168	833	23.793	76.21
13	15	452	0.61	177	1010	28.849	71.15
14	16	460	0.65	185	1195	34.133	65.87
15	17	473	0.69	198	1393	39.789	60.21
16	18	498	0.73	223	1616	46.158	53.84
17	19	520	0.78	245	1861	53.156	46.84
18	20	493	0.82	218	2079	59.383	40.62
19	21	475	0.86	200	2279	65.096	34.90
20	22	438	0.90	163	2442	69.751	30.25
21	23	421	0.94	146	2588	73.922	26.08
22	24	423	0.98	148	2736	78.149	21.85
23	25	402	1.02	127	2863	81.777	18.22
24	26	392	1.06	117	2980	85.119	14.88
25	27	386	1.10	111	3091	88.289	11.71
26	28	375	1.14	100	3191	91.145	8.85
27	29	354	1.18	79	3270	93.402	6.60
28	30	346	1.22	71	3341	95.430	4.57
29	31	335	1.27	60	3401	97.144	2.86
30	32	322	1.31	47	3448	98.486	1.51
31	33	316	1.35	41	3489	99.657	0.34
32	34	287	1.39	12	3501	100.000	0
33	35	275	1.43	0	3501	100.000	0
34	38	275	1.55	0	3501	100.000	0
35	42	275	1.71	0	3501	100.000	0

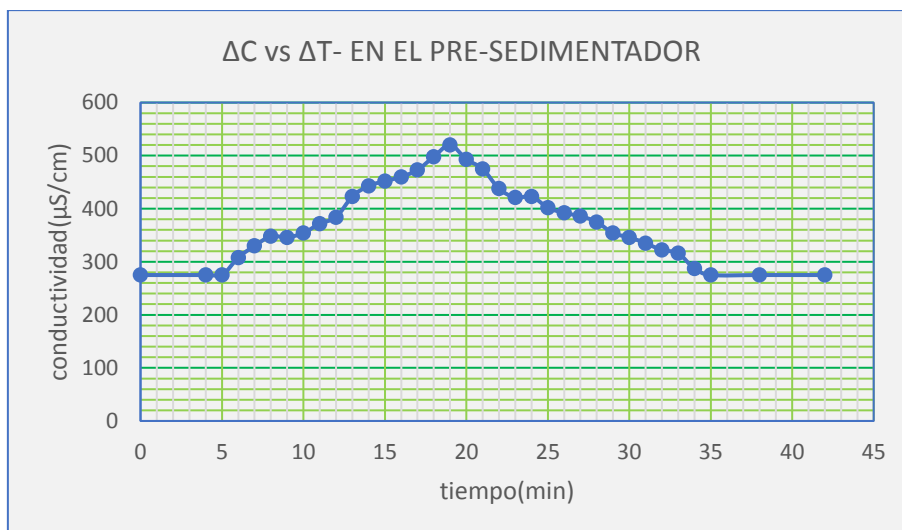


Figura 19: Incremento de la conductividad con respecto al tiempo en el pre-sedimentador

De la figura (19) se obtiene un tiempo de retención real de 26 minutos, el cual es mayor que el tiempo de retención teórico que es 24.5 minutos.

Tabla 16: Valores obtenidos de la figura (19).

Caudal Q = 23.11 L/s									
ti	t10	tp	tm	t0	t90	tf	C0	Cp	Cp/2
6	2.8	13	20	24.50	25.2	28	275	520	260
Cp/10	tc	tb	ti/t0	tm/t0	tp/t0	tc/t0	tb/t0	e	IM
52	13.5	24	0.24	0.82	0.53	0.55	0.98	0.33	9.0

Tabla 17: Análisis de flujo para el pre-sedimentador

Criterio	Valor	Análisis
ti/t0	0.24	Este valor (<0.3) indica que hay paso directo del trazador entre la entrada y salida del pre-sedimentador.
tm/t0	0.82	Este valor es menor que la unidad, de tal manera indica presencia de cortocircuitos hidráulicos, aunque no son muy considerables debido a la proximidad a la unidad.
tp/t0	0.53	Este valor indica que hay predominio de flujo de pistón, ya que su valor es mayor a 0.5.
tc/t0	0.55	Este valor nos indica que no hay presencia de flujo con mezclado ideal.
tb/t0	0.98	Este valor nos indica que no hay presencia de flujo con mezclado ideal.
e	0.33	Ya que este valor es aproximadamente igual a cero indica que hay predominio de flujo de pistón

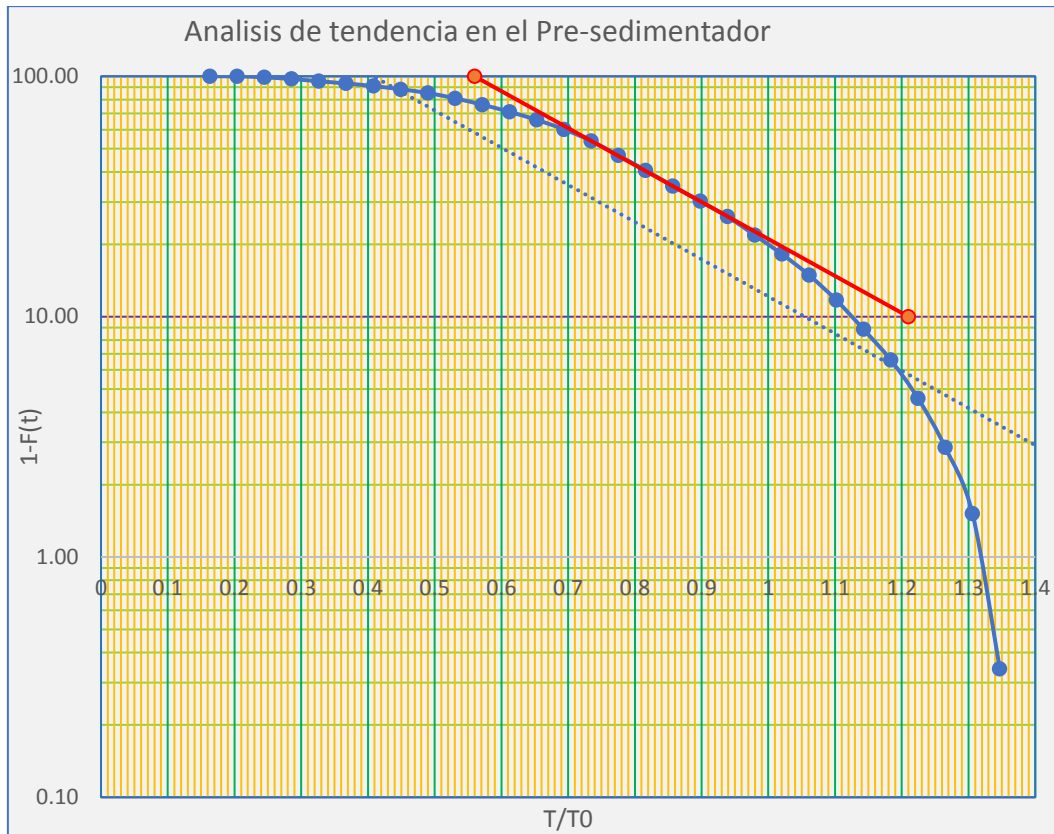


Figura 20: Análisis de tendencia para el pre-sedimentador

Tabla 18: Valores obtenidos de la figura (20).

