

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCVELICA**

(Creada por Ley N° 25265)

**FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERIA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA**



**TESIS**

**“EVALUACION DE LA EFICIENCIA DE UN SISTEMA INTEGRADO DE  
BIOPELICULA Y FITORREMEDIACION CON *Nasturtium officinale* (BERRO)  
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MUNICIPAL EN  
HUANCVELICA”**

**LINEA DE INVESTIGACION:  
TECNOLOGIA AMBIENTAL Y/OSANITARIA**

**PRESENTADO POR:  
Bach. CURASMA MATAMOROS, MARCO ANTONIO.  
Bach. SANDOVAL CONDORI, ESTEFANI KAREN.**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO**

**HUANCAVELICA, PERU**

**2019**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERIA



ACTA DE SUSTENTACIóN DE TESIS

En el Aviditrium de la Facultad de Ciencias de Ingeniería, a los 04 días del mes de diciembre del año 2019, a horas 11:30 a.m., se reunieron los miembros del Jurado Calificador conformado por los siguientes: Mg. Cesar CASTAÑEDA CAMPOS (PRESIDENTE), Mg. Víctor Guillermo SÁNCHEZ ARAUJO (SECRETARIO), Mg. Padre Antonio PALOMINO PASTRANA (VOCAL), designados con Resolución de Decano N° 018-2019-FCI-UNH, de fecha 12 de marzo del 2019, así mismo se realizó el cambio de Miembro Jurado Evaluador (asesor) con la Resolución de Decano N° 237-2019-FCI-UNH, de fecha 28 de noviembre del 2019 y con Resolución de Decano N° 239-2019-FCI-UNH de fecha 02 de diciembre del 2019 se ratifica al Asesor y Jurados evaluadores, a fin de proceder con la evaluación y calificación de la sustentación del informe final de tesis titulado: "EVALUACION DE LA EFICIENCIA DE UN SISTEMA INTEGRADO DE BIOPELICULA Y FITORREMEDIACION CON *T. jastitii* (BERRO) PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MUNICIPAL EN HUANCAVELICA", presentada por los Bachilleres Marco Antonio CURASMA MATAMOROS y Estefani Karen SANDOVAL CONDORI, para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental y Sanitaria; en presencia del M.Sc. Fernando Martín TORIBIO ROMAN, como Asesor del presente trabajo de tesis. Finalizada la evaluación a las... se invitó al público presente y a los sustentantes abandonar el recinto. Luego de una amplia deliberación por parte de los Jurados, se llegó al siguiente resultado:

Marco Antonio CURASMA MATAMOROS

APROBADO POR ...

DESAPROBADO

Estefani Karen SANDOVAL CONDORI

APROBADO **Eg** PoR, ..x,??."..ñ!..fr.%.^

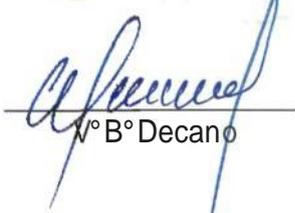
DESAPROBADO

En señal de conformidad, firmamos a continuación:

  
Presidente

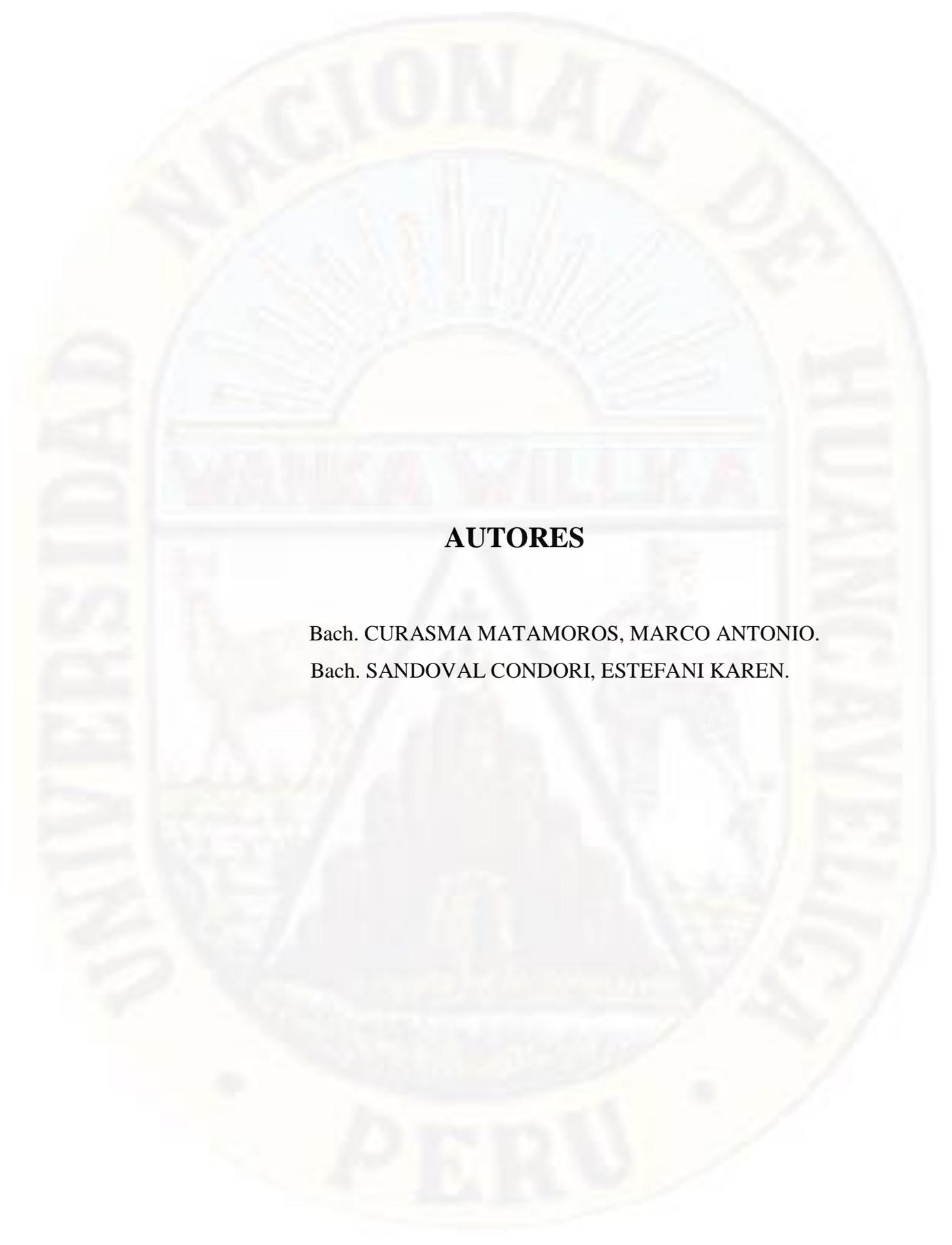
  
Secretario

  
Vocal

  
N° B° Decano

## TÍTULO

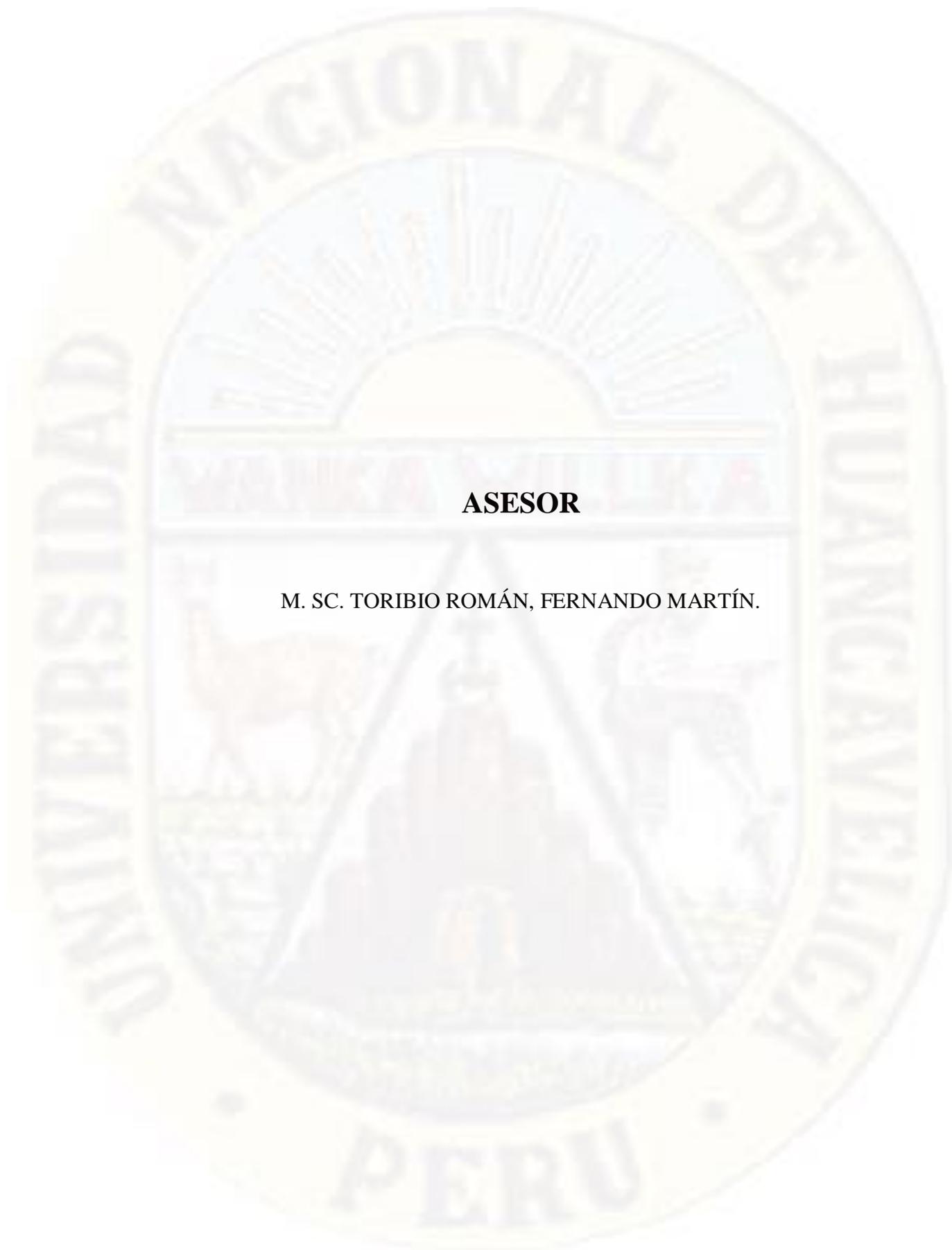
“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN SISTEMA INTEGRADO DE BIOPELÍCULA Y FITORREMEDIACIÓN CON *Nasturtium officinale* (BERRO) PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MUNICIPAL EN HUANCAVELICA”



## **AUTORES**

Bach. CURASMA MATAMOROS, MARCO ANTONIO.

Bach. SANDOVAL CONDORI, ESTEFANI KAREN.



**ASESOR**

M. SC. TORIBIO ROMÁN, FERNANDO MARTÍN.



A mis padres; Guillermo y Justina, por su amor y confianza; mis hermanos Samuel y Pedro, por sus consejos hacia el mundo de la sabiduría; por la motivación constante a culminar satisfactoriamente mi carrera profesional.

Marco Antonio.

A mis padres; Susana y Román; por su amor, comprensión, y dedicación para poder culminar mi formación profesional.

A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona.

Estefani Karen.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por sus bendiciones y sabiduría brindada; que hicieron de cada uno de nosotros lo que hoy somos.

A nuestro asesor **M. Sc. TORIBIO ROMÁN, FERNANDO MARTÍN**; por su tiempo y exigencia impartida que hicieron posible el desarrollo y culminación de la presente investigación científica.

Al director de la E.P.I.A.S. **M. Sc. SÁNCHEZ ARAUJO, VÍCTOR GUILLERMO**; por su compromiso, amistad; por brindarnos de manera muy cordial la disponibilidad de equipos y ambientes donde desarrollamos y culminamos el presente trabajo de investigación.

Al **Ing. QUIJADA GAMARRA, EDGAR**; por su comprensión y consejos, que han servido de guía en el desarrollo de la investigación.

Al **Ing. ENRÍQUEZ QUISPE, JULIO DANIEL**; encargado del laboratorio de biología por su paciencia, confianza, y apoyo cognitivo brindado durante la culminación de esta tesis.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiii
ÍNDICE DE APÉNDICE .....	xiv
RESUMEN .....	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN .....	xvii
CAPÍTULO I .....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Descripción del problema.....	1
1.2. Formulación del problema.....	3
1.3. Objetivo.....	3
1.4. Justificación.....	3
1.5. Limitaciones.....	6
CAPÍTULO II.....	7
MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Antecedentes .....	7
2.1.1. Internacional.....	7
2.1.2. Nacional .....	11
2.1.3. Regional .....	14
2.2. Bases teóricas sobre el tema de investigación.....	14
2.2.1. Teoría general de sistemas.....	14
2.2.2. Teorías de la doble película.....	17
2.2.3. Teoría de la cohesión-tensión .....	22
2.3. Bases conceptuales .....	24
2.3.1. Aguas residuales.....	24
2.3.2. Microbiología del agua.....	26
2.3.3. Proceso de biopelícula.....	27
2.3.4. Biorremediación.....	41
2.3.5. Sistema integrado.....	48

2.4. Definición de términos .....	49
2.5. Hipótesis.....	53
2.6. Variables .....	53
2.6.2. Variable independiente.....	53
2.6.3. Variable dependiente:.....	54
2.7. Operacionalización de variables .....	55
CAPÍTULO III.....	57
MARCO METODOLÓGICO .....	57
3.1. Ámbito temporal y espacial.....	57
3.1.1. Ámbito temporal .....	57
3.1.2. Ámbito espacial.....	58
3.2. Tipo de investigación. ....	60
3.3. Nivel de investigación. ....	60
3.4. Población, muestra, muestreo. ....	63
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	66
3.6. Técnicas y procesamiento de análisis de datos. ....	80
CAPÍTULO IV.....	82
PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	82
4.1. Análisis de información.....	82
4.2. Prueba de hipótesis .....	92
4.3. Discusión de resultados .....	99
Conclusiones .....	104
Recomendaciones .....	105
Referencias bibliográficas .....	106
Apéndice. ....	110

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Posibles niveles que determinan un ordenamiento de los diferentes sistemas .....	16
Figura 2. Resistencia de la película a la transferencia de materia .....	19
Figura 3. La absorción y transporte de agua en las plantas .....	23
Figura 4. Crecimiento relativo de los microorganismos en las aguas residuales.....	27
Figura 5. Una representación esquemática de la formación de un biofilm.....	29
Figura 6. Tipos de reactores de biopelícula aerobios.....	32
Figura 7. Esquema funcional de un lecho bacteriano. ....	37
Figura 8. Tipos de fitorremediación .....	46
Figura 9. Ámbito espacial del proyecto de investigación. ....	59
Figura 10. Perfil del sedimentador .....	67
Figura 11. Sedimentación de sólidos y retención de aceites y grasas .....	68
Figura 12. Placa de vidrio que retiene aceites y grasas .....	68
Figura 13. Proceso de biopelícula con lecho filtrante. ....	69
Figura 14. Proceso de fitorremediación con doble compartimento.....	71
Figura 15. Perfil del proceso de fitorremediación. ....	71
Figura 16. Sustancias compuestas .....	74
Figura 17. Soluciones A, B, C y D preparadas .....	75
Figura 18. Elección de la escala de 250 mg O <sub>2</sub> /l. ....	76
Figura 19. Conexión del equipo de agitación a la incubadora a 20 °C.....	76
Figura 20. Comportamiento de la temperatura durante la etapa de operación. ....	86
Figura 21. Comportamiento del pH a la entrada y salida del sistema integrado.....	87
Figura 22. Medición y control de la DBO <sub>5</sub> .....	90
Figura 23. Test de normalidad de la eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos ....	94
Figura 24. Pasos para la contrastación de hipótesis .....	94
Figura 25. Valores críticos “t” para aceptar o rechazar la hipótesis nula Ho. ....	98
Figura 26. Dimensiones del proceso de pretratamiento y tratamiento primario .....	118
Figura 27. Dimensiones del filtro biológico. ....	119
Figura 28. Dimensiones del proceso de fitorremediación.....	120
Figura 29. Dimensiones del sedimentador.....	121
Figura 30. Zona donde se construyó la caseta. ....	123
Figura 31. Se realizó la limpieza respectiva .....	123
Figura 32. Desarenador de EMAPA S.A. - Huancavelica .....	123

Figura 33. Construcción de cada uno de los procesos de la planta piloto. ....	123
Figura 34. Construcción del proceso de biopelícula. ....	124
Figura 35. Tubería al interior del balde el mismo que fue el soporte del material filtrante. ....	124
Figura 36. Recolección del material inerte para el proceso de biopelícula. ....	124
Figura 37. Recolección del berro para el proceso de fitorremediación. ....	124
Figura 38. Tanque que abastece a la planta piloto. ....	125
Figura 39. Tubería de conducción del agua residual del tanque a la planta piloto. ....	125
Figura 40. Inicio de la operación del sistema. ....	125
Figura 41. Adaptabilidad de las especies para el proceso de fitorremediación. ....	125
Figura 42. Ingreso del afluente a la planta piloto. ....	126
Figura 43. Retención de aceites y grasas en el pretratamiento del sistema. ....	126
Figura 44. Tratamiento secundario. ....	126
Figura 45. Proceso de biopelícula. ....	126
Figura 46. Proceso de fitorremediación. ....	127
Figura 47. Monitoreo del pH del afluente y efluente del sistema. ....	127
Figura 48. Medida del pH del afluente y efluente del sistema. ....	127
Figura 49. Monitoreo de la temperatura. ....	128
Figura 50. Medida del pH del afluente y efluente del sistema, ....	128
Figura 51. Tesista (Estefani Karen Sandoval Condori) junto al asesor durante la visita. ....	128
Figura 52. Tesista (Marco Antonio Curasma Matamoros) junto al asesor durante la visita. ....	128
Figura 53. Recolección de muestra en el afluente del sistema. ....	129
Figura 54. Recolección de muestra en el efluente del sistema. ....	129
Figura 55. Frascos con muestras del afluente y efluente. ....	129
Figura 56. Los frascos se transportaron en un cooler desde la caseta hasta el laboratorio. ....	129
Figura 57. Muestras del afluente y efluente. ....	130
Figura 58. Comparación visual entre las muestras del afluente y efluente. ....	130
Figura 59. Incubadora de CO <sub>2</sub> . ....	130
Figura 60. Balanza analítica para pesar los reactivos y preparar la solución. ....	130
Figura 61. Preparación de materiales de laboratorio para el análisis de muestras. ....	131
Figura 62. Hidróxido de sodio (pellets). ....	131
Figura 63. Reactivos para la preparación de la solución. ....	131
Figura 64. Soluciones preparadas, nutrientes (Solución A, B, C y D). ....	131
Figura 65. Adición de nutrientes (Solución A, B, C y D) a las muestras. ....	132
Figura 66. Preparación de los frascos para el llenado de las muestras con los nutrientes. ....	132

Figura 67. En cada uno de los frascos se colocaron los tapones de goma.....	132
Figura 68. Se colocaron pellets de Hidróxido de sodio .....	132
Figura 69. Regulación de la escala de acuerdo al volumen de muestra. ....	133
Figura 70. Se reguló cada uno de los sensores a 250 mg O <sub>2</sub> /l, para un volumen de 250 ml. 133	
Figura 71. Adición de nutrientes (Solución A, B, C y D) a las muestras .....	133
Figura 72. Se colocaron las muestras en la incubadora para dar inicio a la medición. ....	133
Figura 73. Resultados de medición de la DBO <sub>5</sub> del afluyente, de fecha 13/09/2019.....	134
Figura 74. Resultados de medición de la DBO <sub>5</sub> del efluente, de fecha 13/09/2019. ....	134
Figura 75. Resultados de medición de la DBO <sub>5</sub> del afluyente, de fecha 12/09/2019. ....	134
Figura 76. Resultados de medición de la DBO <sub>5</sub> del efluente, de fecha 12/09/2019. ....	134
Figura 77. Resultados de medición de la DBO <sub>5</sub> del afluyente, de fecha 21/09/2019. ....	135
Figura 78. Resultados de medición de la DBO <sub>5</sub> del efluente, de fecha 21/09/2019. ....	135
Figura 79. Recepción del paquete enviado por el laboratorio. ....	135
Figura 80. Recepción de los frascos. ....	135
Figura 81. Extracción de la muestra del agua residual.....	136
Figura 82. El frasco debe estar bien sellado para evitar fugas .....	136
Figura 83. Sellado del frasco correspondiente a los parámetros microbiológicos.....	136
Figura 84. Se colocaron los frascos de manera adecuada para ser enviados al laboratorio. 136	
Figura 85. Recolección de la muestra del afluyente del sistema de tratamiento. ....	137
Figura 86. Sellado del frasco, de acuerdo al procedimiento de muestreo .....	137
Figura 87. Frascos para el análisis de la DQO y la determinación de aceites y grasas.....	137
Figura 88. Cooler que contiene los frascos del afluyente y efluente. ....	137

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resumen procesos innovadores de biopelícula desarrollados a escala industrial .....	35
Tabla 2 Operacionalización de variables .....	55
Tabla 3 LMP para los efluentes de PTAR domésticas o municipales .....	64
Tabla 4 Conservación y preservación de muestra de agua.....	65
Tabla 5 Cálculo del TRH en el pretratamiento y tratamiento primario .....	67
Tabla 6 Cálculo del TRH en el filtro biológico. ....	69
Tabla 7 Cálculo del TRH en el proceso de fitorremediación .....	70
Tabla 8 Frecuencia de monitoreo (monitoreo de muestras de agua) .....	72
Tabla 9 Instrumentos de recolección de datos .....	79
Tabla 10 Determinación de niveles superados.....	83
Tabla 11 Valores promedios de la temperatura y pH.....	84
Tabla 12 Análisis de datos estadísticos de la medición de la DBO <sub>5</sub> .....	89
Tabla 13 Resultados de las muestras de agua enviadas al laboratorio.....	91
Tabla 14 Test de normalidad para evaluar la eficiencia de remoción .....	93
Tabla 15 Prueba de T de Student para DBO <sub>5</sub> .....	97
Tabla 16 Matriz de consistencia .....	110
Tabla 17 Ficha de registro de parámetros de control .....	111
Tabla 18 Ficha de monitoreo (parámetros de laboratorio) .....	116
Tabla 19 Cálculo del caudal en el pretratamiento .....	118
Tabla 20 Cálculo del caudal en el filtro biológico .....	119
Tabla 21 Cálculo del caudal del proceso de fitorremediación .....	120
Tabla 22 Cálculo del caudal del sedimentador .....	121
Tabla 23 Resumen del cálculo de caudales para cada uno de los sistemas .....	122
Tabla 24 Comparación de resultados.....	138
Tabla 25 Resultados del informe de caracterización del agua residual municipal .....	139

## ÍNDICE DE APÉNDICE

Apéndice 1. Matriz de consistencia.....	110
Apéndice 2. Ficha de registro de parámetros de control.....	111
Apéndice 3. Ficha de monitoreo (parámetros de laboratorio).....	116
Apéndice 4. Cálculo del caudal.....	118
Apéndice 5. Registro fotográfico. ....	123
Apéndice 6. Comparación de resultados de los estudios de caracterización.....	138
Apéndice 7. Informe de caracterización del agua residual de EMAPA S.A .....	139
Apéndice 8. Informe de análisis de muestras en el laboratorio.....	141

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se evaluó la eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos de un sistema integrado de biopelícula y fitorremediación para el tratamiento de agua residual municipal en la localidad de Huancavelica, instalando una planta piloto compuesto por un sedimentador que también retenía aceites y grasas, un filtro biológico empleando como material de soporte la toba calcárea y un proceso de fitorremediación con *Nasturtium officinale* (berro), el tiempo de retención hidráulica fue de 5.5 horas y el caudal de 0.011 l/s, se realizó la evaluación del correcto funcionamiento de los procesos mediante el monitoreo de parámetros de control obteniendo un valor promedio de pH de 7.57 y una temperatura de 12.07 °C, posteriormente se inició con la medición de la DBO<sub>5</sub> obteniendo valores máximos en el efluente de 131 ppm y valores mínimos de 45 ppm y se obtuvo una eficiencia de remoción de 44.8%, para DQO, coliformes totales, coliformes fecales y *Escherichia coli* la remoción fue de 66.67%, 94.59%, 81.22% y 72.12% respectivamente, también se realizó el análisis de aceites y grasas y sólidos totales en suspensión, sin embargo no se obtuvo alta eficiencia de remoción, concluyendo de esta manera que los parámetros de la DBO<sub>5</sub> y DQO cumplen con los LMP para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas municipales, mientras que el resto de parámetros analizados no cumplen con la normativa.

**Palabras clave:** Agua residual, sistema integrado, biopelícula, fitorremediación.

## ABSTRACT

In this research work removal efficiency was evaluated of organic pollutants of an biofilm and phytoremediation integrated system for municipal wastewater treatment in the town of Huancavelica, installing a pilot plant composed of a settler that also retained oils and fats, a biological filter using as support material the calcareous tuff and a phytoremediation process with *Nasturtium officinale* (watercress), the hydraulic retention time was 5.5 hours and the flow rate of 0.011 l/s, the evaluation was made of the proper functioning of processes by monitoring control parameters obtaining an average pH value of 7.57 and a temperature of 12.07 ° C, subsequently the measurement of BOD<sub>5</sub> was initiated, obtaining maximum effluent values of 131 ppm and minimum values of 45 ppm and a removal efficiency of 44.8% was obtained, for DQO, total coliforms, fecal coliforms and *Escherichia coli* the removal was 66.67%, 94.59%, 81.22% and 72.12% respectively, oil and fat analysis was also performed and total suspended solids, however, high removal efficiency was not obtained, concluding in this way that the parameters of BOD<sub>5</sub> y COD comply with the MPL for the effluents of municipal domestic wastewater treatment plants, while the rest of the parameters analyzed do not comply with the regulations.

**Keywords:** Wastewater, integrated system, biofilm, phytoremediation.

## INTRODUCCIÓN

El desconocimiento de principios de tratamiento de aguas residuales ha generado el colapso de un conjunto de plantas de tratamiento de aguas residuales dentro de la región Huancavelica, por otro lado, la inadecuada operación y mantenimiento genera un grado de contaminación muy alto, llegando a contaminar sistemas acuáticos, lo que provoca y afecta la salud pública, porque a través de ella se transmiten diversos tipos de enfermedades gastrointestinales.

De acuerdo a la problemática dentro de nuestra localidad se ha estudiado un sistema cuya finalidad sea reducir la concentración de contaminantes orgánicos y microbiológicos las cuales puedan ser aplicados en el futuro, para ello se analizó la eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos del sistema, la cual presentó resultados muy óptimos; este sistema trabajó de manera continua, la cual combinó un medio biológico concentrado en un lecho filtrante y un proceso de fitorremediación con *Nasturtium officinale* (berro), formando estos procesos un sistema integrado.

Se tomó datos de un estudio de caracterización del agua residual el mismo que se realizó en el punto de llegada al desarenador; donde se constató la presencia de contaminantes orgánicos, las cuales fueron medidos a través de la DBO<sub>5</sub>, razón por la cual se propuso diseñar y construir un sistema integrado.

El objetivo de esta investigación fue evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos a partir de la concentración de la DBO<sub>5</sub> implementado esta tecnología de tratamiento, asimismo, para conocer su capacidad de remoción se analizó parámetros adicionales tales como DQO, aceites y grasas, sólidos totales en suspensión, coliformes totales, coliformes fecales y *Escherichia coli*, demostrando un nivel muy significativo de remoción, este sistema trabajó con un tiempo de retención hidráulica de 5.5 horas.

Una característica muy primordial que se tuvo en cuenta, fue el control del pH y la temperatura del agua, ya que son parámetros que definen condiciones de estabilidad, es decir un cambio brusco de pH puede alterar u obstaculizar el sistema biológico; de

igual manera bajas temperaturas del agua limitan su capacidad de degradación de la materia orgánica.

Durante el proceso de estudio se observaron bajas temperaturas, asimismo los cambios bruscos de temperatura a las cuales nuestra región está expuesta se comportaron como un indicador, permitiendo al sistema adaptarse frente a dichos fenómenos y evaluar la capacidad de remoción y tratamiento, o en términos más comunes la capacidad de reducir contaminantes que pueden degradar los recursos hídricos, siendo en este caso el río Ichu.

Este trabajo de investigación pretende plantear y proponer una alternativa para el tratamiento de agua residual municipal dentro del ámbito urbano y rural, mejorando así las condiciones de vida.

Los autores.



# **CAPÍTULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Descripción del problema**

Las aguas residuales son aguas recogidas en las aglomeraciones urbanas procedentes de los vertidos de la actividad humana (aguas residuales domésticas) o mezclas de estas con las procedentes de actividades comerciales, industriales y agrarias integradas en el núcleo urbano, así como las aguas de las lluvias (aguas residuales municipales) (Trapote, 2011).

Durante siglos en nuestro mundo global las aguas de superficie (ríos, arroyos, lagos y estuarios) también se han usado para descargar desechos humanos e industriales de todas las clases concebibles, alguno de ellos altamente tóxicos. Los contaminantes de las aguas de superficie pueden deteriorar o destruir la vida acuática, amenazar la salud humana, dañar la vida silvestre y perjudicar las operaciones industriales. El tratamiento de las reservas de agua potable contaminada que sirve para prevenir riesgos a la salud humana y el ecosistema; resulta muy costoso (Travis, 2002).

En nuestro país la contaminación de agua es un problema prioritario cuya preocupación a conducido a la necesidad de recuperar ciertas aguas ya sean de distintos puntos de vertimiento; la ANA (Autoridad Nacional del Agua) determinó a este problema como la acumulación indeseable de sustancias, organismos y cualquier forma de energía en un sistema hídrico. En Perú las aguas residuales son el resultado de la acumulación de diversos elementos y sustancias aportados por vertimiento de aguas residuales crudas o insuficientemente tratadas que superan la capacidad de autodepuración del cuerpo receptor generando concentraciones en el cuerpo de agua que exceden el estándar de calidad normado en la zona sometida a regulación.

