



**UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**TESIS DE GRADO**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:**

**INGENIERA EN RECURSOS NATURALES Y AMBIENTALES**

**TEMA:**

Precipitación química de fosfato mediante la combinación de sales de metales trivalentes en la PTAR municipal de Manta.

**AUTORES:**

Stephanny Dayanara Cevallos Saltos

Angie Karolina Zipa Vélez

**DIRECTOR DE TESIS:**

Blgo. Abraham Isaac Velásquez Ferrín M.Sc.

**MANTA – MANABÍ – ECUADOR**

**2018**

**UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**TESIS DE GRADO**

“Precipitación química de fosfato mediante la combinación de sales de metales trivalentes en la PTAR municipal de Manta”

**Tesis presentada al H. Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias Agropecuarias como requisito para obtener el título de:**

**INGENIERA EN RECURSOS NATURALES Y AMBIENTALES**

-----  
Ing. Yessenia García Montes Msc.

**DECANA DE LA FACULTAD**

-----  
Blgo. Abraham Velásquez Msc.

**TUTOR DE TESIS**

**MIEMBROS DEL TRIBUNAL**

Ing. Paulina Espinoza Zambrano, Msc.

-----

Ing. Juan Macías Demera, Msc.

-----

Ing. Robert Mero Santana, Msc.

-----

## CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Blgo. Abraham Isaac Velásquez Ferrín M.Sc. certifica haber tutelado la tesis **“PRECIPITACIÓN QUÍMICA DE FOSFATO MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE SALES DE METALES TRIVALENTES EN LA PTAR MUNICIPAL DE MANTA”** que ha sido desarrollada por las estudiantes Stephanny Dayanara Cevallos Saltos y Angie Karolina Zipa Vélez, egresadas de la carrera INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES Y AMBIENTALES previo a la obtención del título de Ingeniera en Recursos Naturales y Ambientales, de acuerdo al REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE LA TESIS DE GRADO DEL TERCER NIVEL, de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

---

Blgo. Abraham Isaac Velásquez Ferrín. M. Sc

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

La responsabilidad de los hechos, ideas y doctrinas expuestos en la presente tesis, corresponde exclusivamente al tutor y el patrimonio intelectual de los autores, estudiantes de la carrera de Ingeniería en Recursos Naturales y Ambientales de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

---

Srta. Stephanny Dayanara Cevallos Saltos

CI: 1314278282

---

Srta. Angie Karolina Zipa Vélez

CI: 1314639673

# AGRADECIMIENTO

A Dios por acompañarme, por ser el inspirador y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener el título que tanto he deseado.

A mis padres por su amor, su sacrificio, su entrega, sus consejos y su impulso en todos estos años, ya que gracias a ellos he llegado al final de la meta propuesta.

A mi tutor de tesis y gran amigo Blgo. Abrahan Velásquez Ferrín por compartir sus conocimientos, ser guía en este proyecto y por su valioso aporte en nuestra investigación.

A mi compañera de tesis Angie Zipa por su dedicatoria al trabajo, su paciencia, su apoyo, y sus consejos en todo este proceso que hemos terminado juntas, para poder alcanzar el título que queríamos lograr desde que llegamos a la universidad.

A la EPAM por permitirnos realizar el trabajo investigativo para poder culminar la tesis, en especial al Lcdo. Paul Macías por brindarnos el apoyo, tiempo e información necesaria para poder culminar con éxito el trabajo.

A la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí por abrirme sus puertas y acogerme durante estos 5 años universitarios, a los profesores de la Facultad de Ciencias Agropecuarias por brindarme sus conocimientos impartidos en el aula de clases, ya que ellos fueron quienes me dieron la pauta para poder formarme profesionalmente.

Dayanara Cevallos Saltos

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, a Dios por sus bendiciones, su guía a lo largo de todos mis años y por permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mis padres, por alentarme a superarme y ser mejor cada día, por ser el impulso para lograr todo lo que me he propuesto en la vida, por la educación que me han dado, por su bondad, su paciencia, su cariño y sobre todo agradezco infinitamente su apoyo incondicional.

A mi tutor de tesis Blgo. Abraham Velásquez Ferrín, quien se convirtió en un gran amigo, por compartir su conocimiento y dirigirnos durante todo este proceso de investigación.

A mi compañera de tesis, la hermana y mejor amiga que tengo, Dayanara Cevallos, por su gran contribución al desarrollo de este trabajo, por su cariño, por convertirse en parte de mi familia y por su paciencia en todos estos 18 años que llevamos estudiando juntas.

A mi novio, mejor amigo y compañero de vida Geovanny Álava, por sus consejos y experiencia que fueron parte fundamental para culminar esta etapa universitaria, por estar siempre pendiente de mis triunfos y alentarme a superar los fracasos, por motivarme a conseguir grandes cosas para mi vida y por ser ese pilar que me mantiene firme en los momentos difíciles.

A mi abuelo Homero Vélez, por dedicarme su tiempo, por su paciencia y ayudarme a cumplir con la meta propuesta.

A mis amigos de toda la vida, por tener la capacidad de hacerme olvidar de los problemas con los largos momentos de risa cada vez que nos reunimos; y a los amigos que encontré en el salón de clases por hacer más divertida esta experiencia y por todo su aportarte en esta etapa universitaria.

A la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, en especial a la Facultad de Ciencias Agropecuarias y a los docentes de la carrera de Ingeniería en Recursos Naturales y Ambiente, por enriquecer mi educación con los conocimientos brindados desde el primer día.

Al gerente general de la Empresa Pública Aguas de Manta, Ing. José Victor Espinoza Macías por darnos los permisos respectivos para poder realizar el estudio propuesto en la tesis y por delegarnos al Lcdo. Paul Macías para que nos acompañe, nos brinde su ayuda y apoyo en todo lo relacionado al trabajo de investigación.

Angie Zipa Vélez

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis a Dios porque ha estado conmigo en cada paso que doy, dándome las fuerzas necesarias para poder continuar y lograr lo que me proponga.

A mi mamá Mariela Cevallos por formarme como lo ha hecho, por su paciencia, su amor, por motivarme y por creer en mí, esto sin duda es para ella.

A Fabricio Barreiro por apoyarme en todos estos años, por su comprensión y por amarme como si fuera su hija.

A mis hermanos Dariana y Junior por ser mi impulso, ya que algún día quiero escucharlos decir lo orgullosos que están de mí.

A mi familia en general por apoyarme en todos estos años de estudio, por brindarme sus consejos y su mano cuando a veces quería decaer.

A mi mejor amiga Angie Zipa por ser como mi mamá, por sus gritos, por su cariño y por toda la paciencia que siempre me ha tenido.

A mis amigos de toda la vida por siempre creer en mí.

Esto es para ustedes y por ustedes.

Dayanara Cevallos Saltos

## DEDICATORIA

Dedico esto a Dios ya que sin él nada de esto hubiera sido posible, me dio la fuerza y sabiduría necesaria por poder llegar hasta esta etapa de mi vida profesional.

A mis padres Jorge y Dally por ser mi fuente de inspiración para poder cumplir esto, por su amor, su entrega, y su impulso para seguir en este camino.

A mis hermanos Jorge y Aaron por su amor y su apoyo en todos estos años.

A mi novio Geovanny por motivarme, por brindarme su ayuda en todo lo que necesitaba, por sus consejos y por siempre creer en mí.

A mi mejor amiga, y hermana a la vez Dayanara Cevallos por compartir todos estos años desde que éramos unas niñas y ahora juntas poder formarnos profesionalmente.

A mi familia y a mis amigos quienes sin esperar nada a cambio compartieron sus conocimientos, alegrías y tristezas; y estuvieron conmigo apoyándome durante estos cinco años de etapa universitaria.

Angie Zipa Vélez

# INDICE GENERAL

RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
I. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
1.2. OBJETIVOS .....	7
1.2.1. OBJETIVO GENERAL .....	7
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	7
1.3. JUSTIFICACIÓN .....	8
II. HIPÓTESIS .....	10
III. VARIABLES.....	11
3.1. Dependiente: .....	11
3.2. Independiente: .....	11
IV. MARCO TEÓRICO .....	12
4.1. Agua Residual .....	12
4.2. Fuentes contaminantes del agua .....	12
4.2.1. Fuentes urbanas.....	13
4.2.2. Fuentes industriales.....	13
4.2.3. Fuentes agropecuarias .....	14
4.2.4. Fuentes naturales.....	14
4.3. Alternativas de tratamiento de las aguas residuales.....	14
4.4. Lagunas de oxidación .....	16
4.4.1. Lagunas anaerobias.....	17
4.4.2. Lagunas facultativas .....	17
4.4.3. Lagunas de maduración .....	18
4.5. Ciclo del fósforo en aguas residuales.....	18

4.6.	Fosfato en el agua residual .....	19
4.7.	Operaciones y procesos para la eliminación del fósforo .....	20
4.8.	Adición de sales metálicas al tratamiento de aguas residuales ...	20
4.9.	La reacción de precipitación.....	21
4.9.1.	Reacciones concurrentes .....	22
4.10.	Procesos de eliminación de fosfato por precipitación química	22
4.10.1.	Precipitación previa .....	23
4.10.2.	Precipitación simultánea o coprecipitación .....	23
4.10.3.	Precipitación posterior o postprecipitación .....	25
4.11.	Análisis de fosfatos .....	26
4.12.	Métodos para la determinación colorimétrica de fosfatos.....	26
4.12.1.	Método amarillo del ácido vanadomolibdofosfórico.....	26
4.12.2.	Método azul del ácido ascórbico .....	27
4.12.3.	Método cloruro de estaño II .....	28
<b>V.</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>29</b>
5.1.	Métodos y técnicas.....	29
5.1.1.	Método deductivo:.....	29
5.1.2.	Método experimental: .....	29
5.1.3.	Método analítico sintético: .....	29
5.1.4.	Técnica bibliográfica:.....	30
5.2.	Diseño experimental.....	30
5.2.1.	Selección de los precipitantes químicos y el efluente.....	30
5.2.2.	Montaje de ensayos .....	31
5.2.2.1.	Materiales, reactivos y equipos utilizados.....	32
5.2.3.	Análisis de Ortofosfatos .....	33
5.2.3.1.	Materiales, reactivos y equipos .....	33
5.2.3.2.	Preparación de los reactivos .....	34

5.2.3.3. Procedimiento .....	35
5.2.4. Prueba piloto.....	36
5.3. Análisis de datos.....	37
<b>VI. RESULTADOS.....</b>	<b>38</b>
6.1. Curva de calibración.....	38
6.2. Caracterización del efluente .....	38
6.3. Concentración media de fosfatos en los tratamientos.....	39
6.4. ANOVA .....	40
6.5. Presentación de los porcentajes de remoción .....	42
6.6. Presentación de resultados de la prueba piloto .....	43
<b>VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>44</b>
7.1 Conclusiones .....	44
7.2 Recomendaciones .....	45
<b>VIII. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>46</b>
<b>IX. ANEXOS .....</b>	<b>52</b>

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Niveles del diseño experimental.....	30
<b>Tabla 2.</b> Tratamiento del diseño experimental.....	32
<b>Tabla 3.</b> Curva de calibración.....	38
<b>Tabla 4.</b> Caracterización del efluente.....	39
<b>Tabla 5.</b> Concentración de fosfato en cada tratamiento.....	39
<b>Tabla 6.</b> Resultados de la prueba piloto.....	43

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Tratamientos del agua residual.....	15
<b>Figura 2.</b> Diagrama de flujo de la precipitación previa.....	23
<b>Figura 3.</b> Diagrama de flujo de la precipitación simultánea.....	24
<b>Figura 4.</b> Diagrama de flujo de la precipitación posterior.....	25
<b>Figura 5.</b> Porcentaje de remoción de fosfato.....	42

## RESUMEN

El presente trabajo investigativo muestra los resultados del estudio de adición de sales metálicas trivalentes combinadas, para precipitar químicamente el fosfato como tratamiento complementario al sistema de lagunaje de la PTAR municipal de Manta. Se realizaron pruebas de laboratorio para determinar el tratamiento más eficiente en la remoción de fosfato en el agua residual, mediante el análisis de ortofosfato por el método del ácido ascórbico descrito en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater; además se aplicó el análisis de varianza ANOVA y el test de Tukey. Se utilizaron agitadores magnéticos para disolver las tres sales metálicas trivalentes, sulfato férrico (A), sulfato de aluminio (B) y cloruro férrico(C) que se combinaron entre sí, en tres concentraciones, 13 mg/L (1), 8 mg/L (2) y 4 mg/L (3) para cada sal, de manera que se obtuvo un diseño experimental con 27 tratamientos replicados 3 veces. El tratamiento que obtuvo mayor porcentaje de remoción de fosfato con el 99.04%, fue a3.b2.c1 el cual contempla la concentración óptima de 4 mg/L de sulfato férrico, 8mg/L de sulfato de aluminio y 13 mg/L de cloruro férrico, dando un combinado de sales de 25 mg/L, por debajo de la concentración de 40 mg/L que es la dosis que se aplica de manera individual en cada sal. Finalmente se aplicó este tratamiento para su evaluación en campo mediante una prueba piloto realizada durante tres semanas, misma que obtuvo promedio de remoción de 93.13%.