Parámetro	Valor
Θ	0.56
$\tan \alpha$	1.54
p	66.4%
m	33.6%
M	15.7%

Estimación de la eficiencia del floculador de flujo horizontal

La estimación de la eficiencia del floculador se da en función a la gradiente hidráulica y según reglamento, este parámetro debe encontrarse bajo cierto rango ($20-70 \text{ s}^{-1}$) con un tiempo de retención de 20 minutos.

Tabla 19: Parámetros hidráulicos del floculador

Parámetros hidráulicos	Cámara 1	Cámara 2
Caudal de entrada (l/s)	23.11	23.11
Volumen (m ³)	15.68	17.122
Tiempo de detención teórico (s)	678.49	740.89
Área hidráulica (m ²)	0.1582	0.161
Perímetro hidráulico (m)	2.4	2.44
Velocidad de flujo (m/s)	0.15	0.14
Radio hidráulico (m)	0.066	0.066
Longitud total del tramo (m)	75.48	60.32
Numero de vueltas	33	25
Coefficiente de Manning (n)	0.013	0.013
Coefficiente de pérdida en curvas (K)	2	2

Cálculo de las pérdidas de carga en el floculador para ello se utilizó la ecuación (10) y (11) los resultados obtenidos se representan en la siguiente tabla:

Tabla 20: Pérdidas de carga en el floculador

Pérdida de carga	Cámara 1	Cámara 2
h ₁	0.0017	0.0013
h ₂	0.0718	0.0525
h _f = h ₁ +h ₂	0.0735	0.0538

Determinación del gradiente hidráulico para el cual se utilizó la ecuación (2) y la tabla (3) y los valores obtenidos se describe en la siguiente tabla:

Tabla 21: Gradiente de velocidad en el floculador

Cálculos hidráulicos	Valor
h _f total (m)	0.127
Tiempo de detención total (s)	1419.39
Relación $\sqrt{(\gamma/\mu)}$ para 16 ° C	2958.94
G (s ⁻¹)	28.02

Del gradiente de velocidad obtenido se concluye que la estructura está trabajando eficientemente ya que el gradiente hidráulico es de 28.02 s⁻¹.

Análisis del tipo de flujo presentes en el floculador

Tabla 22: Características del floculador y del afluente

Parámetro	Valor
Área del floculador (m ²)	23.43
Altura promedio (m)	1.14
Volumen del floculador (m ³)	26.71
Tiempo de detención teórico (min)	19.26
Conductividad del Afluente (μS/cm)	275

Tabla 23: Prueba de trazadores en el floculador

Muestra N°	Tiempo (min)	Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	T/T0	C-C0	$\Sigma(\text{C-C0})$	F(t)	1-F(t)
1		275		0	0	0	100
2	1	275	0.05	0	0	0	100
3	28	275	1.45	0	0	0	100
4	30	282	1.56	7	7	0.028	99.97
5	32	363	1.66	88	95	0.384	99.62
6	33	553	1.71	278	373	1.508	98.49
7	34	919	1.77	644	1017	4.112	95.89
8	35	1473	1.82	1198	2215	8.956	91.04
9	36	1998	1.87	1723	3938	15.923	84.08
10	37	2801	1.92	2526	6464	26.137	73.86
11	38	3210	1.97	2935	9399	38.005	62
12	39	3410	2.02	3135	12534	50.681	49.32
13	40	3190	2.08	2915	15449	62.468	37.53
14	41	2820	2.13	2545	17994	72.759	27.24
15	42	2090	2.18	1815	19809	80.098	19.9
16	43	1660	2.23	1385	21194	85.698	14.3
17	44	1340	2.28	1065	22259	90.004	10
18	45	928	2.34	653	22912	92.645	7.36
19	46	735	2.39	460	23372	94.505	5.5
20	47	588	2.44	313	23685	95.77	4.23
21	48	505	2.49	230	23915	96.7	3.3
22	49	460	2.54	185	24100	97.449	2.55
23	50	423	2.6	148	24248	98.047	1.95
24	51	397	2.65	122	24370	98.54	1.46
25	52	379	2.7	104	24474	98.961	1.04
26	54	353	2.8	78	24552	99.276	0.72
27	56	335	2.91	60	24612	99.519	0.48
28	58	313	3.01	38	24650	99.672	0.33
29	60	308	3.11	33	24683	99.806	0.19
30	62	294	3.22	19	24702	99.883	0.12
31	64	292	3.32	17	24719	99.951	0.05
32	66	287	3.43	12	24731	100	0
33	68	275	3.53	0	24731	100	0
34	70	275	3.63	0	24731	100	0
35	72	275	3.74	0	24731	100	0

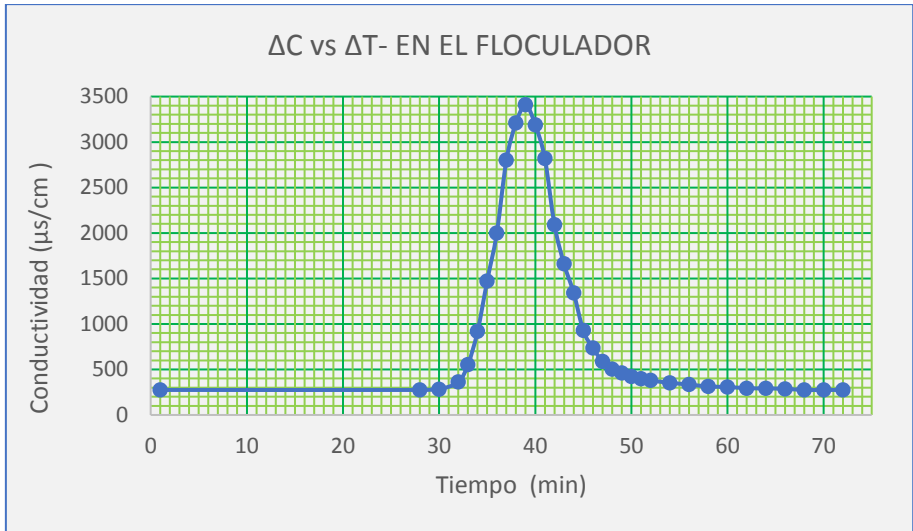


Figura 21: Incremento de la conductividad con respecto al tiempo en el floculador

Tabla 24: Valores obtenidos de la figura (21)

Caudal Q = 23.11 L/s									
ti	t10	tp	tm	t0	t90	tf	C0	Cp	Cp/2
30	3.6	9	18.00	19.26	32.4	36	275	3410	1705
Cp/10	tc	tb	ti/t0	tm/t0	tp/t0	tc/t0	tb/t0	e	IM
341	7	13.3	1.56	0.93	0.47	0.36	0.69	2.49	9.0

Tabla 25: Análisis de flujo para el floculador

Criterio	Valor	Análisis
ti/t0	1.56	Este valor (>1) indica que hay presencia del flujo pistón.
tm/t0	0.93	Este valor es menor que la unidad, de tal manera indica presencia de cortocircuitos hidráulicos, aunque no son muy considerables debido a la proximidad a la unidad.
tp/t0	0.47	Este valor indica que hay predominio de flujo mezclado, ya que su valor es menor a 0.5.
tc/t0	0.36	Este valor es menor a 0.7 por lo que hay presencia de turbulencia.
tb/t0	0.69	Este valor es menor a 2.3 por lo que hay presencia de recirculación.
e	2.49	Este valor nos indica la existencia de flujo de mezclado ideal.