En la localidad de Huancavelica la población vive en contacto íntimo frente a uno de sus recursos hídricos en este caso el río Ichu; la cual a consecuencia del crecimiento poblacional se ha llegado a contaminar, ya que el agua residual municipal es descargado directamente al cuerpo natural de agua, la inadecuada disposición final ha generado que los contaminantes orgánicos, inorgánicos y biológicos trastornen su composición natural, afectando ecosistemas acuáticos y convirtiéndose en un factor indeseable frente a la salud pública, siendo así en un problema prioritario.

En la actualidad la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de la localidad de Huancavelica (EMAPA S.A. - Huancavelica), quien se encarga del abastecimiento de agua potable y el control de saneamiento básico de los sistemas de alcantarillado no cuenta con un sistema de tratamiento de las aguas residuales en conjunto, por lo cual se vierten al río Ichu perjudicando así a la salud pública y dañando el ecosistema, “El agua contaminada pone en peligro la salud física y social de todas las personas. Es una afrenta a la dignidad humana” (Kofi Annan, ONU, 2003).

Hoy en día se desconocen principios básicos y teóricos de como reutilizar las aguas residuales en conjunto, limitando así la posibilidad de construir y mejorar sistemas de tratamiento de aguas residuales. Es por ello que analizando esta problemática formulamos una alternativa para el tratamiento del agua residual municipal, tomando en cuenta los contaminantes orgánicos presentes en las aguas residuales domésticas planteando de esta manera un sistema integrado.

## 1.2. Formulación del problema

¿Cuál es la eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos que tendrá el sistema integrado de biopelícula y fitorremediación con *Nasturtium officinale* (berro) para el tratamiento de agua residual municipal de la localidad de Huancavelica?

## 1.3. Objetivo

Evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos del sistema integrado de biopelícula y fitorremediación con *Nasturtium officinale* (berro) para el tratamiento de agua residual municipal de la localidad de Huancavelica.

## 1.4. Justificación

**Conveniencia:** El sistema estudiado busca mejorar el tratamiento del agua residual municipal, ya que se enmarca en obtener una eficiencia de 60% en la remoción de contaminantes orgánicos, pues al determinar la eficiencia del tratamiento tomando en cuenta ciertas características como es el clima y el diseño se podrá emplear en diferentes lugares; asimismo es de vital importancia

que el sistema no sea muy costoso y mucho menos generen problemas al medio ambiente.

También es necesario que sea de fácil accesibilidad, para que de esta manera las poblaciones rurales y alto andinas que no cuenten con buenas condiciones económicas puedan instalar estos sistemas y proteger los recursos hídricos. En la actualidad muchas poblaciones rurales no cuentan con acceso a una fuente de agua esto debido a que las aguas se contaminan cada vez a mayor escala. Según los Objetivos del Desarrollo del Milenio (ODM), el objetivo 7 instó a la comunidad mundial a reducir a la mitad, para el 2015, la proporción de personas sin acceso sostenible a agua potable y a servicios básicos de saneamiento, obteniendo resultados desfavorables ya que no se cumplió la meta de los ODM sobre saneamiento, pues se ha perdido por casi 700 millones de personas.

**Implicancias prácticas:** El contar con un sistema de tratamiento de aguas residuales es de vital importancia siempre y cuando el sistema empleado para su tratamiento sea previo a investigaciones realizadas y no elegidas al azar; porque todo sistema de tratamiento es influenciado por las condiciones climáticas del lugar y también tiene la finalidad de evitar la contaminación de ecosistemas acuáticos como en este caso, el río Ichu que es la fuente principal de agua de la población de Huancavelica y zonas aledañas que hacen uso de este recurso hídrico como agua para consumo y actividades agrícolas.

Es necesario que las tecnologías empleadas sean capaces de solucionar problemas medioambientales, y que su aplicación resulte muy sustentable tanto económicamente y socialmente por ello en esta investigación se ha optado por biotecnologías las cuales resulten eficientes y estén enmarcada con el cuidado del medio ambiente. Por ello este trabajo de investigación tiene como finalidad presentar un nuevo sistema capaz de llegar a una eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos de 60% teniendo en cuenta la normativa vigente.

**Relevancia social:** Con la presente investigación se busca reducir los impactos negativos que hoy en día ocasiona la descarga de las aguas residuales municipales sin ningún tipo de tratamiento hacia el cuerpo receptor siendo en este caso el río Ichu, perjudicando la salud de la población ya que se ve afectada directa e indirectamente; asimismo, se generan diferentes impactos ambientales como el daño al ecosistema acuático y el impacto paisajístico.

**Valor teórico:** Los estudios y resultados que se obtendrán en este proyecto serán de mucha utilidad ya que al determinar la eficiencia del sistema biológico; empleando un material propio de la zona para el proceso de biopelícula y una especie conocida comúnmente como berros para el proceso de fitorremediación, será de vital importancia para las futuras investigaciones y el mejoramiento del tratamiento de aguas residuales que contengan características de bajo costo, fácil aplicación, simple operación y poco consumo energético.

**Utilidad metodológica:** Al emplear un material y especie propia de la zona analizaremos si el sistema biológico es eficiente con respecto a la remoción de contaminantes orgánicos, en la localidad de Huancavelica. Se conoce que las especies vegetales tienen un proceso de autorremediación es por ello que se emplea en el proceso de fitorremediación para el tratamiento de aguas contaminadas para ello se requiere evaluar y plantear una nueva metodología que acelere cierto proceso de autorremediación, incorporando así el proceso de biopelícula antes de la fitorremediación.

## **1.5. Limitaciones**

### **Limitación de antecedentes.**

La recopilación de estudios e investigaciones que puedan servir de base al presente trabajo fue limitada, debido a que dentro de la región Huancavelica no se tiene estudios de tratamientos de aguas residuales. Con esta investigación pretendemos brindar información de este tema que resulta importante y abrir nuevas investigaciones.

### **Limitación en equipos e insumos.**

Para complementar esta investigación y obtener datos no se cuenta con equipos necesarios, asimismo, se carece de insumos las cuales puedan permitir obtener resultados confiables y hacer que el presente estudio y otras investigaciones obtengan resultados más eficientes.



## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes**

##### **2.1.1. Internacional**

Según Vicente (2016) en su investigación realizada **“Determinación de la eficiencia del aserrín y la fibra de coco utilizados como empaques para la remoción de contaminantes en biofiltros para el tratamiento de aguas residuales”** propone una alternativa ecológica de tratamiento de aguas residuales domésticas llamada biofiltro, que se construye de material vivo (lombrices) e inerte (viruta y grava). Realizó dos biofiltros pilotos, uno con empaque de aserrín y otro con empaque de fibra de coco en los cuales hizo el tratamiento de agua residual doméstica, tomó muestras del efluente tratado en cada reactor. El análisis e interpretación de resultados arrojaron que la eficiencia en la remoción de contaminantes del biofiltro con aserrines es de 53.53

% y está fuera de la norma, y del biofiltro con fibra de coco es del 82.37 % y está dentro de la normativa.

Charris and Caselles (2016) plantearon el proyecto **“Eficiencia de eliminación de contaminantes del agua residual doméstica con humedales construidos experimentales plantados con *Cyperus ligularis* (Cyperaceae) y *Echinochloa colonum* (Poaceae)”** desarrollado en Morelos, México. Este estudio evaluó la eficiencia de eliminación de materia orgánica (DQO), nitrógeno ortofosfatos, coliformes totales y fecales en cuatro humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal. Dos sistemas fueron plantados con *Cyperus ligularis* y dos con *Echinochloa colonum*. La eliminación de la DQO, amonio, nitrato y ortofosfatos fue de 93, 65, 71 y 32%, respectivamente, para *C. ligularis*, y de 85, 54, 67 y 57%, respectivamente, para *E. colonum*. Los resultados indicaron que hubo una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) en la eliminación de los contaminantes en el humedal plantado con *C. ligularis*, indicando una mayor capacidad de remoción de esta especie.

Hernández (2010) en su trabajo de investigación titulado **“Alternativas para el tratamiento de aguas grises de origen doméstico”** evaluó dos filtros biológicos, el primer medio filtrante fue la piedra pómez y el segundo el carbón, de acuerdo a los resultados se tiene para la DBO<sub>5</sub> una eficiencia de 18.5% y un máximo de 39.76%, para el caso de la DQO obtuvo valores promedio de 31.45% y un máximo de 47.41%, por lo que dichos valores se encuentran por debajo de lo esperado (la hipótesis planteada inicialmente fue una remoción del 45%), es así que concluye que ambos filtros tienen un porcentaje de eficiencia similar con respecto a la DBO<sub>5</sub> y DQO, para la remoción de nitritos, nitratos, fosfatos, color y turbiedad, no recomiendan los medios

filtrantes empleados, finalmente el pH se mantuvo en un rango de 6.98 a 8.50.

Según Siguí (2013) en su investigación **“Diseño y construcción de un filtro intermitente de grava sin recirculación y comparación con eficiencias teóricas de filtros con recirculación para el tratamiento de agua residual doméstica”** se basó en la construcción y evaluación de un filtro de grava de diámetro de 6 milímetros, la entrada del caudal a la unidad es de forma intermitente y no tiene recirculación del mismo, comparó la eficiencia del filtro con eficiencias teóricas de filtros con recirculación, obtenidas de la bibliografía, siendo estas mucho mejores a las alcanzadas por el filtro estudiado. El filtro presenta una remoción media de la DBO<sub>5</sub> igual a 63 %, de la DQO igual a 66 % y de SST igual a 45 %. La calidad del efluente cumplió con los valores máximos permisibles de Guatemala, pero es más baja a la que se obtendría con un filtro con recirculación.

Según Sanhueza et al. (2011) en el proyecto **“Evaluación del comportamiento geotécnico de suelos volcánicos chilenos para su uso como material de filtro en la depuración de aguas residuales domésticas”** mencionan que existen investigaciones realizadas en Chile que han permitido concluir que determinados suelos depositados a lo largo de los años como producto de la actividad volcánica, pueden considerarse aptos para ser empleados como material de filtro en la depuración de aguas residuales domésticas. Determinan que la efectividad utilizando el suelo volcánico (Trumao) comprende valores en todas las mediciones iguales o superiores al 94% de depuración, para el parámetro de calidad coliformes totales una efectividad en torno al 100% y los sólidos suspendidos tuvieron un mayor nivel de depuración que los sólidos disueltos.

Rodríguez et al. (2010) realizó la investigación **“Estudio de comparación del tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales”**, obteniendo resultados de remoción de materia orgánica (DBO<sub>5</sub>) entre el 70 y 86% al utilizar el buchón de agua, y de 58% cuando se emplearon lenteja de agua. Durante la experimentación observaron que cuando se utilizó la lenteja de agua en el humedal artificial, ésta le aportó al agua elementos característicos de la planta que aumentan el pH (>11) en el agua efluente; mientras que, con el buchón de agua, los valores de pH del agua están en el rango de 6 a 8.0, favoreciendo la estabilización de la materia orgánica.

Según Soto et al. (2010) realizaron la investigación **“Uso de un filtro anaeróbico sumergido en la remoción de materia orgánica de aguas residuales municipales”**, en este trabajo se evaluó el desempeño de un biorreactor de filtro anaeróbico sumergido (SAF), previamente estabilizada por 8 meses, el mismo que fue alimentado con aguas residuales municipales de Chetumal. Donde evaluaron los niveles de la DBO<sub>5</sub>, amoníaco y nitrato y se estimó la carga orgánica volumétrica. La variación de la temperatura ambiente afectó drásticamente la eficiencia de remoción del SAF, a menor temperatura menor eficiencia de remoción: a 36 - 37 °C se eliminó más del 90% de la materia orgánica, pero a 20 °C fue removido menos del 20%.

Según Cervantes (2009) en su proyecto **“Sistema combinado para el tratamiento de aguas residuales para viviendas unifamiliares”**, evalúa la eficiencia de remoción de dos sistemas combinados (biofiltración con madera de tabachín (*Caesalpinia pulcherrima*) triturada y el sistema de humedales construidos con flujo vertical subsuperficial utilizando la planta cuna de Moisés (*Spathiphyllum wallisii*) donde trabaja en función a 700 l/día

producido por una familia típica a nivel doméstico y obtiene una eficiencia de remoción del 98.5 y 99.5% para DQO y SST respectivamente, con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 1.31 días y un área requerida de 1.28 m<sup>2</sup>, para el parámetro de coliformes fecales (CF) redujo 5 unidades logarítmicas y obtuvo una remoción del 100% para los huevos de helminto (HH).

### 2.1.2. Nacional

Ugaz (2018) realizó la investigación **“Reúso de aguas residuales, tratadas biológicamente para el regadío del jardín botánico, Trujillo, La Libertad – Perú”**, donde evaluó plantas acuáticas y lechos filtrantes. Tomó las siguientes variables: DBO<sub>5</sub>, DQO, SST, pH, N, P y coliformes fecales, el caudal de diseño fue de 1.68 l/s. Los resultados del tratamiento con biofiltros (entrada y salida) fueron: DBO<sub>5</sub> y DQO (mg/l) = 320/25 y 400/55, removiendo más del 85%, para P y N (mg/l) = 12.2/4.4 y 21/19 respectivamente, cabe mencionar que la remoción fue menor de 36% en promedio donde los biofiltros no muestran su mejor rendimiento y coliformes fecales – *E. Coli* (NMP/100 ml) = 10500/560 con una remoción superior al 90%. De la investigación se concluye que el agua tratada con biofiltros es apta para el regadío o irrigaciones agrícolas del tipo II.

Según Quispe (2018) en la investigación **“Evaluación de la eficiencia entre dos sistemas de biofiltros para el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la localidad de Carapongo, Lurigancho”** evaluó dos sistemas pilotos de biofiltros para el tratamiento de las aguas residuales. Se implementaron dos biofiltros, el primer sistema de biofiltro (SB1) conformado por un canal de desbaste, tanque séptico, humedal sub superficial de flujo vertical

(HSSFV) y humedal superficial (HS), y el segundo sistema de biofiltro (SB2) conformado por un canal de desbaste, tanque séptico, lombrifiltro y humedal superficial, empleando como vegetación a las especies *Cyperus papyrus* y *Alocasia macrorrhiza* en el HSSFV, *Eichhornia crassipes* en el HS y *Eisenia foetida* en el lombrifiltro. Los resultados obtenidos de los parámetros SST, DBO<sub>5</sub> y CT fueron registrados por un periodo de 5 semanas, se analizaron 25 muestras, llegando a las siguientes conclusiones, el SB1 fue más eficiente en la remoción de SST, DBO<sub>5</sub> y CT con valores de 95.71%, 91.55% y 99.87%, respectivamente. En tanto, el SB2 presentó valores de 90.33%, 91.23% y 97.28 % respectivamente, respecto al cumplimiento de los estándares de calidad ambiental, todos los parámetros con excepción de PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> y CT del efluente del SB1 y SB2 cumplen con la normatividad.

Vasquez (2017) realizó la investigación **“Análisis de la eficiencia de un prototipo de biofiltro en el tratamiento de aguas residuales para riego en Trapiche, Comas, 2017”** en donde analizó la eficiencia de un sistema con lombrices rojas de california (*Eisenia foetida*) como uno de los estratos filtrantes que lo conforman. Los resultados obtenidos demostraron la eficiencia de los 03 biofiltros para el tratamiento de aguas residuales mediante el mejoramiento de los siguientes parámetros: conductividad eléctrica, pH, temperatura, turbidez, oxígeno disuelto, cloruros, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, coliformes termotolerantes, aceites y grasas. La eficiencia en el biofiltro bola fue del 69.25 %, en el biofiltro pómez se obtuvo una eficiencia del 67.84% y en el biofiltro lombriz una eficiencia del 65.71 %.

Según Espinoza (2017) en el trabajo de investigación **“Disminución de la DBO<sub>5</sub>, DQO y STD del agua residual doméstica de Santiago de Chuco empleando un biofiltro de piedra pómez”**, realizó la filtración con piedra pómez como medio de soporte y el desarrollo de una biopelícula de microorganismos eficientes del tipo EM – agua; buscando la disminución de los parámetros de la DBO<sub>5</sub>, DQO, y STD del efluente residual doméstico del distrito de Santiago de Chuco. El efluente se caracteriza por tener una DBO<sub>5</sub> de 35.52 ppm; así como una DQO de 85.83 ppm y STD 64.99 ppm en valores promedios respectivamente. Se utilizó el método Winkler para la determinación de la DBO<sub>5</sub> y DQO, A pesar de tener una disminución en las concentraciones de los parámetros (DBO<sub>5</sub>, DQO y STD) solo se alcanzó el 53.75 % de eficiencia del biofiltro.

Cornejo (2015) en la investigación **“Determinación de la eficiencia de remoción de la DBO<sub>5</sub> de agua residual doméstica mediante la utilización de un biofiltro de piedra pómez”**, donde construyó un sistema de biofiltración en el cual empleó hongos de la especie *Saccharomyces cerevisiae*, adheridas a un soporte de piedra pómez, contaminó agua con desperdicios de un hogar común, sin considerar la contaminación fecal, para simular agua residual doméstica. Para los efectos y a fin de evaluar la eficiencia del sistema de un biofiltro, comenzó con el acondicionamiento y la adaptación del hongo, monitoreó las concentraciones de oxígeno disuelto, pH, sólidos totales y en un periodo de 4 días se obtuvieron remociones de OD=17.41%, pH=8.97%, ST=38.49%.

Los resultados que se obtuvieron permitieron tener eficiencias de remoción promedio DBO<sub>5</sub>=73.79%, pH= 34.55%, ST=85.65%. El sistema de biofiltración estudiado, demostró que tiene eficiencias altas en remoción de materia orgánica, dentro del rango óptimo del pH de la muestra, con reducción de los sólidos totales.

### **2.1.3. Regional**

En la región de Huancavelica no existen estudios respecto al tratamiento de agua residual municipal mediante biopelículas y fitorremediación como un sistema integrado.

## **2.2. Bases teóricas sobre el tema de investigación**

### **2.2.1. Teoría general de sistemas**

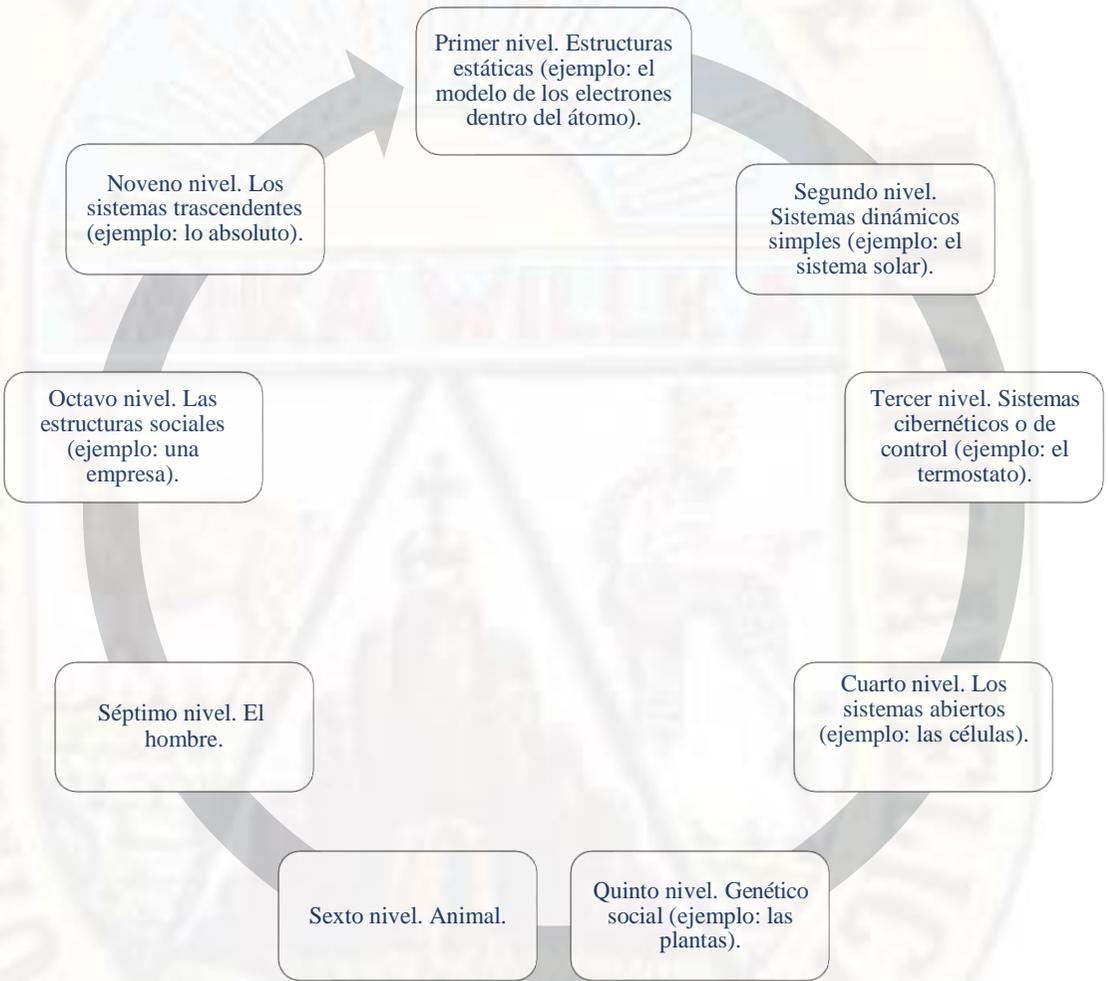
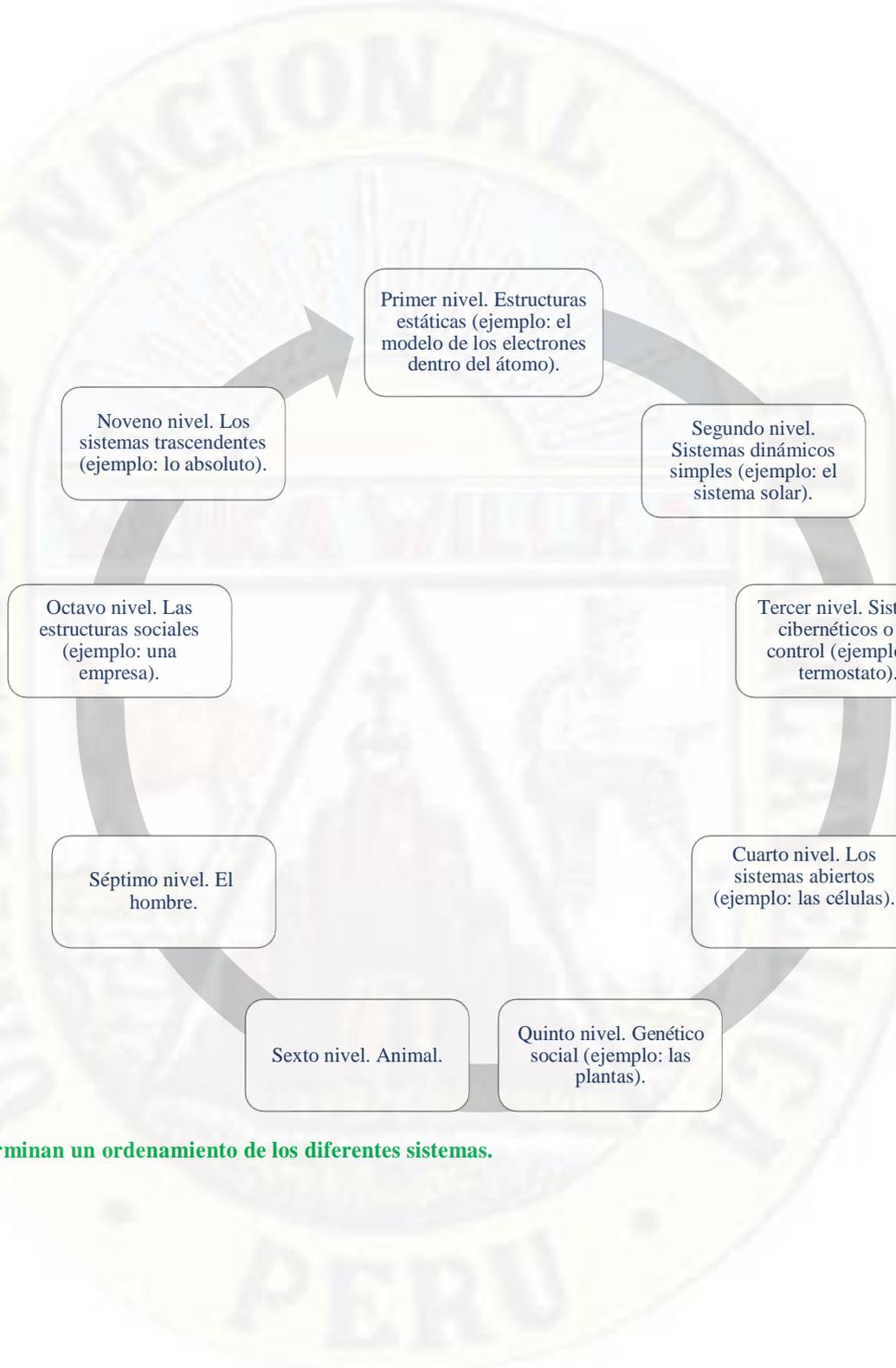
Se cree que esta teoría se encuentra estrechamente relacionada con el trabajo de Ludwig von Bertalanffy, biólogo alemán, que en el año 1925 realizó la presentación de la teoría cuando hizo pública sus investigaciones sobre el sistema abierto, por otro lado, se considera este nacimiento como algo prematuro ya que el autor reconoce que sus ideas no tuvieron una acogida favorable en el mundo científico. Es a partir de 1945 cuando el concepto de la teoría general de sistemas adquirió su derecho a vivir (Johansen, 2004).

La teoría general de sistemas describe un nivel de construcción teórico de modelos que se sitúa entre las construcciones altamente generalizadas de las matemáticas puras o sea el cálculo infinitesimal y las teorías específicas de las disciplinas especializadas. Aspira a enunciar principios aplicables a sistemas en general o a subclases definidas (sistemas cerrados y abiertos), a proporcionar técnicas para su investigación y descripción y aplicar estas a casos concretos (Johansen, 2004).

El destino de la teoría no busca establecer una teoría general de prácticamente cualquier cosa, única y total, que reemplace todas las teorías especiales de cada disciplina en particular, ya que a medida

que aumentamos la generalidad tenemos que hacerlo a costa del contenido, es así que presenta un ordenamiento jerárquico a los posibles niveles que determinan un ordenamiento de los diferentes sistemas que nos rodean (Johansen, 2004).





**Figura 1.** Posibles niveles que determinan un ordenamiento de los diferentes sistemas.

**Fuente:** Johansen (2004).

Boulding denomina a la teoría como el “Esqueleto de la Ciencia” en el sentido de que esta teoría busca un marco de referencia a una estructura de sistema sobre el cual “colgar la carne y la sangre de las disciplinas particulares en el ordenado y coherente cuerpo de conocimientos” (Johansen, 2004).

### **2.2.2. Teorías de la doble película**

La teoría de la doble película es un modelo útil para definir la transferencia de materia entre fases. La transferencia de materia de un determinado soluto de una fase a otra incluye el transporte desde el seno de una fase de la superficie límite o interfase, y entonces desde la interfase al seno del segundo fluido la teoría de la película se basa en la idea de que, en la zona de contacto entre dos fases se forma una película de fluido o capa límite de transferencia de materia (Pauline, 1998).

Debido a la dificultad para describir la transferencia de materia hacia y a través de la interfase a partir de principios básicos, se han desarrollado diversos modelos simples que intentan interpretar de manera más o menos precisa la hidrodinámica real en las cercanías de la interfase (Izquierdo, 2004).

#### **i. Modelo de la película estancada:**

Este modelo original de Nearst se basa en las siguientes suposiciones:

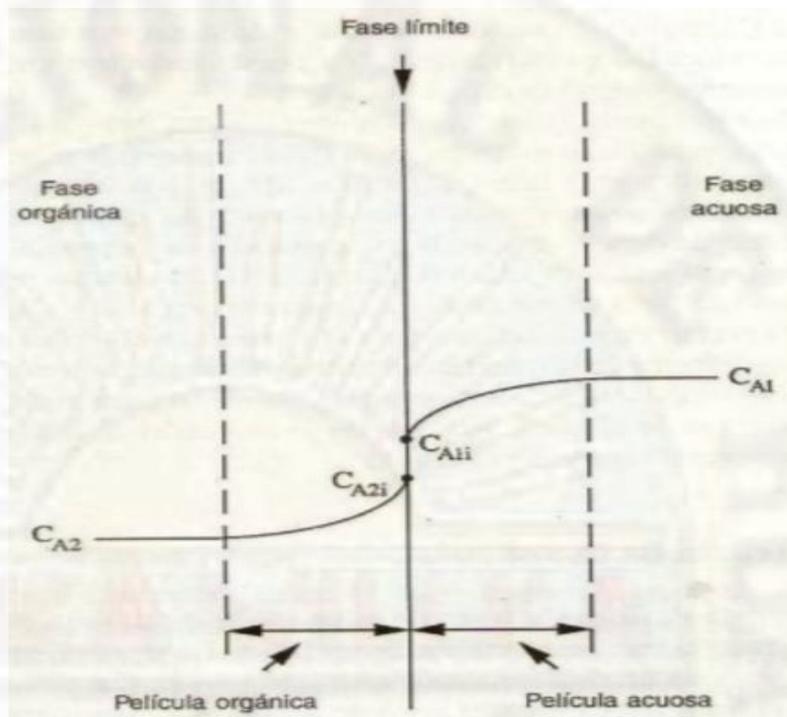
1. El fluido se considera dividido en dos zonas: una película estancada de espesor  $\delta$  cercana a la interfase y otras detrás de ella perfectamente agitada en la que no hay gradientes de concentración.
2. El proceso de transferencia se halla en estado estacionario.