## ABSTRACT

The present investigative work shows the results of the study of addition of combined trivalent metal salts, to chemically precipitate the phosphate as a complementary treatment to the lagoon system of the Municipal WWTP of Manta. Laboratory tests were performed to determine the most efficient treatment in the removal of phosphate in the wastewater, through orthophosphate analysis by the ascorbic acid method described in the Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater; In addition, ANOVA variance analysis and the Tukey test were applied. Magnetic stirrers were used to dissolve the three trivalent metal salts, ferric sulfate (A), aluminum sulfate (B) and ferric chloride (C) which were combined with each other, in three concentrations, 13 mg/L (1), 8 mg/L (2) and 4 mg/L (3) for each salt so that an experimental design was obtained with 27 treatments replicated 3 times. The treatment that obtained the highest percentage of phosphate removal with 99.04% was a3.b2.c1 which contemplates the optimum concentration of 4 mg/L of ferric sulfate, 8mg/L of aluminum sulfate and 13 mg/L of ferric chloride, giving a combined salt of 25 mg/L below the concentration of 40 mg/L which is the dose that is applied individually in each salt. Finally, this treatment was applied for its evaluation in the field through a pilot test carried out during three weeks which obtained an average of 93.13% removal.

# I. INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental es un problema que se ha venido agravando con el tiempo y que debe ser atendido de manera eficaz. El tratamiento de las aguas residuales, es decir, aquellas cuyas características han sido modificadas por diversos usos, es una manera de controlar la contaminación de los cuerpos de agua donde éstas son descargadas, con la finalidad de remover la mayor cantidad de residuos que pueden causar contaminación y asegurar de esta forma, que el cuerpo receptor tenga una calidad de agua tal que pueda sustentar los usos que se le dé a dicho cuerpo de agua. (Cárdenas et al., 2005).

Según el PNUMA (2000) en Latinoamérica menos del 20% del agua residual recibe un tratamiento adecuado, haciendo que esto sea un serio problema que requiere de estrategias eficientes tanto tecnológica como económicamente.

El tratamiento de las aguas residuales puede llevarse a cabo mediante procesos físicos, químicos o biológicos. Específicamente, el tratamiento de las aguas residuales domésticas, se realiza en dos o tres etapas: Tratamiento físico, denominada también primera etapa o tratamiento primario, tratamiento biológico, denominada también segunda etapa o tratamiento secundario y tratamiento avanzado, denominada también tercera etapa o tratamiento terciario. Esta última etapa se considera como algo fuera de lo común para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, siendo más comúnmente utilizadas la primera y la segunda etapa (Rolim, 2000).

Los tratamientos biológicos se clasifican en aerobios, anaerobios y facultativos. En el primer caso se requiere de la presencia de oxígeno disuelto en el medio; en el segundo caso el oxígeno está ausente; y en el tercero se pueden presentar las dos situaciones (Metcalf y Eddy, 1995).

Entre las técnicas de bajo costo utilizadas en los tratamientos biológicos para depurar las aguas residuales domésticas, ha sido las lagunas de estabilización. El lagunaje ha pasado en pocos años a convertirse en la elección prioritaria, para muchos países, incluso aplicadas en diversas condiciones climáticas, teniendo un recorrido de implantación desde los trópicos hasta Alaska (MOPT, 1991).

En la ciudad de Manta se emplea los sistemas de lagunaje para tratar el agua residual, ya que según Metcalf y Eddy (1995) estas son relativamente grandes y de poca profundidad, provistas de estructuras en tierra abiertas al sol y al aire y cuyo fin es el de lograr el tratamiento de las aguas residuales a través de procesos naturales, pero controlados.

Producto de la necesidad de eliminar nutrientes del agua, para evitar fenómenos de eutrofización, se implementaron procesos de precipitación química, con sales metálicas y coagulantes de origen orgánico o polímeros para la eliminación de fósforo principalmente. (Oyarzo 2007)

El control de los fosfatos en la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Manta, es clave para prevenir la eutrofización de las aguas superficiales. El fosfato es el nutriente con mayor grado de eutrofización, causa problemas en la calidad del agua y en la conservación de las lagunas de oxidación en donde se dan los tratamientos.

Por ello el presente estudio busca precipitar químicamente el fosfato mediante la combinación de sales de metales trivalentes en la PTAR municipal de Manta con el fin de complementar el proceso de depuración que se da en la planta de tratamiento.

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las aguas residuales se han convertido en uno de los generadores de impacto más negativos en el medioambiente debido a la concentración de sustancias contaminantes que afectan el equilibrio de los ecosistemas terrestres, acuáticos y marinos y consigo a la misma humanidad que ha generado la contaminación a pesar de los sistemas implementados para reducir el efecto en los cuerpos receptores.

En promedio, los países de ingresos altos tratan cerca del 70% de las aguas residuales municipales e industriales que generan. Este promedio cae a un 38% en los países de ingresos medios-altos y a un 28% en los países de ingresos medios-bajos. En los países de ingresos bajos solo el 8% recibe algún tratamiento. Estas estimaciones sustentan la aproximación que se cita comúnmente que, en el mundo, más del 80% de las aguas residuales son vertidas sin tratamiento alguno. (WWAP, 2017)

En Ecuador, los gobiernos municipales en su mayoría optan por tratar las aguas residuales mediante lagunas de oxidación, este es el caso de la ciudad de Manta que cuenta con un sistema de lagunas para el tratamiento de las aguas residuales urbanas, mismo que debido al constante crecimiento poblacional ya no es el más adecuado para abastecer la alta carga de contaminantes presentes en el agua residual.

Uno de los contaminantes más importantes y más difíciles de depurar son los fosfatos, que al no ser tratados correctamente son los principales responsables de la eutrofización del agua y de todos los problemas que este fenómeno trae consigo.

De acuerdo a Oyarzo, (2007) el fósforo en forma de ortofosfatos es un factor limitante del crecimiento de muchos microorganismos presentes en los fangos activados, que lo incorporan en su tejido celular en forma de compuestos orgánicos fosfatados.

Por lo tanto, el presente proyecto pretende dar solución a esta problemática complementando el tratamiento de la Planta de Tratamiento de Agua Residual municipal, por medio de la adición de sales de metales trivalentes combinadas como precipitantes químicos del fosfato.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

Precipitar químicamente fosfato mediante la combinación de sales de metales trivalentes en la PTAR municipal de Manta.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar los niveles de ortofosfato en el agua residual de la PTAR municipal de Manta antes de recibir tratamiento biológico.
- Dosificar combinaciones de sales en el agua residual para probar su efectividad a escala de laboratorio.
- Probar a escala piloto in situ la combinación de sales que tengan el mayor porcentaje de remoción de fosfato.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN**

Aunque los procesos biológicos son más económicos en algunas ocasiones no son las más adecuados si se los utiliza como único tratamiento, por esta razón la precipitación química del fósforo en conjunto con el tratamiento biológico de la planta garantiza la eficiencia en la depuración del agua con costos adecuados.

De acuerdo a Metcalf y Eddy, (1995) si se permite la acumulación y estancamiento del agua residual, la descomposición de la materia orgánica que contiene puede conducir a la generación de grandes cantidades de gases malolientes. A este hecho cabe añadir la frecuente presencia en el agua residual bruta, de numerosos microorganismos patógenos y causantes de enfermedades que habitan en el aparato intestinal humano o que pueden estar presentes en ciertos residuos industriales.

También suelen contener nutrientes que pueden estimular el crecimiento de plantas acuáticas, y puede incluir también compuestos tóxicos. Es por ello que la evaluación inmediata y sin molestias del agua residual de sus fuentes de generación, seguidas de su tratamiento y eliminación, es no solo deseable sino también necesaria en toda sociedad industrializada. (Metcalf y Eddy, 1995).

Por lo antes mencionado la eliminación de nutrientes (compuestos de fósforo y nitrógeno) de las aguas residuales es una operación importante, debido a que estos productos juegan un papel crítico en el tratamiento del agua residual.

Se ha acentuado el interés en la eliminación del fósforo últimamente por dos razones: (1) el fósforo es el nutriente más crítico, y (2) los procesos de eliminación de nitrógeno son menos eficaces y más caros. (Oyarzo, 2007).

La Constitución de la República del Ecuador de 2008 establece las normas y políticas públicas direccionadas a la protección y ejercicio de los derechos del agua que deben cumplir todas las empresas y plantas de tratamiento de aguas residuales para cumplir con el Art. 14 que reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, sumak kawsay.

## **II. HIPÓTESIS**

La eficiente combinación de sales de metales trivalentes logrará la precipitación química de fosfato en la PTAR municipal de Manta.

### **III. VARIABLES**

#### **3.1. Dependiente:**

Precipitación química de fosfato.

#### **3.2. Independiente:**

Combinación de sales de metales trivalentes.

## **IV. MARCO TEÓRICO**

### **4.1. Agua Residual**

Un agua residual puede definirse como un residuo líquido recogido mediante la red de alcantarillado para su envío a una planta depuradora, el objetivo principal de una planta de tratamiento de agua residual es reducir los riesgos sanitarios y evitar la contaminación de las aguas. (Mujeriego, 1990).

Sin embargo, de acuerdo a Seghezzi, (2004) se estima que entre el 90 y 95% del agua residual generada en el mundo se desecha sin ningún tipo de tratamiento previo, lo que afecta severamente la calidad de cuerpos de agua y suelos.

El vertido de aguas residuales sin tratar o con tratamiento inadecuado tendrá consecuencias que se clasifican en tres grupos, según tengan: efectos adversos para la salud humana por la reducción de la calidad del agua; efectos ambientales negativos debido a la degradación de las masas de agua y de los ecosistemas; y posibles efectos en las actividades económicas (PNUMA, 2015).