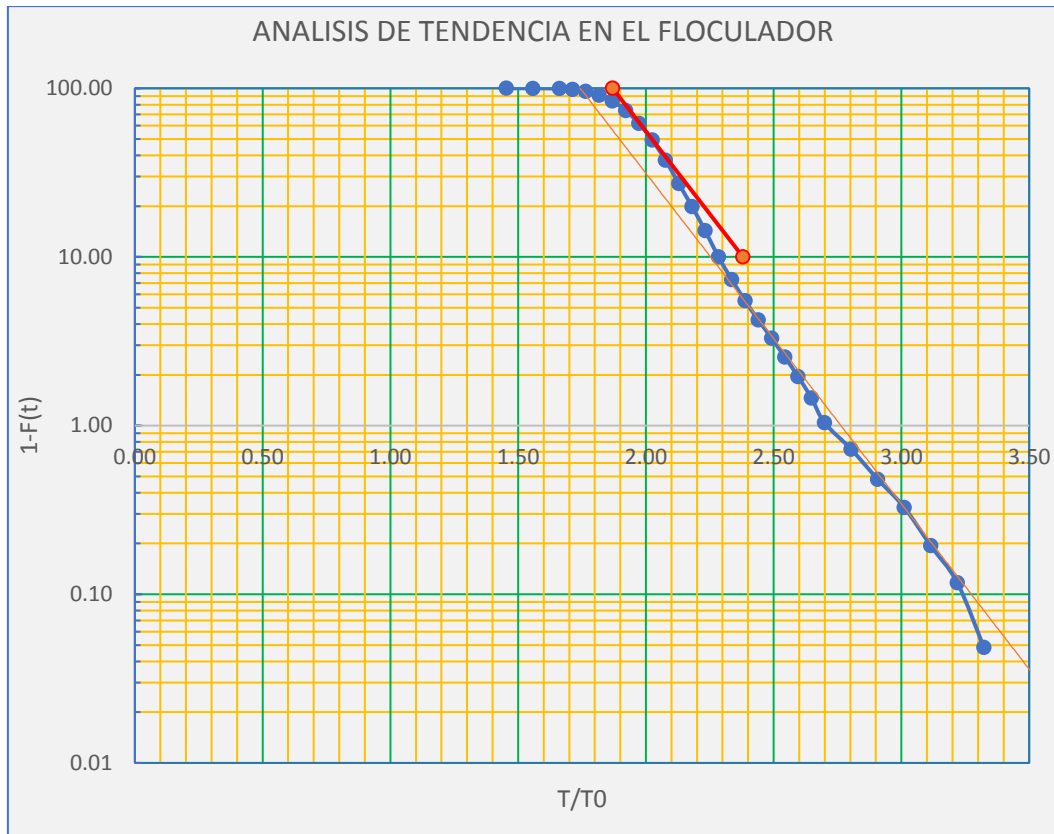


Figura 22: Análisis de tendencia para el floculador

Tabla 26: Valores obtenidos de la figura (22)

Parámetro	Valor
Θ	1.87
$\tan \alpha$	1.96
ρ	89.4%
m	10.6%
M	-1.09

Estimación de la eficiencia del sedimentador

Con los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico de las muestras, calculamos la eficiencia en función de la remoción de la turbiedad con la siguiente expresión que representa la ecuación (12).

$$\text{Eficiencia del sedimentador} = \frac{T_b - T_s}{T_b}$$

Reemplazando datos de los registros obtenidos del análisis fisicoquímico del agua para el sedimentador tenemos que la eficiencia es de:

$$E_f = 44.58 \%$$

Análisis del tipo de flujo presentes en el sedimentador

Tabla 27: Características del sedimentador

Parámetro	Valor
Caudal de ingreso (L/s)	23.11
Área de perfil del sedimentador (m ²)	18.85
Ancho total (m)	5.94
Volumen del sedimentador (m ³)	111.97
Tiempo de detención teórico (min)	80.75
Conductividad del efluente (μS/cm)	275

Tabla 28: Prueba de trazador en el sedimentador

Muestra N°	Tiempo (min)	Conductividad (μs/cm)	T/T0	C-C0	Σ(C-C0)	F(t)	1-F(t)
1		275		0	0	0	100
2	1	275	0.01	0	0	0	100
3	20	275	0.25	0	0	0	100
4	23	340	0.28	65	65	0.122	99.88
5	26	658	0.32	383	448	0.843	99.16
6	29	884	0.36	609	1057	1.989	98.01
7	32	1020	0.4	745	1802	3.392	96.61
8	35	1156	0.43	881	2683	5.05	94.95
9	38	1224	0.47	949	3632	6.836	93.16
10	41	1392	0.51	1117	4749	8.939	91.06
11	44	1564	0.54	1289	6038	11.365	88.64
12	47	1836	0.58	1561	7599	14.303	85.7
13	50	2108	0.62	1833	9432	17.753	82.25
14	53	2856	0.66	2581	12013	22.611	77.39
15	56	3604	0.69	3329	15342	28.877	71.12
16	59	4320	0.73	4045	19387	36.49	63.51
17	62	4216	0.77	3941	23328	43.908	56.09
18	65	4012	0.8	3737	27065	50.942	49.06
19	68	3808	0.84	3533	30598	57.592	42.41
20	71	3468	0.88	3193	33791	63.602	36.4
21	74	3196	0.92	2921	36712	69.1	30.9
22	77	2924	0.95	2649	39361	74.086	25.91
23	80	2584	0.99	2309	41670	78.432	21.57
24	83	2380	1.03	2105	43775	82.394	17.61
25	86	1836	1.07	1561	45336	85.332	14.67
26	89	1700	1.1	1425	46761	88.014	11.99
27	92	1564	1.14	1289	48050	90.44	9.56
28	95	1428	1.18	1153	49203	92.61	7.39
29	98	1292	1.21	1017	50220	94.525	5.48

Continuación

30	101	1088	1.25	813	51033	96.055	3.95
31	104	1020	1.29	745	51778	97.457	2.54
32	107	952	1.33	677	52455	98.731	1.27
33	110	816	1.36	541	52996	99.75	0.25
34	113	408	1.4	133	53129	100	0
35	116	275	1.44	0	53129	100	0
36	120	275	1.49	0	53129	100	0
37	140	275	1.73	0	53129	100	0

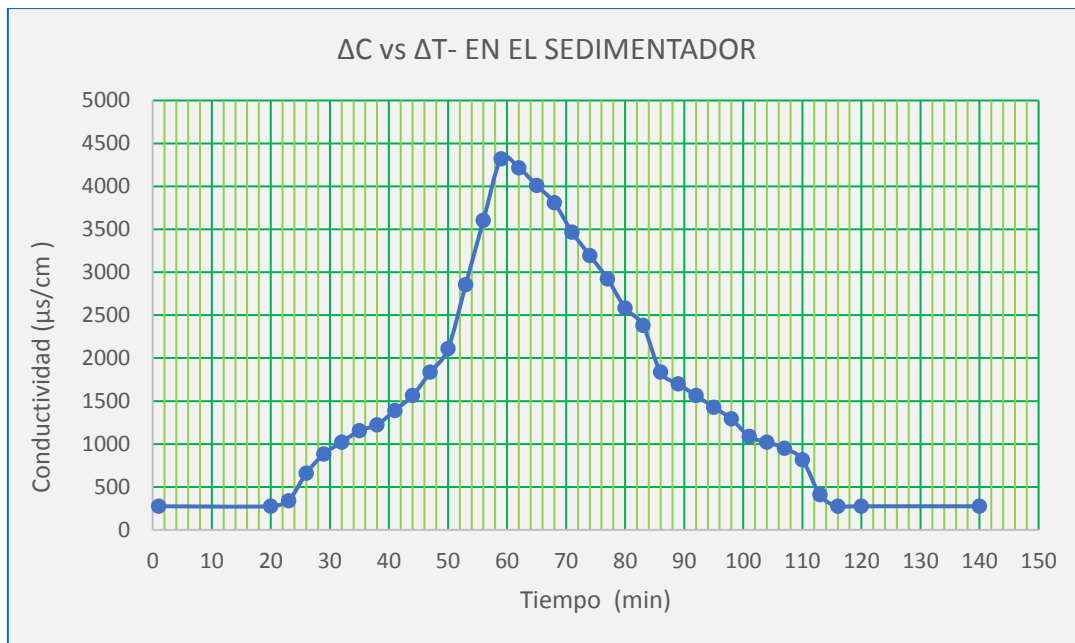


Figura 23: Incremento de la conductividad con respecto al tiempo en el sedimentador