Desde el punto de vista físico, este modelo no es muy realista y el espesor de la película no puede ser medido ya que en realidad no existe. A pesar de ello se utiliza por su sencillez y porque en el caso de tener que describir la transferencia de materia combinada con la reacción química, en la mayoría de los casos, lo hace con suficiente precisión (Izquierdo, 2004).

**ii. Modelo de la doble película estancada o de Lewis-Whitman:**

Considera el modelo de la película estancada a ambos lados de la interfase. Es decir, se considerará que tanto en el gas como en el líquido existe una película estancada o laminar. Al plantear el modelo de la doble película hay que tener presente que la interfase es real pero que las películas son imaginarias y sus espesores desconocidos (Izquierdo, 2004).

Es ampliamente utilizado de acuerdo a lo anteriormente comentado. En esta teoría se supone que la turbulencia está situada fuera de la interfase y que existe una capa laminar en cada uno de los fluidos. Fuera de la capa laminar, los remolinos turbulentos complementan la acción originada por el movimiento al azar de las moléculas y resistencia a la transferencia se hace cada vez menor. Para interdifusión equimolecular el gradiente de concentración es, por consiguiente, lineal junto a la superficie y se va haciendo gradualmente en el proceso (Izquierdo, 2004).



**Figura . Resistencia de la película a la transferencia de materia entre dos líquidos**

**inmiscibles. Fulínez (1998**

**).**

Considérese la transferencia de materia de un componente A a través de la interfase representada en la figura 2 supóngase que las fases son dos líquidos inmiscibles, como agua y cloroformo, y que inicialmente la concentración de A es mayor en la fase acuosa que en la fase orgánica (Izquierdo, 2004).

Cada fase se encuentra perfectamente mezclada y en flujo turbulento. La concentración de A en el seno de la fase acuosa es  $C_{A1}$ , y la concentración de A en el seno de la fase orgánica es  $C_{A2}$ . De acuerdo con la teoría de la película, la turbulencia en cada fluido disminuye cerca de la interfase y se forma una película fina de fluido relativamente en reposo a cada uno de los lados de la interfase. la transferencia de materia a través de esta película se produce

únicamente por difusión molecular (Izquierdo, 2004).

La concentración de A varía en zonas cercanas a la interfase como se indica en la figura 2 siendo  $C_{A2i}$  la concentración de A en la interfase correspondiente a la fase acuosa y  $C_{A1i}$  la concentración de A en la interfase correspondiente a la fase orgánica. La mayor parte de la resistencia a la transferencia de materia tiene lugar en la película de líquido más que en el seno de los fluidos. A efectos prácticos generalmente se supone despreciable la resistencia al transporte en la interfase, lo que equivale a suponer que las fases se encuentran en equilibrio en el plano de contacto (Izquierdo, 2004).

La diferencia entre  $C_{A2i}$  y  $C_{A1i}$  en la interfase justifica la posibilidad de que, en equilibrio A pueda ser más soluble en una fase que en otra. Por ejemplo, si A fuera Ácido acético en contacto en la interfase con agua y cloroformo, la concentración de equilibrio en agua sería entre 5 y 10 veces mayor que en cloroformo. Es decir,  $C_{A1i}$  sería significativamente mayor que  $C_{A2i}$ . Incluso aunque los líquidos se encuentren bien mezclados, la difusión del componente A es básica para que se produzca la transferencia de materia, debido a que las velocidades locales del fluido se aproximan a cero en la interfase (Izquierdo, 2004).

Donde la ecuación general para la transferencia de materia es:

$$N_A = k_L [C_{A1} - C_{A2}]$$

$N_A$ , es la velocidad molar de difusión por área.

$[C_{A1} - C_{A2}]$ , diferencia de concentraciones molares en A.

$k_L$ , es aquí el coeficiente de transferencia de la película de líquido, que puede expresarse en  $\frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \times \text{m}^2$

Para disoluciones diluidas:

$$k_L = \frac{D_L}{z_L}$$

$D_L$ , difusividad en la fase líquida.

$z_L$ , espesor de la película líquida en la que tiene lugar la difusión.

### iii. Modelo de penetración de Higbie:

Este modelo supone que la interfase está cubierta de pequeños elementos de fluido que no están estáticos, sino que son renovados periódicamente. Después de un determinado tiempo de contacto, en la interfase cada elemento vuelve al seno del fluido, el cual está perfectamente agitado y es substituido otro elemento nuevo con una concentración inicial uniforme que es generado en el seno del fluido. En la interfase cada elemento realiza la transferencia de materia por difusión. En este caso el proceso de difusión es esencialmente no estacionario (Izquierdo, 2004).

### iv. Modelo de Danckwerts:

Este modelo es una modificación del anterior en el que se supone que existe una distribución exponencial decreciente de tiempos de permanencia de los elementos en la interfase (Izquierdo, 2004).

Aunque es una representación muy simplificada la teoría de la película descrita por Lewis-Whitman se aplica habitualmente en el análisis de transferencia de materia en fluidos que incluyen resultados matemáticos más realistas que la teoría de la película. A pesar de todo, independientemente de cómo se visualice la transferencia de materia importante en zonas cercanas a la interfase entre fluidos.

Los cuatro modelos descritos tienen en común que la hidrodinámica en las cercanías de la interfase se describe con un solo parámetro: el espesor de la película, el tiempo de contacto o la probabilidad de reemplazamiento. La elección de uno de ellos resulta ser bastante arbitraria ya que en muchos casos los resultados obtenidos son los mismos, por lo tanto, aplicar modelos más realistas y complicados no comporta predicciones de la influencia de la reacción sobre la transferencia substancialmente mejores.

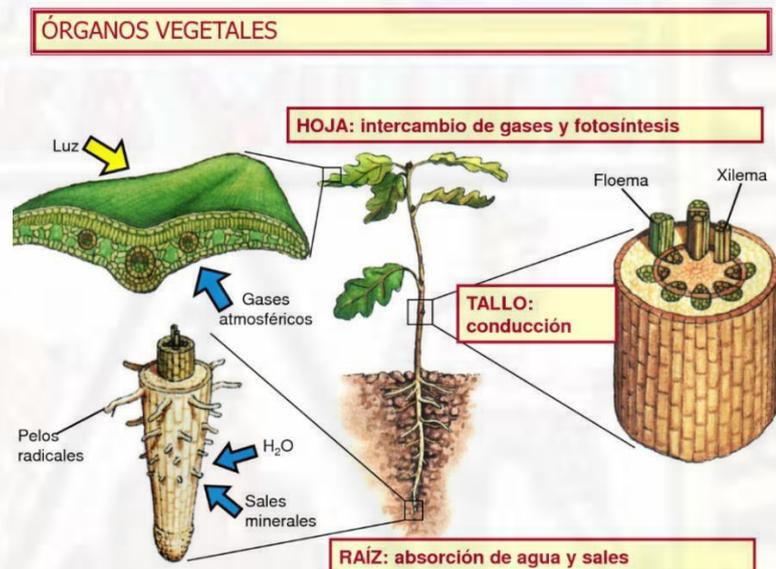
### **2.2.3. Teoría de la cohesión-tensión**

El ascenso de la savia bruta en contra de la gravedad se produce gracias a varios fenómenos físicos que dependen de tener vasos leñosos muy finos, como de las propiedades físicas tensión superficial, adhesión y cohesión. Los conjuntos de estos procesos son: la presión radicular, la transpiración y la tensión-cohesión (Bachibiology, 2012).

- **Presión radicular.** Las células de la raíz tienen una concentración de solutos mayor que la del agua en el suelo. Esta entra en el interior de la raíz por ósmosis. La continua entrada produce una presión radicular para que la savia bruta ascienda por el tallo. Esta presión no es suficiente en plantas con gran altura (Bachibiology, 2012).
- **Transpiración.** Ocurre en las hojas y se basa en la pérdida de agua por evaporación. Al aumentar la transpiración aumenta la absorción de agua a través de las raíces. La pérdida de agua por evaporación hace una fuerza capaz de absorción de agua en la raíz y es capaz de conducirla por el xilema hasta el resto de la planta. Esta fuerza aspirante ejerce una presión denominada

tensión y que tira de cada molécula de agua hacia arriba (Bachibiology, 2012).

- Tensión-cohesión. Las moléculas de agua están unidas entre sí por enlaces de hidrógeno. Permite una cohesión elevada y hace que la tensión que puede soportar una columna de agua no llegue a romperse. En este mecanismo interviene la adhesión de agua a las paredes de los vasos leñosos (Bachibiology, 2012).



*Figura 3. La absorción y transporte de agua en las plantas.*

uenñe: Bachibiology (2012).

La cohesión que se origina entre las moléculas de agua, que como se señaló anteriormente es debida a los puentes de hidrógeno, permite que ellas formen largas cadenas. Así mismo, la interacción entre las moléculas de agua y una superficie (pared celular, por ejemplo) se denomina adhesión. La adhesión es fundamental en los procesos de ascenso del agua en las plantas debido a que las moléculas de agua se adhieren a la pared de celulosa del xilema y de esta forma contrarrestan la fuerza de gravedad. La tensión superficial del agua es la responsable de los fenómenos de capilaridad (Torres, 2012).

Esta se produce por la atracción asimétrica que sufren las moléculas de agua que están en la superficie y también hace que se formen gotas esféricas de agua sobre una superficie cerosa debido a la tendencia de las moléculas de agua a tener una superficie mínima que es la esfera (Torres, 2012).

Debido a esta teoría de cohesión – tensión se produce el proceso de fitorremediación gracias a la interacción de la raíz con el suelo y a los distintos procesos que conducen a la reducción, mineralización, degradación, volatilización y estabilización de los diversos contaminantes. Según sea el proceso del que se trate, se han definido diferentes mecanismos o estrategias de fitorremediación entre las que se incluye la rizodegradación, fitoextracción y fitoestabilización, entre otras. (Sierra, 2010).

El hecho de que la fitorremediación sea una metodología que pueda ser aplicada de manera *in-situ*, permite que la destrucción, transformación, inmovilización o cualquier técnica que vaya a ser aplicada para reducir la disponibilidad del contaminante pueda realizarse sin la necesidad de excavar o transportar el medio contaminado, lo que a su vez reduce el impacto en el ecosistema y por supuesto, los costos de aplicación (Sierra, 2010).

## **2.3. Bases conceptuales**

### **2.3.1. Aguas residuales**

Las aguas residuales tienen orígenes muy remotos que datan desde la aparición del hombre no se sustenta en ninguna teoría ya que es un hecho observable de la realidad, cuyo origen es irrefutable y no se puede discrepar en ningún sentido, lo que sí se puede discrepar son

los principios y métodos de tratamiento de estas aguas residuales que hoy en día son de interés para el hombre. Los primeros en utilizar métodos para el tratamiento del agua datan de hace más de 1,500 años hasta el 400 A.C. Los mismos indican que las formas más comunes de purificación del agua eran hirviéndola sobre el fuego, calentándola al sol o sumergiendo una pieza de hierro caliente dentro de la misma (Al Azharia, 2010).

Otro de los métodos más comunes era el filtrado del agua hervida a través de arena o grava para luego dejarla enfriar, estas teorías de tratamiento de aguas residuales son basadas en principios físicos las cuales hoy en día son aplicadas dentro de sistemas, que de alguna u otra manera contribuyen en el desarrollo del tratamiento de agua residuales. No se tiene registros de cómo surgió este método de tratamiento, pero se puede considerar el uso de *Moringa oleífera* (*M. oleífera*) en el tratamiento de aguas con el fin de purificarlas es una práctica antigua (Al Azharia, 2010).

En algunas fuentes de literatura popular se dice que este uso está recogido en el siguiente pasaje del Antiguo Testamento: "...no pudieron beber las aguas de Mara, porque eran amargas (...) Moisés clamó a Jehová, y Jehová le mostró un árbol; y lo echó en las aguas, y las aguas se endulzaron (Éxodo 15:22-27). Independientemente de los atributos de la moringa y del valor teológico del mencionado pasaje bíblico, los argumentos para relacionarlos carecen de fundamento científico. Lo que sí es cierto es que sus semillas han sido utilizadas desde hace siglos en distintas regiones de Asia y África como un coagulante natural para la clarificación de aguas turbias (Al Azharia, 2010).

La efectividad de las semillas de *M. oleifera* para la remoción de materias en suspensión contenidas en aguas turbias ha sido convincentemente demostrada (Muyibi & Evison, 1995). Además, se ha comprobado que la moringa no solo tiene propiedades coagulantes, sino también acción bactericida así como lo mencionan Al-Khalili, R et al. (1997), lo que avala su uso en la potabilización de agua. En una investigación realizada con aguas turbias del Nilo, en dos horas de tratamiento se logró hasta un 99,5 % de reducción de la turbidez y la eliminación de hasta el 99,99 % de las bacterias (E. Hernández et al., 2013).

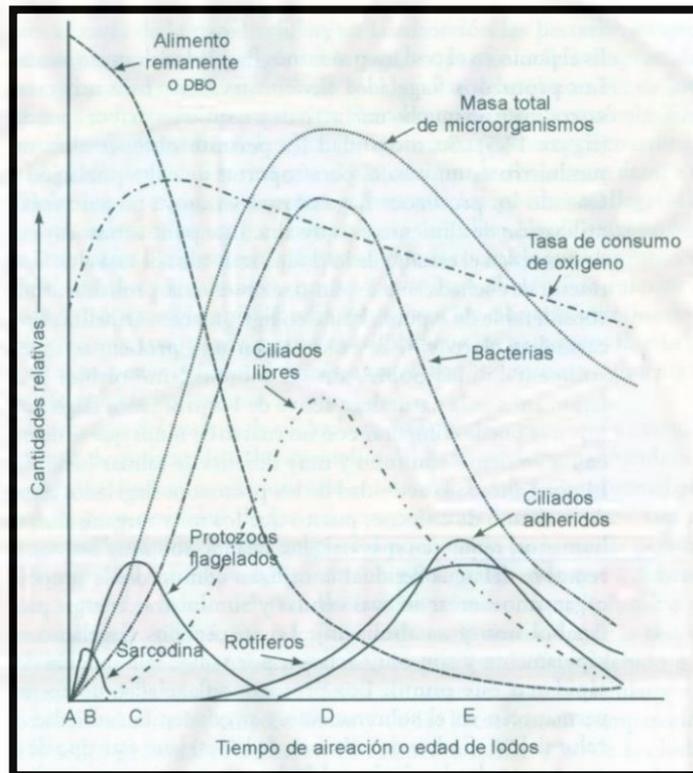
### **2.3.2. Microbiología del agua.**

Los microorganismos que intervienen en los procesos biológicos del tratamiento son los siguientes:

- Bacterias.
- Protozoos.
- Hongos.
- Algas.
- Rotíferos.
- Nemátodos.

La bacteria hongos y algunos protozoos son microorganismos descomponedores. Los protozoos y metazoos (rotíferos y nemátodos) son microorganismos consumidores (Trapote, 2011).

En la figura 4 que se muestra a continuación se observa un esquema típico de los microorganismos que aparecen en un tratamiento de aguas residuales iniciando desde el periodo de arranque.



**Figura** Crecimiento relativo de los microorganismos en las aguas residuales.

**Fuente:** Trapote (2011).

### 2.3.3. Proceso de biopelícula.

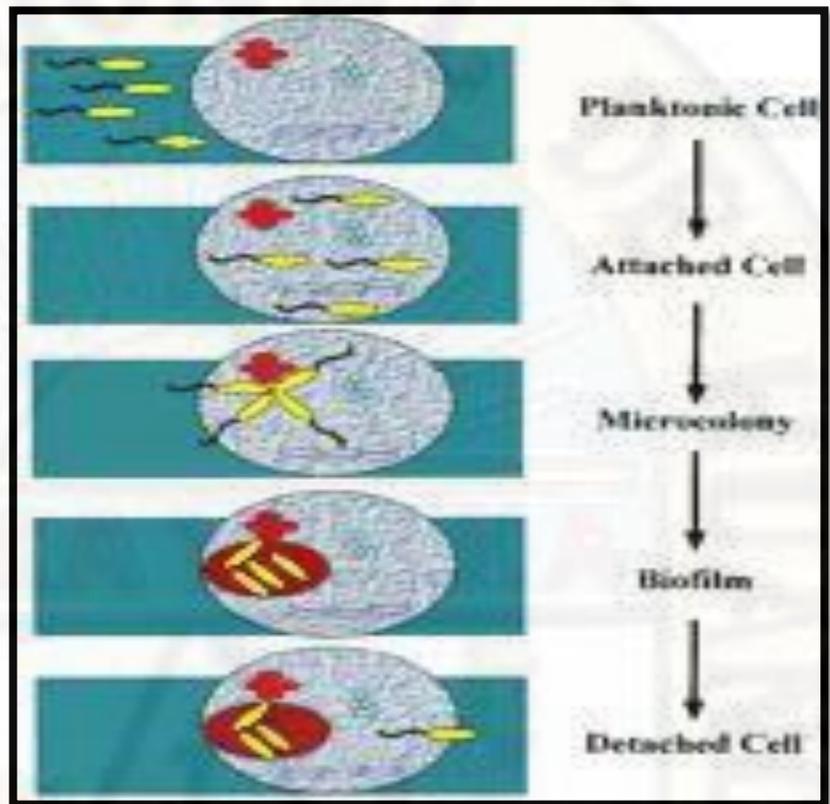
Un proceso de biopelícula es un sistema de microorganismos que se asientan sobre membranas porosas en general, e incluso sobre membranas permeables a gases e hidrófilas. Las cuales tienen una alta resistencia a antimicrobianos y poseen la capacidad de comunicación intercelular que las convierten en complejos difíciles de erradicar de los ambientes donde se establecen (Betancourth, Botero, & Rivera, 2004).

### 2.3.3.1. Biopelícula.

El término biopelícula (biofilm) hace referencia a una serie de microorganismos que se encuentran agregados en un ex polímero compuesto de glico-cálix (75%) y que se organizan en forma de colonias adheridas a diferentes superficies, ya sean blandas, animadas e inanimadas. El ex polímero que es producido por los mismos microorganismos, forma una matriz adherente en donde estos quedan atrapados y comienzan a organizarse en colonias con diferentes requerimientos metabólicos (Betancourth et al., 2004).

Una de estas características es la heterogeneidad, lo que las hace organizaciones únicas que pueden estar conformadas por bacterias, hongos y protozoos. Se ha visto entonces, que los microorganismos al ser variados dentro de esta organización presentan diferentes microambientes de pH, tensión de oxígeno, concentración de iones, carbono y nitrógeno. También cuando se liberan células de la biopelícula, éstas pueden viajar y depositarse en nuevos nichos de colonización manteniendo las mismas características de una biopelícula adherida a una superficie. Finalmente, los microorganismos se comunican unos con otros (Betancourth et al., 2004).

Esto es lo que se ha denominado *Quorum sensing* e involucra la regulación y expresión de genes específicos a través de moléculas de señalización que median la comunicación intercelular los microorganismos pueden producir sustancias para estimular la propagación de colonias e inhibir el crecimiento de otras dejando a los microorganismos más patógenos en una posición favorable dentro de la biopelícula (Betancourth et al., 2004).



**Figura 5:** Representación esquemática de la formación de un biofilm.

**Fuente:** Watnick (2000).

En la figura 5 se puede observar la formación de un biofilm sobre una roca previamente colonizada con múltiples especies de bacterias. Las bacterias amarillas representan una especie acuática que nada hacia la roca usando flagelos polares, forma ataduras aleatorias sueltas a la roca, migra sobre la superficie para formar una microcolonia y finalmente produce exopolisacárido para formar un biofilm tridimensional. Cuando las condiciones ambientales se vuelven desfavorables, algunas de las bacterias pueden separarse y nadar para encontrar una superficie en un ambiente más favorable (Monzón et al., 2012).

Los cultivos en suspensión están compuestos por flóculos biológicos, de un tamaño tan reducido que en teoría los sustratos disueltos (oxígeno, carbono, amonio, etc.) están disponibles para todas las células. En los procesos de biopelícula los sustratos deben atravesar la capa líquida estancada junto a la superficie de la biopelícula y luego transportarse a través de ella, fundamentalmente por difusión, hasta la zona en que son consumidos. Asimismo, los productos de las reacciones biológicas se difunden en sentido contrario (Monzón et al., 2012).

Por lo tanto, las tasas globales de eliminación de sustrato en un proceso de biopelícula dependen de las velocidades de transferencia de masa y las concentraciones de sustrato en los diferentes puntos de la biopelícula. La otra consecuencia de estos fenómenos de transporte es que dentro de una misma biopelícula pueden coexistir distintos ambientes (aerobio, anóxico o anaerobio) lo que puede aprovecharse, por ejemplo, para conseguir nitrificación y desnitrificación simultáneas (Monzón et al., 2012).

Existe una amplia variedad de tecnologías basadas en procesos de biopelícula, cada una con sus características específicas. En general se pueden incluir, entre sus ventajas frente a los procesos de fangos activos convencionales, unos costes de operación y energéticos reducidos, volúmenes menores de los reactores, necesidades mínimas de capacidad de decantación y simplicidad de operación. (Monzón et al., 2012).

### **2.3.3.2. Reactores de biopelículas.**

Existen varios criterios de clasificación de los reactores de biopelícula, por ejemplo, según el tipo de soporte (soporte fijo, giratorio o móvil) o su combinación con fangos activos (reactores híbridos) o no (reactores de biopelícula puros) (Monzón et al., 2012).

Atendiendo al grado de saturación del medio, y considerando sólo los reactores aerobios. Entre las soluciones innovadoras basadas en procesos de biopelícula destacan los biofiltros y los reactores de lecho móvil, así como los reactores híbridos. El concepto básico del biofiltro es utilizar soportes de pequeño tamaño con una alta superficie específica, de forma que se produce tanto biodegradación (en condiciones aerobias, anóxicas o anaerobias) como retención de sólidos (Monzón et al., 2012).

**De medio no saturado**

- Lecho bacteriano (filtros percoladores)
- Torres biológicos (bitorres)
- Filtros intermitentes de arena
- Tratamiento por aplicación al terreno

**De medio saturado, inundado o sumergido**

**De soporte móvil (Gránulos o partículas, en operación y lavado)**

De soporte inerte

- Biofiltros aireados
- Lecho expandido
- Lecho fluidizado
  - Bifásico: Agua/partícula-biomasa
  - Trifásico: Agua/aire/partícula-biomasa
- Fangos activados con partículas de soporte
- Proceso de biopelícula

De soporte activo

**De soporte fijo**

Con aireación de lecho BLAS (biopelícula de lecho aireado sumergido)

Soporte rígido

- Relleno de partículas
- Soportes estructurados

Soporte permeable

- RBSP (reactores de biopelícula de soporte permeable)
- Humedales

**De medio intermitente sumergido**

**RBC: Contratadores biológicos rotatorios**

- Biodiscos
- Biocilindros

**Lechos inundados (Precusores de los lechos bacterianos)**

**Tipos de reactores de biopelícula aerobios.**

**Fuente: Monzón et al. (2012).**

En los lechos móviles (agitados, expandidos, fluidizados, turbulentos o circulantes) el soporte de la biopelícula se mantiene en constante movimiento. El objetivo es controlar así el espesor de la biopelícula, evitar los problemas de atascamientos de los lechos fijos y mejorar los procesos de transferencia de masa (Hardcover, 2010).

El término híbrido se emplea generalmente para describir los procesos que combinan en un mismo reactor biomasa en suspensión y biopelícula en soportes fijos o móviles. La idea es incrementar la cantidad de biomasa disponible por unidad de volumen, lo que permite diseñar reactores biológicos más pequeños o bien conseguir que un reactor dado tenga mayor capacidad de depuración, por lo que han encontrado un importante campo de aplicación cuando es preciso adaptar depuradoras existentes para soportar mayores cargas o eliminar nutrientes (Hardcover, 2010).

Los gránulos de fango o lodo son en realidad flóculos de biomasa grandes en cuyo interior se producen precipitaciones que hacen que su densidad aumente mucho. Por ello puede considerarse que el gránulo es una partícula (soporte) cubierta con biopelícula en la cual, debido a su espesor, también tienen gran importancia los fenómenos de transporte de sustratos. Su comportamiento es similar al de las biopelículas de lecho móvil. Las bacterias anammox utilizan amonio y nitrito para producir nitrógeno gas, lo que reduce la necesidad de aportar oxígeno y carbono para la eliminación del nitrógeno de las aguas residuales (Hardcover, 2010).

Al ser de crecimiento lento, resulta apropiada su inmovilización en forma de biopelícula. Los reactores de biopelícula sobre membranas utilizan este material, además de como soporte de la biopelícula, para proveer un gas (p.ej. oxígeno o hidrógeno) a la biomasa (Hardcover, 2010).

**Tabla 1**

*Resumen de algunos procesos innovadores de biopelícula desarrollados a escala industrial*

<b>Tipo</b>	<b>Proceso</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Soporte</b>	<b>Aplicación</b>	
<b>Lecho fijo</b>	Biofiltros con soportes pesados	Biofor	Degrémont	Biolite (arcilla expandida)	ARU;C, NF, postDN
		Biocarbone	OTV-Veolia	Biodamine (arcilla expandida)	ARU, ARI; C, NF
		B2A	OTV-Veolia	3 capas de distintos medios	ARU; C, NF, NF/DN
		Nitrazar	Degrémont	Biolite (arcilla expandida)	AP; DN
		Biodenit		Biodagene	AP; DN
	Biofiltros con lavados continuos	DynaSand	Parkinson CO	Arena	ARU; postDN, NF
			SOGEA	Arena	ARU; postDN
	Biofiltros con medio flotante	Biostyr	OTV-Veolia	PS expandido	ARU; C, NF/DN
		Denitropur	Sulzer	Plásticos Mellapak	AP; DN
		Denipor	Preussag AG	PS expandido	AP;DN
Biobead		Brightwater Eng	PE o PP	ARU; NF	

**Lecho móvil**

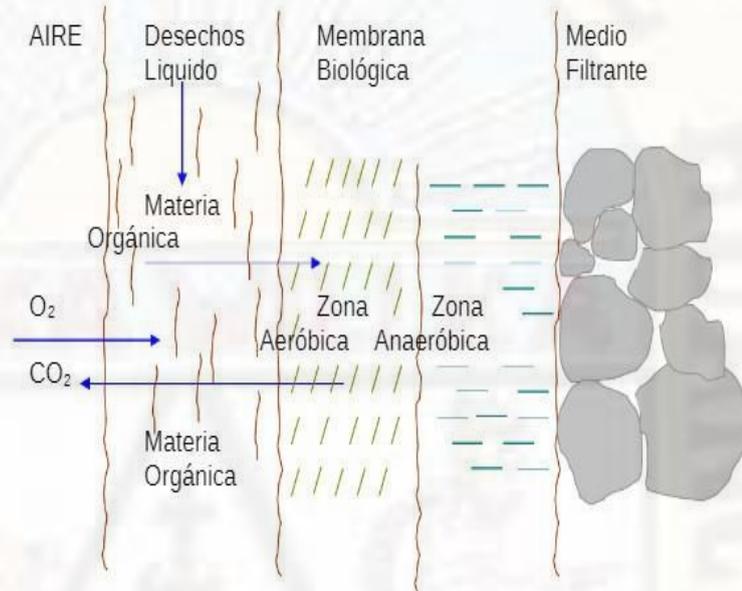
Lecho fluidizado aerobio	Sistema Oxitron	DorrOliver/Ecolotrol	Arena/CAG	ARU; NF
	Rex	Envirex/Ecolotrol	Arena	ARU, ARI; NF
Lecho fluidizado anaerobio o anóxico	Sistema Anitron	DorrOliver/Ecolotrol	Arena/CAG	ARU-DN;ARI-C
	Rex	Envirex/Ecolotrol	Arena	ARU-DN; ARI-C-DN
	Anaflux	Degrémont	Biolite (arcilla expandida)	ARI; C
	Biobed	Gist-Brocodes	Arena	ARU; C
Lechos móviles y turbulentos	Linpar	Linde AG	Cubos de PU	ARU-C/NF; ARI-C
	Captar	Simon-Hart., Ltd.	Cubos de PU	ARU; C, NF
	MBBR	Kaldnes-Veolia	PE	ARU-NF/DN; ARI-C
	Pegasus/Pegasur	Hitachi/Degrémont	Pellets de PEG	ARU; NF
Air-lifts y lechos circulantes	Circox/BAS	Pacques/Gist Brocades	Basalto	ARU-C/NF; ARI-C
	Turno N	Degrémont	Granulos de PE	ARU; NF
	Mixazur	Degrémont	Arcilla	ARU; DN

*Nota: ARU: Agua residual urbana; ARI: Agua residual industrial; AP: Potabilización de aguas. C: Eliminación de carbono; NF: Nitrificación; DN: Desnitrificación; postDN: Post-desnitrificación; PS: Polietileno; PE: Poletileno; PP: Polipropileno; PU: Poliuretano; PEG: Poletilen glicol; CAG: Carbón activado granular.*

**Fuente: Monzón et al. (2012).**

### 2.3.3.3. Lechos de oxidación.

Los lechos bacterianos son sistemas de cultivo fijo o de biomasa fija, es decir los microorganismos están adheridos a un medio de soporte y en ellos toman la materia orgánica a transformar (Trapote, 2011).



**Figura 1.** Esquema funcional de un lecho bacteriano.

Fuente: Russell (2012).

El principio de funcionamiento de los lechos bacterianos, denominado también filtros percoladores consiste en hacer caer el agua a tratar previamente decantada en forma de lluvia sobre una masa de material de gran superficie específica y sumamente permeable que sirven de soporte a los microorganismos depuradores las cuales forman una película biológica cuyo espesor oscila entre 0.1-0.2 mm. La materia orgánica presente en el agua residual es degradada por esta población de microorganismos adheridas a este medio de soporte (Trapote, 2011).

### **Descripción del proceso.**

Un filtro percolador o filtro rociador consiste en una estructura de material granular o material de soporte a través de la cual se hace pasar un efluente de aguas residuales previamente clarificadas, mediante un tratamiento primario. Los filtros percoladores, al igual que otros procesos de tratamiento secundario como los filtros de arena y los contenedores biológicos constan de tres partes básicas (Galindo, Toncel, & Rincón, 2017).