### **4.2. Fuentes contaminantes del agua**

Las principales fuentes de contaminación se pueden agrupar en cuatro grandes grupos de acuerdo a su procedencia:

- a) Urbanas o municipales
- b) Industriales
- c) Agropecuarias
- d) Naturales

#### **4.2.1. Fuentes urbanas**

Corresponden a las cargas de residuos de origen doméstico y público que constituyen las aguas residuales municipales (lavado de ropa, baño, desperdicios de cocina, limpieza y preparación de alimentos y lavado de loza.) Las concentraciones urbanas de población constituyen una de las mayores fuentes de contaminación, debido a los grandes volúmenes de aguas residuales domésticas producidas, las cuales, en su mayor parte, son colectadas por los sistemas de alcantarillado. (Ramos, et. al., 2002)

Debido al gran crecimiento de las ciudades, la mayoría de la zonas suburbanas o rurales no cuentan con el sistema de alcantarillado y por ende disponen sus aguas residuales en pozos sépticos o directamente a algún cuerpo de agua.

#### **4.2.2. Fuentes industriales**

Son las descargas originadas por el desarrollo de actividades correspondientes a la extracción y transformación de los recursos naturales en bienes de consumo. La actividad industrial está integrada por una variedad muy amplia de procesos, de los cuales va a depender los volúmenes de agua residual generada y la naturaleza fisicoquímica de la misma, como grasas, aceites, materia orgánica, metales pesados, ácidos, nutrientes, entre otros.

De acuerdo a Ramos et. al., (2002) los contaminantes más comunes de las descargas industriales en general proceden de las siguientes fuentes:

- Agentes químicos de acondicionamiento de agua para enfriamiento.
- Purga de lodos acumulados en torres de enfriamiento.
- Lavado de materia prima.
- Procesos de transporte con residuos de producto terminado.
- Compuestos químicos usados en el lavado de equipo.
- Sustancias químicas empleadas como materia prima y reactivos.
- Desechos de materia orgánica generados durante el proceso de industrialización.

- Desechos ácidos y alcalinos generados en prácticas auxiliares del proceso industrial, como la regeneración de intercambiadores iónicos, lavado de filtros, limpieza de equipo, etc.
- Metales pesados que se generan en algunos procesos de transformación.

#### **4.2.3. Fuentes agropecuarias**

Son los afluentes de instalaciones dedicadas a la crianza y engorde de ganado, así como las aguas de retorno de los campos agrícolas. Con el uso de plaguicidas y fertilizantes estas aguas generan una fuente importante de contaminación que afecta los ecosistemas acuáticos, ya que son muy difíciles de manejar, especialmente en temporada lluviosa; lo que puede ocasionar graves problemas de eutrofización.

#### **4.2.4. Fuentes naturales**

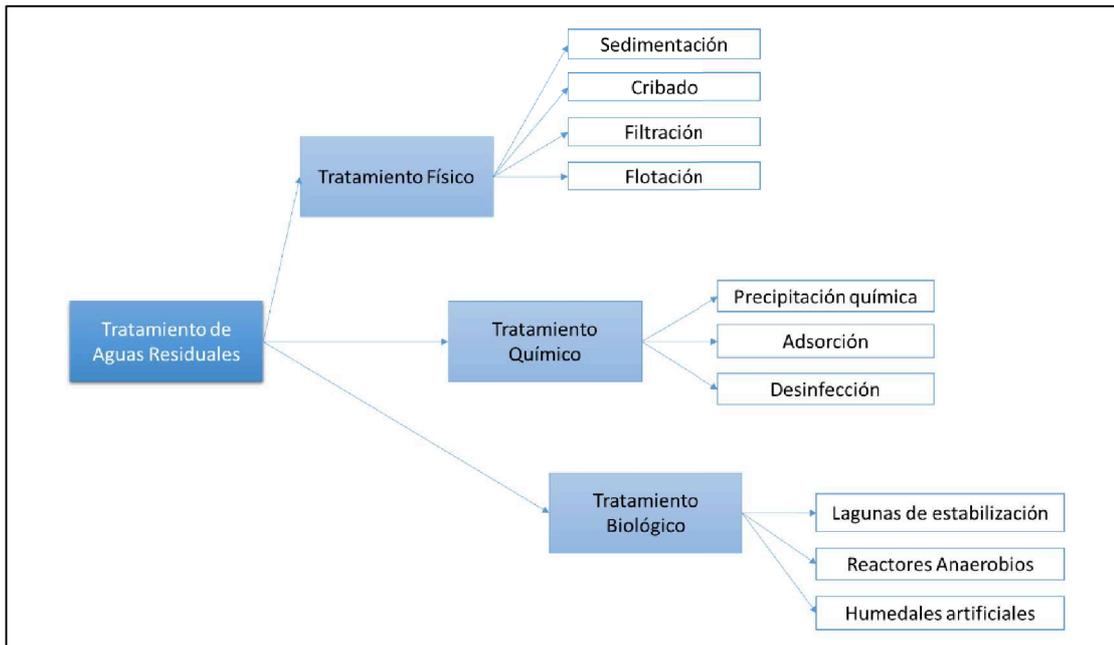
La contaminación por fuentes naturales ocurre debido al arrastre de materia orgánica por escorrentía, así como los compuestos inorgánicos producidos por la erosión del suelo, sin embargo, este tipo de contaminación es la genera menos problemas, ya que la naturaleza tiene la capacidad de autodepurarse, siempre que los contaminantes no superen su capacidad de carga.

### **4.3. Alternativas de tratamiento de las aguas residuales**

Se entiende como tratamiento de aguas residuales, a los procesos encaminados a conseguir reducir a límites permisibles de compuestos contaminantes que se encuentran en el agua luego del uso que haya tenido, ya sea agrícola, doméstico o industrial. Entre los principales compuestos contaminantes del agua se puede mencionar a los sólidos suspendidos, sólidos disueltos, aceites y grasas, fosfatos, nitratos, cloruros, materia orgánica, virus y patógenos.

En la actualidad, gracias a los avances científicos y tecnológicos existen diversas alternativas para el tratamiento del agua residual, las cuales pueden agruparse de acuerdo al aspecto técnico de su funcionamiento tal como se muestra en la Figura 1.

**Figura 1.** Principales alternativas para el tratamiento de aguas residuales.



**Elaborado por:** Cevallos y Zipa. 2018.

De acuerdo a Orozco, et. al. sf, para dar tratamiento a aguas residuales de cualquier tipo, antes de seleccionar la tecnología de tratamiento deben ser tomados en cuenta factores como:

1. Tipo agua residual a tratar; se debe conocer los componentes y concentraciones de sustancias contaminantes presentes.
2. Volúmenes de agua a tratar; en conjunto con lo anterior determinan los requerimientos de área de terreno y dimensiones de las unidades de tratamiento a implementar.
3. Normas de descontaminación; las normativas y legislación vigente es fundamental para la implementación de un sistema de tratamiento.

Una vez evaluados los tres aspectos antes mencionados se considera las diferentes alternativas de tratamiento, teniendo en cuenta la viabilidad tanto técnica como económica, de manera que los parámetros fisicoquímicos y biológicos del agua tratada estén por debajo de los límites máximos permisibles para ser descargado a un cuerpo receptor.

#### **4.4. Lagunas de oxidación**

Son excavaciones de poca profundidad en el cual se desarrolla una población microbiana compuesta por bacterias, algas y protozoos que conviven en forma simbiótica y eliminan en forma natural patógenos relacionados con excrementos humanos, sólidos en suspensión y materia orgánica, causantes de enfermedades tales como el cólera, parasitismo, hepatitis y otras enfermedades gastrointestinales. (Vinces, 2014)

Las lagunas de oxidación han sido empleadas para tratar aguas residuales desde hace 3,000 años. El primer tanque de estabilización artificial que se construyó fue en San Antonio, Texas, en 1901. Para 1975 se encontraban operando 7,000 lagunas en los Estados Unidos y 868 en Canadá.

La implementación de lagunas como método de tratamiento se ve limitado por los efectos adversos que pueden causar cuando hay asentamientos poblacionales cercanos a las mismas; pues en caso de manejo no adecuado, provocan malos olores y proliferación de insectos. Al mismo tiempo por su ubicación se pueden ocasionar problemas de contaminación a acuíferos, en última instancia y desde el punto de vista estético causan afectación al paisaje. (Orozco, et. al., sf)

Dependiendo del carácter de los procesos biológicos que se desarrollen y las condiciones que predominen durante su operación (suministro de oxígeno), las lagunas de estabilización pueden recibir diferentes nombres; estas serán descritas brevemente:

1. Lagunas anaerobias, que se basan en los procesos de descontaminación por una población microbiana en ausencia de oxígeno;
2. Lagunas facultativas, que tienen tanto zonas anaerobias como aerobias;
3. Lagunas de maduración, o lagunas aerobias de aireación natural;
4. Lagunas aerobias en base de aireación forzada o aireación mecánica;

#### **4.4.1. Lagunas anaerobias**

Las lagunas anaerobias se utilizan habitualmente como primera fase del tratamiento de aguas residuales urbanas o industriales con alto contenido en sólidos en suspensión totales y en materia orgánica biodegradable; alcanzándose una reducción de sólidos en suspensión totales del orden del 70% y una reducción media del 50% en materia orgánica. En ellas la degradación de la materia orgánica se produce en condiciones anaerobias. Estas lagunas suelen tener una profundidad entre 2 y 5 metros y tiempos de retención hidráulicos entre 1 y 4 días. (Esteve, et. al., 2003)

En las lagunas anaerobias, al igual que en los reactores anaerobios, interviene un gran número de bacterias, dentro de las cuales se distinguen tres principales grupos: fermentadoras, acetogénicas y metanogénicas; cada uno de estos grupos realizan tareas específicas dentro del proceso de digestión anaerobia. (Orozco, et. al., sf)

#### **4.4.2. Lagunas facultativas**

Las lagunas facultativas reciben agua residual bruta o bien procedente de lagunas anaerobias, fosas sépticas o tanque de sedimentación convencional. La reducción de la materia orgánica varía entre un 75-80% para tiempos de retención entre 7 y 15 días. La profundidad media de estas lagunas suele estar

comprendida entre 1 y 2 metros. En este tipo de lagunas se distinguen dos zonas, una superficial aerobia donde se produce la oxidación de la materia orgánica a expensas del oxígeno procedente de la acción fotosintética de las algas y la aireación superficial, y otra más profunda anaerobia donde tiene lugar la degradación anaerobia de la materia orgánica, así como de los lodos que se acumulan en esta zona. (Esteve, et. al., 2003)

Estas lagunas requieren de una superficie relativamente grande, ya que la penetración de oxígeno depende de dos factores: la difusión del aire, promovido por el viento y la generación por parte de algas, que requieren de energía solar (luz) para llevar a cabo su fotosíntesis. (Orozco, et. al., sf)

#### **4.4.3. Lagunas de maduración**

Las lagunas de maduración, con una profundidad entre 1 y 1,5 metros y un tiempo de retención hidráulico entre 3 y 7 días reciben el efluente procedente de un tratamiento secundario (ya sea de lagunas facultativas o de plantas biológicas convencionales).

El principal objetivo que se persigue con el funcionamiento de estas lagunas es el de obtener un efluente de elevada calidad microbiológica y reducir el contenido de nutrientes (nitrógeno y fósforo, principalmente) hasta los niveles deseados. (Esteve, et. al., 2003)

#### **4.5. Ciclo del fósforo en aguas residuales**

El fósforo puede llegar a una PTAR proveniente de aguas de agricultura o bien en menor cantidad de desechos humanos, se puede encontrar en forma de fosfatos, que se clasifican a su vez en ortofosfatos, polifosfatos o fosfatos orgánicos.