Tabla 29: Valores obtenidos de la figura (23)

Caudal Q = 23.11 L/s									
t_i	t_{10}	t_p	t_m	t_0	t_{90}	t_f	C_0	C_p	$C_{p/2}$
23	9	36	45.00	80.75	81	90	275	4320	2160
$C_p/10$	t_c	t_b	t_i/t_0	t_m/t_0	t_p/t_0	t_c/t_0	t_b/t_0	e	IM
432	32	83	0.28	0.56	0.45	0.40	1.03	0.51	9.0

Tabla 30: Análisis de flujo para el sedimentador

Criterio	Valor	Análisis
t_i/t_0	0.28	Este valor (<0.3) indica que hay paso directo del trazador entre la entrada y salida del sedimentador.
t_m/t_0	0.56	Este valor es menor que la unidad, de tal manera indica presencia de cortocircuitos hidráulicos.
t_p/t_0	0.45	Este valor indica que hay predominio de flujo de mezclado, ya que su valor es menor a 0.5.
t_c/t_0	0.40	Este valor es menor a 0.7 por lo que hay presencia de turbulencia.
t_b/t_0	1.03	Este valor es menor a 2.3 por lo que hay presencia de recirculación.
e	0.51	Ya que este valor es < 1, hay presencia de flujo de mezclado

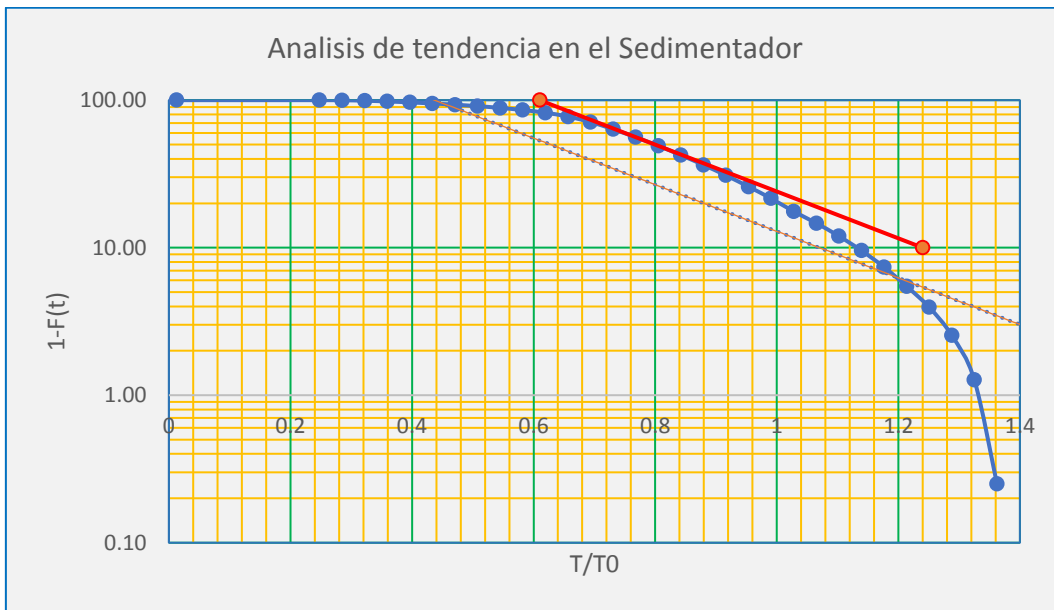


Figura 24: Análisis de tendencia para el sedimentador

Tabla 31: Valores obtenidos de la figura (24)

Parámetro	Valor
Θ	0.61
$\tan \alpha$	1.59
p	69.0%
m	31.0%
M	0.12

Estimación de la eficiencia del filtro

Con los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico de las muestras, calculamos la eficiencia en función de la remoción de la turbiedad con la siguiente expresión que representa la ecuación (13).

$$Eficiencia\ del\ filtro = \frac{Tb - Ts}{Tb}$$

Reemplazando datos de los registros obtenidos del análisis fisicoquímico del agua para el filtro tenemos que la eficiencia es de:

$$Ef = 95.59 \%$$

Según la clasificación de Arboleda Valencia (tabal 13), una eficiencia mayor a 90 % lo clasifica como un filtro excelente.

Registro de la cantidad de cloro a la salida del reservorio:

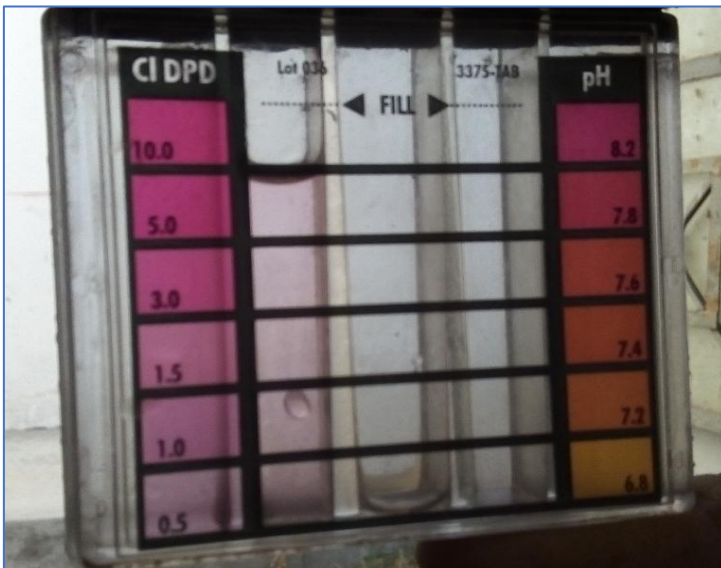


Figura 25: Test colorimétrico para medir cloro residual con pastillas DPD

Datos de los ensayos del test colorimétrico para la determinación del cloro residual a la salida del reservorio.

Tabla 32: Concentración de cloro residual a la salida del reservorio

Fecha	06/01/2018	27/01/2018	17/02/2018	10/03/2018	31/03/2018	21/04/2018	19/05/2018
Cl (ppm)	0.5	1	1	0.5	1	1	1

Prueba de jarras

La planta de tratamiento no cuenta con un laboratorio para la determinación de la dosis del coagulante óptimo, este es el que se encarga de producir una rápida desestabilización de las partículas coloidales, que va a permitir la formación de un floculo pesado y compacto que pueda ser fácilmente retenido en los procesos de sedimentación. Con el fin de elaborar un diagrama que permita identificar la dosis óptima para cada valor de turbiedad se hizo la prueba de jarras con un registro de diez datos. La ampliación del coagulante en épocas de lluvia varia de un valor de 4 hasta 7 kg por hora, pero en la mayor parte del día se utiliza una cantidad de 5 kg por hora, esto hace que la cantidad de coagulante aplicado sea innecesario comparado con la dosis optima de coagulante, teniendo un mezclador hidráulico eficiente y un diagrama de dosificación optima se puede ahorrar en insumos hasta 1.5 kg por hora.