- a) **Medio filtrante:** El medio filtrante en un filtro percolador puede estar formado por grava, escoria, carbón, pedacería de ladrillo, esferas de plástico o cualquier otra sustancia durable y resistente; sobre la cual se propicia la formación de una película gelatinosa (llamada zooglea) constituida por una población microbiana heterogénea cuya acción física y físico-química retiene la materia orgánica y se alimenta de ella (Zambrano, Elena, Chuquival, & Alfredo, 2007).

El medio filtrante debe tener una relación de vacíos tal que permita su adecuada ventilación para proporcionar condiciones aeróbicas, por lo que se usan tamaños - de material comprendidos entre 2 y 4 pulgadas (5 a 10 cm) con una granulometría casi uniforme; y una profundidad que oscila entre 1, 2 y 5m; colocado de tal manera que el material más fino ocupe las posiciones superiores. El medio filtrante ideal es aquel material que posea una elevada área superficial por unidad de volumen, que sea económico, duradero y que no se obstruya fácilmente (Zambrano, Elena, Chuquival, & Alfredo, 2007).

Respecto a la granulometría del medio, se puede decir que un material con un tamaño menor que 1 pulgada (2.54 cm) no proporciona suficiente espacio de poros entre las piedras que permitan el flujo del agua residual, y los sólidos que pudieran - acarrear del tratamiento primario, darán como resultado una obstrucción más rápida del filtro; por otra parte las piedras con un tamaño mayor a 2 y 3/4 pulgadas (7 cm) evitan los taponamientos pero presentan un área superficial pequeña en relación a su volumen; razón por la cual no pueden soportar una zooglea grande, bajando considerablemente la eficiencia de remoción del filtro (Zambrano, Elena, Chuquival, & Alfredo, 2007).

#### **Espesor de la capa de limo (Zooglea).**

Normalmente, el espesor de la capa de limo está comprendido entre 0,1 y 2,0 mm. Existe un efecto perjudicial en la operación del filtro percolador si dicho espesor es superior a los 2,0 mm. Puede presentarse una obstrucción del relleno, perjudicando el flujo del agua residual y la transferencia de oxígeno a los microorganismos aerobios. Las cargas hidráulicas de operación normal son bajas, 1 - 10 m<sup>3</sup> /m<sup>2</sup> - h, y no son suficientes para mantener la capa de limo limpia. De esta forma, la carga hidráulica no puede emplearse para controlar el espesor de la capa de limo (Russell, 2012).

Este control se efectúa principalmente por las larvas y gusanos, que sobreviven en el limo acumulado. Conforme la capa de limo aumenta de espesor, la materia orgánica del agua residual se metaboliza antes de que pueda alcanzar la capa de microorganismos asociada a la superficie de relleno. Estos microorganismos quedan sin alimentación suficiente y tienden a pasar a la fase de respiración endógena. La capa de limo en

la fase endógena pierde su capacidad para unirse a la superficie del relleno y se pierde. Este fenómeno, denominado desprendimiento, es función de la carga orgánica e hidráulica del filtro (Russell, 2012).

b) **Sistema de distribución:** El sistema de distribución de un filtro percolador tiene por objeto uniformizar el reparto del agua residual en el medio filtrante (Russell, 2012).

c) **Sistema de bajo dren:** El sistema de bajo dren debe cumplir dos requisitos esenciales:

- i. Recolectar el agua residual tratada y los sólidos que se desprenden del medio filtrante y
- ii. Permitir una buena ventilación para mantener adecuadas condiciones aerobias en la zooglea, evitando que ésta se descomponga al entrar en condiciones anaerobias.

Los requisitos anteriores se cumplen si los drenes presentan una capacidad y pendiente suficiente para que operen a satisfacción por si solos, permitiendo el libre paso del aire para una buena ventilación, por lo que es recomendable que los drenes inferiores y canaletas de recolección se diseñen para transportar el gasto de diseño con un tirante hasta la mitad de su altura (Zambrano et al., 2007).

#### **2.3.4. Biorremediación.**

Es una estrategia que proviene del concepto remediación, que hace referencia al uso de técnicas físico-químicas las cuales utilizan el potencial metabólico de los microorganismos, así como también los tejidos vegetales de las plantas para remover o transformar contaminantes orgánicos en compuestos más simples. Con el uso de esta técnica se busca disminuir el daño y lograr realizar trabajos de descontaminación de aguas y de suelos. Esta metodología surge de una rama de la biotecnología que puede ser aplicada a todos los contaminantes que puedan ser transformados, acumulados o degradados de tal manera que se disminuya el desequilibrio causado en el medio ambiente (Casallas & Katerin, 2015).

En este proceso los contaminantes orgánicos, son biotransformados porque generalmente los microorganismos pueden utilizarlos para su propio crecimiento como fuente de carbono y energía y, en el caso de que no sean capaces de crecer a partir de ellos, pueden seguir transformándose si se les aporta un sustrato de crecimiento alternativo o co-sustrato (Buendía, 2012).

Para el crecimiento de los microorganismos es necesaria la presencia de donadores y aceptores de electrones, una fuente de carbono y nutrientes (N, P, K, S, Mg, Ca, Mn, Fe, Zn, Cu y elementos traza). El proceso más básico del metabolismo microbiano es la transferencia de electrones desde un sustrato donante hasta un sustrato aceptor. Los electrones son necesarios para oxidar (reducir) los compuestos orgánicos, que son la fuente de carbono, a la forma química utilizada por los constituyentes celulares y para generar la energía necesaria que posibilite la síntesis y el mantenimiento de la masa (Buendía, 2012).

Según el Instituto Nacional de Ecología, (2003). Establece que, de acuerdo al tipo de tratamiento, las tecnologías de remediación pueden clasificarse en tres grupos:

**G1: Tratamientos biológicos:** Utilizan las actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias) para degradar, transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos.

**G2: Tratamientos fisicoquímicos:** Utilizan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para separar o contener la contaminación.

**G3: Tratamientos térmicos:** Que utilizan calor para incrementar la volatilización, quemar, descomponer o fundir (inmovilización) los contaminantes en un suelo. La selección de un tratamiento debe considerar los siguientes factores: tipo de hidrocarburos, concentración del hidrocarburo, características del lugar donde se realizará la remediación, normativa ambiental, costos y tiempo disponible para la remediación.

### **Fitorremediación.**

Proviene del griego «phyton» = planta y del latín «remedium» = restablecer el equilibrio, la remediación. La fitorremediación no es un concepto nuevo, pues desde hace 3000 años los hombres han utilizado la capacidad natural de purificación de las plantas para el tratamiento del agua. Desde la década de 1970 esta práctica ha encontrado un renovado interés, en particular para el tratamiento de los plaguicidas y de los metales (Bachibiology, 2012).

En el siglo XVIII Joseph Priestley, Karl Scheele y Antoine Lavoisier demostraron que en presencia de luz las plantas son capaces

de descontaminar la atmósfera. Más tarde en 1885, Baumann, un botánico alemán, encontró altas concentraciones de Zinc en las hojas de algunas plantas que crecían en lugares conteniendo cantidades elevadas de este metal. Sin embargo, no fue sino hasta los años 70 que se reconoció la habilidad de las plantas para limpiar aguas y suelos contaminados. Y así, en los años 90 surgió el concepto de fitorremediación (Bachibiology, 2012).

La fitorremediación se trata de una serie de tecnologías o procesos que utilizan plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y destruir contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en suelos, lodos y sedimentos. Se han identificado una amplia variedad de especies empleadas para este fin. Estas técnicas utilizan plantas capaces de secuestrar contaminantes para evitar su propagación en el medio, reubicarlos dentro de la misma, o bien, degradarlos o metabolizarlos en otras sustancias menos tóxicas (Bachibiology, 2012).

De manera más completa, la fitorremediación representa una tecnología sustentable que utiliza las plantas para reducir la concentración de contaminantes a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a su sistema de raíz, basados en la teoría de la cohesión-tensión, una teoría de la atracción intermolecular observada habitualmente en el proceso en que el agua viaja hacia arriba (en contra de la fuerza de gravedad), a través del xilema de las plantas, que fue propuesta por John Joly y Henry Horatio Dixon (Bachibiology, 2012).

## **I. Mecanismos de fitorremediación.**

La remoción de contaminantes por fitorremediación se realiza empleando alguno de los siguientes mecanismos:

**Fitoimmobilización:** Provoca la sujeción y reducción de la biodisponibilidad de los contaminantes mediante la producción de compuestos químicos en la interfaz suelo-raíz, los que inactivan las sustancias tóxicas, ya sea por procesos de absorción, adsorción o precipitación (Carpena & Bernal, 2007).

**Fitoextracción o fitoacumulación:** Consiste en la absorción de metales contaminantes mediante las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y hojas. El primer paso para la aplicación de esta técnica es la selección de las especies de planta más adecuada para los metales presentes y las características del emplazamiento. Una vez completado el desarrollo vegetativo de la planta el siguiente paso es cortarlas y proceder a su incineración y traslado de las cenizas a un vertedero de seguridad (Kumar, Dushenkovv, Motto, & Raskin, 1995).

**Fitoestabilización:** Permite inmovilizar contaminantes en el suelo a través de su absorción y acumulación en las raíces o bien, por precipitación en la zona de la rizosfera. Este proceso reduce la movilidad de los contaminantes y evita su migración a las aguas subterráneas o al aire (Barton et al., 2005).

La fitoestabilización es efectiva en suelos de textura fina con alto contenido de materia orgánica. Se aplica principalmente en terrenos extensos en donde existe contaminación superficial. Esta tecnología tiene como ventajas, sobre otros métodos de remediación de suelos, que es de menor

costo, fácil de aplicar y estéticamente agradable (Padmavathiamma & Li, 2007).

**Fitodegradación o fitotransformación:** Se basa en el uso de plantas para degradar o transformar en sustancias menos tóxicas diversos tipos de contaminantes orgánicos como hidrocarburos aromáticos polinucleares, hidrocarburos totales del petróleo, plaguicidas (herbicidas, insecticidas y fungicidas), compuestos clorados, explosivos y surfactantes (detergentes) (Padmavathiamma & Li, 2007).

A través de reacciones enzimáticas que llevan a cabo plantas y microorganismos en la rizósfera, es decir, la zona del suelo estrechamente asociada con las raíces de las plantas, dichos contaminantes son parcial o completamente degradados o transformados. De esta manera son asimilados por las plantas y secuestrados en sus vacuolas o fijados a estructuras celulares insolubles, como la lignina (Padmavathiamma & Li, 2007).

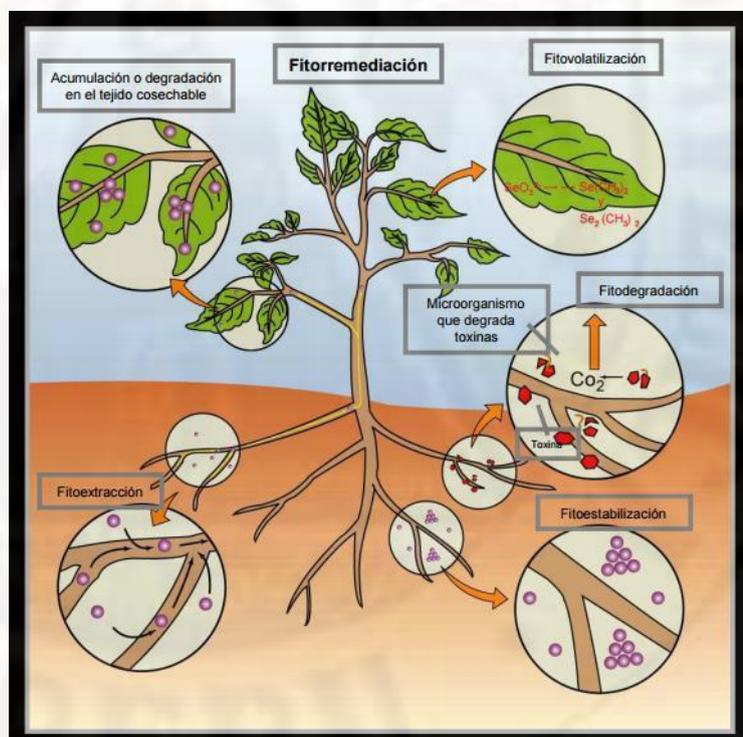
**Rizofiltración:** Se basa exclusivamente en hacer crecer, en cultivos hidropónicos, raíces de plantas terrestres con alta tasa de crecimiento y área superficial para absorber, concentrar y precipitar metales pesados de aguas residuales contaminadas (Núñez, Meas, Ortega, & Olgún, 2004).

Como puede apreciarse, las estrategias de fitorremediación hacen referencia a los mecanismos predominantes realizados por las propias plantas, pero también, en algunos casos, indican el papel que tienen las comunidades microbianas durante el proceso de remediación. Así, se hace evidente que la fitorremediación es un proceso complejo que involucra la participación de la comunidad microbiana asociada a su sistema

de raíz. Cada una de las estrategias tiene condiciones particulares, determinadas principalmente por el tipo de contaminante y el sustrato a tratar: suelos, sedimentos o agua (Núñez, Meas, Ortega, & Olgún, 2004).

**Fitovolatilización:** Se produce a medida que los árboles y otras plantas en crecimiento absorben agua junto con contaminantes orgánicos e inorgánicos. Algunos de estos pueden llegar hasta las hojas y evaporarse o volatilizarse en la atmósfera (Prasad, Narasimha, Freitas, & Maria, 2003).

Mediante este proceso se han eliminado contaminantes como: compuestos orgánicos volátiles (benceno, nitrobenceno, tolueno, etilbenceno y m-xileno), As, Se y Hg (Burken & Ma, 2006).



**Tipos de fitorremediación.**

Fuente: Carpena, & Bernal (2007).

## **II. Fitorremediación acuática.**

Tradicionalmente, las plantas vasculares acuáticas han sido consideradas como una plaga en sistemas enriquecidos con nutrientes. Su rápida proliferación puede dificultar la navegación y amenazar el balance de la biota en los ecosistemas acuáticos (Núñez et al., 2004).

Sin embargo, en la actualidad se considera que estas plantas también pueden ser manejadas adecuadamente y volverse útiles, debido a su capacidad para remover y acumular diversos tipos de contaminantes. Además, su biomasa puede ser aprovechada como fuente de energía, forraje y fibra. Los primeros sistemas de tratamiento de aguas residuales a base de plantas se implementaron en los países europeos a principios de 1960, utilizando juncos o carrizos (Núñez et al., 2004).

Desde entonces, los sistemas de fitorremediación acuática se han perfeccionado y diversificado, y su aceptación y aplicación cada vez es mayor. La fitorremediación acuática tiene la ventaja de que se pueden remover, in situ, diferentes tipos de metales que se hallen con bajas concentraciones en grandes volúmenes de agua (Núñez et al., 2004).

### **Sistemas de fitorremediación acuática.**

Los sistemas de fitorremediación acuática pueden ser de cuatro tipos:

**Humedales construidos:** se definen como un complejo de sustratos saturados, vegetación emergente y subemergente, animales y agua que simula los humedales naturales, diseñado y hecho por el hombre para su beneficio (Núñez et al., 2004).

**Sistema de tratamiento con plantas acuáticas flotantes:** pueden ser estanques semiconstruidos o naturales, donde se mantienen plantas flotantes para tratar aguas residuales (Núñez et al., 2004).

**Sistema de tratamiento integral:** es una combinación de los dos sistemas anteriores (Núñez et al., 2004).

**Sistema de rizofiltración:** ya mencionado anteriormente. Se ha demostrado que estos sistemas pueden remover eficientemente fosfatos, nitratos, fenoles, pesticidas, metales pesados, elementos radiactivos, fluoruros, bacterias y virus, de aguas residuales municipales, agrícolas e industriales, incluyendo las industrias: lechera, de pulpa y papel, textil, azucarera, de curtiduría, de destilería, aceitera, de galvanizado y metalurgia (Núñez et al., 2004).

### **2.3.5. Sistema integrado.**

Los sistemas integrados son sistemas combinados de procesos que de alguna manera tienen la función de cumplir tareas específicas, toda organización es un sistema complejo e integral formado por un grupo humano y una variedad de recursos físicos coordinada para la obtención de una finalidad establecida en el tiempo. Es posible definir matemáticamente un sistema de varias maneras (Hammond, 2010).

Como podemos observar un sistema integrado no es considerado un tipo de sistema dentro de la teoría general de los sistemas, pero puede estar inmerso dentro de un sistema abierto considerando criterios tales como; estar compuesto por dos y

más elemento que entre sí se interactúan y se difieren, la integración de sistemas biológicos es muy poco estudiado y en la siguiente investigación se integra dos elementos de tratamiento o proceso las cuales se estudiarán a detalle para una mejor funcionalidad como sistema (Hammond, 2010).

## 2.4. Definición de términos

- **Agua.-** El agua se compone de dos partes de hidrógeno y una de oxígeno, pero más importantes que sus componentes son los contaminantes que contiene.
- **Aguas negras o municipales.-** Son las aguas procedentes de los vertidos de la actividad humana, doméstica, comercial, industrial, agrícola, sus caudales son menores y más continuos, y su contaminación mucho mayor.
- **Aireación.-** La aireación en los procesos de lodos activos tiene como propósito; suministrar oxígeno a las células, mantener las células en suspensión y mantener en contacto íntimo el residuo con los lodos activos.
- **Biodiscos (RBC) .-** Son sistemas que fueron desarrollados para obtener el tratamiento biológico aerobio de las aguas residuales. En el caso de los RBC, la biomasa se presenta simultáneamente en la forma de crecimiento asistido (como en el caso de los filtros percoladores) y de crecimiento en suspensión (como en el caso de las unidades de lodos activos).
- **Biofilm.-** Se definen como comunidades de microorganismos que crecen en una matriz de exopolisacárido y adheridos a una superficie inerte o un tejido vivo.
- **Biofiltros.-** Los filtros que utilizan materiales orgánicos como empaque (paja, pasto, madera, turba, etc.) son los llamados “biofiltros”. El efluente, aguas servidas o residuos líquidos orgánicos, es rociado en la superficie del biofiltro y escurre por el medio filtrante quedando retenida la materia

orgánica, la cual es consumida por la actividad microbiológica, oxidándola y degradándola.

- **Calidad de agua.-** La calidad de agua, especialmente la calidad de agua dulce a menudo se clasifica de acuerdo a su uso: recreativo, para el consumo, para pescar y de vertido.
- **Características de las aguas residuales municipales.-** Son características de un agua residual urbana el conjunto de parámetros que pueden ser necesarios para el diseño y para el control de la estación del agua residual.
- **Carga másica.-** Es la relación entre microorganismo y alimento F/M.
- **Carga volumétrica:** Es la carga de materia orgánica introducida diariamente en el reactor biológico por unidad de volumen.
- **DBO (demanda bioquímica de oxígeno).-** Es la cantidad de oxígeno expresada en ppm y consumida en condición de ensayo en un tiempo dado, como consecuencia de la oxidación por vía biológica de la materia biodegradables presentes en el agua residual.
- **DQO (demanda química de oxígeno).-** Es la cantidad de oxígeno consumida por los cuerpos reductores presentes en el agua residual sin intervención de los organismos vivos.
- **Edad de fangos.-** Expresa la relación entre la masa de fangos presentes en el reactor biológico y la masa de fangos extraídos diariamente del reactor.
- **Fangos activos.-** El lodo activado consiste en una masa floculante de microorganismos, materia orgánica muerta, y materiales inorgánicos, tiene la propiedad de poseer una superficie altamente activa para la adsorción de materiales coloidales y suspendidos a la cual debe su nombre de activado.
- **Filtros biológicos.-** El filtro biológico es un proceso diseñado para ejercer una verdadera acción de tamizado o filtración de agua residual con biomasa adherida a un medio de soporte fijo, constituyendo un lecho de oxidación biológica. Un filtro percolador tiene como objetivo reducir la carga orgánica existente en aguas residuales domésticas o industriales. Consiste en un lecho de piedras u otro medio natural o sintético sobre el cual se

aplican las aguas residuales con el consecuente crecimiento de microorganismos, lamas o películas microbiales sobre el lecho.

- **Filtros de baja carga.-** Es un dispositivo que produce una calidad estable del efluente con independencia de la naturaleza cambiante del afluente. Generalmente, se mantiene una carga hidráulica constante, no por recirculación, sino por medio de bombas con control del nivel de succión o con sifones dosificadores.
- **Filtro de desbaste.-** Son filtros de alta carga que se proyectan para trabajar con cargas orgánicas y cargas hidráulicas elevadas, superiores a  $187 \text{ kg/m}^2$ . Se utilizan como pretratamiento del agua residual antes del tratamiento secundario, y usa medios plásticos. La actividad biológica es similar a la de un filtro percolador.
- **Filtro de muy alta carga.-** Estos filtros de muy alta carga trabajan a altas cargas hidráulicas y orgánicas. Las principales diferencias entre estos y los de alta carga radican en las mayores cargas hidráulicas y la mayor profundidad.
- **Fósforo.-** El fósforo es importante ya que se ha demostrado que es un ingrediente clave en la rápida proliferación de algas aguas abajo después del tratamiento. Este elemento se encuentra dentro del agua residual en forma de ortofosfatos o polifosfatos, las cuales actúan como nutrientes siendo un factor importante en la eutrofización.
- **Material de relleno.-** Las dos propiedades importantes de un medio filtrante son: La superficie específica y la porosidad.
- **Materia orgánica.-** El contenido de materia orgánica en las aguas residuales expresa su capacidad de absorción de oxígeno disuelto que contienen las aguas de los cauces naturales. Para valorar la materia orgánica se utiliza diversos parámetros principalmente la DBO-DQO.
- **Medidas de caudales.-** Existen un número de métodos de medidas de caudales su selección variara según las situaciones, caudal pequeño o muy fuerte y flujo en régimen fluvial o torrencial para un curso de agua.

- **Método de exploración de campo de velocidad.-** En una sección recta de flujo; la velocidad de flujo se determina en diferentes puntos de la sección. Estos métodos necesitan de material específico (molinillo varilla graduada, salmón, medidores de corriente, etc.) y un personal con formación.
- **Métodos fisicoquímicos.-** Llamados químicos o de dilución que consisten en inyectar un compuesto de concentración conocida en solución en el agua y medir la evolución de su concentración en el tiempo de una cierta distancia bajo el punto de inyección asegurándose de que la mezcla es satisfactoria.
- **Método hidráulico.-** Que utiliza los principios que rigen el flujo, y que engloban las medidas de montaje del vertedero.
- **Método volumétrico.-** (Aforo de capacidad), que consiste en medir el tiempo necesario para llenar el agua en un recipiente de contenido conocido. Estos métodos se emplean por lo general para caudales pequeños (en laboratorio), en los vertidos puntuales limitados en el tiempo.
- **Muestreo.-** La toma de muestra de agua es una operación delicada que requiere un gran cuidado pues condiciona los resultados analíticos y la interpretación que se dará.
- **Nitrógeno.-** La presencia del nitrógeno dentro del agua residual se presenta bajo la forma de nitratos y nitritos. Cuando el amonio se oxida a nitrato, requiere cantidades importantes de oxígeno. La primera oxidación es a nitrito mediante bacterias nitrosomonas, y la segunda toman el nitrito y lo oxidan a nitrato.
- **pH.-** Si las aguas residuales urbanas no contienen vertidos industriales su pH oscila entre 6.5 y 8.5 valores que no plantean problemas a los procesos de depuración. Fuera de este rango se producen problemas en los procesos biológicos.
- **Repartición hidráulica.-** La repartición hidráulica se da de manera homogénea dependiendo a la forma del lecho.

- **Sólidos suspendidos.-** El valor de este parámetro define la cantidad de fangos que será preciso de eliminar en un sistema biológico. La proporción en los fangos entre sólidos y fijos, volátiles determinan las posibilidades de funcionamiento del proceso de estabilización para su tratamiento.
- **Temperatura.-** La temperatura es importante en un proceso de depuración biológica ya que a medida que disminuye se ralentiza los procesos.
- **Tiempo de aireación.-** Está en función a la concentración de la DBO del agua residual afluyente y del volumen del tanque de aireación.
- **TRH (tiempo de retención hidráulica).-** El tiempo de retención hidráulica es el tiempo en la cual el floc biológico entra en contacto con el oxígeno y la materia orgánica.

## 2.5. Hipótesis

La eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos del agua residual municipal para el sistema integrado de biopelícula y fitorremediación con *Nasturtium officinale* (berro) es mayor al 60%.

## 2.6. Variables:

### 2.6.2. Variable independiente:

Sistema integrado de biopelícula y fitorremediación con *Nasturtium officinale* (berro) a escala piloto en la zona de descarga.

- Proceso de biopelícula.
- Proceso de fitorremediación con *Nasturtium officinale* (berro).

### **2.6.3. Variable dependiente:**

Eficiencia en la remoción de contaminantes orgánicos en el agua residual municipal.

- Determinación de la remoción de contaminantes orgánicos a partir de la  $DBO_5$ .

## 2.7. Operacionalización de variables

**Tabla 2**  
*Operacionalización de variables*

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN SISTEMA INTEGRADO DE BIOPELÍCULA Y FITORREMIEDIACIÓN CON <i>Nasturtium officinale</i> (BERRO) PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MUNICIPAL EN LA LOCALIDAD DE HUANCVELICA”					
Objetivo	Variab	Definición conceptual	Definición operacional	Indicador	Unidad de medida
<b>Evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos del sistema integrado de biopelícula y fitorremediación con <i>Nasturtium officinale</i> (berro) para el tratamiento de agua residual municipal de la localidad de Huancavelica.</b>	<b>Independiente</b> Sistema integrado de biopelícula y fitorremediación con <i>Nasturtium officinale</i> (berro) a escala piloto en la zona de descarga.	<b>Biopelícula:</b> Un proceso de biopelícula tiene por objetivo reducir la carga orgánica existente en agua residual doméstica o industrial. Consiste en un lecho de piedras, u otro medio sintético, sobre el cual se aplican las agua residual, con el consecuente crecimiento de microorganismos o películas microbiales sobre el lecho (Romero, 2000).	<b>Biopelícula:</b> Para este proceso se empleó un medio de contacto para el desarrollo de los microorganismos. En este tipo de proceso el medio entra en contacto con el agua residual y crecen microorganismos adheridos a la superficie, formando una capa de microorganismos que constituye una película biológica, de esta manera los microorganismos se alimentaron de la materia orgánica disuelta en el agua residual (Rivera, 2008).	TRH Caudal Temperatura pH	Horas m <sup>3</sup> /s °C Cantidad de iones de hidrógeno
	– Proceso de biopelícula. – Proceso de fitorremediación con <i>Nasturtium officinale</i> (berro).	<b>Fitorremediación:</b> Las tecnologías convencionales que han sido investigadas y utilizadas en los países desarrollados, pueden ser muy eficientes, pero generalmente son muy altos en costos, tanto de construcción como de operación, por lo cual se hace necesario desarrollar nuevos sistemas, para mejorar la salud de la población y del medio ambiente. La fitorremediación es un conjunto de tecnologías que reducen in situ o ex situ la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas (Villalobos, 2016)	<b>Fitorremediación:</b> Para el proceso de fitorremediación se empleó la especie <i>Nasturtium officinale</i> (berro). El método de plantación fue el de flujo superficial, con la especie flotando y una vez instalado el proceso inicio la operación y en lo posterior la evaluación mediante el muestreo.		

<b>Dependiente</b>			
<p>Eficiencia en la remoción de contaminantes orgánicos en el agua residual municipal.</p> <p>- Determinación de la remoción de contaminantes orgánicos a partir de la DBO<sub>5</sub>.</p>	<p>La eficiencia es la relación entre un ingreso y un egreso; entre una entrada y una salida; entre un recurso y un producto (FAO, 2010).</p> <p>Si bien es cierto la eficiencia determina la relación entre el efluente y afluente y al obtener alta eficiencia no se puede asumir que el afluente se puede disponer en un cuerpo receptor es por ello que los valores se analizaron en base a los Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales aprobado mediante Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.</p>	<p>Se realizó un muestreo de acuerdo al cronograma establecido para así evaluar los contaminantes orgánicos en el agua residual municipal, posteriormente se enviaron las muestras a un laboratorio certificado, por último, determinamos la eficiencia en función a los resultados obtenidos.</p>	<p>DBO<sub>5</sub> mg/l</p> <p><b>Sub indicadores:</b></p> <p>DQO. mg/l</p> <p>SST. mg/l</p> <p>Aceites y grasas mg/l</p> <p>Coliformes termotolerantes. (NMP/100 ml)</p> <p>Coliformes totales. (NMP/100 ml)</p> <p><i>Escherichia coli.</i> (NMP/100 ml)</p>

**Fuente:** Elaboración propia.



## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1. Ámbito temporal y espacial.**

##### **3.1.1. Ámbito temporal.**

El proyecto se ejecutó en una sola temporada (época de estiaje) durante los meses de junio, julio, agosto, y setiembre del año 2019, la construcción y ejecución del presente proyecto de investigación fue en el punto de vertimiento de aguas residuales de la localidad de Huancavelica (desarenador de agua residual de EMAPA S.A.), se trabajó bajo esta temporada climática por tener valores inferiores de temperatura ambiental de  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### **3.1.2. Ámbito espacial.**

El estudio fue desarrollado al margen derecho del desarenador de la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado – EMAPA S.A. - Huancavelica ubicado en el barrio de Santa Ana del distrito de Huancavelica, con coordenadas este 504066.40 m E y norte 8587053.49 m S.



**Fig. 1** Ambito espacial del proyecto de investigación.

Fuente: Google Earth.

### **3.2. Tipo de investigación.**

El tipo de investigación es la aplicada. Muy frecuentemente el propósito del investigador es identificar, describir y resolver situaciones y necesidades que con ocurrencias circundan en la sociedad, es decir como es y se manifiesta determinado fenómeno. Cumplen los criterios de una investigación básica ya que se estudian hechos y fenómenos de las cuales se formulan problemas e hipótesis destinadas a resolverlas (Tamayo, 2001).

El tipo de investigación tiene por objetivo demostrar y resolver la manera de reutilizar el agua residual municipal aplicando un sistema adecuado que garantice un buen funcionamiento acorde a las condiciones climáticas de la región de Huancavelica. La investigación del tipo aplicada tiene la función de demostrar cuan eficiente, deficiente, ineficiente; eficaz o ineficaz puede resultar este sistema estudiado (Tamayo, 2001).