Generalmente el fósforo suele presentarse en forma de disolución, aunque también pueden estar presentes en forma de partículas granuladas, constituyendo esta cifra entre un 5-15 % del total (Marín, 2003).

Los ortofosfatos constituyen entre un 15-35 % del total disuelto, mientras que los polifosfatos constituyen el 65-85 % restante. Bien es cierto que estos últimos, mediante hidrólisis pueden revertirse a ortofosfatos, aunque éste es un proceso lento (Navarro y López, 2008).

De acuerdo Ferrara y Harleman, (1980) a Los procesos de transformación a que se encuentran sometidos los compuestos de fósforo son los siguientes:

- Mineralización del fósforo orgánico, que resulta en la liberación de fósforo soluble directamente asimilable por los microorganismos. El fósforo orgánico está en forma de ésteres fosfóricos y resulta fácilmente hidrolizable.
- Precipitación del fósforo como sales insolubles, que quedan inmovilizados a efectos de la actividad biológica en los sedimentos del fondo. La fracción más importante de este fósforo precipita en forma de fosfato cálcico y fosfato férrico.
- Asimilación de fósforo soluble en el crecimiento de algas y bacterias, con lo que queda incorporado a su tejido celular y convertido, por tanto, en fósforo orgánico.

#### **4.6. Fosfato en el agua residual**

El fósforo del agua residual puede estar presente como ortofosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), fosfatos inorgánicos condensados (polifosfatos y metafosfatos) y fosfatos orgánicos. La remoción de fósforo se realiza comúnmente mediante precipitación química y/o aplicando métodos biológicos (proceso EBPR, enhanced biological phosphorus removal) (Caravelli et al., 2008)

El sistema EBPR ha sido implementado en numerosos países desarrollando considerable experiencia práctica, no obstante, hay consenso generalizado que el proceso EBPR es inestable e incluso puede fallar violando límites de descarga (Lötter, 1991; Thomas et al., 2003) Por tal razón, es necesario el adecuado uso de precipitantes químicos para disminuir la carga de fosfatos en el agua residual.

#### **4.7. Operaciones y procesos para la eliminación del fósforo**

De acuerdo a Manahan, (2006) el tratamiento avanzado de aguas residuales o desechos líquidos requiere normalmente la remoción del fósforo para reducir el crecimiento de algas, que pueden desarrollarse a niveles  $PO_4^{3-}$  de sólo 0.05mg/L; y dado que las aguas residuales municipales contienen típicamente alrededor de 25mg/L de fosfato, la eficiencia de eliminación debe ser bastante alta para prevenir el crecimiento de algas.

Ninguna de las formas de fósforo presentes en el agua residual es gaseosa a las temperaturas y presiones normales, de tal modo que la eliminación debe conseguirse por formación de un precipitado insoluble que pueda eliminarse por sedimentación por gravedad. Los productos químicos principalmente utilizados para ello son la cal, el sulfato de aluminio y el cloruro o sulfato férrico. (Metcalf y Eddy, sf)

#### **4.8. Adición de sales metálicas al tratamiento de aguas residuales**

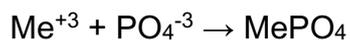
Las sales metálicas pueden añadirse al agua residual cruda en el tanque de aireación del fango activado, o en el canal de alimentación del clarificador final. En los sistemas de filtros percoladores, las sales se añaden al agua residual cruda o al afluente del filtro. También se han usado sistemas en los que la adicción se realiza en varios puntos.

El fósforo es eliminado de la fase líquida por medio de una combinación de precipitación, adsorción, intercambio y aglomeración, y se extrae del sistema tanto con los fangos primarios como con los secundarios, o con ambos. (Metcalf y Eddy, sf)

#### **4.9. La reacción de precipitación**

El Hierro  $Fe^{+3}$  y el Aluminio  $Al^{+3}$  son sustancias de precipitación que tiene un comportamiento similar; sin embargo, los flóculos de hierro, por lo general son más pesados y compactos que los de aluminio, lo que es importante conocer para los procesos de separación.

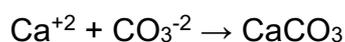
De acuerdo a la ATV (1992), la eliminación de fosfatos por medio de sales metálicas se fundamenta básicamente en la precipitación del  $PO_4^{-3}$  a través del  $Me^{+3}$ , es decir, a través de la formación de los fosfatos poco solubles  $FePO_4$  y  $AlPO_4$ , según la fórmula de reacción:



En cuanto a la precipitación de fosfato de calcio, los productos de precipitación más importantes son hidroxilo de apatita:



Así como carbonato de calcio:



#### **4.9.1. Reacciones concurrentes**

Simultáneamente a la precipitación de fosfato, ocurren otras reacciones que, desde el punto de vista técnico, conllevan a un aumento en el gasto de las sustancias de precipitación y floculación y que, de esta manera, aumentan además la generación de lodo. Básicamente se pueden distinguir entre:

- Formación de hidróxido
- Formación de carbonato
- Formación de complejos con sustancias orgánicas
- Reacciones de adsorción

Las reacciones más importantes que se producen en forma paralela son; en el caso de  $\text{Fe}^{+3}$  y  $\text{Al}^{+3}$ , la precipitación del ión de hidróxido  $\text{OH}^-$  y en el caso de  $\text{Ca}^{+2}$ , la formación de carbonato. La precipitación química de sustancias orgánicas no juega un papel importante en el proceso de depuración por precipitación. (ATV, 1992)

#### **4.10. Procesos de eliminación de fosfato por precipitación química**

Los principales procesos de eliminación del fosfato se diferencian según los puntos de aplicación del precipitante; los principales son:

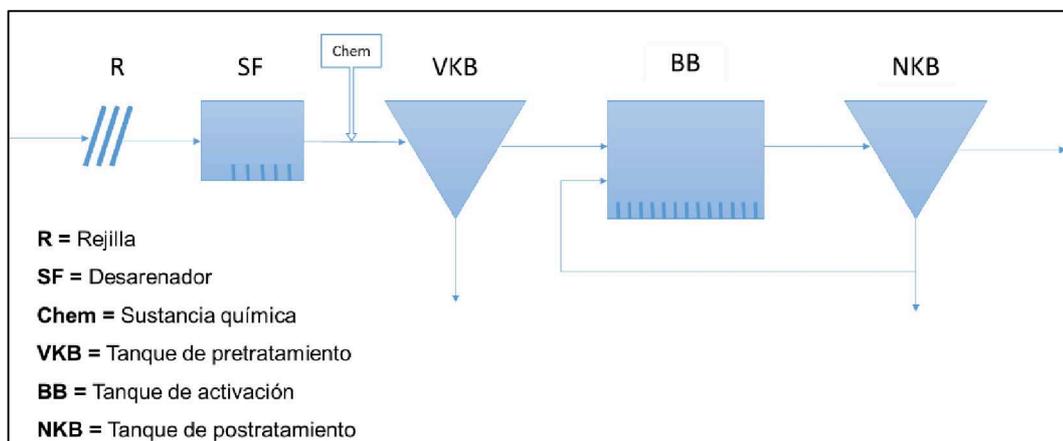
- Precipitación previa
- Precipitación simultánea o coprecipitación
- Precipitación posterior o postprecipitación

#### 4.10.1. Precipitación previa

De acuerdo a la ATV (1992), en el proceso de precipitación previa, los precipitantes se introducen antes de la pila de pretratamiento. El lugar de la dosificación se escoge de tal manera que no se destruyan los flóculos ya formados. Los productos de la precipitación se separan en la pila de pretratamiento.

El fósforo se elimina con una eficacia del 90% y la concentración final de P es inferior a 0.5 mg/L. La dosis química necesaria para la eliminación de fósforo es la misma que la necesaria para la eliminación de la DBO y de SS (Lenntech, 2018).

**Figura 2.** Diagrama de flujo de la precipitación previa



**Elaborado por:** ATV. Asociación Alemana de Saneamiento. 1992.

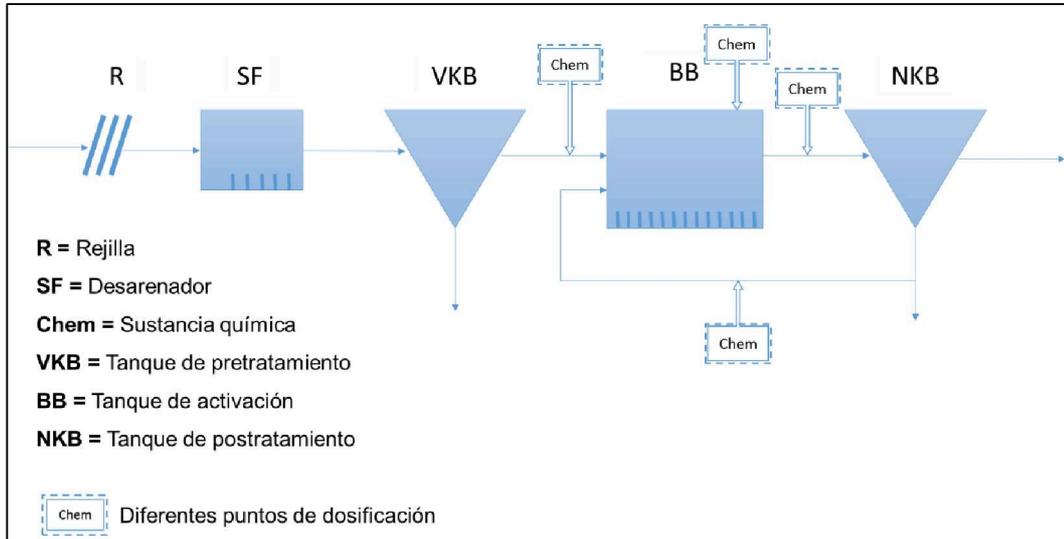
#### 4.10.2. Precipitación simultánea o coprecipitación

En la precipitación simultánea la adición del precipitante se lleva a cabo en el proceso de activación y en el caso de un reactor biológico rotativo, antes de la pila de postratamiento o en la tubería de lodos activados (ATV, 1992).

De acuerdo a Lenntech (2018), el proceso de coprecipitación es particularmente adecuado para plantas de lodos activos, donde los agentes químicos se alimentan directamente en el tanque de aireación o antes de él. La recirculación continua de lodo, junto con la precipitación y los procesos de absorción, permiten una reducción del consumo de reactivos químicos. Además, los costes de la planta son más bajos, ya que no se necesitan grandes tanques de postprecipitación. En este proceso los únicos agentes químicos que se añaden son hierro y aluminio.

Los inferiores costes y la mayor simplicidad se confrontan con una eficacia de eliminación inferior a la obtenida con la postprecipitación (alrededor del 85%). La concentración de fósforo en el efluente final es aproximadamente de 1 mg/L (Lenntech, 2018).