Tabla 33: Resultados de la dosis optima de coagulante con la prueba de jarras

N° de ensayo	Turbiedad inicial (NTU)	Dosificación Al ₂ (SO ₄) ₃ en mg/L						Turbiedad final (NTU)						Dosificación óptima de Al ₂ (SO ₄) ₃ en mg/L
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
1	759	39	41	43	45	47	49	4.45	3.45	3.11	2.56	1.99	4.33	47
2	448	33	35	37	39	41	43	5.10	3.40	2.86	2.16	2.87	4.32	39
3	356	31	33	35	37	39	41	4.51	3.77	3.00	2.20	2.97	3.66	37
4	613	37	39	41	43	45	47	3.81	2.97	2.26	2.79	3.41	4.33	41
5	475	35	37	39	41	43	45	4.25	3.21	2.34	4.10	4.78	5.12	39
6	511	34	36	38	40	42	44	4.98	4.44	3.24	2.10	3.12	4.67	40
7	275	31	33	35	37	39	41	4.21	3.66	2.78	3.98	4.56	5.12	35
8	528	34	36	38	40	42	44	5.32	4.58	3.33	2.20	3.42	4.51	40
9	542	35	37	39	41	43	45	5.10	4.24	3.20	2.31	3.70	4.76	41
10	239	30	32	34	36	38	40	4.00	2.87	1.96	2.90	3.23	4.70	34

Tabla 34: Resultados del pH óptimo

N° de ensayo	pH inicial	Dosificación Al ₂ (SO ₄) ₃ en mg/L						pH final						Dosificación óptima de Al ₂ (SO ₄) ₃ en mg/L
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
1	8.37	39	41	43	45	47	49	8.16	8.00	7.90	7.88	7.87	7.85	47
2	8.21	33	35	37	39	41	43	8.11	8.05	7.94	7.90	7.88	7.87	39
3	8.4	31	33	35	37	39	41	8.23	8.20	8.04	7.94	7.92	7.89	37
4	8.23	37	39	41	43	45	47	8.14	8.10	7.95	7.93	7.91	7.90	41
5	8.16	35	37	39	41	43	45	8.08	7.98	7.93	7.91	7.89	7.88	39
6	8.24	34	36	38	40	42	44	8.13	8.09	8.01	7.93	7.92	7.89	40
7	8.29	31	33	35	37	39	41	8.15	8.10	7.95	7.93	7.91	7.88	35
8	8.17	34	36	38	40	42	44	8.07	8.02	7.97	7.90	7.88	7.88	40
9	8.22	35	37	39	41	43	45	8.09	8.06	8.01	7.91	7.90	7.87	41
10	8.28	30	32	34	36	38	40	8.14	8.07	7.96	7.94	7.91	7.90	34

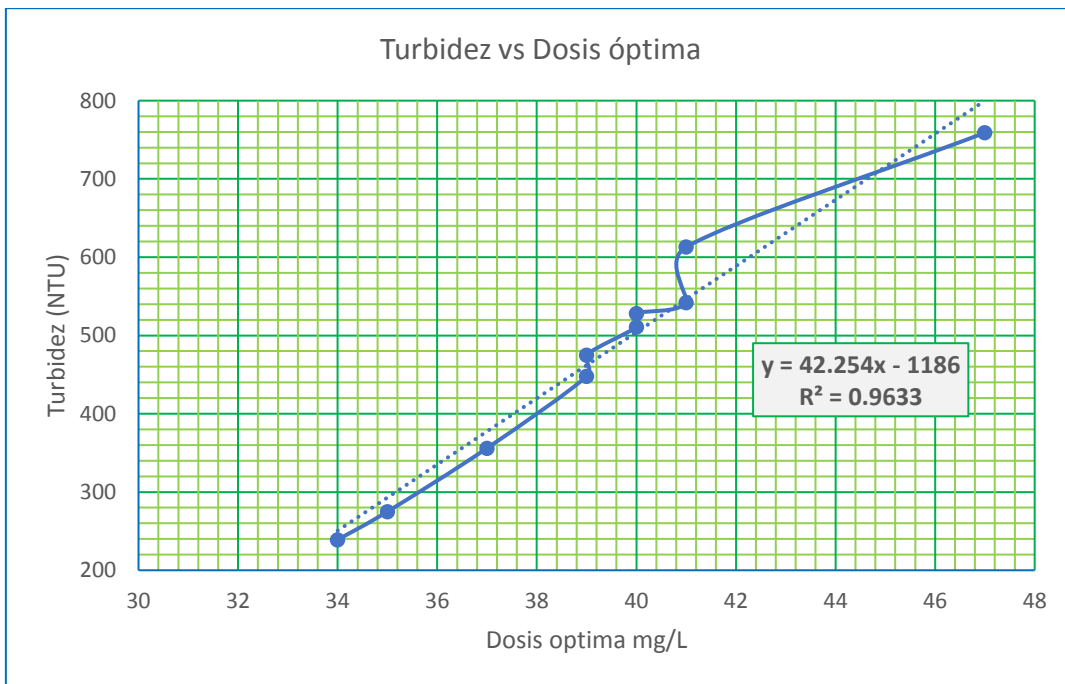


Figura 26: Modelo matemático para la determinación de la dosis óptima de coagulante a añadir.

Determinación de la eficiencia total de PTAP

Para la determinación de la eficiencia de la planta de tratamiento de agua cruda, en función de sus eficiencias parciales se utilizó la siguiente expresión:

$$Eft = \frac{(TPS * EPS) + (TFL * EFL) + (TS * ES) + (TF * EF)}{(TPS) + (TFL) + (TS) + (TF)}$$

$$Eft = \frac{(772.1 * 0.45) + (423.1 * 0.26) + (308.9 * 0.44) + (171.2 * 0.95)}{(772.1) + (423.1) + (308.9) + (171.2)}$$

$$Eft = 45.12\%$$

El resultado encontrado nos indica que la planta está trabajando deficientemente.

Tabla 35: Promedio del análisis fisicoquímico de las muestras

Parámetro	Unidad	M1	M2	M3	M4	M5
Turbiedad	UNT	772.1	423.1	308.9	171.2	7.543
PH, a 17 °C	--	8.006	8.053	8.105	8.085	8.106
Conductividad	µS/cm	268.2	269.1	268.9	279.4	277
Dureza	mg/L	232.8	229.9	232.9	234	236.1
Cloruros	mg/L	19.8	20.3	19.1	19.2	20.6
Flúor	mg/L	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Sulfatos	mg/L	16.6	15.8	15	13	11.4
Nitratos	mg/L	13.1	10.8	10.2	8	6.2
Cianuro Libre	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Aluminio	mg/L	0.06636	0.2022	0.1772	0.152	0.1451
Cobre	mg/L	0.4426	0.463	0.3821	0.2332	0.06774
Cromo Total	mg/L	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Hierro	mg/L	0.3785	0.3337	0.2825	0.3741	0.05381
Manganeso	mg/L	3.5261	2.6958	2.1348	1.2041	0.47
Zinc	mg/L	0.0666	0.05323	0.04459	0.03642	0.02586

Tabla 36: Comparación de los resultados del análisis fisicoquímico promedio M5 con el Reglamento de calidad del agua para consumo humano.