### **3.3. Nivel de investigación.**

El nivel de la investigación fue explicativa, ya que en el transcurso de esta investigación se realizó la manipulación de variables no comprobadas en condiciones rigurosamente controladas con la finalidad de descubrir de qué modo o porque causa se produce un acontecimiento particular (Rodríguez, 2005).

El experimento evaluado por el investigador, le permite introducir determinadas variables de estudio manipuladas por él, para controlar el aumento o disminución de esas variables y su efecto en las conductas observadas. Para los investigadores un tipo de investigación no es mejor que otro (experimental versus no experimental). Como menciona Kerlinger (1979): “Los dos tipos de investigación son relevantes necesarios,

tienen un valor propio y ambos deben llevarse a cabo”. Cada uno posee sus características y la elección sobre qué clase de investigación y diseño específico hemos de seleccionar, depende de los objetivos que nos hayamos trazado, las preguntas planteadas, el tipo de estudio a realizar (exploratorio, descriptivo, correlaciona lo explicativo) y las hipótesis formulada (Rodríguez, 2005).

### **3.3.1. Métodos de investigación.**

**Método científico:** La ciencia tiene como cualidades el ser metódica, reflexiva, formal y crítica. Se vale del método científico para su progreso, el cual tiene la particularidad de usar técnicas específicas para cada área del conocimiento que son acordadas y reconocidas por cada comunidad científica para su uso. El método científico procura la precisión y mejora la exactitud.

**Método hipotético-deductivo:** Se tomará este método para hacer de esta investigación una práctica científica. El método hipotético-deductivo tiene varios pasos esenciales: observación del fenómeno a estudiar, creación de una hipótesis para explicar dicho fenómeno, deducción de consecuencias o proposiciones más elementales que la propia hipótesis, y verificación o comprobación de la verdad de los enunciados deducidos comparándolos con la experiencia. Este método obliga al científico a combinar la reflexión racional o momento racional (la formación de hipótesis y la deducción) con la observación de la realidad o momento empírico (la observación y la verificación).

**Método experimental:** Se usará este método en la investigación ya que se controlará deliberadamente las variables para delimitar relaciones entre ellas, este método de investigación está basado en la metodología científica. En este método se recopilan datos para

comparar las mediciones de comportamiento de un grupo control, con las mediciones de un grupo experimental. Las variables que se utilizarán serán las variables dependientes (las que queremos medir o el objeto de estudio del investigador) y las variables independientes (las que el investigador manipula para ver la relación con la dependiente). Además, debemos controlar todas las demás variables que puedan influir en el estudio.

### 3.3.2. Diseño de investigación.

Se aplicó el diseño experimental puro en donde se controlaron los factores que puedan alterar el proceso. Estudio de caso **pretest-postest de un solo grupo**. En este diseño se efectuó una observación antes de introducir la variable independiente que en principio es el agua residual municipal ( $O_1$ ) y otra después de su aplicación ( $O_2$ ). Por lo general la observación se obtuvo a través de la aplicación de una prueba u observación directa, cuyo nombre asignado depende del momento de aplicación. Si la prueba se administrará antes de la introducción de la variable independiente se le denomina pretest y si se administra después que entonces se llama postest; es por ello que se aplicará este diseño de investigación cuyo ordenamiento es la siguiente:



Donde:

**GE** = Es el grupo experimental de los contaminantes del efluente de agua residual municipal de la localidad de Huancavelica.

**O<sub>1</sub>** = Es el análisis de la DBO<sub>5</sub> del afluente y a partir de ello se determina a través de sus indicadores la calidad de agua presente antes de su tratamiento.

**X** = Representa al tratamiento respectivo a aplicar para una posible remediación del agua contaminada. (sistema integrado de biopelícula y fitorremediación).

**O<sub>2</sub>** = Es el análisis de la DBO<sub>5</sub> que contiene el efluente para determinar la eficiencia y el nivel de remediación que se alcanzó al aplicar el nuevo sistema de tratamiento de aguas residuales municipales.

### 3.4. Población, muestra y muestreo.

**Población:** La población es del tipo accesible ya que estará predispuesto para esta investigación. Se tomó como población a la localidad de Huancavelica la cual tiene una producción per cápita de 60 l/día/habitante valor aproximado de desechos residuales las cuales tiene un caudal promedio de 87 l/s en el desarenador punto final de llegada del agua residual de la localidad de Huancavelica, dichos datos son de acuerdo a la consulta realizada a EMAPA S.A.

**Muestra:** La muestra es no probabilística del tipo intencional o de conveniencia la cual garantiza representatividad, tomadas en el punto de descarga del agua residual que de acuerdo a los trabajadores de EMAPA S.A. - Huancavelica el punto de descarga tiene un caudal de 87 l/s del cual se tomó 0.011 l/s para poder obtener un tiempo de retención hidráulica de 5.5 horas.

El volumen de agua se obtuvo previo cálculo de acuerdo al tiempo de retención hidráulica.

**Muestreo:** Para realizar el análisis de los parámetros que nos ayuden a determinar la eficiencia del sistema las muestras fueron tomadas en el punto de entrada y salida del sistema de tratamiento durante el cronograma establecido,

para ello se recolectó el volumen de un litro (500 ml para afluente y 500 ml para efluente), ambas rotuladas para su adecuada identificación y análisis de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), así mismo para el análisis del pH y temperatura del agua.

**Tabla 3**

*Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales*

<b>Parámetros de monitoreo</b>	<b>Unidad</b>	<b>LMP</b>
Aceites y grasas	mg/l	20
Coliformes termotolerantes	NMP/100 ml	10000
DBO <sub>5</sub>	mg/l	100
DQO	mg/l	200
pH	unidad	6.5-8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mg/l	150
Temperatura	°C	<35

**Fuente:** Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM (Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales).

Para las muestras recolectadas para la medición de la DBO<sub>5</sub> no se utilizaron preservantes ya que su medición fue inmediata en el laboratorio central de la Universidad Nacional de Huancavelica; sacando así:

- 21 muestras para la medición de la DBO<sub>5</sub> a la entrada del sistema integrado.
- 21 muestras para la medición de la DBO<sub>5</sub> a la salida del sistema integrado.

Los parámetros de DQO, aceites y grasas, sólidos totales en suspensión, coliformes totales, coliformes fecales, *Escherichia coli*; fueron analizadas solo para verificar el nivel de remoción, razón por la cual solo se analizó una sola muestra a la entrada y salida del sistema, asimismo se aplicó los preservantes que envió el laboratorio tomándose en cuenta las condiciones de preservación y tipo de recipiente, según detalle.

**Tabla 4**

**Conservación y preservación de muestras de agua en función al parámetro evaluado**

Conservación y preservación de muestra de agua en función del parámetro evaluado			
Parámetro	Tipo de recipiente	Condiciones de preservación y almacenamiento	Tiempo máximo de almacenamiento
<b>Químico – Físico</b>			
pH	Plástico o vidrio	Analizar preferiblemente in situ	24 horas
Temperatura	Plástico o vidrio	Analizar preferiblemente in situ Llenar recipiente y sellar sin burbujas. Almacenar a oscuras o usar botellas oscuras.	Inmediatamente.
Demanda bioquímica de oxígeno en cinco días	Plástico o vidrio	Congelar por debajo de $-18^{\circ}\text{C}$ . Almacenar a oscuras o usar botellas oscuras	24 horas. 1 mes (6 meses si $> 50 \text{ mg/l}$ )
Demanda química de oxígeno	Plástico o vidrio. Plástico	Acidificar a pH 1 – 2 con $\text{H}_2\text{SO}_4$ Congelar por debajo de $-18^{\circ}\text{C}$	6 meses 6 meses
Sólidos totales en suspensión	Plástico o vidrio.	-	2 días
<b>Orgánicos</b>			
Aceites y grasas	Vidrio, boca ancha y ámbar.	Acidificar a pH 1 – 2 con HCl, $\text{H}_2\text{SO}_3$ o $\text{H}_2\text{SO}_4$ y refrigerar a $4^{\circ}\text{C}$ .	28 días
<b>Microbiológicos</b>			
Coliformes termotolerantes	Vidrio estéril	Dejar un espacio para aireación y mezcla de 1/3 del frasco de muestreo. Almacenar a $\leq 6^{\circ}\text{C}$ y en oscuridad.	24 horas
Coliformes totales (35-37 °C)	Vidrio estéril	Refrigerar a $4^{\circ}\text{C}$	24 horas
<i>Escherichia coli</i>	Vidrio estéril	Refrigerar a $4^{\circ}\text{C}$	24 horas

**Fuente: Parámetros químicos- físicos: ISO (2012) “Water Quality Sampling. Part 3: Preservation and handing of water samples International Estándar ISO 5667-3”, Organización Internacional de Normalizacion, Ginebra, Suiza. Y parámetros microbiológicos: Estándar Methods for the examination of Water and Wastewater 22ND edition, 2012, Whashington DC.**

## **3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.**

### **3.5.1. Técnicas de recolección de datos.**

Para el desarrollo de la investigación se empleó la técnica de la entrevista, recopilando de esta manera información como es el estudio de caracterización que realizó la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado S.A. de Huancavelica en adelante EMAPA S.A. – Huancavelica, también se empleó la observación y experimentación, evaluando de esta manera el comportamiento del sistema integrado respecto a los factores que afectan el adecuado funcionamiento, y finalmente el muestreo para determinar la DBO<sub>5</sub>, realizando el monitoreo correspondiente de parámetros de control y tomando muestras para el análisis correspondiente en el laboratorio empleando los instrumentos correspondientes, finalmente se emplearon fichas que nos permitieron recopilar los datos significativos

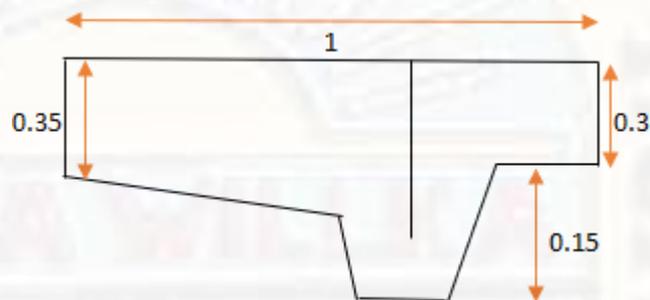
Para aplicar la técnica de experimentación y evaluar la eficiencia del sistema se diseñó y construyó cada uno de los procesos en el punto de descarga de agua residual municipal de la localidad de Huancavelica ubicada en el barrio de Santa Ana.

#### **3.5.1.1. Construcción del sistema integrado de biopelícula y fitorremediación**

Para el diseño de cada uno de los componentes se tomó en cuenta el tiempo de retención hidráulica del sistema integrado, siendo este valor de 5-6 horas, tiempo total en el cual un sistema biológico tarda en degradar la materia orgánica, para la presente investigación se dimensionó para 5.5 horas por ser un sistema a escala de laboratorio.

### Pretratamiento y tratamiento primario.

Se construyó un sedimentador que también cumplía la función de desengrasado, esto para retener partículas coloidales que pueden obstruir la circulación del agua a través de las mangueras, las mismas que tienen un diámetro muy pequeño.



**Figura 4.1.** sedimentador.

**Fuente:** Elaboración propia.

Como se aprecia en la imagen el diseño tenía una longitud de 1 m y una profundidad de 0.45 m y una pantalla en el centro que limita el paso de las natas, esto por la densidad de aceites y grasas.

**Tabla 5**

*Cálculo del TRH en el pretratamiento y tratamiento primario*

Cálculo del TRH		
Características	Cantidad	Unidad
Caudal	0.000011	m <sup>3</sup> /s
Tiempo	3	h
Caudal de ingreso	0.01	l/s
Caudal de salida	0.0073	l/s

**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla 5 se aprecia que este proceso tenía un caudal de ingreso de 0.01 l/s y contenía un volumen de agua de 0.12 m<sup>3</sup> y presenta un tiempo de retención hidráulica de 3 horas.

Para la construcción de este componente se empleó acuarios de vidrios sobre andamios como material de soporte el mismo que tenía una válvula de ingreso al sistema, de igual manera a la salida se colocó un codo de 90° y seguida de ello una válvula, esto para realizar el control del flujo a derivar al siguiente proceso; este componente tenía una pantalla de vidrio al centro.



*Figura 11. Sedimentación de sólidos y retención de aceites y grasas.*



*Figura 12. Placa de vidrio que retiene aceites y grasas.*

### **Filtro biológico**

Para este proceso se tomó en cuenta criterios de diseño similares las cuales indican que deben de tener un tiempo de contacto de 10 a 20 segundos; esto indica que el agua distribuida al medio biológico debe salir posterior a los 10 o 15 segundos, para ello se uso un sifón invertido, que iniciaba después del sedimentador; asimismo; a la entrada del filtro biológico se colocó una válvula antirretorno de media pulgada

de diámetro esto para impedir el retorno del agua, para el soporte del material filtrante (toba calcárea) de 5 cm de diámetro aproximadamente se empleó un balde de 18 litros ocupando un volumen de  $0.02 \text{ m}^3$ , para la distribución del agua se empleó una manguera de 6 mm de diámetro, las cuales repartían un caudal de  $0.0073 \text{ l/s}$ , como se aprecia en la tabla 6.

**Tabla 6**

*Cálculo del TRH en el filtro biológico*

Cálculo del TRH		
Características	Cantidad	Unidad
Caudal de ingreso	0.0073	l/s
Volumen	0.021	$\text{m}^3$
TRH	10	s

**Fuente:** Elaboración propia.

Al inferior del sistema biológico se encontraba un sedimentador secundario la cual es un componente adicional a un filtro biológico la cual tiene como función colectar las aguas filtradas y posteriormente se derivan al siguiente proceso como se aprecia en la figura 13.



**Figura 13.** Proceso de biopelícula con lecho filtrante.

### **Fitorremediación.**

Posterior al proceso de biopelícula se tuvo el proceso de fitorremediación en un acuario de doble cámara, la cual tenía la función de absorber nutrientes y contaminantes orgánicos, en cada cámara se colocó 4 plantas siendo en total 8 plantas colocadas, su capacidad de este componente es de 0.03 m<sup>3</sup> y tiene una longitud de 0.70 m y una profundidad de 0.30 m, esto para tener mayor contacto con las plantas, su tiempo de retención hidráulica fue de 2 horas con un caudal de salida de 0.004 l/s.

**Tabla 7**

*Cálculo del TRH en el proceso de fitorremediación*

<b>Cálculo del TRH</b>		
<b>Características</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Caudal	0.0000048	m <sup>3</sup> /s
Tiempo	2	h
Caudal de salida	0.0048	l/s
Caudal de ingreso	0.0097	

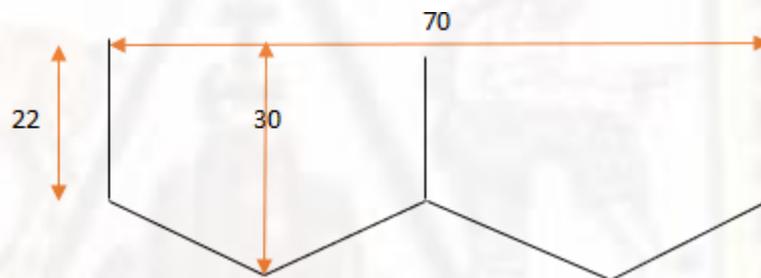
**Fuente: Elaboración propia.**

Este sistema estaba compuesto por dos cámaras, aumentando el tiempo de contacto entre el efluente del filtro biológico y las plantas, el sistema se visualiza en la figura 14.



**Figura 14. Proceso de fitorremediación con doble compartimento.**

Su diseño fue realizado tomando en cuenta las características de las plantas estudiadas, como se visualiza en la figura 15.



**Figura 15. Diagrama del proceso de fitorremediación.**

**fuente: Elaboración propia.**

Para realizar el proceso de monitoreo se empleó un cronograma para medir los cambios sustanciales que ocurren en determinados periodos de tiempo no mayor de 24 horas. Con la finalidad de realizar el seguimiento de la variación de los parámetros fisicoquímicos, orgánicos, microbiológicos relacionados al agua residual cruda y tratada de la planta piloto. El muestreo se desarrolló en tres etapas siendo la primera el monitoreo de los parámetros de control, posteriormente la

medición de la DBO<sub>5</sub> y finalmente el análisis de muestras mediante un laboratorio acreditado (véase Tabla 8).

**Tabla 8**

*Frecuencia de monitoreo (monitoreo de muestras de agua)*

Descripción del proceso	Frecuencia de monitoreo		
	2019		
	Julio	Agosto	Setiembre
Monitoreo de los parámetros de control.			
Determinación de la DBO <sub>5</sub> .			
Análisis de muestras en el laboratorio			

**Fuente:** Elaboración propia.

El monitoreo de parámetros de control se realizó 1 vez al día, esto para determinar el progreso del sistema y determinar su avance y su mantenimiento, y según el cronograma se llevó a cabo durante 3 meses, mientras que la determinación de la DBO<sub>5</sub> se realizó durante 2 meses, finalmente se enviaron las muestras al laboratorio **LABECO Análisis Ambientales S.C.R.L.** acreditado por el INACAL.

### **3.5.1.2. Monitoreo de parámetros de control:**

Durante el proceso de operación del sistema integrado se realizó el monitoreo del 15 de julio de 2019 al 23 de setiembre de 2019, donde se empleó un multiparámetro para medir la temperatura y el pH, según detalle.

### **Materiales y equipo:**

2 frascos de plástico, agua destilada, paño suave sin pelusa, vaso precipitado y pHmetro.

### **Metodología:**

- Se lava el frasco tres veces y se extrae la muestra del afluente y efluente, rotulando cada una de ellas.
- Se realiza la instalación del equipo estabilizando los electrodos del pHmetro con tres soluciones buffer, ácida, neutra y alcalina, luego se colocan los electrodos en la muestra del afluente y efluente según corresponde, se presiona el botón que inicia a dar lectura y posteriormente se espera hasta que se estabilicen los datos que figuran en la pantalla, se registran los datos y finalmente se lava con agua destilada cada uno de los electrodos.

#### **3.5.1.3. Determinación de la DBO<sub>5</sub>:**

La medición de la DBO<sub>5</sub> se realizó del 21 de agosto de 2019 al 23 de setiembre de 2019, tomando en consideración los criterios de conservación y preservación (véase Tabla 4).

### **Materiales y equipos:**

2 frascos de plástico, 4 pipetas esterilizadas, 2 vasos precipitados, espátula, paño suave sin pelusa, escobillón, agua destilada, 4 frascos para preparar las soluciones, Cloruro Férrico Hexahidratado ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ), Cloruro Cálculo anhidrido ( $\text{CaCl}_2$ ), Sulfato Magnésico Heptahidratado ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ ), Fosfato Potásico monobásico ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), base fuerte (cal sodada o potasa cáustica) en pellets, equipo Velp Científic DBO<sub>5</sub> 6 posiciones, hervidor eléctrico y balanza analítica.

## Metodología:

### Muestreo

- Se lava el frasco tres veces y se extrae la muestra del afluente y efluente, rotulando cada una de ellas, tomar en consideración que el frasco se debe llenar completamente.
- Rotular los frascos.
- Colocar los frascos en el cooler y trasladar las muestras al laboratorio central de la Universidad Nacional de Huancavelica.

### Determinación de la DBO<sub>5</sub>

- Se realiza la preparación de las soluciones (nutrientes A, B, C, y D), según detalle:

**Solución A:** 0.25 g de Cloruro Férrico Hexahidratado ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ) a un litro de agua destilada. (No debe estar expuesto a la luz).

**Solución B:** 27.5 g de Cloruro Cálculo anhidrido ( $\text{CaCl}_2$ ) a un litro de agua destilada.

**Solución C:** 22.5 g de Sulfato Magnésico Heptahidratado ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ ) a un litro de agua destilada.

**Solución D (Tampón):** 8.5 g de Fosfato Potásico monobásico ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) a un litro de agua destilada.



Figura 16. Sustancias compuestas.



**Figura 17. Soluciones A, B, C y D.**

- Colocar 250 ml de muestra del afluente y efluente respectivamente en un vaso precipitado y posteriormente se añade 1 ml de cada solución con pipetas esterilizadas y diferentes.
- Para determinar este parámetro se empleó el equipo Velp Cientific DBO<sub>5</sub> 6 posiciones, dicho equipo cuenta con 6 frascos de vidrio ámbar y sensores.
- Añadir las muestras en los frascos de vidrio ámbar.
- Rotular los frascos de vidrio ámbar.
- Introducir el imán de agitación en cada botella.
- Colocar pellets en los depósitos de CO<sub>2</sub> hasta el borde sin que rebose por los agujeros de las paredes.
- Colocar el sensor D.B.O. en el frasco y cerrar para evitar fugas, evitando ajustes que puedan dañar la rosca del sensor.
- Presionar el botón SET y START a la misma vez para realizar un reset.
- Presionar el botón SET para elegir la escala de 250 mg O<sub>2</sub>/l y luego presionar START, dando inicio a la medición.



*Figura 18. Ajuste de la escala de 250 mg O 2/L.*

- Conectar el refrigerador termostático y el cable de corriente del equipo de agitación en el interior, finalmente colocar los frascos en su posición, se debe tomar en cuenta que la temperatura del refrigerador termostático debe estar a 20 °C.



*Figura 19. Conexión del equipo de agitación a la incubadora a 20 °C.*

- Después de los 5 días transcurridos se realiza la medición presionando el botón START.

#### **Mantenimiento de los frascos**

Al culminar el ciclo de medición tanto botellas como imanes y depósitos de álcalis se debe lavar con agua caliente y escobillones pequeños, no deberían utilizarse detergentes ya que contiene altos valores de DBO<sub>5</sub> y podría afectar las mediciones posteriores si quedan restos de pequeñas trazas de detergente.

#### **3.5.1.4. Analisis de muestras por el laboratorio:**

El análisis de muestras de los parámetros: DQO, sólidos totales en suspensión, aceites y grasas, coliformes totales, coliformes fecales y *Escherichia coli* se realizó con el laboratorio “**LABECO Análisis Ambientales S.C.R.L.**” acreditado por el INACAL.

#### **Materiales y equipos:**

2 frascos de plástico esterilizados para los parámetros microbiológicos, 2 frascos de vidrio de color ámbar para aceites y grasas y DQO, 2 frascos de plástico para sólidos totales en suspensión, cooler, ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), cinta film.

#### **Metodología:**

##### **Muestreo para el análisis**

- Se recibieron los frascos enviados por el laboratorio los mismos que llegaron con los rótulos correspondientes y los preservantes.

- Se extrae la muestra del afluente y efluente:

Para las muestras de parámetros microbiológicos considerar un espacio del 10 % del volumen del recipiente para asegurar un adecuado suministro de oxígeno para las bacterias.

Para el parámetro DQO y aceites y grasas se debe dejar un espacio de alrededor del 1% aproximadamente de la capacidad del envase y una vez que se haya tomado la muestra se adiciona el preservante ( $H_2SO_4$ ).

- Se completan los datos del rotulo de cada uno de los frascos.
- Colocar los frascos en el cooler y embalar con la cinta film para posteriormente enviar las muestras al laboratorio.

### 3.5.2. Instrumentos de recolección de datos.

Los instrumentos empleados fueron para el proceso de monitoreo, según detalle:

#### Tabla 9

##### *Instrumentos de recolección de datos*

Parámetros	Instrumentos	Métodos
DBO <sub>5</sub> .	Sensor DBO <sub>5</sub>	Prueba de la DBO de 5 días
Temperatura	pHmetro digital	Método mecánico
pH	pHmetro digital	Método mecánico
DQO	Digestor DBR 200, Colorímetro portátil DR 900.	Reflujo cerrado, método colorimétrico
Coliformes totales		Técnicas estandarizadas de fermentación en tubo múltiple (NMP) de coliformes totales
Coliformes termotolerantes	Incubadora y autoclave	Método de filtro de membrana
Escherichia coli		Procedimientos generales de aislamiento e identificación de calidad
Aceites y grasas	Extractor Soxhlet	Método de partición – Gravimétrica
Sólidos totales suspendidos	Erlenmeyer	Sólidos totales en suspensión secados a 103° - 105 ° C.

**Fuente:** Elaboración propia.

Así mismo para el registro de datos se empleó:

- Ficha de registro de parámetros de campo.
- Ficha de registro de medición de la DBO<sub>5</sub>.

### **3.6. Técnicas y procesamiento de análisis de datos.**

Una vez concluida la investigación los datos se procesaron teniendo en cuenta criterios lógicos para que la información tenga coherencia y sea explícita, es así que detallamos las operaciones donde se recopilamos datos para posteriormente realizar el procesamiento y análisis, empleando técnicas lógicas (deductivas e inductivas) centradas en el análisis de la información obtenida tanto en campo y en laboratorio, para luego pasar a la técnica estadística (descriptiva e inferencial) las cuales tuvieron un análisis, síntesis lógico y verídico.

#### **3.6.1. Trabajo in situ**

En campo se realizó la evaluación de los parámetros físicos (caudal) y parámetros de control (pH y temperatura), asimismo se evaluó el correcto funcionamiento del sistema recolectando datos que puedan interferir en cada uno de los procesos y alterar las características y condiciones actuales del agua, también se realizó la toma de muestras para su posterior análisis en el laboratorio.

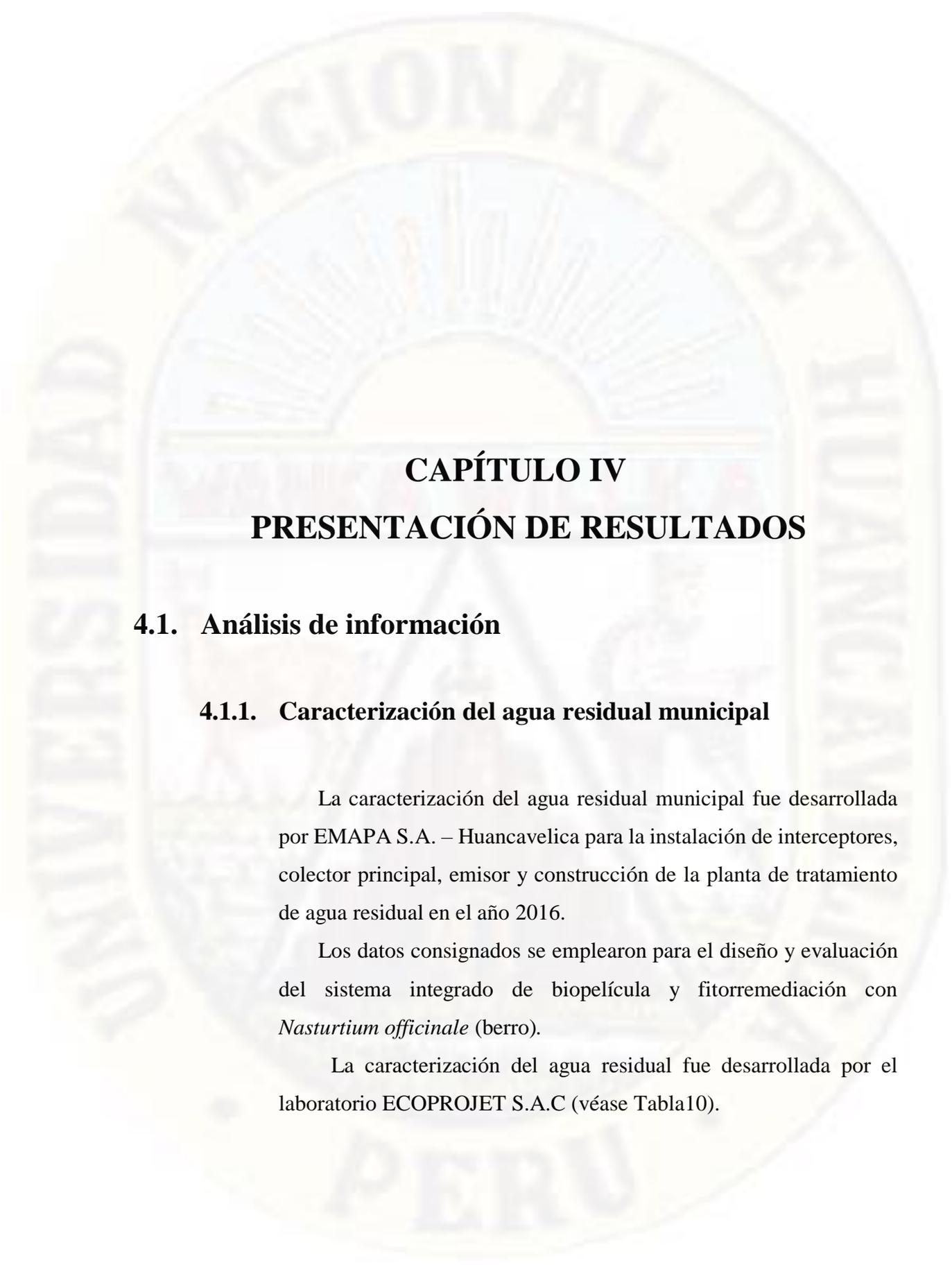
#### **3.6.2. Trabajo en laboratorio**

Se realizó la determinación de la DBO<sub>5</sub> en el laboratorio central de la Universidad Nacional de Huancavelica donde la información recopilada fue procesada para determinar la eficiencia del sistema integrado.

Los parámetros de DQO, aceites y grasas, sólidos totales en suspensión, coliformes totales, coliformes fecales y *Escherichia coli* fueron determinados en el laboratorio “**LABECO Análisis Ambientales S.C.R.L.**” acreditado por el INACAL.

### **3.6.3. Análisis de datos**

Mediante los criterios de la determinación de la eficiencia para el sistema se empleó la estadística descriptiva y la prueba de distribución de T- Student al 95% de confiabilidad, pre y post a la prueba del tratamiento del agua residual; se realizó un análisis de los datos procesados y ordenados comparándolos con la legislación ambiental (Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM que aprueba los Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales) evaluando de esta manera si los parámetros cumplen con la norma antes citada y de esta manera proyectos futuros puedan tomar esta investigación como punto de partida.