**Figura 3.** Diagrama de flujo de la precipitación simultánea.



**Elaborado por:** ATV. Asociación Alemana de Saneamiento. 1992.

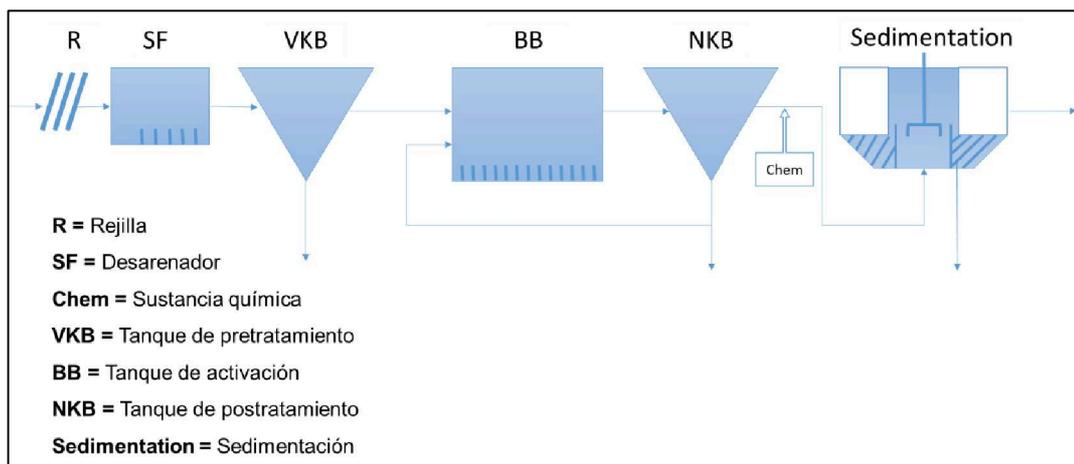
#### 4.10.3. Precipitación posterior o postprecipitación

La postprecipitación es un tratamiento estándar de efluentes secundarios, normalmente se usan sólo reactivos metálicos. Es el proceso que proporciona las más altas eficiencias de eliminación de fósforo. La eficiencia puede alcanzar el 95%, y la concentración de fósforo en el efluente puede ser inferior a 0.5 mg/L (Lenntech, 2018).

Los procedimientos de precipitación posterior se caracterizan por el hecho que la precipitación se lleva a cabo en una fase posterior separada de la del tratamiento biológico (ATV, 1992).

Así mismo la ATV, (1992) sostiene que la fase de precipitación posterior constituye un paso independiente del proceso y no tiene mucho efecto sobre los procesos preconnectados. Además, las oscilaciones en la concentración del afluente son relativamente bajas, facilitando una mejor adaptación de la dosificación del precipitante.

**Figura 4.** Diagrama de flujo de la precipitación posterior



**Elaborado por:** ATV. Asociación Alemana de Saneamiento. 1992.

#### **4.11. Análisis de fosfatos**

Se acuerdo a Severiche, et al. (2013), el análisis de fosfatos implica dos etapas básicas:

- La conversión de la forma de fósforo que interesa determinar, a ortofosfato disuelto. Esto se logra mediante una hidrólisis o digestión oxidante. Cuando se quiere distinguir entre la forma disuelta y la suspendida, se realiza una filtración por membrana.
- La determinación colorimétrica de ortofosfatos. De los tres métodos existentes: ácido vanadomolibdofosfórico, cloruro de estaño II y ácido ascórbico.

#### **4.12. Métodos para la determinación colorimétrica de fosfatos**

El fósforo total se determina en una muestra sin filtrar y en ella están presentes todas las formas de fósforo. Debido a que el fósforo puede estar presente en combinación con la materia orgánica, es necesario para determinar el fósforo total, preparar la muestra mediante un método de digestión capaz de oxidar la materia orgánica efectivamente, para liberar el fósforo como ortofosfato, para su posterior determinación (Suarez, 2004).

Tal como lo menciona Severiche, et al. (2013), existen tres métodos para la determinación colorimétrica de fosfatos, los cuales se describen a continuación:

##### **4.12.1. Método amarillo del ácido vanadomolibdofosfórico**

En una solución diluida de ortofosfato, el molibdato amónico reacciona en condiciones ácidas para formar un heteropoliácido, ácido molibdofosfórico. En presencia de vanadio forma ácido vanadomolibdofosfórico amarillo. La intensidad del color amarillo es proporcional a la concentración de fosfatos (AOAC, 2005).

Algunas sustancias pueden causar interferencias como el hierro ferroso produciendo un color azul, pero no afecta los resultados si su concentración es menor a 100 mg/L, valor que es mucho mayor que el contenido en la matriz de estudio. El ion férrico causa interferencias cuando la longitud de onda a la cual se mide la intensidad del color es baja, particularmente a 400 nm (González, 2016)

#### **4.12.2. Método azul del ácido ascórbico**

Este método se aplica a la determinación de P inorgánico u ortofosfatos. Se basa en la reacción en medio ácido entre el anión fosfato y el molibdato amónico en presencia de tartrato de K y Sb, para generar ácido fosfomolibdico el cual es reducido mediante ácido ascórbico generando una coloración azul debida al Mo y susceptible de determinación colorimétrica (Mercado, 2017).

La absorbancia del complejo medida a una longitud de onda de 880 nm, resulta proporcional a la concentración de ortofosfatos en la muestra. Los fosfatos que responden a la determinación colorimétrica sin recurrir a la conversión por hidrólisis o digestión oxidante, se consideran “fósforo reactivo”, el cual da una medida fundamentalmente del ortofosfato, sin excluir una pequeña fracción de fosfato condensado que puede hidrolizarse durante el análisis. (Severiche, et al., 2013)

Así mismo Severiche, et al., (2013), sostiene que el método es aplicable a todo tipo de aguas, incluyendo las marinas, ya que la influencia de la salinidad es despreciable en la intensidad del color. Además, que el color natural del agua no suele interferir a la elevada longitud de onda empleada.

#### 4.12.3. Método cloruro de estaño II

De acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-029-SCFI-2001 (2001), este método se basa en la reacción del fósforo contenido en la muestra como ortofosfato con el ácido molíbdico para formar el ácido 12-molibdofosfórico según la reacción:



El ácido 12-molibdofosfórico es reducido por el cloruro de estaño a azul de molibdeno, compuesto de composición desconocida que contiene una mezcla de Mo (VI) y Mo (V), que absorbe a 690 nm. La intensidad del color azul formado depende de la concentración de fosfatos adicionados al heteropoliácido. El método es aplicable cuando el contenido de fósforo en las muestras se encuentra entre las concentraciones de 0,01 mg P/L a 6,0 mg P/L.

Todo el fósforo contenido en la muestra debe estar como ión ortofosfato ( $\text{PO}_4$ )<sup>-3</sup>, ya que el método espectrofotométrico es esencialmente específico para este ión ortofosfato ( $\text{PO}_4$ )<sup>-3</sup>. La materia orgánica de la muestra es destruida por medio de una digestión con persulfato de amonio y ácido sulfúrico, rompiendo las ligaduras orgánicas del fósforo (C-P y/o C-O-P), e hidrolizando los polifosfatos a ortofosfatos (NMX, 2001).

## **V. METODOLOGÍA**

### **5.1. Métodos y técnicas.**

Los métodos y técnicas utilizados en el desarrollo de presente trabajo de investigación son:

#### **5.1.1. Método deductivo:**

Se enmarca en la denominada lógica racional y consiste en que, partiendo de unas premisas generales, se puede llegar a inferir enunciados particulares, es así que conociendo las características del agua residual y las condiciones del sistema de tratamiento por lagunaje se considera necesario la implementación de precipitación química como sistema de tratamiento complementario.

#### **5.1.2. Método experimental:**

Siguiendo el método experimental, la investigación se desarrolló en dos etapas; en primera instancia a escala de laboratorio, mediante el montaje de ensayos en tres repeticiones para cada tratamiento, donde para el análisis de los resultados se realizaron pruebas estadísticas para la comprobación de la hipótesis; donde se obtuvo el tratamiento más eficiente, que sirvió para ejecutar la segunda etapa de la investigación mediante el desarrollo de una prueba piloto in situ.

#### **5.1.3. Método analítico sintético:**

Se parte de la descomposición del objeto de estudio en cada una de las partes que lo constituyen para poder tratar los elementos que originan el problema, determinando a los ortofosfatos como el contaminante más importante a ser removido mejorando las características fisicoquímicas del agua residual a tratar. Con la información obtenida se realiza la síntesis del tratamiento más eficiente en la depuración del agua residual municipal.

#### 5.1.4. Técnica bibliográfica:

Se considera el punto de partida para la realización del presente trabajo de investigación, mediante la búsqueda fundamento bibliográfico encontrado en diversas fuentes de referencia, como libros, artículos científicos, tesis, manuales, documentos de seminarios y talleres y websites.

## 5.2. Diseño experimental.

El diseño experimental que se utilizó en este trabajo de investigación, constó de tres factores, las sales metálicas trivalentes, las cuales fueron: A: Sulfato férrico  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , B: Sulfato de aluminio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  y C: Cloruro férrico  $\text{Fe Cl}_3$ ; así mismo cada uno de estos factores estuvo compuesto por 3 niveles que correspondieron a la variación de la cantidad de cada sal por litro, valor que representa su peso expresado en mg/L, tal como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Niveles del diseño experimental.

	<b>A</b> <b><math>\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3</math></b>	<b>B</b> <b><math>\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3</math></b>	<b>C</b> <b><math>\text{Fe Cl}_3</math></b>		
<b>a<sub>1</sub></b>	13 mg/L	<b>b<sub>1</sub></b>	13 mg/L	<b>c<sub>1</sub></b>	13 mg/L
<b>a<sub>2</sub></b>	8 mg/L	<b>b<sub>2</sub></b>	8 mg/L	<b>c<sub>2</sub></b>	8 mg/L
<b>a<sub>3</sub></b>	4 mg/L	<b>b<sub>3</sub></b>	4 mg/L	<b>c<sub>3</sub></b>	4 mg/L

**Elaborado por:** Cevallos y Zipa. 2018.

### 5.2.1. Selección de los precipitantes químicos y el efluente.

Previo a la ejecución del experimento se realizó la selección de los precipitantes químicos, teniendo en cuenta como criterio de selección la trivalencia de los reactivos a ser evaluados en el experimento, para lo cual, se contactó a la empresa de instrumentos de laboratorio y reactivos Biomed Instrumens, que fue el proveedor de los tres reactivos, Sulfato férrico  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , Sulfato de aluminio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  y Cloruro férrico  $\text{Fe Cl}_3$ ; que fueron usados en la experimentación.

En cuanto a la obtención del efluente a tatar, se realizó la debida gestión mediante un oficio dirigido al gerente de la EPAM para conseguir acceso a la planta y por ende para la toma de muestras del agua residual de la PTAR municipal.

Una vez autorizado el ingreso se coordinaron visitas para definir el punto de muestreo en todo el sistema, mismo que se realizó en el reactor donde se homogeniza el agua procedente del pretratamiento, previo a la salida del efluente a las lagunas anaerobias (Anexo 1).

La toma de muestras se realizó en dos canecas de 20 litros en cada repetición (Anexo 2) y para el montaje de la prueba piloto se llevó hasta el punto de muestreo el diseño elaborado para la prueba.

### **5.2.2. Montaje de ensayos**

Los ensayos fueron montados en laboratorio adaptando el método de Test de Jarras con el uso de agitadores magnéticos (Anexo 3).

Con el diseño experimental trifactorial se establecieron 27 tratamientos que resultaron de la combinación de los niveles de cada factor, tal como se muestra en la Tabla 2, los cuales fueron replicados 3 veces.