Parámetro	Unidad	M5	Reglamento
Turbiedad	UNT	7.543	5
PH, a 17 °C	--	8.1	6.5-8.5
Conductividad	µS/cm	277	1500
Dureza	mg/L	236.1	500
Cloruros	mg/L	20.6	250
Flúor	mg/L	< 0.02	1
Sulfatos	mg/L	11.4	250
Nitratos	mg/L	6.2	50
Cianuro Libre	mg/L	<0.005	0.07
Aluminio	mg/L	0.14	0.2
Cobre	mg/L	0.067	2
Cromo Total	mg/L	< 0.002	0.05
Hierro	mg/L	0.053	0.3
Manganeso	mg/L	0.47	0.4
Zinc	mg/L	0.025	3

Los parámetros evaluados cumplen con la normatividad del reglamento de calidad del agua para consumo humano a excepción de la turbiedad, esto debido al desconocimiento de la importancia del proceso de mezclado y dosificación óptima de coagulante. Para lo cual como aporte a la investigación se elaboró un diagrama con diez datos de muestras obtenidas para diferentes turbiedades, en el cual se representa la dosificación óptima de coagulante en función de la turbiedad.

CAPITULO V. CONCLUSIONES

- Con los datos obtenidos de la planimetría y altimetría se procedió a calcular el volumen y los resultados para el pre-sedimentador, floculador y sedimentador fueron 33.98m^3 , 26.71m^3 y $111,97\text{m}^3$, respectivamente. El caudal circulante promedio es del orden de 23.11 l/s, siendo este calculado mediante un registro de tirantes y velocidades en un tramo recto del canal con una longitud de 4m; Con ambos datos se determinó el tiempo de retención teórico, los resultados para el pre-sedimentador, floculador y sedimentador fueron 24.5 min, 19.26 min y 80.75 min, respectivamente.
- Del análisis físico-químico del agua, del afluente y efluente se determinó la eficiencia de cada de las estructuras en estudio, en función de las muestras obtenidas de los puntos M1, M2, M3, M4 y M5; la mayoría de datos de turbiedad presentan valores altos en épocas de lluvia y al no contar con medidores de caudal y turbidímetro para una dosificación optima de coagulante hace que la turbiedad a la salida del filtro esté sobre los 5 UNT.
- Mediante el ensayo de trazadores se determinó que el pre-sedimentador cuenta con un flujo pistón 66.40%, flujo mezclado 33.60 % y 15.70% zonas muertas; el floculador cuenta con un flujo pistón 89.40%, flujo mezclado 10.60 % y 0% zonas muertas lo cual indica que tiene una eficiencia recomendada para este tipo de unidad de flujo horizontal, ya que este tipo de unidades debe poseer un porcentaje alto de flujo pistón, además no se están formando cortocircuitos dentro del rector, lo que al final genera un buen funcionamiento; el sedimentador cuenta con un flujo pistón 69.0%, flujo mezclado 31.0 % y 12.0% zonas muertas. El tiempo de retención real son de 26 min, 48 min y 68 min respectivamente.
- La eficiencia de la plata de tratamiento de agua cruda, para cada una de sus estructuras involucradas, pre-sedimentador, floculador, sedimentador y filtro lento fueron 45.20%, 26.99%, 44.58% y 95.59% respectivamente y una eficiencia total de la planta en función de las eficiencias parciales fue de 45. 12%. El cual indica una deficiencia en cuanto a la remoción de partículas en suspensión.

CAPITULO VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda levantar la cota de entrada de agua a la planta con el fin de generar un resalto hidráulico que cumpla con los requisitos para una mezcla rápida, el cual permite mejorar la eficiencia coagulación – floculación y con ello optimizar insumos de coagulantes.
- la colocación de un medidor de caudal a la entrada de la planta, específicamente, para registrar con exactitud la cantidad de agua que ingresa, esto vital para la aplicación del coagulante óptimo.
- También se recomienda la limpieza y mantenimiento de las estructuras que conforman el tratamiento, tales como retirar el lodo que se acumula en el fondo del reactor, el pintado de las estructuras con sulfato de cobre para evitar el desarrollo de las algas.
- De manera general se recomienda a la Municipalidad Provincial de San Marcos tener consideración de la importancia de los procesos de tratamiento que se lleva a cabo en la planta y un control permanente de análisis físico-químico y bacteriológico para verificar si la calidad de agua suministrada cumple con los estándares de calidad de las normas vigentes. Además, realizar ensayos de laboratorio periódicos para determinar la dosificación optima de coagulantes que se utilizan en la planta, debido a que solo se lo realiza mediante la experiencia del personal que labora dentro de la planta, y de alguna manera se los debería capacitar para que tengan conocimiento de la importancia de los procesos que se llevan a cabo en planta.

CAPITULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AZEVEDO NETTO, J. M. (1998).** Manual de hidraulica. Octava Edicion. Editorial Edgard Blucher . Sao Paulo- Brasil.
- ANDIA CARDENAS, Y. (2000).** Evaluacion de Plantas y Desarrollo Tecnologico. Primera Edicion. Lima-Perú.
- ARBOLEDA VALENCIA, J. (1981).** Teoria, diseño y control de los procesos de clarificacion del agua. Vol. N° 13. Lima-Perú.
- ARBOLEDA VALENCIA, J. (2000).** Teoria y Practica de la Purificacion del Agua . Tomo 1. Nomos S.A. Santa Fe de Bogotá-Colombia.
- AZEVEDO NETTO, J. M. (1988).** Desinfeccion. Lima-Perú.
- BARRENECHEA MARTEL, A. (2004).** Coagulacion. Primera Edicion. Lima-Peru.
- CÁNEPA DE VARGAS, L. (2004).** Procesos Unitarios y plantas de tratamiento. Lima-Perú.
- CEPIS/OPS. (2002).** Guia para la vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano. Lima-Perú.
- CHAVEZ ALLAIN, A. M. (2012).** Origen y efectos de la contaminacion del agua. Tomo II. Piura-Perú.
- LUENGAS C, S. B. (1990).** Aforo por dilucion. Bogotá-Colombia.
- MALDONADO YACTAYO, V. (2004).** Filtracion: Capitulo 9. Lima-Perú.
- MINAM. (2017).** Estándares de Calidad Ambiental para Agua. Lima-Perú.
- NORMA OS.020. (2009).** Plantas de Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Lima-Perú.
- OMS. (2008).** Guia para la calidad del agua potable. Vol 1. Ginebra-Suiza.
- OPS. (2006).** Guia Para la Calida de Agua Potable. Tomo1. Lima-Perú.
- OPS/CEPIS. (2004).** Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Tomo 1. Lima-Perú.

- PEREZ CARRION, J. (1992).** Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención. Tomo II. Lima-Perú.
- RAS. (2000).** Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Bogotá-Colombia.
- RÍOS PIGNATTA, D. A. (1998).** Utilización del parámetro "eficiencia" en remoción de turbiedad en sedimentadores. Lima-Perú.
- RODRÍGUEZ CASTRO, G. A. (2001).** Tratamiento del agua para consumo. Colombia.
- RODRIGUEZ RUIZ, P. (2001).** Abastecimiento de Agua. Tomo 1. Lima.
- ROJAS VARGAS, R. (1994).** Pruebas de trazadores para calibración de medidores y estudios de la dispersión. Lima-Perú.
- ROMERO ROJAS, JA. (1999).** potabilizacion del agua. Tercera Edición. Edición Alfaomega. México.