## **CAPÍTULO IV**

### **PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

#### **4.1. Análisis de información**

##### **4.1.1. Caracterización del agua residual municipal**

La caracterización del agua residual municipal fue desarrollada por EMAPA S.A. – Huancavelica para la instalación de interceptores, colector principal, emisor y construcción de la planta de tratamiento de agua residual en el año 2016.

Los datos consignados se emplearon para el diseño y evaluación del sistema integrado de biopelícula y fitorremediación con *Nasturtium officinale* (berro).

La caracterización del agua residual fue desarrollada por el laboratorio ECOPROJET S.A.C (véase Tabla10).

**Tabla 10*****Determinación de niveles superados***

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>	<b>LMP</b>	<b>Condición</b>
Aceites y grasas	mg/l	25.3	20	No cumple
Coliformes termotolerantes	NMP/100 ml	22000000.00	10,000	No cumple
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l	113	100	No cumple
Demanda química de oxígeno	mg O <sub>2</sub> /l	198	200	Cumple
pH	Unidades pH	6.93	6.5-8.5	Cumple
Sólidos totales en suspensión	mg/l	63	150	Cumple

**Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de caracterización del agua residual realizado por EMAPA S.A. – Huancavelica en el año 2016.**

Para los efectos de analizar las características del agua vertida al cuerpo receptor (río Ichu) se compararon con los Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Municipales aprobado mediante D.S.003-2010-MINAM; donde se concluye que el agua residual tiene alto contenido de materia orgánica, el mismo que se determina a partir de la DBO<sub>5</sub> con un valor de 113 mg-O<sub>2</sub>/l, rango que no está dentro de los LMP, asimismo, presenta un contenido de DQO de 198 mg-O<sub>2</sub>/l, por otro lado presenta alto contenido de coliformes totales con un valor de  $2.2 \times 10^7$  las cuales están fuera del rango permitido siendo esto una característica típica de un agua residual municipal, es así que los valores analizados no cumplen con la normativa.

#### 4.1.2. Comportamiento de la temperatura y pH del agua

La operación del sistema integrado se desarrolló entre los meses de julio a setiembre, con 2 fases de monitoreo; la primera fase tuvo inicio el 15 de julio del 2019 hasta el 23 de setiembre del 2019; esto para conocer la adaptación de las especies al medio acuoso, controlándose así la temperatura y el pH del agua; la segunda fase duro hasta el 23 de setiembre del 2019, realizando la medición de temperatura, pH y DBO<sub>5</sub> esto para evaluar su eficiencia del sistema (véase Tabla 17 y Tabla 18)

**Tabla 11**

*Valores promedios de la temperatura y pH*

	Media	
	Afluente	Efluente
Temperatura	11.40	12.07
pH	7.48	7.58

**Fuente:** Elaboración propia.

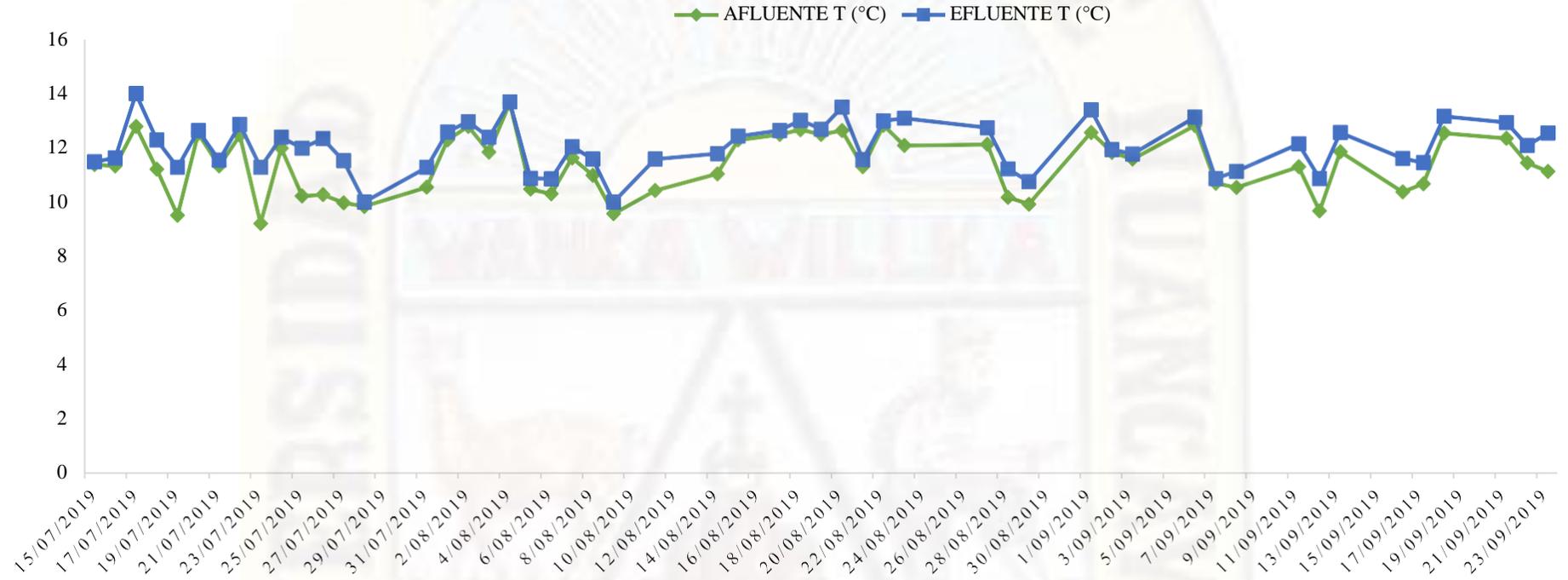
En la figura 20 se aprecia el comportamiento de la temperatura; la medición se realizó a la entrada y salida del sistema integrado esto para notar la variación de dicho parámetro. A la entrada del sistema integrado se tuvo una temperatura media de 11.4 °C y de 12.07 °C en la salida, este pequeño incremento se debe al tiempo de retención hidráulica, ya que existe incremento de temperatura del agua al recorrer cada uno de los procesos.

Por otro lado se procedió a medir el pH, usualmente este parámetro debe mantenerse dentro del rango de 6.5 a 8.5 de acuerdo a los Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Municipales aprobado mediante D.S.003-2010-MINAM, esto para garantizar un adecuado funcionamiento del sistema, durante el proceso de monitoreo a la entrada del sistema se tuvo valores promedios de pH de 7.48 y a la salida 7.57, esto indica un correcto funcionamiento del sistema; cabe precisar que tener valores por encima del rango establecido indica que el sistema integrado no estaría funcionando adecuadamente pues los sistemas biológicos no toleran cambios bruscos de pH.

En la figura 21 se evidencia que el 3 de septiembre del 2019 a la entrada del sistema se tuvo un valor de pH de 9.1 esto debido a la característica de un agua residual del tipo municipal, y a la salida se tuvo un valor de pH de 8.54, este fenómeno suscita por las sustancias químicas que son vertidas al agua residual las cuales quedan suspendidas en el agua llegando a incrementar o disminuir así el valor del pH.

La reducción del pH se debe que dentro del sistema integrado se tenía incorporado un sedimentador o desarenador el cual al tener un tiempo de retención hidráulica cumple la función de sedimentar partículas que de alguna u otra manera pueden generar alteraciones en los valores de pH del sistema, además de ello este fenómeno no se volvió a repetir en las fases de monitoreo por el cual no llegó a ser un obstáculo para determinar que el sistema esté funcionando correctamente.

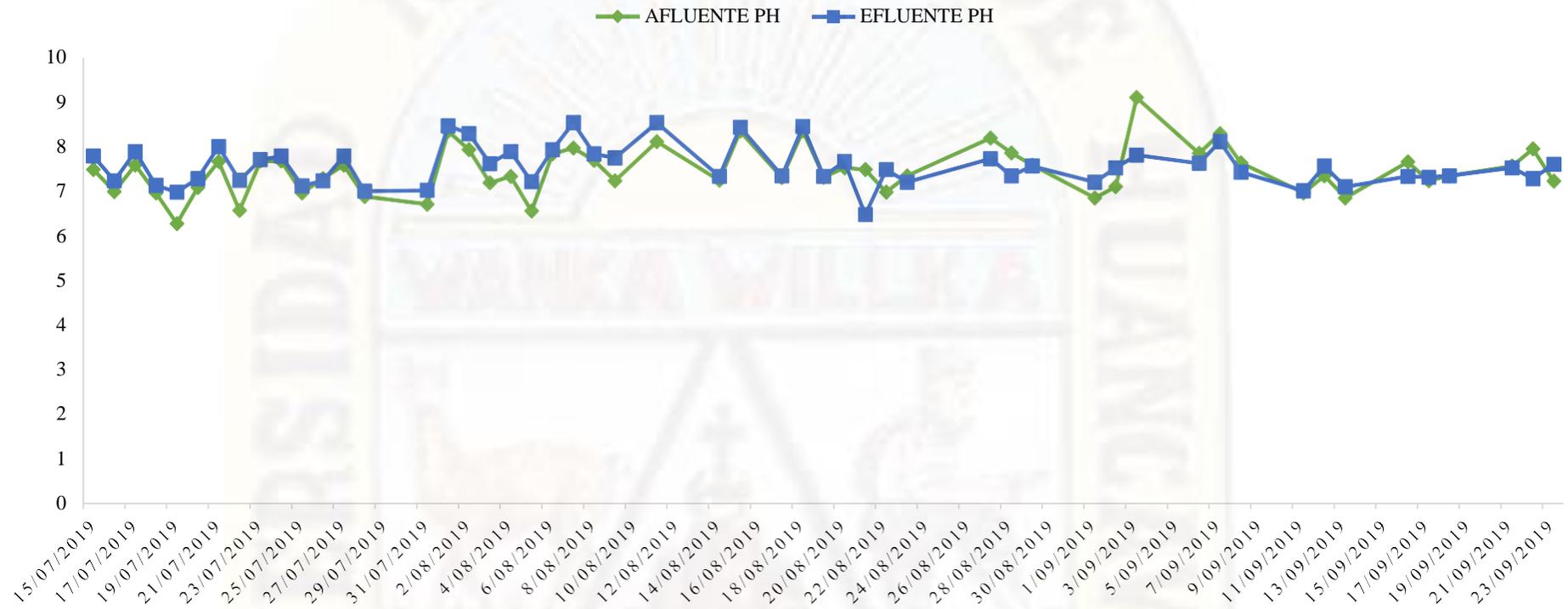
## Comportamiento de la temperatura



**Figura 20** Comportamiento de la temperatura durante la etapa de operación.

Fuente: Elaboración propia.

### Comportamiento del p H



Comportamiento del pH a la entrada y salida del sistema integrado.

Fuente: Elaboración propia.

### **4.1.3. Comportamiento de la DBO<sub>5</sub>**

La segunda fase de monitoreo está comprendida para determinar la eficiencia del sistema integrado, para lo cual se realizaron 21 mediciones de la DBO<sub>5</sub>, este parámetro indica la cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos para poder degradar la materia orgánica, es decir si se tiene un valor alto de la DBO<sub>5</sub> y no reduce dicho parámetro es porque no existen microorganismos que se encargan de desarrollar el proceso de degradación, y el sistema no estaría funcionando adecuadamente, motivo por el cual se desarrolló la medición de dicho parámetro.

La medición se desarrolló desde el 21 de agosto de 2019 hasta el 23 de septiembre de 2019, obteniendo 21 datos de DBO<sub>5</sub> medidos al quinto día (ver Apéndice 3), se obtuvo valores promedio en la entrada y salida del sistema de 154.42 ppm y 84.67 ppm respectivamente, obteniendo una eficiencia de remoción de 44.8%, asimismo durante el periodo de medición se evidenciaron valores máximos a la entrada del sistema integrado de 198 ppm y valores mínimos de 104 ppm, y a la salida del sistema valores máximos de 131 ppm y valores mínimos de 45 ppm, llegando a cumplir con los Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Municipales aprobado mediante D.S.003-2010-MINAM.

**Tabla 12**

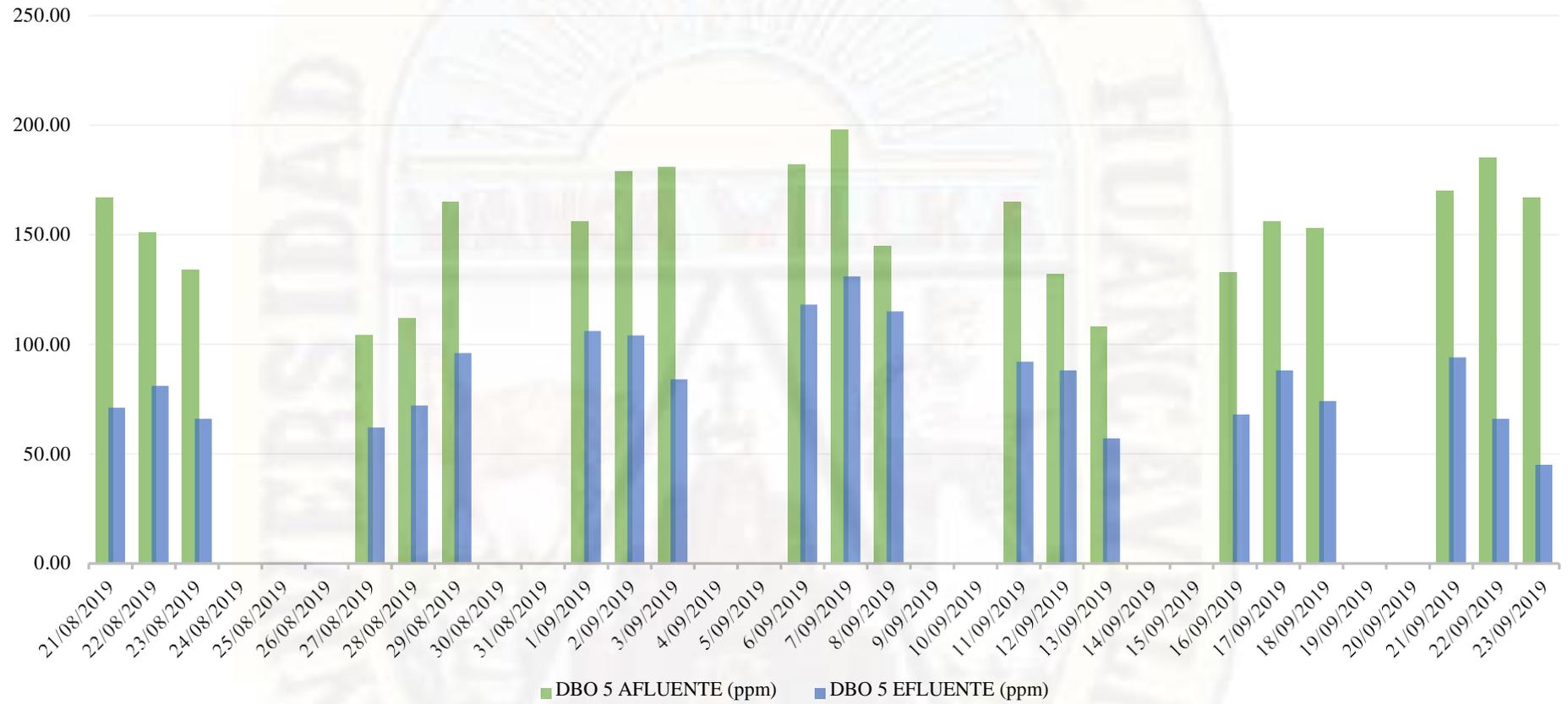
**Análisis de datos estadísticos de la medición de la DBO<sub>5</sub>**

	Media	
	Afluente	Efluente
DBO <sub>5</sub>	154.43	84.67

**Fuente: Elaboración propia.**

En la figura 22 se puede apreciar que existen grupos de 3 y cada 5 días, pues se realizó las mediciones por 3 días consecutivos, esto se da debido a la disponibilidad del equipo de medición, ya que el equipo consta de 6 botellas y cada una de ellas posee un sensor, asimismo para obtener los resultados se debe esperar 5 días, motivo por el cual los datos están representados de esa manera. Durante la medición de los días 6, 7 y 8 de setiembre el efluente presenta altos contenidos de carga orgánica, mientras que los días 16, 17, 18 de setiembre presenta bajo contenido de carga orgánica, obteniendo así una remoción significativa.

## Control de la DBO<sub>5</sub>



**Medición y control de la DBO**

5.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.4. Comportamiento de la DQO, coliformes totales, coliformes fecales, *Escherichia coli*

La medición de estos parámetros se desarrolló a la entrada y salida del sistema, siendo la entrada la tubería de ingreso al desarenador o sedimentador y la salida posterior al proceso de fitorremediación. Las muestras fueron enviadas el 10 de setiembre de 2019 al laboratorio “LABECO Análisis Ambientales S.C.R.L.” acreditado por el INACAL, y mediante el “INFORME DE ENSAYO N.º 1434-191” emitió los resultados como se aprecia en la tabla 13.

**Tabla 13**

*Resultados de las muestras de agua enviadas al laboratorio para conocer los parámetros de la DQO, TSS, aceites y grasas, coliformes totales, coliformes fecales, y Escherichia coli*

Código de Laboratorio	1434-1 (muestra 1)	1434-2 (muestra 2)	Unidad	LMP	Condición
Código de Cliente	EF-01	EF-02			
<b>Parámetros Físicoquímicos</b>					
TSS	179,0	171,3	mg/L	150	No cumple
Aceites y Grasas	537,8	505,7	mg/L	20	No cumple
DQO	345	115	mg/L	200	Cumple
<b>Parámetros Microbiológicos</b>					
Coliformes totales	$1,7 \times 10^7$	$9,2 \times 10^5$	NMP/100mL	*	No cumple
Coliformes termotolerantes	$4,9 \times 10^6$	$9,2 \times 10^5$	NMP/100mL	10000	No cumple
<i>Escherichia coli</i>	$3,3 \times 10^6$	$9,2 \times 10^5$	NMP/100mL	*	No cumple

\* A pesar de no existir una restricción en la legislación en cuestión, acerca de las poblaciones de coliformes totales y *E. coli*, es de vital importancia analizar dichos parámetros.

**Fuente: LABECO Análisis Ambientales S.C.R.L.**

Para el parámetro de DQO al ingreso se tiene 345 ppm, y en el efluente se obtuvo 115 ppm, cumpliéndose así los Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Municipales aprobado mediante D.S.003-2010-MINAM y se obtuvo una eficiencia de remoción de 67 % ; asimismo, se analizó parámetros microbiológicos tales como coliformes totales, coliformes fecales, *Escherichia coli* obteniéndose valores como se aprecia en la tabla 13 las cuales no están dentro del rango permitido, pero se evidencia que si tiene una capacidad de remoción significativa, cabe precisar que dentro de una planta de tratamiento de aguas residuales la remoción de los contaminantes microbiológicos no se da en su totalidad, finalmente los parámetros de aceites y grasas y sólidos totales en suspensión no cumplen con la normativa antes citada.

## **4.2. Prueba de hipótesis**

### **4.2.1. Principios de la investigación**

A través de la historia se ha tratado de encontrar un método confiable y eficaz, es por ello que la investigación científica tiene principios básicos para poder garantizar un correcto muestreo y un adecuado análisis de los datos obtenidos. La distribución normal es utilizada en muchos campos ya que es el supuesto básico de algunas herramientas estadísticas tales como para las pruebas T de Student, que son pruebas de hipótesis de medias, utilizadas para datos muestrales menores a 30, empleadas para observar los resultados, para los objetivos definidos, al ser modelados mediante esta prueba; de esto han surgido varias pruebas de normalidad que toman la información de la muestra para generar un valor que establezca un parámetro de decisión, por ello utilizamos la prueba de normalidad (R. Hernández, Fernández, & Baptista, 2006).

Se realizó el test de normalidad utilizando el estadístico de **Shapiro-Wilk**, porque la cantidad de datos evaluados de cada parámetro son menores a 50 datos ( $n < 50$ ).

### **Test de normalidad**

Para evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos del agua residual municipal para el sistema integrado de biopelícula y fitorremediación con *Nasturtium officinale* (berro) a partir de la  $DBO_5$  se empleó el test de normalidad.

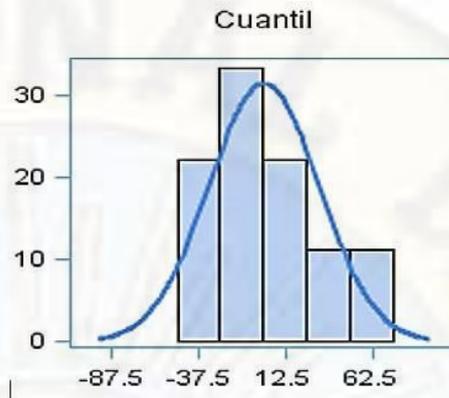
*Tabla 14*

*Test de normalidad.*

<b>Test de normalidad</b>		
<b>Test</b>	<b>Estadístico</b>	<b>p valor</b>
<b>Shapiro-Wilk</b>	<b>W</b> 0.510	<b>Pr &lt; W</b> 0.0970

**Fuente:** Elaboración propia.

Se realizó el test de normalidad con el estadístico de Shapiro-Wilk en el cual resultó que los datos de demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ), muestran un comportamiento normal, debido a que  $Pr < W$  resultó 0.0970 el cual es mayor a 0.05 (error de 5 %), por lo que presenta normalidad en la prueba de Shapiro-Wilk.

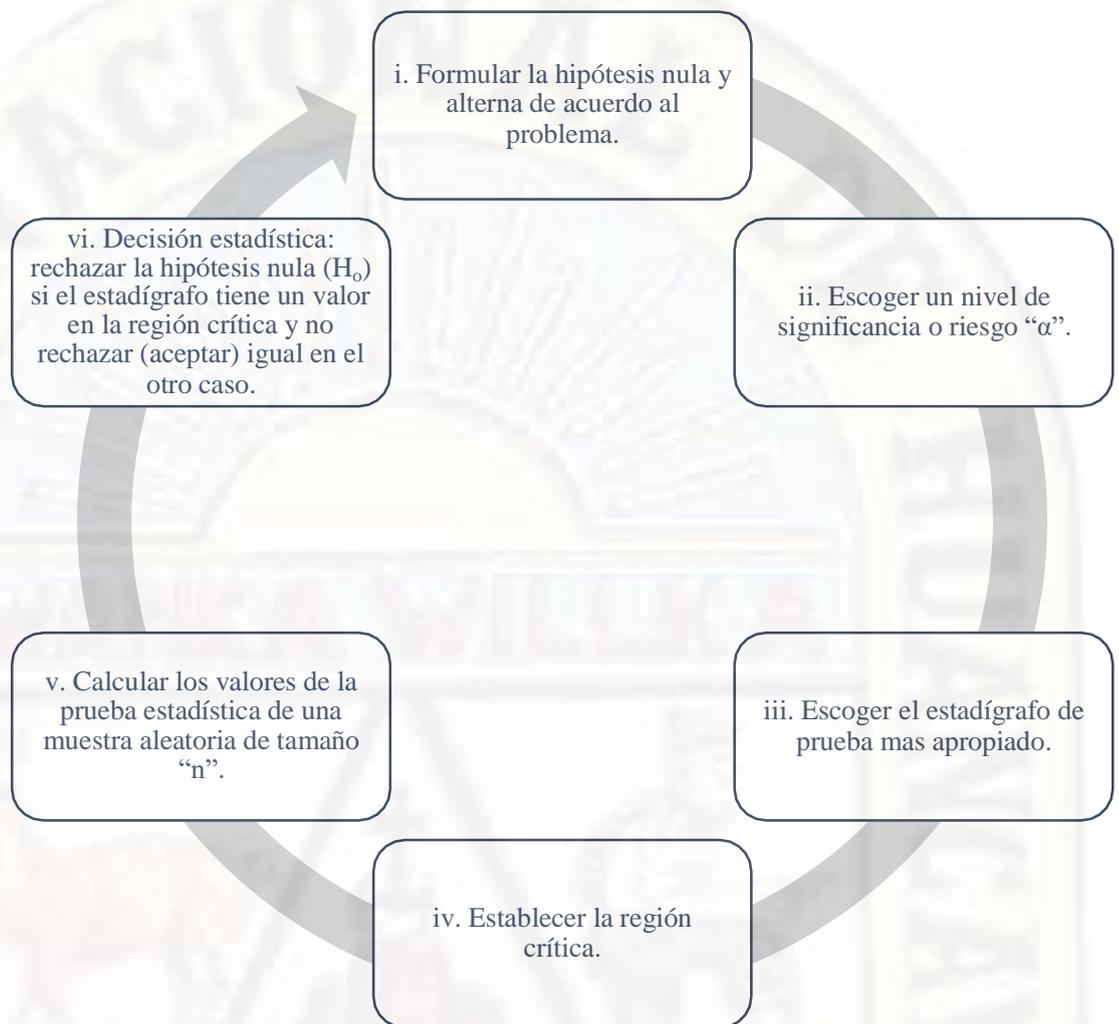


**Figura 3.** normalidad de la eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos del agua residual municipal para el sistema integrado de biopelícula y fitorremediación con *Nasturtium officinale* (berro), con cuantiles normales.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2. Prueba de hipótesis

Como señala Hernández *et al.* (2014), la contrastación de hipótesis se resume en 6 pasos, y estando en este último paso, se tiene ya la posibilidad de tomar la decisión de aceptar o rechazar la hipótesis nula; atendiendo a este planteamiento, que a criterio propio es el más coherente; sin dejar de lado otros planteamientos, se ha optado por seguir estos pasos para el contraste de la hipótesis:



**Figura 24. Pasos para la contrastación de hipótesis.**

**Fuente: Hernández et al. (2014).**

### **i. Formulación de la hipótesis nula y alterna.**

Ha: La eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos del agua residual municipal para el sistema integrado de biopelícula y fitorremediación con *Nasturtium officinale* (berro) es mayor al 60%.

$$\mu > 60 \%$$

Ho: La eficiencia de remoción de los contaminantes orgánicos del agua residual municipal para el sistema integrado de biopelícula y fitorremediación con *Nasturtium officinale* (berro) es menor al 60%.

$$\mu < 60 \%$$

**ii. Nivel de significación.**

En la presente investigación se trabajó con un error de 5 %; es decir:

$\alpha = 0.05$ , por lo que el error del trabajo no debe ser mayor al planteado y con un grado de confianza de 95 %, es decir con  $1 - \alpha = 0.095$ .

**iii. Estadístico de prueba.**

El estadístico de prueba utilizado fue el “T de Student” debido a que los datos analizados son menores a 30 datos y se encuentran en porcentajes (Hernández *et al.* 2014).

**iv. Valor crítico y regla de decisión.**

A partir de la hipótesis planteada la  $H_a (>)$ , indica que tendrá una cola hacia la derecha y cuando  $H_a (<)$ , indica que tendrá una cola hacia la izquierda para un nivel de confianza de 95% con un error  $\alpha = 0.05$  en la tabla de T de Student tenemos los valores críticos de T de la tabla y  $\alpha$  error.

$$T_{\text{tabla}} = 1/20 = - 1.7247$$

GL= 21 – 1; porque se tiene 21 datos de eficiencia.

$T_{\text{cal}} < =$  que el valor T de la tabla se acepta la hipótesis nula

$T_{\text{cal}} > =$  que el valor T de la tabla se rechaza la hipótesis nula.

v. **Cálculo de los estadígrafos de prueba.**

Análisis de (T de Student) para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>).

**Tabla 15**

*Prueba de T de Student para DBO<sub>5</sub>*

<b>T de Student para la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub></b>	
Nivel de significancia (NS)	0.05
Nivel de confianza (NC)	0.95
Valor hipotético (u)	60
Muestra (n)	21
Grados de libertad (n-1)	20
Media (x)	44.80
Desviación estándar (s)	11.69
Prueba de T de Student	<b>-1.68</b>

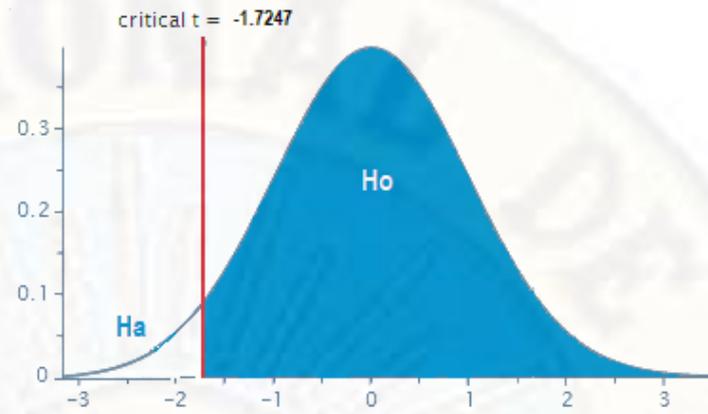
**Fuente: Elaboración propia.**

De acuerdo a los resultados obtenidos se tiene lo siguiente:

$$T_{\text{calculado}} = \frac{\bar{x} - u}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

Obteniendo que el T cal o T de Student es = **-1.68**

Con T de tabla = **-1.72**



**Figura 3.5** Críticos “t” para aceptar o rechazar la hipótesis nula  $H_0$ , en términos de la  $DBO_5$ .

Fuente: Elaboración propia.

\* El valor T calculado resultó -1.68 menor que ( $<$ ) los valores de T de la tabla - 1.7247, para demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ) se observa que hay una diferencia entre los valores de T siendo T de Student la prueba de contrastación de hipótesis.

#### vi. Decisión estadística

Se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se rechaza la hipótesis alterna ( $H_a$ ) debido a que el valor de T calculado es  $-1.68 <$  que el valor de T de la tabla -1.72, indicando que el valor del estadístico muestral (T calculado) se encuentra en la región de aceptación para  $H_0$ , entonces la hipótesis nula ( $H_0$ ) se acepta, y concluimos que: La eficiencia de remoción de los contaminantes orgánicos del agua residual municipal para el sistema integrado de biopelícula y fitorremediación con *Nasturtium officinale* (berro) es menor al 60%.