**Tabla 2.** Tratamientos del diseño experimental.

a1. b1. C1	a2. b1. C1	a3. b1. C1
a1. b1. C2	a2. b1. C2	a3. b1. C2
a1. b1. C3	a2. b1. C3	a3. b1. C3
a1. b2. C1	a2. b2. C1	a3. b2. C1
a1. b2. C2	a2. b2. C2	a3. b2. C2
a1. b2. C3	a2. b2. C3	a3. b2. C3
a1. b3. C1	a2. b3. C1	a3. b3. C1
a1. b3. C2	a2. b3. C2	a3. b3. C2
a1. b3. C3	a2. b3. C3	a3. b3. C3

**Elaborado por:** Cevallos y Zipa. 2018

#### **5.2.2.1. Materiales, reactivos y equipos utilizados**

- Balanza Analítica
- 3 Espátulas
- 3 Vasos de Precipitación de 1000ml
- 3 Agitadores magnéticos.
- 3 Balas magnéticas.
- 14 cajas Petri.
- 27 botellas plásticas
- Sulfato de Aluminio
- Sulfato Férrico
- Cloruro Férrico
- Efluente a tratar

a) Para comenzar el proceso, se realizó el pesaje de la combinación de los reactivos de cada tratamiento en una balanza analítica, utilizando cajas Petri para colocar el contenido pesado; (las cantidades utilizadas para formar cada uno de los tratamientos se exponen en la tabla 1).

b) Para identificar cada tratamiento fue necesario rotular el código del tratamiento (expuestos en la tabla 2) en cada caja Petri.

- c) Luego se procedió a verter 1 litro del agua residual en cada uno de los vasos de precipitación de 1000 mililitros.
- d) A cada vaso de precipitación se le colocó en su interior una bala magnética para luego ser colocado sobre el agitador magnético (apagado).
- e) A continuación, se agregó la combinación de las sales metálicas trivalentes correspondientes a cada tratamiento.
- f) Posteriormente se dió inicio al proceso de agitación, el cual se realizó en dos partes: inicialmente a 1400 rpm durante 5 minutos y seguido a esto se bajó la velocidad a 40 rpm durante 20 minutos.
- g) Transcurrido este tiempo se apagó el agitador y se dejó en reposo por unos 20 minutos más.
- h) Una vez que se produjo la precipitación química de los ortofosfatos, el agua tratada fue colocada en botellas plásticas de 500ml.
- i) Este proceso se repitió 3 veces para cada tratamiento.
- j) Para finalizar con esta etapa de la investigación se procedió a realizar los análisis de ortofosfatos en el agua residual tratada.

### **5.2.3. Análisis de Ortofosfatos**

Para el análisis de ortofosfato se empleó el método del ácido ascórbico, técnica 4500 – P E. (APHA, AWWA, WEF, 2012), contenido en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22th Edition.

Este método, que se plantea en la página 4-155, se vale de la reacción del molibdato amónico, el tartrato antimónico potásico en medio ácido y la presencia de ortofosfatos para dar ácido hetero-poliácido fosfomolibdico que se reduce a azul de molibdeno, de color intenso por el ácido ascórbico (Anexo 4 y 5)

#### **5.2.3.1. Materiales, reactivos y equipos**

- Balanza analítica
- Espátulas

- Vasos de precipitación de 100ml
- Vasos de precipitación de 250ml
- Vaso de precipitación de 500ml
- Probeta de 100ml
- Probeta de 50ml
- 2 Balones volumétrico de 100ml
- 3 Balones volumétrico de 500ml
- Matraces erlenmeyer de 250ml
- Matraz erlenmeyer de 125ml
- Micropipetas
- 2 celdas de cuarzo
- Papel limpia celdas
- Espectrofotómetro para lectura de absorbancia a 880 nm
- Agua destilada
- Ácido Clorhídrico HCl 1N al 10%
- Ácido Sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 5N
- Tartrato de Antimonio y Potasio K(SbO) C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O<sub>6</sub> .1/2H<sub>2</sub>O
- Molibdato de Amonio (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub> Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub> .4H<sub>2</sub>O
- Ácido Ascórbico (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub>) 0.1 M
- Alcohol etílico o isopropílico al 95%
- Fosfato monopotásico KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>
- Fenolftaleína

### **5.2.3.2. Preparación de los reactivos**

- Solución de ácido sulfúrico, (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 5N (preparación: se diluyó cuidadosamente 70 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado hasta 500 mL con agua destilada).
- Solución de tartrato de antimonio y potasio, K(SbO) C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O<sub>6</sub> (preparación: se pesaron 1,3715g de K(SbO) C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O<sub>6</sub> . 1/2H<sub>2</sub>O para luego diluirlo a 500mL con agua destilada)

- c) Solución de molibdato de amonio,  $(\text{NH}_4)_6 \text{Mo}_7\text{O}_{24}$  (preparación: se pesaron 20g de  $(\text{NH}_4)_6 \text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  y se diluyeron a 500 mL con agua destilada)
- d) Solución de ácido ascórbico,  $(\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6)$  0.1 M (preparación: se pesaron 1,76 g de ácido ascórbico y se diluyeron a 100 mL con agua destilada).
- e) Solución alcohólica del indicador fenolftaleína, (preparación: se pesaron 0,5 g de fenolftaleína, que se transfirieron a un balón volumétrico de 100 mL, luego se agregaron 50 mL de alcohol etílico o isopropílico 95%, se mezcló y aforó con agua destilada).
- f) Reactivo combinado para ortofosfato (método del ácido ascórbico) (preparación: se mezcló en un erlenmeyer de 250 mL los siguientes reactivos en el orden que se mencionan (para 100 mL de reactivo): 50 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  5N, 5 mL de la solución de  $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$ , 15 mL de la solución de  $(\text{NH}_4)_6 \text{Mo}_7\text{O}_{24}$  y 30 mL de la solución de ácido ascórbico).
- g) Solución de ácido clorhídrico, HCl 1N (preparación: se diluyeron cuidadosamente 41,5 mL de HCl concentrado hasta 500 mL con agua destilada).
- h) Solución madre de ortofosfato 100,0 mg/L (preparación: se pasaron 4,39 g de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  anhidro y se diluyó a 1L con agua destilada).

### 5.2.3.3. Procedimiento

Luego de la preparación de cada solución y del reactivo combinado, se dió paso a la determinación del ortofosfato mediante la curva de calibración (Anexo 4).

- a) Todo el material de vidrio a utilizar fue lavado previamente con la solución de HCl 10% v/v.
- b) Posteriormente se preparó la curva de calibración de ortofosfato desde 5 hasta 1000 mg/L (5, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 y 1000 mg/L).
- c) Se vertió 25mL de patrón en un vaso de precipitación de 125mL
- d) Se colocó 4 gotas de la solución indicadora de fenolftaleína.

- e) Se ajustó el pH de la muestra a aproximadamente 8, empleando la solución de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,5 N. El pH adecuado se consigue cuando se observó la aparición de un color rosa pálido con el uso del indicador.
- f) Se agregó 4 mL del reactivo combinado y se agitó inmediatamente además se dejó reposar 10 minutos.
- g) Se agitó nuevamente y se realizó las lecturas de absorbancia a 880 nm, antes de que hayan transcurrido 30 minutos, a partir de la adición del reactivo combinado.
- h) Se usó un blanco de reactivos como solución de referencia y celdas de 1 cm de trayecto óptico para realizar la lectura en el espectrofotómetro con la longitud de onda establecida.
- i) Con los datos obtenidos se calculó la curva de calibración.
- j) Finalmente se procedió a analizar cada uno de los tratamientos siguiendo el protocolo expuesto en los puntos anteriores (Anexo 5).

#### **5.2.4. Prueba piloto**

La segunda etapa de la experimentación consistió en probar a escala piloto el tratamiento más eficiente según los datos recolectados en laboratorio, con el fin de comprobar su efectividad en una muestra de agua residual más grande.

De acuerdo a los resultados obtenidos en laboratorio el tratamiento a3.b2.c1 presentó el porcentaje de remoción más alto, por lo cual se seleccionó para la prueba en campo, misma que se realizó en la PTAR municipal de Manta los martes a las 15h00, durante tres semanas (Anexo 8).

Para la implementación de esta prueba se construyó el prototipo de un reactor con capacidad de 15 litros. donde se realizó la precipitación química de los fosfatos (Anexo 6). El prototipo fue diseñado teniendo en cuenta las siguientes partes: una manguera para el ingreso del agua a tratar, un agitador con su motor, dos válvulas para la salida del precipitado y una válvula para la salida del agua tratada (Anexo 7).

### **5.3. Análisis de datos.**

Luego de culminar con la experimentación se dió paso al análisis de los datos, mediante pruebas estadísticas, haciendo uso de las tablas de datos obtenidos, medias aritméticas, curva de calibración y porcentaje de remoción; mediante el software de cálculo Microsoft Excel 2016.

De la misma forma se empleó el software estadístico InfoStat en su versión estudiantil 2018, para realizar el análisis de varianza (ANOVA) y la separación de medias a través de Tukey, con la finalidad de determinar las diferencias significativas entre los diferentes de tratamientos. Además, se realizó una correlación de Pearson, para establecer si existe dependencia entre los resultados obtenidos entre tratamientos

## VI. RESULTADOS

### 6.1. Curva de calibración

En la Tabla 3 se presenta la curva de calibración obtenida por el método del ácido ascórbico con una longitud de onda de máxima absorción de 880nm, con patrones de 5, 300, 500 y 1000 mg/L para la conversión de ABS a mg PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>/L.

**Tabla 3.** Curva de calibración.

<b>Patrón (mg/L)</b>	<b>ABS</b>
<b>5</b>	0,973
<b>300</b>	1,049
<b>500</b>	1,104
<b>1000</b>	1,237
<b>Coefficiente de correlación</b>	0,999954693

**Elaborado por:** Cevallos y Zipa. 2018.

Los valores que no se ajustaron a la curva fueron descartados en base a la técnica 4500 – P E. descrita en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22th Edition, esto se realiza como una limpieza estadística para tener una curva con mínimo 3 puntos cuyo coeficiente de correlación sea mayor a 0,987.

### 6.2. Caracterización del efluente

La Tabla 4 muestra los datos obtenidos a partir de la caracterización inicial del efluente que corresponden a los valores del parámetro analizado (fosfato) en cada una de sus tres repeticiones, y la media.

**Tabla 4.** Caracterización del efluente

	Repetición	ABS	mg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> /L	
			Individual	Media
<b>Muestra sin tratamiento</b>	1	1,9590	789,50	801,67
	2	2,0040	812,00	
	3	1,9870	803,50	

**Elaborado por:** Cevallos y Zipa. 2018.

### 6.3. Concentración media de fosfatos en los tratamientos

Como resultado de los análisis de las muestras de agua tratada, se presenta en la Tabla 5. los valores en mg PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>/L de la media de las réplicas de los 27 tratamientos. Los resultados individuales de los análisis se encuentran en el Anexo 9.

**Tabla 5.** Concentración de fosfatos en cada tratamiento

Tratamiento	mg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> /L	Tratamiento	mg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> /L	Tratamiento	mg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> /L
	Media		Media		Media
a1.b1.c1	105,00	a2.b1.c1	45,17	a3.b1.c1	160,33
a1.b1.c2	401,50	a2.b1.c2	104,33	a3.b1.c2	165,50
a1.b1.c3	264,33	a2.b1.c3	12,83	a3.b1.c3	180,83
a1.b2.c1	48,33	a2.b2.c1	171,67	a3.b2.c1	7,67
a1.b2.c2	221,83	a2.b2.c2	53,17	a3.b2.c2	153,50
a1.b2.c3	80,00	a2.b2.c3	144,83	a3.b2.c3	279,83
a1.b3.c1	38,67	a2.b3.c1	196,17	a3.b3.c1	204,33
a1.b3.c2	164,33	a2.b3.c2	193,17	a3.b3.c2	204,67
a1.b3.c3	73,83	a2.b3.c3	219,17	a3.b3.c3	209,00

**Elaborado por:** Cevallos y Zipa. 2018.

## 6.4. ANOVA

Se evaluó la eficiencia de la combinación de los precipitantes químicos utilizados en los distintos tratamientos. Mediante los datos obtenidos a partir de los ensayos realizados en el laboratorio se calculó los porcentajes de remoción para la determinación del análisis de varianza del fosfato y su respectivo test de Tukey.