CAPITULO VIII. ANEXOS

ANEXO A: ANALISIS FISICOQUIMICO DEL AGUA



INFORME DEL ANALISIS FISICOQUIMICO DEL AGUA

DATOS DE LA MUESTRA:

SOLICITANTE : PALERMO ISPILCO ROJAS
 PUNTOS DE MUESTREO : PLANTA DE TRATAMIENTO SAN MARCOS
 DISTRITO : PEDRO GALVEZ
 PROVINCIA : SAN MARCOS
 REGIÓN : CAJAMARCA

fecha	25/05/2018					
Párametro	Unidad	M1	M2	M3	M4	M5
Turbiedad	UNT	594	351	259	134	4
PH, a 17 °C	--	7.42	7.37	7.35	7.52	7.82
Conductividad	µS/cm	287	265	279	272	283
Dureza	mg/L	221	232	227	234	243
Cloruros	mg/L	13	14	16	12	14
Fluor	mg/L	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Sulfatos	mg/L	13	12	13	10	7
Nitratos	mg/L	8	7	6	6	3
Cianuro Libre	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Aluminio	mg/L	0.036	0.198	0.165	0.135	0.036
Cobre	mg/L	0.298	0.225	0.117	0.094	0.013
Cromo Total	mg/L	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Hierro	mg/L	0.287	0.187	0.162	0.109	0.036
Manganeso	mg/L	2.971	1.217	1.306	0.761	0.361
Zinc	mg/L	0.043	0.041	0.037	0.027	0.019



Ing. [Firma]
 CONTROL DE CALIDAD
 EPS SEDACAJ S. A.



INFORME DEL ANALISIS FISICOQUIMICO DEL AGUA

DATOS DE LA MUESTRA:

SOLICITANTE : PALERMO ISPILCO ROJAS
 PUNTOS DE MUESTREO : PLANTA DE TRATAMIENTO SAN MARCOS
 DISTRITO : PEDRO GALVEZ
 PROVINCIA : SAN MARCOS
 REGIÓN : CAJAMARCA

fecha	11/05/2018					
Pàrametro	Unidad	M1	M2	M3	M4	M5
Turbiedad	UNT	527	367	293	187	6.8
PH, a 17 °C	--	8.21	8.47	7.93	8.61	8.12
Conductividad	µS/cm	226	242	252	227	243
Dureza	mg/L	243	237	252	246	260
Cloruros	mg/L	15	17	15	13	11
Flùor	mg/L	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Sulfatos	mg/L	15	14	13	11	9
Nitratos	mg/L	11	9	8	6	2
Cianuro Libre	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Aluminio	mg/L	0.063	0.237	0.225	0.213	0.092
Cobre	mg/L	0.431	0.591	0.407	0.162	0.037
Cromo Total	mg/L	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Hierro	mg/L	0.347	0.247	0.127	0.973	0.012
Manganeso	mg/L	4.231	3.567	3.102	1.116	0.471
Zinc	mg/L	0.074	0.064	0.043	0.037	0.023



Inge. Marcos Pedro Costarica
 CONTROL DE CALIDAD
 EPS SEDACAJ S. A.



INFORME DEL ANALISIS FISICOQUIMICO DEL AGUA

DATOS DE LA MUESTRA:

SOLICITANTE : PALERMO ISPILCO ROJAS
 PUNTOS DE MUESTREO : PLANTA DE TRATAMIENTO SAN MARCOS
 DISTRITO : PEDRO GALVEZ
 PROVINCIA : SAN MARCOS
 REGIÓN : CAJAMARCA

fecha	27/04/2018					
Pàrametro	Unidad	M1	M2	M3	M4	M5
Turbiedad	UNT	768	461	247	189	9
PH, a 17 °C	--	7.83	7.64	7.92	7.98	7.95
Conductividad	µS/cm	274	257	246	273	261
Dureza	mg/L	263	244	253	261	256
Cloruros	mg/L	18	17	16	18	12
Flùor	mg/L	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Sulfatos	mg/L	17	16	18	14	11
Nitratos	mg/L	13	11	9	6	4
Cianuro Libre	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Aluminio	mg/L	0.054	0.214	0.211	0.108	0.074
Cobre	mg/L	0.372	0.421	0.331	0.114	0.021
Cromo Total	mg/L	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Hierro	mg/L	0.261	0.189	0.137	0.983	0.036
Manganeso	mg/L	2.731	1.457	1.234	0.928	0.213
Zinc	mg/L	0.039	0.031	0.026	0.017	0.012



Inga Maria Ines Castañeda
 CONTROL DE CALIDAD
 EPS SEDACAJ S. A.



INFORME DEL ANALISIS FISICOQUIMICO DEL AGUA

DATOS DE LA MUESTRA:

SOLICITANTE : PALERMO ISPILCO ROJAS
 PUNTOS DE MUESTREO : PLANTA DE TRATAMIENTO SAN MARCOS
 DISTRITO : PEDRO GALVEZ
 PROVINCIA : SAN MARCOS
 REGIÓN : CAJAMARCA

fecha	13/04/2018					
Parámetro	Unidad	M1	M2	M3	M4	M5
Turbiedad	UNT	564	315	242	131	4
PH, a 17 °C	--	7.43	7.56	7.82	7.76	7.87
Conductividad	µS/cm	238	253	209	273	251
Dureza	mg/L	217	225	215	212	223
Cloruros	mg/L	16	15	17	15	21
Fluor	mg/L	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Sulfatos	mg/L	16	13	15	11	8
Nitratos	mg/L	11	9	7	5	3
Cianuro Libre	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Aluminio	mg/L	0.076	0.356	0.289	0.276	0.121
Cobre	mg/L	0.534	0.672	0.534	0.231	0.053
Cromo Total	mg/L	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Hierro	mg/L	0.267	0.184	0.146	0.132	0.023
Manganeso	mg/L	3.031	2.754	2.307	1.241	0.307
Zinc	mg/L	0.084	0.065	0.056	0.043	0.019



Ing. Marco Aurelio Contreras
 CONTROL DE CALIDAD
 EPS SEDACAJ S. A.



INFORME DEL ANALISIS FISICOQUIMICO DEL AGUA

DATOS DE LA MUESTRA:

SOLICITANTE : PALERMO ISPILCO ROJAS
 PUNTOS DE MUESTREO : PLANTA DE TRATAMIENTO SAN MARCOS
 DISTRITO : PEDRO GALVEZ
 PROVINCIA : SAN MARCOS
 REGIÓN : CAJAMARCA

fecha	30/03/2018					
Pàrametro	Unidad	M1	M2	M3	M4	M5
Turbiedad	UNT	568	353	241	122	4.6
PH, a 17 °C	--	7.93	8.47	8.76	8.35	8.32
Conductividad	µS/cm	237	241	253	246	226
Dureza	mg/L	173	164	186	192	183
Cloruros	mg/L	17	15	14	13	14
Flùor	mg/L	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Sulfatos	mg/L	14	15	14	11	12
Nitratos	mg/L	11	9	8	6	3
Cianuro Libre	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Aluminio	mg/L	0.0781	0.176	0.172	0.126	0.053
Cobre	mg/L	0.396	0.274	0.253	0.146	0.0934
Cromo Total	mg/L	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Hierro	mg/L	0.275	0.268	0.249	0.162	0.067
Manganeso	mg/L	2.186	1.742	1.127	0.791	0.256
Zinc	mg/L	0.046	0.0364	0.0272	0.0129	0.0121



[Handwritten Signature]
 Ing. Mateo Iván Castañón
 CONTROL DE CALIDAD
 EPS SEDACAJ S. A.