### 4.3. Discusión de resultados.

- El sistema se diseñó de acuerdo al estudio de caracterización que realizó EMAPA S.A. – Huancavelica en el año 2016 con el laboratorio ECOPROJET S.A.C y realizando una comparación con los resultados de las muestras analizadas del afluente en el presente trabajo de investigación (ver Apéndice 8) se determinó que los parámetros no cumplen con la normativa vigente, asimismo, existe un incremento de los valores, esto se puede atribuir a los 3 años transcurridos, ya que uno de los factores que interviene en las características del agua residual es el crecimiento poblacional y también el aumento del número de interceptores para la construcción del colector principal.
- La temperatura presentó una variación de 1 °C, mientras que el pH a la entrada del sistema presentó valores promedios de 7.48, y a la salida 7.57 el análisis de dichos parámetros concuerdan con Vicente (2016) ya que de acuerdo a su investigación sobre la remoción de contaminantes en biofiltros empleando como material de soporte al aserrín y la fibra de coco determina que la temperatura presenta una variación de 1 °C y los valores de pH se encuentran entre 5.8 - 6.9 los mismos que cumplen con la normativa de Ecuador, de igual manera Charris and Caselles (2016) evalúan la eficiencia de remoción de contaminantes del agua residual doméstica con humedales donde los valores de la temperatura presentan una variación de 2 °C y el pH se encuentra entre 7 – 8.
- Delgadillo et al. (2010) refiere que la temperatura del agua residual es mayor que la temperatura del agua para abastecimiento como consecuencia de la incorporación de agua caliente proveniente del uso doméstico e industrial, asimismo este parámetro es importante ya que muchos procesos biológicos dependen de la temperatura para el

desarrollo de la actividad bacteriana y el rango óptimo se encuentra entre 25°C a 35 °C y si la temperatura es menor a 5° C la actividad microbiana se inhibe. En el efluente del sistema integrado la temperatura promedio fue de 12.07 °C limitando de esta manera la formación de la biopelícula a pesar de haber acondicionado la caseta.

- El tipo de material que se empleó para el biofiltro no afectó los valores de pH, sin embargo, Siguí (2013) en la evaluación que realizó, refiere que el agua subió significativamente en los primeros 4 días de análisis, esto probablemente a la falta de una limpieza a la grava utilizada y la limpieza era necesaria ya que la grava posee algo de cal, lo que ocasionó un aumento significativo de este parámetro en un inicio.
- Del análisis de la DBO<sub>5</sub> se obtuvo una eficiencia de remoción de 44.8%, y dentro de las 21 mediciones se evidenciaron valores máximos a la entrada del sistema integrado, de 198 ppm y valores mínimos de 104 ppm, así mismo a la salida del sistema valores máximos de 131 ppm y valores mínimos de 45 ppm, llegando a cumplir con los LMP.
- Según la investigación de Espinoza (2017) donde evaluó la concentración de 10 ml/l de microorganismos eficientes en un sistema de biofiltro se encontró una mínima disminución promedio para la DBO<sub>5</sub> de un 4%, y una máxima disminución de 16.24%, así mismo compara sus resultados con la investigación de Hernández (2010) donde empleó la piedra pómez y grava como material filtrante y obtuvo eficiencias de remoción para la DBO<sub>5</sub> desde un 7.69 %, hasta un máximo de 28.94%, también se evaluó el carbón y grava como medio filtrante y la eficiencia de remoción para la DBO<sub>5</sub> fue de 5.0 % hasta un máximo de 39.76%.
- Por otro lado Rodríguez et al. (2010) realiza el estudio de la comparación de lentejas y buchón de agua en humedales artificiales en

el tratamiento de aguas residuales y presenta resultados de remoción de materia orgánica ( $DBO_5$ ) entre 70 y 86% al utilizar el buchón de agua, y de 58% cuando empleó lentejas de agua.

- La eficiencia de remoción de DQO es de 66.67 %, asimismo el valor del afluente cumple con la normativa ambiental, aproximándose de esta manera a la eficiencia que obtuvo Siguí (2013), ya que el promedio total de eficiencia fue de 66,3 % de remoción de la DQO, el refiere que los microorganismos se desarrollaban en el interior del medio filtrante y la eficiencia mejoraba hasta llegar a un punto de saturación donde la película biológica ha crecido tanto que comienza a desprenderse del medio y ocasiona una pérdida en la eficiencia del tratamiento, mientras que Espinoza (2017) obtuvo valores mínimos de eficiencia de 31.45% y un máximo de 47.41% de remoción de la DQO en dicho estudio evaluó dos tipos de sistemas de filtrado uno con piedra pómez y otro con carbón, por otro lado Rodríguez et al. (2010) obtiene una remoción del 86.25% en un proceso de fitorremediación.
- En relación al parámetro coliformes totales Sanhueza et al. (2011) evalúa el comportamiento geotécnico de suelos volcánicos chilenos para su uso como material de filtro en la depuración de aguas residuales domésticas y determina que para los casos en que el espesor es de 15 cm, se refleja una leve alza en los valores al aplicar una tasa de agua residual de 550 cc, mientras que la depuración es mejor cuando se aplican 500 cc en las probetas. De esta manera, los mejores resultados se obtienen con la combinación de probetas de altura 15 cm y tasa de aplicación de 500 cc, la eficiencia de remoción en la presente investigación fue del 94.59%, sin embargo, los valores que se obtuvo en el efluente no cumplen con la normativa vigente.
- La remoción de coliformes fecales fue de 81.22%, mientras que Ugaz (2018) obtiene una remoción del 94.7% para un proceso de

fitorremediación, valores que cumplen con la normativa ambiental, asimismo refiere que la principal diferencia entre los coliformes totales y fecales es la capacidad que tiene los coliformes fecales para desarrollarse a mayor temperatura en condiciones de laboratorio y según Chernicharo (2013) este parámetro es más importante en el sector salud, ya que se relaciona con la probabilidad de encontrar patógenos excretados (bacterias, parásitos y virus entéricos).

- Quispe (2018) evaluó dos sistemas de biofiltro tomando como referencia los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA), Categoría 3 y obtuvo mayor eficiencia respecto a la remoción de coliformes fecales en el primer biofiltro SB1 empleado (canal de desbaste, tanque séptico, seguido por un humedal de flujo subsuperficial vertical y un humedal de flujo superficial) a diferencia del segundo SB2 (canal de desbaste, tanque séptico, seguido por un lombrifiltro y un humedal de flujo superficial).
- Ugaz (2018) obtuvo una eficiencia del 94.6 % respecto a la remoción de *E. coli*, mientras que la eficiencia de remoción del presente trabajo de investigación alcanzó al 72.12 %, por otro lado (Cervantes, 2009) quien analizó un sistema combinado (biofiltración con madera de tabachín (*Caesalpinia pulcherrima*) triturada y el sistema de humedales construidos con flujo vertical subsuperficial utilizando la planta llamada cuna de Moisés (*Spathiphyllum wallisii*) obtuvo una reducción de concentración de coliformes fecales en 3 unidades logarítmicas respecto al efluente del biofiltro y 4 unidades para el efluente del primer humedal artificial.
- Finalmente, se analizaron los parámetros de sólidos totales en suspensión y aceites y grasas, respecto al primer parámetro no hubo alta eficiencia de remoción, ya que los resultados del afluente y efluente

fueron 179,0 mg/l y 171,3 mg/l respectivamente, en la investigación que realizó Vicente (2016) obtuvo un incremento en 370 mg/l del efluente con respecto a los 223 mg/l de sólidos totales en suspensión del afluente debido a la presencia de restos del empaque que se han disgregado por lo que este parámetro se encuentra fuera de la norma ambiental, es así que en la presente investigación se puede determinar que no hubo alta remoción debido a que una de las características de la toba calcárea es que tiende a disgregarse aumentando los sólidos sedimentables, sin embargo el proceso de fitorremediación no afecta la variación de dicho parámetro.

- Para el parámetro de aceites y grasas Vasquez (2017) trabajó en función a 7.81 mg/l como testigo y obtuvo una eficiencia de remoción de 41.1 % en la biofiltración con la piedra pómez, mientras que en el tratamiento con plantas acuáticas y lechos filtrantes Ugaz (2018) tiene un ingreso de 42 mg/l y una eficiencia de 95.2 %, cabe mencionar que en la presente investigación el afluente que ingresa a cada uno de los procesos es de 537.8 mg/l y se obtuvo una eficiencia de 5.97 % de eficiencia, es por ello que es de vital importancia evaluar la concentración de aceites y grasas para diseñar una adecuada trampa de grasas, ya que de acuerdo a la caracterización del año 2016 solo se tenía 20 mg/l.

## Conclusiones:

- De acuerdo al análisis del informe de caracterización, el agua residual tiene alto contenido de materia orgánica e inorgánica, y coliformes totales es así que los valores analizados no cumplen con los LMP para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Municipales aprobado mediante D.S.003-2010-MINAM.
- Respecto al comportamiento de la temperatura se obtuvo la variación de 1 °C, este pequeño incremento se debe al tiempo de retención hidráulica, por otro lado, el pH se mantuvo dentro del rango establecido en los LMP para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Municipales aprobado mediante D.S.003-2010-MINAM.
- Se obtuvo una eficiencia de remoción de la DBO<sub>5</sub> de 44.8%, asimismo a la salida del sistema, los valores máximos y mínimos fueron de 131 ppm y 45 ppm respectivamente, llegando a cumplir los LMP para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Municipales aprobado mediante D.S.003-2010-MINAM.
- Del análisis de la DQO, coliformes totales, coliformes fecales y *Escherichia coli*, aceites y grasas y sólidos totales en suspensión se determinó que los valores del afluente de la DQO cumplen con los LMP para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Municipales aprobado mediante D.S.003-2010-MINAM, mientras que el resto de parámetros no cumplen con la normativa, pero se evidencia que hubo una capacidad de remoción significativa de los parámetros microbiológicos.

## **Recomendaciones:**

- Para realizar trabajos de investigación empleando una planta piloto es importante contar con una caseta de protección con adecuada ventilación, ya que evita la generación de olores.
- El análisis de una especie (berro) que crece en el distrito de Huancavelica resultó de vital importancia, pues se recomienda que continúen realizando posteriores investigaciones.
- Realizar un estudio de la eficiencia de remoción empleando dos humedales artificiales con berro.
- Al tener altos contenidos de aceites y grasas es importante realizar la limpieza una vez al día, pues de acuerdo a los resultados del laboratorio se obtuvo una mínima eficiencia de remoción de sólidos totales en suspensión y aceites y grasas, ya que se realizaba el mantenimiento cada 2 días, tomando en consideración que es una planta piloto, pues el mantenimiento de una planta de tratamiento de aguas residuales es diario.
- Colocar un dispersor de agua residual automático, es por ello que el lugar donde se instalará la planta piloto debe contar con acceso a energía eléctrica.
- Es importante implementar una bomba de agua para la captación del agua residual, de esta manera se evitaría abastecer el tanque de agua de la planta piloto.

## Referencias bibliográficas

- Al-Khalili, R, Sutherland, J., & Folkard, G. (1997). Filtration with a natural coagulant. *Water and sanitation for all: Partnerships and innovations*, 3.
- Al Azharia, S. (2010). Using Moringa Seeds as Coagulants in Developing Countries. *Bachibiology*. (2012). Mecanismo de tensión-adhesión-cohesión.
- Barton, C., Marx, D., Adriano, D., Koo, B. J., Newman, L., Czapka, S., & Blake, J. (2005). Phytostabilization of a landfill containing coal combustion waste. *Environmental Geosciences*. 12(4): 251-265.
- Betancourth, M., Botero, J. E., & Rivera, S. P. (2004). Biopelículas: una comunidad microscópica en desarrollo. *Colombia Médica*, 35 Sup1(3), 34–39.
- Buendía, H. (2012). Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante compost de aserrín y estiércoles. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*.
- Burken, J., & Ma, X. (2006). Phytoremediation of volatile organic compounds. In *Phytoremediation Rhizoremediation* (pp. 199–216). Springer Netherlands.
- Carpena, R. O., & Bernal, M. P. (2007). Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Ecosistemas*, 16(2), 1–3.
- Casallas, C., & Katerin, J. (2015). Fitorremediación in situ para la remediación de suelos contaminados por metales pesados (cadmio y plomo) y evaluación de selenio en la finca Furatena alta en el municipio de Útica-Cundinamarca. *reponame:Repositorio Institucional Universidad Libre*.
- Cervantes, A. (2009). *Sistema combinado para el tratamiento de aguas residuales para viviendas unifamiliares*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Charris, J., & Caselles, A. (2016). *Tecnología y Ciencias del Agua. Tecnología y ciencias del agua* (Vol. 7).
- Chernicharo, C. (2013). *Principios del Tratamiento Biológico de Aguas Residuales Reactores Anaerobios*. (Universidad de Nariño, Ed.). Colombia.
- Cornejo, D. (2015). Determinación de la eficiencia de remoción de la DBO de agua residual doméstica mediante la utilización de un biofiltro de piedra pómez. *Universidad Nacional de Trujillo*.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Perez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales* (Nelson Antequera). Cochabamba, Bolivia.
- Espinoza, A. (2017). Disminución de la DBO, DQO y STD del agua residual doméstica de Santiago de Chuco empleando un biofiltro de piedra pómez. *Universidad César Vallejo*.

- FAO. (2010). Capítulo 2 - Eficiencia biológica.
- Galindo, A., Toncel, E., & Rincón, N. (2017). Evaluación de un filtro biológico como unidad de post-tratamiento de aguas residuales utilizando conchas marinas como material de soporte. *Revista Ion, Investigación, Optimización y Nuevos Procesos en Ingeniería*, 29(2), 37–48.
- Hammond, D. (2010). *The science of synthesis: exploring the social implications of general systems theory*. University Press of Colorado.
- Hardcover. (2010). *Biofilm Reactors WEF MOP 35: Water Environment Federation*:
- Hernández, E., Martín, C., Martín, G., García, A., Fernández, T., & Jürgen, P. (2013). *Pastos y Forrajes*. (Vol. 36).
- Hernández, J. (2010). *Alternativas para el tratamiento de las aguas residuales grises de origen doméstico*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2006). *Metodología de la investigación*. (Cuarta). México.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta). México.
- Izquierdo, J. (2004). *Cinética de las reacciones químicas*. Edicions Universitat de Barcelona.
- Johansen, O. (2004). *Introducción a la teoría general de sistemas*. (Limusa Noriega Editores, Ed.). México.
- Kumar, N., Dushenkov, V., Motto, H., & Raskin, I. (1995). Phytoextraction: The Use of Plants To Remove Heavy Metals from Soils.
- Monzón, J. I. T., García, A. L. E., Florio, L. de, Montero, R. D., Cortazar, A. L. G. de, & Hernández, M. L. R. (2012). Tecnologías de biopelícula innovadoras para la depuración de aguas residuales: veinticinco años de investigación del Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria. *Ingeniería civil*, (168), 61–74.
- Muyibi, S. A., & Evison, L. M. (1995). Moringa oleífera seeds for softening hardwater. *Water Research*, 29(4), 1099–1104.
- Núñez, R. A., Meas, Y., Ortega, R., & Olguín, E. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones, 15.
- Padmavathiamma, P. K., & Li, L. Y. (2007). Phytoremediation Technology: Hyperaccumulation Metals in Plants. *Water, Air, and Soil Pollution*, 184(1–4), 105–126.
- Pauline, D. (1998). Principios de ingeniería de los bioprocesos / Pauline M. Doran.
- Prasad, V., Narasimha, M., Freitas, de O., & Maria, H. (2003). Metal hyperaccumulation in plants: Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic Journal of Biotechnology*, 6(3), 285–321.

- Quispe, A. (2018). Evaluación de la eficiencia entre dos sistemas de biofiltros para el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la localidad de Carapongo, Luriganchos Chosica. *Universidad Nacional Federico Villarreal*.
- Rivera, J. (2008). Biopelículas: una comunidad microscópica en desarrollo, 34–39.
- Rodríguez, E. (2005). *Metodología de la investigación : la creatividad, el rigor del estudio y la integridad son factores que transforman al estudiante en un profesional de éxito*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Rodríguez, J. P., Gómez, E., Garavito, L., & López, F. (2010). Estudio de comparación del tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(1), 59–68.
- Romero, J. (2000). *Tratamiento de aguas residuales : teoría y principios de diseño*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Russell, D. (2012). *Tratamiento de aguas residuales : un enfoque práctico*. Reverté.
- Sanhueza, C., Palma, J., Valenzuela, P., Araneda, O., & Calderón, K. (2011). Evaluación del comportamiento geotécnico de suelos volcánicos chilenos para su uso como material de filtro en la depuración de aguas residuales domésticas. *Revista de la Construcción*, 10(2), 66–81.
- Sierra, L. (2010). Fitorremediación de un suelo contaminado por plomo por actividad industrial.
- Sigüí, L. (2013). *Diseño y construcción de un filtro intermitente de grava sin recirculación y comparación con eficiencias teóricas de filtros con recirculación para el tratamiento de agua residual doméstica*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Soto, S. Á., Bucio, J. L. G., Uuh, J. A. C., Calva, G. C., Reveles, J. C. A., García, N. A. O., & Jiménez, J. M. C. (2010). Uso de un filtro anaeróbico sumergido en la remoción de materia orgánica de aguas residuales municipales. Resultados preliminares. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 41, 1–9.
- Tamayo, M. (2001). *El proceso de la investigación científica*. Limusa.
- Torres, M. (2012). La fisiología de la absorción y conducción de agua y minerales a través del xilema en plantas vasculares y el desarrollo de la inteligencia visual y espacial como propuesta para su aprendizaje.
- Trapote, A. (2011). *Depuración de aguas residuales urbanas*. Publicaciones de la Universidad de Alicante.
- Travis, W. (2002). *Contaminación causas y sus efectos*. (Gernika, Ed.). México.
- Ugaz, F. (2018). Reuso de aguas residuales, tratadas biológicamente para el regadío del jardín botánico, Trujillo, La Libertad - Perú. *Universidad Nacional de Trujillo*.

- Vasquez, S. (2017). Análisis de la eficiencia de un prototipo de biofiltro en el tratamiento de aguas residuales para riego en Trapiche, Comas, 2017. *Universidad César Vallejo*.
- Vicente, J. (2016). Determinación de la eficiencia del aserrín y la fibra de coco utilizados como empaques para la remoción de contaminantes en biofiltros para el tratamiento de aguas residuales. *Enfoque UTE*, 7(3), 41.
- Villalobos, M. (2016). Fitorremediación de aguas residuales domésticas procedentes de la laguna de estabilización de la provincia de Jaén, mediante el uso de la especie *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) en la provincia de Jaén.
- Zambrano, A., Elena, C. L., Chuquival, C., & Alfredo, R. (2007). Tratamiento alternativo de aguas residuales domésticas mediante filtros consecutivos para poblaciones rurales. *Universidad Nacional de Ingeniería*.

# Apéndice

## Apéndice 1. Matriz de consistencia.

Tabla 16

### Matriz de consistencia.

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES	MÉTODOS Y TÉCNICAS
¿Cuál es la eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos que tendrá el sistema integrado de biopelícula y fitorremediación con <i>Nasturtium officinale</i> (berro) para el tratamiento de agua residual municipal de la localidad de Huancavelica?	Evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos del sistema integrado de biopelícula y fitorremediación con <i>Nasturtium officinale</i> (berro) para el tratamiento de agua residual municipal de la localidad de Huancavelica.	La eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos del agua residual municipal para el sistema integrado de biopelícula y fitorremediación con <i>Nasturtium officinale</i> (berro) es mayor al 60%.	<p><b>Dependiente:</b></p> <p>Eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos en el agua residual municipal.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Determinación de la remoción de contaminantes orgánicos a partir de la DBO<sub>5</sub>.</li> </ul> <p><b>Independiente:</b></p> <p>Sistema integrado de biopelícula y fitorremediación con <i>Nasturtium officinale</i> a escala piloto en la zona de descarga.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Proceso de biopelícula.</li> <li>Proceso de fitorremediación con <i>Nasturtium officinale</i></li> </ul>	<p>DBO<sub>5</sub></p> <p><b>Sub indicadores:</b></p> <p>DQO</p> <p>SST</p> <p>Aceites y grasas</p> <p>Coliformes termotolerantes</p> <p>Coliformes totales</p> <p><i>Escherichia coli</i></p> <p>TRH</p> <p>Caudal</p> <p>Temperatura</p> <p>pH</p>	<p><b>TIPO:</b> Aplicado</p> <p><b>NIVEL:</b> Explicativo</p> <p><b>MÉTODOS:</b> Científico, hipotético-deductivo y experimental.</p> <p><b>DISEÑO:</b> Se aplicó el diseño pretest-posttest de un solo grupo:</p> <p></p> <p>Donde:  <b>GE</b> = Es el grupo experimental de los contaminantes del efluente de agua residual municipal de la localidad de Huancavelica.  <b>O1</b> = Es el análisis de la DBO<sub>5</sub> del afluente y a partir de ello se determina a través de sus indicadores la calidad de agua presente antes de su tratamiento.  <b>X</b> = Representa al tratamiento respectivo a aplicar para una posible remediación del agua contaminada. (sistema integrado de biopelícula y fitorremediación).  <b>O2</b> = Es el análisis de la DBO<sub>5</sub> que contiene el efluente para determinar la eficiencia y el nivel de remediación que se alcanzó al aplicar el nuevo sistema de tratamiento de aguas residuales municipales.</p> <p><b>POBLACIÓN Y MUESTRA</b></p> <p><b>Población:</b> La localidad de Huancavelica que produce 60 l/día/habitante.</p> <p><b>Muestra:</b> La muestra a tomarse está en función del tiempo de retención hidráulica de 5.5 horas.</p> <p><b>Selección de la muestra:</b> No probabilística, porque se elegirá el punto de extracción de muestra al azar, que usualmente fluctúa de manera aproximada entre 87 l/s con un nivel de confianza de 95%.</p> <p><b>TÉCNICAS E INSTRUMENTOS</b></p> <p><b>Técnicas:</b> Entrevista, observación, muestreo y experimentación.</p> <p><b>Procesamiento de información:</b> Mediante los criterios de la determinación de la eficiencia para cada sistema se utilizó la estadística descriptiva y la prueba de distribución de T- Student al 95% de confiabilidad, pre y post a la prueba del tratamiento del agua residual; se realizó un análisis de los datos procesados y ordenados con anterioridad teniendo en cuenta vínculos jurídicos tales como la legislación ambiental (Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM que aprueba los Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales) evaluando de esta manera si los parámetros cumplen con la norma antes citada y de esta manera proyectos futuros puedan tomar esta investigación como punto de partida.</p>

Fuente: Elaboración propia.

## Apéndice 2. Ficha de registro de parámetros de control.

Tabla 17

### Ficha de registro de parámetros de control

FICHA DE PARÁMETROS DE CONTROL								
Proyecto: “EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN SISTEMA INTEGRADO DE BIOPELÍCULA Y FITORREMEDIACIÓN CON <i>Nasturtium officinale</i> (BERRO) PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MUNICIPAL EN LA LOCALIDAD DE HUANCVELICA”								
Responsable del monitoreo	Nombres y apellidos: Estefani Karen Sandoval Condori. Marco Antonio Curasma Matamoros.				Registro N°	001		
Ubicación de la planta piloto:	Desarenador de EMAPA S.A.	Coordenadas:	Norte 75° 22' 14"	Este 13° 16' 31"	Altitud:	3,200 msnm		
Fecha	Hora (24 h)	Sistema de control	Parámetro físico		Parámetros de control			Condiciones meteorológicas
			Caudal (l/s)	Método de medición	T (°C)	pH	Temperatura ambiental (°C)	Clima
15/07/2019	17:31	Afluente	0.011	Volumétrico	11.4	7.5	11.5	Cielo despejado parcial variando a cielo nublado con ráfagas de viento.
	17:33	Efluente	0.0048	Volumétrico	11.5	7.8		
16/07/2019	16:52	Afluente	0.011	Volumétrico	11.35	7.01	14.5	Cielo con nubes dispersas entre cielo despejado
	16:54	Efluente	0.0048	Volumétrico	11.65	7.25		
17/07/2019	17:54	Afluente	0.011	Volumétrico	12.8	7.6	6	Cielo despejado parcial variando a cielo nublado con ráfagas de viento.
	17:57	Efluente	0.0048	Volumétrico	14	7.9		

18/07/2019	17:01	Afluente	0.011	Volumétrico	11.23	6.98	11	Cielo despejado parcial variando a cielo nublado
	17:03	Efluente	0.0048	Volumétrico	12.3	7.15		
19/07/2019	16:48	Afluente	0.011	Volumétrico	9.54	6.3	7.5	Cielo despejado parcial variando a cielo nublado
	16:50	Efluente	0.0048	Volumétrico	11.3	7		
20/07/2019	17:15	Afluente	0.011	Volumétrico	12.54	7.1	12	Cielo nublado variando a cielo con nubes dispersas
	17:17	Efluente	0.0048	Volumétrico	12.65	7.3		
21/07/2019	16:35	Afluente	0.011	Volumétrico	11.35	7.68	15.5	Cielo despejado
	16:38	Efluente	0.0048	Volumétrico	11.56	8.01		
22/07/2019	17:53	Afluente	0.011	Volumétrico	12.47	6.59	11	Cielo despejado parcial variando a cielo nublado con ráfagas de viento.
	17:55	Efluente	0.0048	Volumétrico	12.87	7.26		
23/07/2019	17:33	Afluente	0.011	Volumétrico	9.24	7.69	8.5	Cielo despejado parcial variando a cielo nublado con ráfagas de viento.
	17:35	Efluente	0.0048	Volumétrico	11.3	7.72		
24/07/2019	16:49	Afluente	0.011	Volumétrico	12	7.69	12.3	Cielo despejado
	16:51	Efluente	0.0048	Volumétrico	12.4	7.8		
25/07/2019	17:12	Afluente	0.011	Volumétrico	10.25	6.98	11	Cielo despejado
	17:14	Efluente	0.0048	Volumétrico	12	7.14		
26/07/2019	17:26	Afluente	0.011	Volumétrico	10.3	7.3	12.2	Cielo despejado parcial variando a cielo nublado
	17:28	Efluente	0.0048	Volumétrico	12.35	7.25		

27/07/2019	17:37	Afluente	0.011	Volumétrico	10	7.6	11	Cielo despejado parcial variando a cielo nublado con ráfagas de viento.
	17:39	Efluente	0.0048	Volumétrico	11.54	7.8		
28/07/2019	16:54	Afluente	0.011	Volumétrico	9.87	6.9	12.3	Cielo despejado
	16:56	Efluente	0.0048	Volumétrico	10.03	7.02		
31/07/2019	18:02	Afluente	0.011	Volumétrico	10.57	6.73	10.5	Cielo despejado
	18:04	Efluente	0.0048	Volumétrico	11.3	7.04		
01/08/2019	16:59	Afluente	0.011	Volumétrico	12.3	8.35	14	Cielo despejado
	17:01	Efluente	0.0048	Volumétrico	12.6	8.47		
02/08/2019	17:55	Afluente	0.011	Volumétrico	12.8	7.94	12.2	Cielo despejado
	17:57	Efluente	0.0048	Volumétrico	12.97	8.3		
03/08/2019	18:08	Afluente	0.011	Volumétrico	11.86	7.204	11.9	Cielo despejado parcial variando a cielo nublado
	18:10	Efluente	0.0048	Volumétrico	12.4	7.63		
04/08/2019	17:15	Afluente	0.011	Volumétrico	13.65	7.35	12.5	Cielo despejado parcial variando a cielo nublado
	17:17	Efluente	0.0048	Volumétrico	13.7	7.9		
05/08/2019	16:04	Afluente	0.011	Volumétrico	10.5	6.58	18.5	Cielo despejado
	16:06	Efluente	0.0048	Volumétrico	10.9	7.23		

06/08/2019	17:33	Afluente	0.011	Volumétrico	10.33	7.85	11.3	Cielo despejado parcial variando a cielo nublado
	17:35	Efluente	0.0048	Volumétrico	10.88	7.94		
07/08/2019	16:41	Afluente	0.011	Volumétrico	11.65	7.98	16	Cielo despejado
	16:43	Efluente	0.0048	Volumétrico	12.06	8.54		
08/08/2019	17:52	Afluente	0.011	Volumétrico	11.01	7.7	12	Cielo despejado parcial variando a cielo nublado
	17:54	Efluente	0.0048	Volumétrico	11.6	7.85		
09/08/2019	17:02	Afluente	0.011	Volumétrico	9.6	7.25	13.1	Cielo despejado
	17:04	Efluente	0.0048	Volumétrico	10.03	7.76		
11/08/2019	16:08	Afluente	0.011	Volumétrico	10.45	8.12	18.4	Cielo despejado
	16:11	Efluente	0.0048	Volumétrico	11.6	8.54		
14/08/2019	17:35	Afluente	0.011	Volumétrico	11.06	7.26	12.7	Cielo despejado
	17:37	Efluente	0.0048	Volumétrico	11.8	7.35		
15/08/2019	18:12	Afluente	0.011	Volumétrico	12.3	8.35	10.4	Cielo despejado parcial variando a cielo nublado
	18:14	Efluente	0.0048	Volumétrico	12.44	8.44		
17/08/2019	18:20	Afluente	0.011	Volumétrico	12.5	7.32	11.5	Cielo despejado parcial variando a cielo nublado
	18:22	Efluente	0.0048	Volumétrico	12.65	7.36		

18/08/2019	18:06	Afluente	0.011	Volumétrico	12.68	8.36	13.4	Cielo despejado
	18:08	Efluente	0.0048	Volumétrico	13.02	8.46		
19/08/2019	17:56	Afluente	0.011	Volumétrico	12.5	7.33	10.3	Cielo despejado parcial variando a cielo nublado
	17:58	Efluente	0.0048	Volumétrico	12.7	7.35		
20/08/2019	17:47	Afluente	0.011	Volumétrico	12.65	7.54	12.5	Cielo despejado
	17:49	Efluente	0.0048	Volumétrico	13.5	7.68		