### Cuadro de Coeficiente de Variación

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
CONCENTRACIÓN	81	1,00	1,00	3,04

**Elaborado por:** Cevallos y Zipa. 2018.

### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	646284,50	26	24857,10	1163,66	<0,0001
TRATAMIENTO	646284,50	26	24857,10	1163,66	<0,0001
Error	1153,50	54	21,36		
Total	647438,00	80			

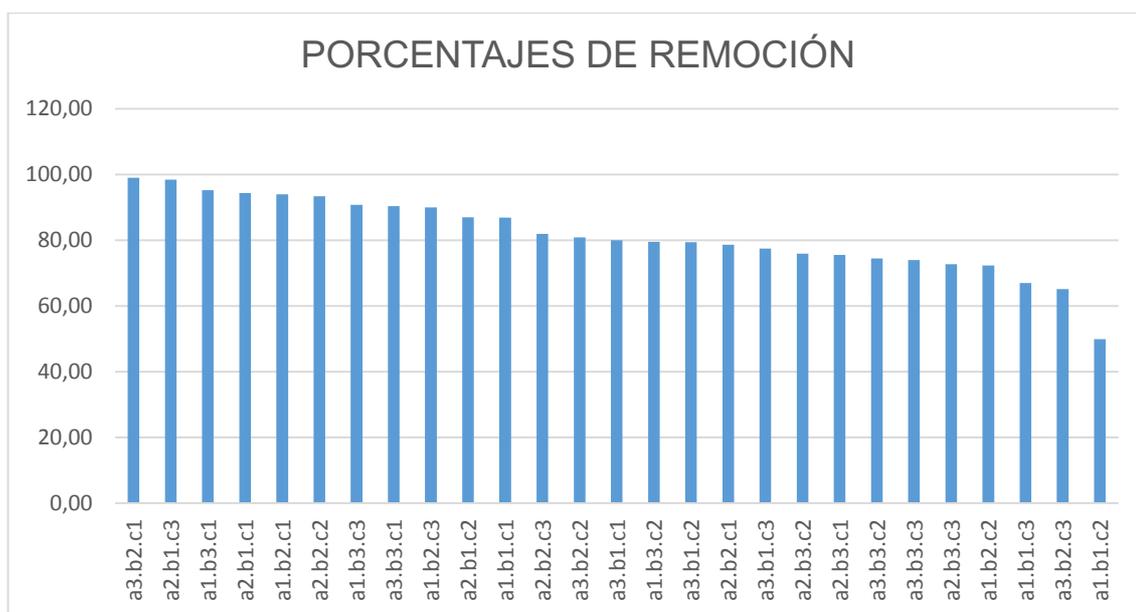
**Elaborado por:** Cevallos y Zipa. 2018.



## 6.5. Presentación de los porcentajes de remoción

Para la realización del siguiente gráfico estadístico (Figura 5), se utilizaron los datos de porcentaje de remoción descritos en la tabla del Anexo 10.

**Figura 5.** Porcentajes de remoción de fosfatos



**Elaborado por:** Cevallos y Zipa. 2018.

En el diagrama de barras se esquematizan de izquierda a derecha los porcentajes de remoción de fosfatos de mayor a menor. El tratamiento a3.b2.c1 consiguió un promedio de remoción de fosfato de 99.04%, siendo el tratamiento con porcentaje de remoción más alto; por lo que fue el tratamiento seleccionado para probar su eficiencia a escala piloto. Además, otros dos presentaron valores elevados de remoción, el tratamiento a2.b1.c3 obtuvo un porcentaje de 98.40% y el a1.b3.c1 presentó una remoción de fosfato del 95.18%.

Por otro lado, los que obtuvieron la tasa de remoción más baja fueron los tratamientos a1.b1.c3 con un porcentaje de 67.03%, el a3.b2.c3 con 65.09% y por último el tratamiento que mostró menor remoción de fosfato fue el tratamiento a1.b1.c2 con el 49.92%.

## 6.6. Presentación de resultados de la prueba piloto

Como se mencionó en párrafos anteriores, la prueba piloto fue puesta en marcha con el tratamiento a3.b2.c1, para evaluar su eficacia en campo; Los resultados se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Resultados de la prueba piloto

Tratamiento	Repetición	ABS	mg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> /L	
			Individual	Media
<b>a3.b2.c1</b>	1	0,501	60,50	54,83
	2	0,487	53,50	
	3	0,481	50,50	

**Elaborado por:** Cevallos y Zipa. 2018.

De acuerdo a la prueba realizada in situ, se determinó que el tratamiento a3.b2.c1 al ser aplicado en campo, obtuvo un porcentaje de remoción de 93,13%; un tanto menor a resultados obtenidos en laboratorio, sin embargo, la tasa de remoción de los fosfatos sigue siendo buena, considerando que posterior a la precipitación química sigue el tratamiento anaerobio de acuerdo al sistema de lagunaje de la PTAR municipal.

De acuerdo a Microlab Industrial (2018), esta variación se atribuye al tamaño de la muestra, ya que mientras más pequeña sea la muestra, mayor la es probabilidad de obtener valores extremos. En una muestra más grande seguirá habiendo variación, sin embargo no serán tan diferentes y serán más cercanas al promedio real.

## VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 Conclusiones

- Se determinaron los niveles medios de fosfato en el mezclador inicial de la PTAR municipal de Manta, evidenciando niveles elevados de contaminación.
- Las diferentes combinaciones de sales probadas a escala de laboratorio mostraron un comportamiento estadísticamente diferente ya que la prueba de Tukey mostró 15 rangos diferentes, solo los rangos A, B y C están notoriamente definidos.
- La prueba piloto mostró porcentajes de remoción similares a los obtenidos en laboratorio con la combinación a3.b2.c1 (4mg/L de Sulfato férrico  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , 8mg/L de Sulfato de aluminio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  y 13mg/L de Cloruro férrico  $\text{FeCl}_3$ ).
- Es posible realizar la precipitación química de ortofosfato con una combinación de sales que alcanzó un total de 25mg/L muy por debajo de la concentración óptima de 40mg/L teóricamente considerado para cada sal de manera individual.

## 7.2 Recomendaciones

- Realizar un estudio combinado de precipitación inicial más tratamiento biológico con el uso de diferentes reactores con finalidad de evidenciar el comportamiento del efluente durante todo el tratamiento.
- Desarrollar un estudio completo de factibilidad para el diseño, construcción, operatividad y mantenimiento de un sedimentador inicial en la PTAR municipal de Manta.
- Utilizar las combinaciones con mayor porcentaje de remoción en diferentes efluentes industriales de la ciudad de Manta, tomando en cuenta la remoción de otros parámetros físicos y químicos.

## VIII. BIBLIOGRAFÍA

- AOAC. 2005. Official Methods of Analysis of AOAC International. 18th ed. Association of Official of Analytical Chemist. Washington, DC.
- APHA, AWWA, WEF. 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22th Edition. New York. Pp 4-155, Method 4500-P E.
- ATV (Asociación Alemana de Saneamiento). 1992. Procedimiento para la eliminación de fósforo de las aguas residuales. Reglas técnicas con respecto a la gestión de aguas residuales y desechos, Instructivo A202. Traducida por el Proyecto CEPIS/GTZ. San José, Costa Rica. pp 9
- Caravelli A.H., Contreras E.M., Zaritzky N.E. 2008. Remoción de ortofosfato de efluentes lácteos mediante cloruro férrico. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Edgardo\\_Contreras/publication/245023112\\_REMOCION\\_DE\\_ORTOFOSFATO\\_DE\\_EFLUENTES\\_LACTEOS\\_MEDIANTE\\_CLORURO\\_FERRICO/links/0c96051d5a30a819bd000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Edgardo_Contreras/publication/245023112_REMOCION_DE_ORTOFOSFATO_DE_EFLUENTES_LACTEOS_MEDIANTE_CLORURO_FERRICO/links/0c96051d5a30a819bd000000.pdf)
- Cárdenas, C., Jaeger, C., Villasmil, H., Perruolom T., Yabroudi, S. y Castejón, O. 2002. Evaluación de las Unidades que conforman la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Maracaibo Sur. En: Revista Técnica facultad de Ingeniería (Venezuela). Universidad de Zulia. Vol. 28, No 2; pp. 97-109.

- Esteve, M.A, Lloréns, M. y Martínez, C, Eds. 2003. Los recursos naturales de la Región Murcia. Un análisis interdisciplinar. Universidad de Murcia. Pp 148.
  
- Ferrara, R.A., y Harleman, D.R.F. 1980. Dynamic nutrient cycle model for waste stabilization ponds. Journal of the Environmental\_Engineering Division. ASCE, Vol. 106.
  
- González, E. 2016. Validación parcial del método espectrofotométrico del ácido vanadomolibdofosfórico para la determinación del contenido de fósforo total en productos de fermentación de microorganismos eficientes. Universidad Central “Martha Abreu” de las Villas.
  
- Lenntech B.V. 2018. Eliminación del fósforo del agua residual. Disponible en: <https://www.lenntech.es/eliminacion-del-fosforo.htm>
  
- Lötter LH. 1991. Combined chemical and biological removal in activated sludge plants. Water Sci. Technol. 23, 611.
  
- Manahan, S.E. 2006. Introducción a la química ambiental. UANM. Editorial Reverté. Mexico D.F. pp 234.
  
- Marín, R. 2003. Físicoquímica y Microbiología de los medios acuáticos. Tratamiento y control de calidad de aguas. Ed. Díaz de Santos, SA.

- Mercado, J.E. 2017. Validación de la metodología analítica para la determinación de fosfato en agua potable por espectrofotometría ultravioleta – visible – método del azul de molibdeno con ácido ascórbico. Universidad de Cartagena.
  
- Metcalf y Eddy, INC. 1995. Ingeniería de las aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización. Tercera Edición, Mc Graw-Hill: Madrid, España.
  
- Metcalf y Eddy, INC. Sf. Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. Segunda Edición.
  
- Microlab Industrial. 2018. Las sutilezas del análisis: El tamaño de muestra. Aguasresiduales.info. Disponible en: <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/las-sutilezas-del-analisis-el-tamano-de-muestra>
  
- MOPT (Ministerio de Obras Públicas y Transportes). 1991. Depuración por Lagunaje de Aguas Residuales, Manual de Operadores. Madrid, España. pp. 57-75.
  
- Mujeriego, R. 1990. Manual Práctico de Riego con Agua Residual Municipal Regenerada. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
  
- Navarro, F., López, M.F. 2008. Tratamiento de Aguas. Apuntes asignatura, UPV.