INFORME DEL ANALISIS FISICOQUIMICO DEL AGUA

DATOS DE LA MUESTRA:

SOLICITANTE : PALERMO ISPILCO ROJAS
 PUNTOS DE MUESTREO : PLANTA DE TRATAMIENTO SAN MARCOS
 DISTRITO : PEDRO GALVEZ
 PROVINCIA : SAN MARCOS
 REGIÓN : CAJAMARCA

fecha	09/03/2018					
Pàrametro	Unidad	M1	M2	M3	M4	M5
Turbiedad	UNT	662	235	150	76	1.03
PH, a 17 °C	--	8.67	8.36	8.48	8.31	8.39
Conductividad	µS/cm	240	237	251	277	286
Dureza	mg/L	164	153	137	184	204
Cloruros	mg/L	13	14	17	15	18
Fluor	mg/L	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Sulfatos	mg/L	15	17	15	13	10
Nitratos	mg/L	8	7	8	5	2
Cianuro Libre	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Aluminio	mg/L	0.063	0.152	0.123	0.114	0.809
Cobre	mg/L	0.422	0.471	0.379	0.148	0.044
Cromo Total	mg/L	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Hierro	mg/L	0.321	0.285	0.278	0.133	0.038
Manganeso	mg/L	2.455	2.305	1.652	0.629	0.378
Zinc	mg/L	0.063	0.054	0.043	0.037	0.021



Inge. Walter Hugo Contreras
 CONTROL DE CALIDAD
 EPS SEDACAJ S. A.



INFORME DEL ANALISIS FISICOQUIMICO DEL AGUA

DATOS DE LA MUESTRA:

SOLICITANTE : PALERMO ISPILCO ROJAS
 PUNTOS DE MUESTREO : PLANTA DE TRATAMIENTO SAN MARCOS
 DISTRITO : PEDRO GALVEZ
 PROVINCIA : SAN MARCOS
 REGIÓN : CAJAMARCA

fecha	23/02/2018					
Pàrametro	Unidad	M1	M2	M3	M4	M5
Turbiedad	UNT	965	523	378	189	8
PH, a 17 °C	--	7.98	7.99	8.16	7.85	8.21
Conductividad	µS/cm	304	327	313	341	328
Dureza	mg/L	293	285	274	281	259
Cloruros	mg/L	36	38	29	25	34
Fluor	mg/L	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Sulfatos	mg/L	21	18	15	16	16
Nitratos	mg/L	22	18	17	14	15
Cianuro Libre	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Aluminio	mg/L	0.0915	0.137	0.128	0.109	0.036
Cobre	mg/L	0.536	0.625	0.537	0.421	0.125
Cromo Total	mg/L	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Hierro	mg/L	0.385	0.452	0.372	0.273	0.114
Manganeso	mg/L	5.476	4.657	4.326	2.958	1.107
Zinc	mg/L	0.096	0.0782	0.0635	0.0592	0.0372

Ingeº Marga Harro Contralón
 CONTROL DE CALIDAD
 EPS SEDACAJ S. A.



INFORME DEL ANALISIS FISICOQUIMICO DEL AGUA

DATOS DE LA MUESTRA:

SOLICITANTE : PALERMO ISPILCO ROJAS
 PUNTOS DE MUESTREO : PLANTA DE TRATAMIENTO SAN MARCOS
 DISTRITO : PEDRO GALVEZ
 PROVINCIA : SAN MARCOS
 REGIÓN : CAJAMARCA

fecha	09/02/2018					
Pàrametro	Unidad	M1	M2	M3	M4	M5
Turbiedad	UNT	876	647	526	304	12
PH, a 17 °C	--	8.45	8.43	8.51	8.31	8.21
Conductividad	µS/cm	345	323	356	367	371
Dureza	mg/L	257	264	275	265	253
Cloruros	mg/L	23	21	25	26	21
Fluor	mg/L	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Sulfatos	mg/L	15	17	14	13	13
Nitratos	mg/L	17	14	15	11	9
Cianuro Libre	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Aluminio	mg/L	0.085	0.176	0.142	0.132	0.092
Cobre	mg/L	0.437	0.467	0.452	0.397	0.106
Cromo Total	mg/L	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Hierro	mg/L	0.453	0.487	0.387	0.391	0.067
Manganeso	mg/L	4.572	3.264	1.435	1.324	0.802
Zinc	mg/L	0.079	0.0657	0.0602	0.0561	0.0503



Ing. Marco Hugo Centurión
 CONTROL DE CALIDAD
 EPS SEDACAJ S. A.



INFORME DEL ANALISIS FISICOQUIMICO DEL AGUA

DATOS DE LA MUESTRA:

SOLICITANTE : PALERMO ISPILCO ROJAS
 PUNTOS DE MUESTREO : PLANTA DE TRATAMIENTO SAN MARCOS
 DISTRITO : PEDRO GALVEZ
 PROVINCIA : SAN MARCOS
 REGIÓN : CAJAMARCA

Parámetro	Unidad	M1	M2	M3	M4	M5
fecha	26/01/2018					
Turbiedad	UNT	967	412	397	176	11
PH, a 17 °C	--	7.91	8.09	8.01	8	8.03
Conductividad	µS/cm	245	254	243	240	242
Dureza	mg/L	265	274	283	220	230
Cloruros	mg/L	23	25	24	27	29
Flúor	mg/L	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Sulfatos	mg/L	22	19	18	15	15
Nitratos	mg/L	16	13	14	14	13
Cianuro Libre	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Aluminio	mg/L	0.042	0.153	0.145	0.142	0.042
Cobre	mg/L	0.435	0.45	0.447	0.321	0.093
Cromo Total	mg/L	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Hierro	mg/L	0.565	0.475	0.446	0.164	0.067
Manganeso	mg/L	4.373	3.526	3.491	1.421	0.427
Zinc	mg/L	0.075	0.043	0.039	0.027	0.024



Ingeniero Marco Harro, Contralor
 CONTROL DE CALIDAD
 EPS SEDACAJ S. A.



INFORME DEL ANALISIS FISICOQUIMICO DEL AGUA

DATOS DE LA MUESTRA:

SOLICITANTE : PALERMO ISPILCO ROJAS
 PUNTOS DE MUESTREO : PLANTA DE TRATAMIENTO SAN MARCOS
 DISTRITO : PEDRO GALVEZ
 PROVINCIA : SAN MARCOS
 REGIÓN : CAJAMARCA

fecha	12/01/2018					
Parámetro	Unidad	M1	M2	M3	M4	M5
Turbiedad	UNT	1230	567	356	204	15
PH, a 17 °C	--	8.23	8.15	8.11	8.16	8.14
Conductividad	µS/cm	286	292	287	278	279
Dureza	mg/L	232	221	227	245	250
Cloruros	mg/L	24	27	18	28	32
Flúor	mg/L	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Sulfatos	mg/L	18	17	15	16	13
Nitratos	mg/L	14	11	10	7	8
Cianuro Libre	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Aluminio	mg/L	0.075	0.223	0.172	0.165	0.096
Cobre	mg/L	0.565	0.434	0.364	0.298	0.092
Cromo Total	mg/L	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Hierro	mg/L	0.624	0.563	0.521	0.421	0.0781
Manganeso	mg/L	3.235	2.469	1.368	0.872	0.378
Zinc	mg/L	0.067	0.054	0.051	0.048	0.041



Inge Marco Herro Contreras
 CONTROL DE CALIDAD
 EPS SEDACAJ S. A.