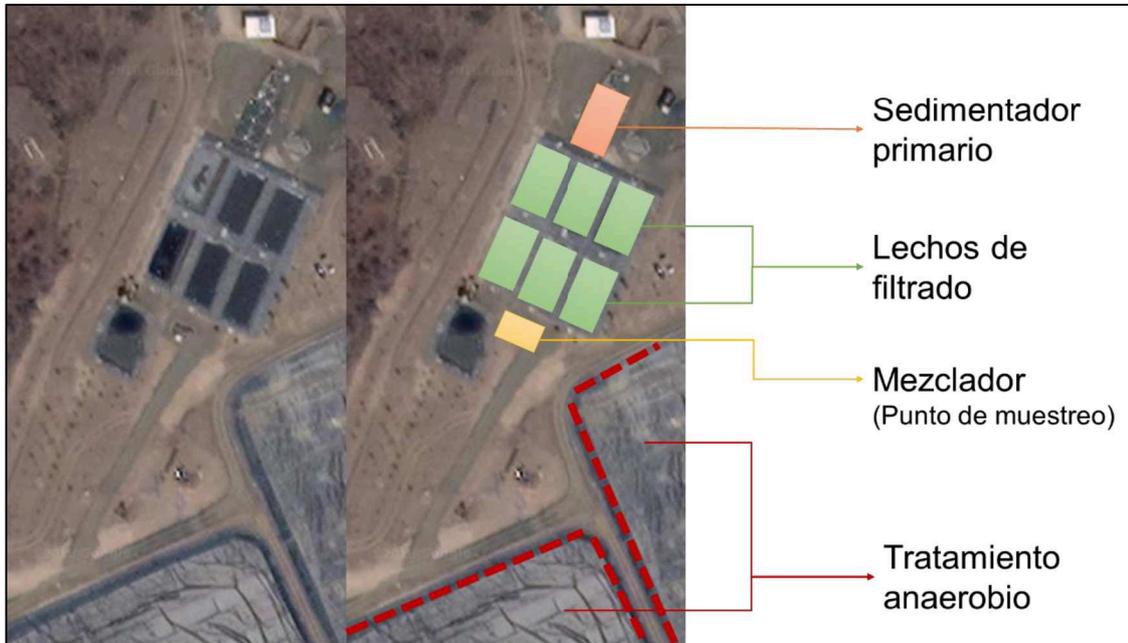
- NMX. Norma Mexicana. 2001. NMX-AA-029-SCFI-2001. Análisis de aguas - Determinación de fósforo total en aguas naturales, potables y residuales tratadas - Método de prueba.
- Orozco, C., Cantarero, V.R. y Rodríguez, J.F. sf. Tratamiento de Residuos del Café. Seminario – Taller El tratamiento anaeróbico de los residuos del café: Una alternativa energética para la disminución del impacto ambiental en el sector. Manual didáctico. Nicaragua, Malagalpa. Pp 34 – 35.
- Oyarzo, M. 2007. Precipitación química del fósforo mediante la adición de sulfato de aluminio en plantas de tratamiento de aguas. Pp 60.
- PNUMA (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente) 2015. Economic Valuation of Wastewater - The Cost of Action and the Cost of No Action. Nairobi, PNUMA. Disponible en: [unep.org/gpa/Documents/GWI/Wastewater%20Evaluation%20Report%20Mail.pdf](http://unep.org/gpa/Documents/GWI/Wastewater%20Evaluation%20Report%20Mail.pdf)
- PNUMA (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2000. América Latina y el Caribe. Perspectivas del Medio Ambiente. GEO-ALC del PNUMA (Oficina Regional para América Latina y el Caribe), Costa Rica. 144 pp.
- Ramos, R., Sepúlveda, R. y Villalobos, F. 2002. Agua en el ambiente: muestreo y análisis. Ed. Plaza y Valdés, S.A de C.V. México. Pp. 40 – 44.
- Rolim M., S. 2000. Sistemas de Lagunas de Estabilización. Editorial Mc Graw Hill. Santa Fe de Bogotá, Colombia. pp.31.

- Seghezzo, L. 2004. Anaerobic treatment of domestic wastewater in subtropical regions. Thesis Ph. D. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
- Severiche, C y González, H. 2012. Determinación de fosfatos en aguas por método colorimétrico. Validación del método. Química Hoy. Chemistry Sciences. Vol. 2 (3).
- Severiche, C. A., Castillo, M. E. y Acevedo, R. L. 2013. Manual de métodos analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos básicos en aguas. Editado Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso. Biblioteca virtual eumed.net. Cartagena de Indias, Colombia. Disponible en: <http://www.eumed.net/libros-gratis/2013a/1326/1326.pdf>
- Suarez, D. S. 2004. Fósforo total en agua por digestión ácida, Método del ácido ascórbico. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia.
- Thomas M., Wright P., Blackall L., Urbain V., Keller J. 2003. Optimisation of Noosa BNR plant of improve performance and reduce operating costs. Water Sci. Technol. 47, 141.
- Vinces, J.M. 2014. Planta piloto para el tratamiento de aguas residuales de la laguna de oxidación de San Juan de la ciudad de Manta, durante el periodo de enero a junio del año 2013.

- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). 2017. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso no explotado. París, UNESCO.

## IX. ANEXOS

**Anexo 1.** Vista Satelital y esquema del diseño de la PTAR, indicando el punto de muestreo.



**Anexo 2.** Selección del punto de muestreo y toma de muestras en la planta de tratamiento municipal de Manta.



### Anexo 3. Montaje de ensayos.



### Anexo 4. Preparación de los reactivos y curva de calibración de ortofosfato.



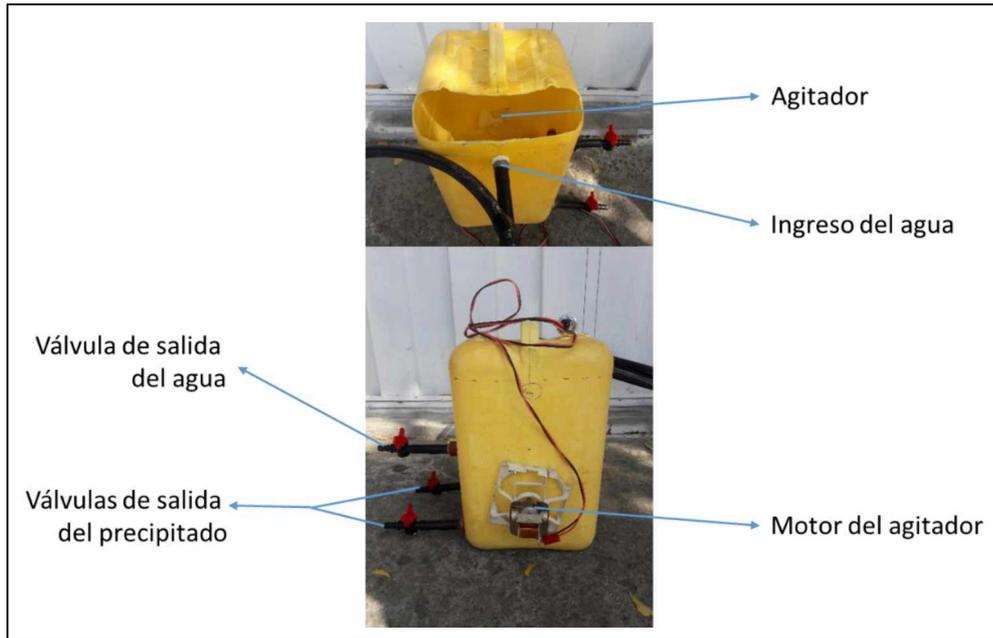
**Anexo 5. Análisis de ortofosfato de los tratamientos.**



**Anexo 6. Construcción del prototipo para la prueba piloto.**



### Anexo 7. Diseño y estructura del prototipo



### Anexo 8. Prueba piloto en la PTAR Municipal



**Anexo 9.** Valores de los resultados completos de la concentración de fosfatos

Tratamiento	Repetición	ABS	mg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> /L	
			Individual	Media
a1.b1.c1	1	0,5870	103,50	105,00
	2	0,5930	106,50	
	3	0,5900	105,00	
a1.b1.c2	1	1,175	397,50	401,50
	2	1,189	404,50	
	3	1,185	402,50	
a1.b1.c3	1	0,88	250,00	264,33
	2	0,945	282,50	
	3	0,901	260,50	
a1.b2.c1	1	0,473	46,50	48,33
	2	0,479	49,50	
	3	0,478	49,00	
a1.b2.c2	1	0,819	219,50	221,83
	2	0,829	224,50	
	3	0,823	221,50	
a1.b2.c3	1	0,534	77,00	80,00
	2	0,545	82,50	
	3	0,541	80,50	
a1.b3.c1	1	0,453	36,50	38,67
	2	0,461	40,50	
	3	0,458	39,00	
a1.b3.c2	1	0,706	163,00	164,33
	2	0,711	165,50	
	3	0,709	164,50	
a1.b3.c3	1	0,52	70,00	73,83
	2	0,534	77,00	
	3	0,529	74,50	
a2.b1.c1	1	0,4550	37,50	45,17
	2	0,4780	49,00	
	3	0,4780	49,00	
a2.b1.c2	1	0,568	94,00	104,33
	2	0,6	110,00	
	3	0,598	109,00	
a2.b1.c3	1	0,409	14,50	12,83
	2	0,403	11,50	
	3	0,405	12,50	
a2.b2.c1	1	0,724	172,00	171,67
	2	0,728	174,00	
	3	0,718	169,00	
a2.b2.c2	1	0,484	52,00	53,17
	2	0,488	54,00	
	3	0,487	53,50	

(Continuación) Anexo 9. Valores de los resultados completos de la concentración de fosfatos

Tratamiento	Repetición	ABS	mg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> /L	
			Individual	Media
a2.b2.c3	1	0,668	144,00	144,83
	2	0,671	145,50	
	3	0,67	145,00	
a2.b3.c1	1	0,769	194,50	196,17
	2	0,777	198,50	
	3	0,771	195,50	
a2.b3.c2	1	0,75	185,00	193,17
	2	0,78	200,00	
	3	0,769	194,50	
a2.b3.c3	1	0,815	217,50	219,17
	2	0,82	220,00	
	3	0,82	220,00	
a3.b1.c1	1	0,696	158,00	160,33
	2	0,705	162,50	
	3	0,701	160,50	
a3.b1.c2	1	0,708	164,00	165,50
	2	0,714	167,00	
	3	0,711	165,50	
a3.b1.c3	1	0,737	178,50	180,83
	2	0,746	183,00	
	3	0,742	181,00	
a3.b2.c1	1	0,389	4,50	7,67
	2	0,4	10,00	
	3	0,397	8,50	
a3.b2.c2	1	0,683	151,50	153,50
	2	0,69	155,00	
	3	0,688	154,00	
a3.b2.c3	1	0,935	277,50	279,83
	2	0,944	282,00	
	3	0,94	280,00	
a3.b3.c1	1	0,78	200,00	204,33
	2	0,797	208,50	
	3	0,789	204,50	
a3.b3.c2	1	0,785	202,50	204,67
	2	0,793	206,50	
	3	0,79	205,00	
a3.b3.c3	1	0,795	207,50	209,00
	2	0,8	210,00	
	3	0,799	209,50	

**Anexo 10.** Tabla de porcentaje de remoción de los tratamientos.

<b>TRATAMIENTO</b>	<b>PORCENTAJES DE REMOCIÓN</b>
a3.b2.c1	99,04
a2.b1.c3	98,40
a1.b3.c1	95,18
a2.b1.c1	94,37
a1.b2.c1	93,97
a2.b2.c2	93,37
a1.b3.c3	90,79
a3.b3.c1	90,33
a1.b2.c3	90,02
a2.b1.c2	86,99
a1.b1.c1	86,90
a2.b2.c3	81,93
a3.b2.c2	80,85
a3.b1.c1	80,00
a1.b3.c2	79,50
a3.b1.c2	79,36
a2.b2.c1	78,59
a3.b1.c3	77,44
a2.b3.c2	75,90
a2.b3.c1	75,53
a3.b3.c2	74,47
a3.b3.c3	73,93
a2.b3.c3	72,66
a1.b2.c2	72,33
a1.b1.c3	67,03
a3.b2.c3	65,09
a1.b1.c2	49,92