**Fuente:** Elaboración propia.

### Apéndice 3. Ficha de monitoreo (parámetros de laboratorio).

Tabla 18

#### Ficha de monitoreo (parámetros de laboratorio)

FICHA DE PARAMETROS DE LABORATORIO														
Proyecto: "EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN SISTEMA INTEGRADO DE BIOPELÍCULA Y FITORREMEDIACIÓN CON <i>Nasturtium officinale</i> (BERRO) PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MUNICIPAL EN LA LOCALIDAD DE HUANCAVELICA"														
Responsable del monitoreo				Nombres y apellidos: Sandoval Condori, Estefani Karen. Curasma Matamoros, Marco Antonio.					Registro N°: 001			Altitud: 3,200 msnm		
Ubicación de la planta piloto: Desarenador de EMAPA S.A.				DBOs (mg/l)		Coordenadas:		Norte 75° 22' 14"		Este 13° 16' 31"		Temperatura (°C)		pH
Fecha de incubación	Hora de incubación	Fecha de medición	Hora de medición	Código	Afluente	Efluente	Eficiencia de remoción	Preservante	Tiempo * (horas)	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	
21/08/2019	19:15:00	26/08/2019	19:45:00	M-1	167	71	57%	No	> 2	11.32	11.58	7.5	6.5	
22/08/2019	18:45:00	27/08/2019	19:15:00	M-2	151	81	46%	No	> 2	12.84	13	7	7.5	
23/08/2019	19:30:00	28/08/2019	20:00:00	M-3	134	66	51%	No	> 2	12.1	13.1	7.36	7.22	
27/08/2019	18:25:00	01/09/2019	18:55:00	M-4	104	62	40%	No	> 2	12.14	12.75	8.2	7.74	
28/08/2019	20:00:00	02/09/2019	18:10:00	M-5	112	72	36%	No	> 2	10.2	11.24	7.87	7.36	
29/08/2019	19:00:00	03/09/2019	17:55:00	M-6	165	96	42%	No	> 2	9.95	10.78	7.6	7.58	
01/09/2019	19:18:00	06/09/2019	17:40:00	M-7	156	106	32%	No	> 2	12.58	13.4	6.87	7.22	
02/09/2019	18:40:00	07/09/2019	19:10:00	M-8	179	104	42%	No	> 2	11.85	11.95	7.12	7.54	
03/09/2019	18:50:00	08/09/2019	19:20:00	M-9	181	84	54%	No	> 2	11.6	11.79	9.1	7.82	
06/09/2019	18:10:00	11/09/2019	17:40:00	M-10	182	118	35%	No	> 2	12.83	13.14	7.86	7.64	
07/09/2019	19:30:00	12/09/2019	18:10:00	M-11	198	131	34%	No	> 2	10.72	10.89	8.3	8.12	

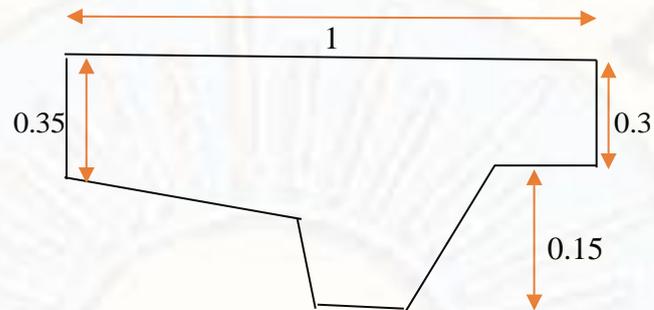
08/09/2019	20:15:00	13/09/2019	18:45:00	M-12	145	115	21%	No	>2	10.56	11.15	7.65	7.44
11/09/2019	06:15:00	16/09/2019	06:45:00	M-13	165	92	44%	No	>2	11.32	12.16	6.98	7.03
12/09/2019	18:55:00	17/09/2019	19:15:00	M-14	132	88	33%	No	>2	9.7	10.89	7.36	7.58
13/09/2019	07:10:00	18/09/2019	06:40:00	M-15	108	57	47%	No	>2	11.87	12.57	6.87	7.12
16/09/2019	19:22:00	21/09/2019	18:52:00	M-16	133	68	49%	No	>2	10.4	11.63	7.67	7.35
17/09/2019	19:35:00	22/09/2019	19:05:00	M-17	156	88	44%	No	>2	10.7	11.47	7.25	7.33
18/09/2019	19:10:00	23/09/2019	18:40:00	M-18	153	74	52%	No	>2	12.55	13.17	7.36	7.36
21/09/2019	19:18:00	26/09/2019	18:48:00	M-19	170	94	45%	No	>2	12.36	12.94	7.58	7.54
22/09/2019	19:25:00	27/09/2019	18:55:00	M-20	185	66	64%	No	>2	11.46	12.1	7.96	7.3
23/09/2019	19:55:00	28/09/2019	18:25:00	M-21	167	45	73%	No	>2	11.15	12.55	7.24	7.62

\* Representa el tiempo que se mantendrá la muestra en el frasco

**Fuente: Elaboración propia.**

#### Apéndice 4. Cálculo del caudal.

##### Pretratamiento y tratamiento primario



*Figura 26. Dimensiones del proceso de pretratamiento y tratamiento primario.*

Fuente: Elaboración propia.

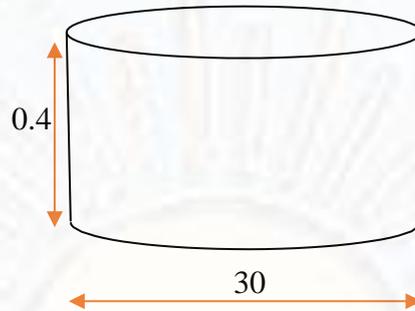
**Tabla 19**

*Cálculo del caudal en el pretratamiento y tratamiento primario*

Cálculo del TRH		
Características	Cantidad	Unidad
Ancho	0.35	m
Área	0.34	m <sup>2</sup>
Volumen	0.12	m <sup>3</sup>
Caudal	0.000011	m <sup>3</sup> /s
Tiempo	3	h
Caudal de ingreso	0.011	l/s
Caudal de salida	0.0073	l/s

Fuente: Elaboración propia.

### Filtro biológico



*Figura 27. Dimensiones del filtro biológico.*

Fuente: Elaboración propia.

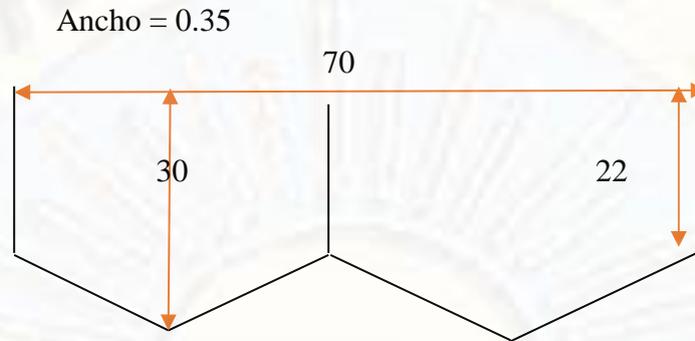
**Tabla 20**

#### *Cálculo del caudal en el filtro biológico*

Cálculo del TRH		
Características	Cantidad	Unidad
Caudal de ingreso	0.0073	l/s
Volumen	21.21	$\text{m}^3$
TRH	10	s

Fuente: Elaboración propia.

### Fitorremediación



**Figura 28. Dimensiones del proceso de fitorremediación.**

Fuente: Elaboración propia.

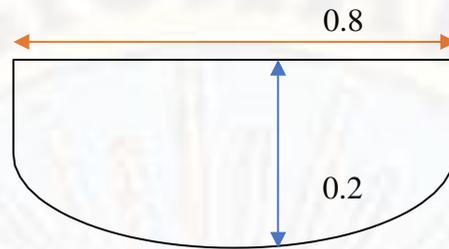
**Tabla 21**

*Cálculo del caudal del proceso de fitorremediación*

Cálculo del TRH		
Características	Cantidad	Unidad
Ancho	0.35	m
Área	0.10	$\square^2$
Volumen	0.03	$\square^3$
Caudal	0.0000048	$\square^3/\square$
Tiempo	2	h
Caudal de ingreso	0.0048	l/s
Caudal de salida	0.0097	l/s

Fuente: Elaboración propia.

### Sedimentador



**Figura 29.** Dimensiones del sedimentador.

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 22**

*Cálculo del caudal del sedimentador*

Cálculo del TRH		
Características	Cantidad	Unidad
Diámetro	0.8	m
Área	0.50	$\square^2$
Volumen	0.25	$\square^3$
Caudal	0.00014	$\square^3/\square$
Tiempo	0.5	h
Caudal	0.14	l/s

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 23**

*Resumen del cálculo de caudales para cada uno de los sistemas*

<b>Resumen del tiempo de retención hidráulica (TRH)</b>				
<b>Procesos</b>	<b>Volumen</b>	<b>TRH</b>	<b>Caudal de ingreso (l/s)</b>	<b>Caudal de salida (l/s)</b>
Pretratamiento y tratamiento primario	0.12	3 h	0.011	0.0073
Filtro biológico	0.02	10 s	0.0073	-
Sedimentador	0.25	30 min	-	0.0048
Fitorremediación	0.035	2 h	0.0048	0.0048
<b>Resumen</b>		5.5 h	0.011	0.0048

**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Apéndice 5. Registro fotográfico.**

**Construcción de la planta piloto**



*Figura 30. Ubicación de la zona donde se construyó la caseta al lado del desarenador de EMAPA S.A. - Huancavelica.*



*Figura 31. Se realizó la limpieza respectiva y se tomaron las medidas para la construcción de la caseta.*



*Figura 32. Desarenador de EMAPA S.A. – Huancavelica.*



*Figura 33. Construcción de cada uno de los procesos de la planta piloto.*



*Figura 34.* Construcción del proceso de biopelícula.



*Figura 35.* Tubería instalada al interior del balde el mismo que fue el soporte del material filtrante.



*Figura 36.* Recolección del material inerte para el proceso de biopelícula.



*Figura 37.* Recolección del berro para el proceso de fitorremediación.

## Operación del sistema



*Figura 38.* Tanque que abastece a la planta piloto.



*Figura 39.* Tubería de conducción del agua residual del tanque a la planta piloto.



*Figura 40.* Inicio de la operación del sistema.



*Figura 41.* Adaptación de las especies (berro) para el proceso de fitorremediación.



*Figura 42. Ingreso del afluente a la planta piloto.*



*Figura 43. Retención de aceites y grasas en el pretratamiento y tratamiento primario del sistema.*



*Figura 44. Tratamiento secundario.*



*Figura 45. Proceso de biopelícula.*



*Figura 46. Proceso de fitorremediación.*

### Monitoreo de los parámetros de control



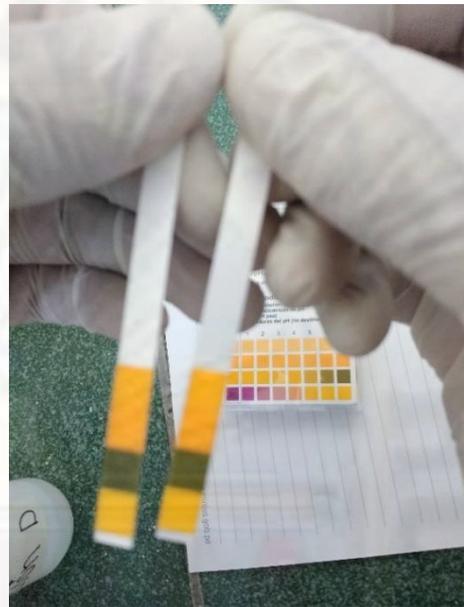
*Figura 47. Monitoreo del pH del afluente y efluente del sistema.*



*Figura 48. Medida del pH del afluente y efluente del sistema.*



*Figura 49. Monitoreo de la temperatura.*

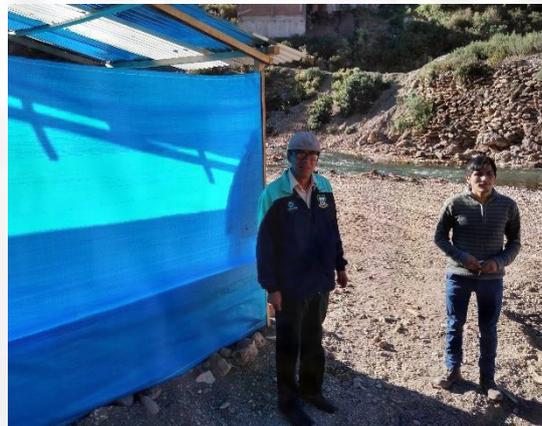


*Figura 50. Medida del pH del afluente y efluente del sistema, empleando cinta indicadora de pH.*

### Visita del asesor

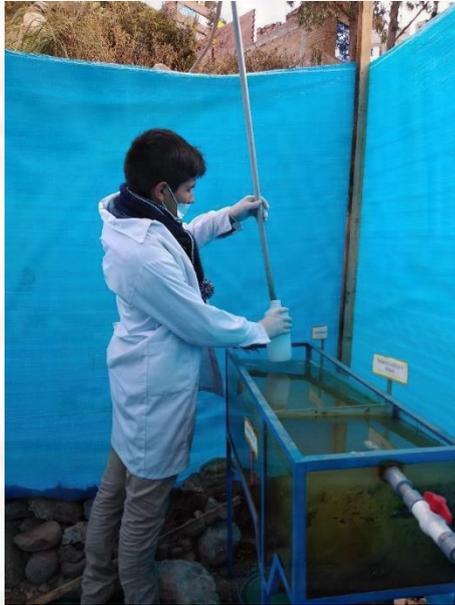


*Figura 51. Tesista (Estefani Karen Sandoval Condori) junto al asesor (Fernando Martín Toribio Román), durante la visita a la planta piloto.*



*Figura 52. Tesista (Marco Antonio Curasma Matamoros) junto al asesor (Fernando Martín Toribio Román), durante la visita a la planta piloto.*

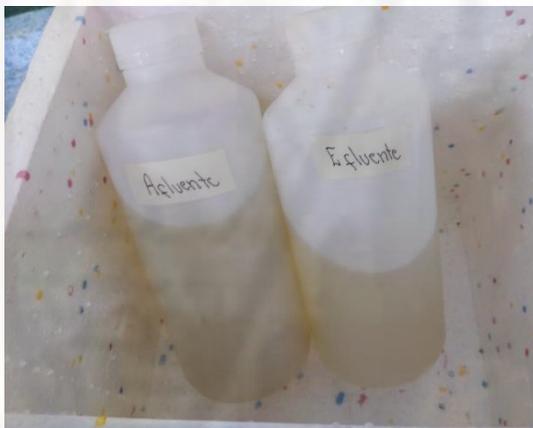
## Determinación de la DBO<sub>5</sub>



*Figura 53. Recolección de muestra en el afluente del sistema.*



*Figura 54. Recolección de muestra en el efluente del sistema.*



*Figura 55. Frascos con muestras del afluente y efluente.*



*Figura 56. Los frascos se transportaron en un cooler desde la caseta hasta el laboratorio.*



**Figura 57.** Muestras del afluente y efluente.



**Figura 58.** Comparación visual entre las muestras del afluente y efluente.



**Figura 59.** Incubadora de CO<sub>2</sub>



**Figura 60.** Balanza analítica para pesar los reactivos y preparar la solución.



**Figura 61.** Preparación de materiales de laboratorio para el análisis de muestras.



**Figura 62.** Hidróxido de sodio (pellets).



**Figura 63.** Reactivos para la preparación de la solución.



**Figura 64.** Soluciones preparadas (Solución A, B, C y D).



**Figura 65.** Adición de nutrientes (Solución A, B, C y D) a las muestras.



**Figura 66.** Preparación de los frascos para el llenado de las muestras con los nutrientes añadidos.



**Figura 67.** En cada uno de los frascos se colocaron los tapones de goma que sirven de soporte del material que consume el CO<sub>2</sub>.



**Figura 68.** Se colocaron pellets de Hidróxido de sodio.



*Figura 69.* Regulación de la escala de acuerdo al volumen de muestra.



*Figura 70.* Se reguló cada uno de los sensores a 250 mg O<sub>2</sub>/l, ya que el volumen con el que se trabajó fue de 250 ml.



*Figura 71.* Se colocó las muestras en el equipo de agitación.



*Figura 72.* Se colocaron las muestras en la incubadora para dar inicio a la medición.



*Figura 73. Resultados de medición de la DBO<sub>5</sub> del afluente, el mismo que se determinó el 13/09/2019.*



*Figura 74. Resultados de medición de la DBO<sub>5</sub> del efluente, el mismo que se determinó el 13/09/2019.*



*Figura 75. Resultados de medición de la DBO<sub>5</sub> del afluente, el mismo que se determinó el 12/09/2019.*



*Figura 76. Resultados de medición de la DBO<sub>5</sub> del efluente, el mismo que se determinó el 12/09/2019.*



*Figura 77. Resultados de medición de la DBO<sub>5</sub> del afluente el mismo que se determinó el 21/09/2019.*



*Figura 78. Resultados de medición de la DBO<sub>5</sub> del efluente, el mismo que se determinó el 21/09/2019.*

**Envío de las muestras al laboratorio “LABECO Análisis Ambientales S.C.R.L.” acreditado por el INACAL.**



*Figura 79. Recepción del paquete enviado por el laboratorio.*



*Figura 80. Recepción de los frascos.*



*Figura 81.* Extracción de la muestra del agua residual.



*Figura 82.* El frasco debe estar bien sellado para evitar fugas durante el transporte hacia Lima.



*Figura 83.* Sellado del frasco para parámetros microbiológicos.



*Figura 84.* Se colocaron los frascos de manera adecuada para ser enviados al laboratorio.



**Figura 85.** Recolección de la muestra del afluente del sistema de tratamiento.



**Figura 86.** Sellado del frasco, de acuerdo a las indicaciones del procedimiento de muestreo.



**Figura 87.** Frascos que contienen las muestras para el análisis de la DQO y la determinación de aceites y grasas.



**Figura 88.** Cooler que contiene los frascos del afluente y efluente.

**Apéndice 6. Comparación de resultados entre el estudio de caracterización de EMAPA S.A. y el estudio realizado en la presente investigación.**

**Tabla 24**

*Comparación de resultados entre el estudio de caracterización de EMAPA S.A. y el estudio realizado en la presente investigación*

Parámetros	Unidad	A1	A2	LMP	Condición
Aceites y grasas	mg/l	25.3	505.7	20	No cumple
Coliformes termotolerantes	NMP/100 ml	2,2X10 <sup>7</sup>	4,9 x 10 <sup>6</sup>	10,000	No cumple
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l	113	154.429	100	No cumple
Demanda química de oxígeno	mg O <sub>2</sub> /l	198	345	200	No cumple
pH	Unidades pH	6.93	7.477	6.5-8.5	Cumple
Sólidos totales en suspensión	mg/l	63	179	150	No cumple
Temperatura	°C	-	11.4	<35	Cumple

**Fuente: Elaboración propia.**

Donde:

A1: Caracterización que realizó EMAPA S.A. en el año 2016 por el laboratorio ECOPROJET S.A.C.

A2: Análisis realizado por el laboratorio “**LABECO Análisis Ambientales S.C.R.L.**” acreditado por el INACAL, cabe precisar que la medida de los parámetros DBO<sub>5</sub>, temperatura y pH fueron realizadas por los tesisistas.



**015 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS - Formas Parasitarias (Huevos y Larvas de Helmintos)**

Huevos y Larvas de Helmintos*	10060	Org/L	1	< 1	< 1
-------------------------------	-------	-------	---	-----	-----

**015 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS - Huevos de Helmintos**

Acanthocephala -	16876	Huevos/L	1	< 1	< 1
Macracanthorhynchus sp.					
Cestoda - Diphylobothrium sp.	16876	Huevos/L	1	< 1	< 1
Cestoda - Dipylidium sp.	16876	Huevos/L	1	< 1	< 1
Cestoda - Hymenolepis sp.	16876	Huevos/L	1	< 1	< 1
Cestoda - Taenia sp.	16876	Huevos/L	1	< 1	< 1
Huevos de Helmintos	16876	Huevos/L	1	< 1	< 1
Nematoda - Ancylostoma sp./Necator sp.	16876	Huevos/L	1	< 1	< 1
Nematoda - Ascaris sp.	16876	Huevos/L	1	< 1	< 1
Nematoda - Capillaria sp.	16876	Huevos/L	1	< 1	< 1
Nematoda - Enterobius sp.	16876	Huevos/L	1	< 1	< 1
Nematoda - Strongyloides sp.	16876	Huevos/L	1	< 1	< 1
Nematoda - Trichostrongylus sp.	16876	Huevos/L	1	< 1	< 1
Nematoda - Trichuris sp.	16876	Huevos/L	1	< 1	< 1
Trematoda - Clonorchis sp.	16876	Huevos/L	1	< 1	< 1
Trematoda - Echinostoma sp.	16876	Huevos/L	1	< 1	< 1
Trematoda - Fasciola hepatica	16876	Huevos/L	1	< 1	< 1
Trematoda - Paragonimus sp.	16876	Huevos/L	1	< 1	< 1
Trematoda - Schistosoma sp.	16876	Huevos/L	1	< 1	< 1

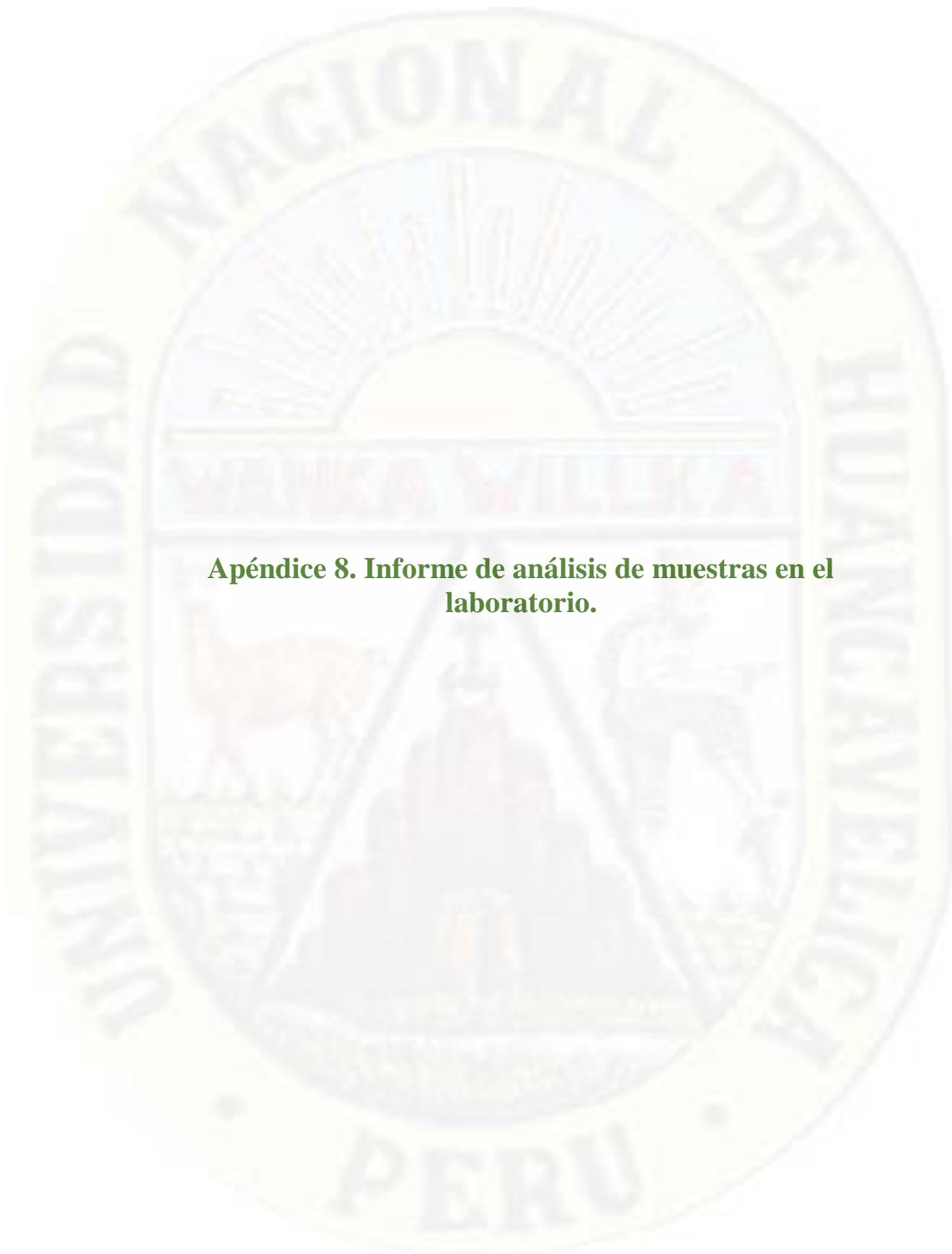
**021 ANÁLISIS TERCERIZADOS**

Nitrógeno Orgánico*	13018	mg/L	0.020	36.78	7.6
---------------------	-------	------	-------	-------	-----

(\*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL – DA.

El valor de <1 reportado en los Análisis Microbiológicos equivale a decir Ausencia.

**Fuente: Informe de ensayo del laboratorio ECOPROJET S.A.C.**



**Apéndice 8. Informe de análisis de muestras en el laboratorio.**

## ZYFOR3fT DE ENSAYO N°2434-19'

Solicitante : ESTEFANI KAREN SANDOVAL CONDORI  
 Dirección del Solicitante : Jr, Odonovan N° 782 - Distrito de Huancavelica  
 Atención : Estefani Karen Sandoval Condori  
 Marco Antonio Curasma Matamoro  
 Proyecto : Tesis  
 Lugar de Muestreo : Planta Piloto para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales -  
 A 2 metros del desarenador de EMAPA - Huancavelica  
 Tipo de Muestra : Agua Residual (Doméstico)  
 Fecha de Muestreo : No Indica  
 Fecha de Recepción de Muestra : 11/06/19  
 Fecha de Inicio de Análisis : 11/09/19  
 Fecha de Término de Análisis : 16/00/19

### CALIDAD DE AGUA

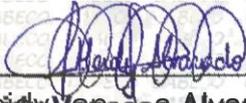
Código de Laboratorio	1434-1	1494*k	Límite Detección	Unidad
Oédlogo de Clientes	EF-01	EF•02		
<b>Parámetros Físicoquímicos</b>				
TSS	179.0	171,3	1,2	mg/L
Aceites y Grasas	537,8	505,7	1,0	mg/L
DOO	345	115	1	mg/L
<b>Parámetros Microbiológicos</b>				
Coliformes Totales	1,7 x 10'	9,2 x 10*	<1,8	NMP/100mL
Coliformes Fecales	4,9 x 10'	9,2 x 10*	«1.8	NMP/100mL
Escherichia Coli	3,3 x 10 <sup>e</sup>	9,2 x 10*	<1,8	NMP/100mL

- Muestra Tomada por el cliente.
- La fecha de muestreo es data proporcionado por el cliente.
- Lugar y condiciones ambientales del muestreo: indicado por el cliente.
- Condición y Estado de la muestra analizada: Las muestras llegaron refrigeradas.
- El cliente renuncia al derecho de la indemnidad.

#### Método de Análisis:

TSB- APHA AWWA-WEF Part 2640 D, 23rd Edition 2017 Solids. Total Suspended Solids Determined at 105 °C.  
 Aceite y Grasa: APHA AWWA-WEF Part 6520B, 23rd Edition 2017 Oil and Grease, Liquid-Liquid, Partition-Quantitative Method.  
 QDO: APHA AWWA-WEF Part 1825, 23rd Edition 2017 Biochemical Oxygen Demand (BOD), 5-Day BOD Test  
 QDO: APHA AWWA-WEF Part 5220 C, D 29th Edition 2017, Chemical Oxygen Demand. Closed Reflux Colorimetric Method.  
 Coliformes Totales: APHA AWWA-WEF Part 8221 B, 23rd Edition. 2017 Multiple Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group.  
 Standard Total Coliform Enumeration Technique.  
 Coliformes Fecales: APHA AWWA-WEF Part 8221 E, 23rd Edition. 2017 Multiple Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group.  
 Fecal Coliform Procedure,  
 Escherichia Coli: APHA 9221 P, 23rd Edition 2017, Escherichia Coli Procedure.

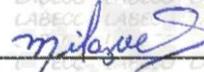
LB-F-14



**Ing. Heidi Vanessa Alvarado Huaylupo**

CIP N° 206784

Supervisor de Laboratorio Análisis Qulmicoa



**Biga. Milagros Taype Villegas**

CBP N° 10623

Coordinador ISO

Lima, 17 de Setiembre de 2018.

Nala 1: Eipreaante doansnto edtaaa vélldoparala(s) muaetta(s) de la fafetencia.

Nota2: Eaia fesultado no debe aer utlbado a mo una caf6ficaci6n de conformtdad con namas depaxluctoe "o como aertificado del alatame de Calldad de k anfidad qua la produce".

Nota3: La(a) mueets (a) y contramueattaa aa mantandr6n par un pertodo de ate (7) dlas da ansitldo el presents Infoezte dc Ensayo.

Nota 4: B labotatorio daclaia la validaz det ptsenta Infome de Gncayo pot el pertodo da un afle, pada los flnas qua el diem asttma convenient.

Nota 6: T0ddmnaecldn oenmlenda Salca alpmaante Infotme dc Eneayo aeft aml#da con la dedaraci6n "suptemento al Jnfome de angayo"

Nkm6: Es Q pto N bido la mproducc6n total y/o pamial dal placenta Infbn#a, ea No aulorizaclan eaorita par LABECO Angliais Amblanala s.C.R.L,

Nala 7: Sa adjuna al LB-F-IN Cadena da Vtgllancia coma pondlente a atte Infome.

Nala 10: El euparndlce "I" partanaclante at ktuio de Inf6tme de Enaayo ea eetg oonsideiando para loa par6mattos que no eatn dantto dat Alcanco da Aasdltd0r1

LB-F-14

CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA RECIBIDA	SI	NO									
Todas las muestras están dentro del periodo de análisis	X										
La muestra es proporcionada por el cliente	X										
La muestra fue monitoreada por LABECO Análisis Ambientales S.C.R.L		X									
El envase es proporcionado por LABECO Análisis Ambientales S.C.R.L	X										
El envase es proporcionado por el cliente		X									
Las muestras para metales pesados están filtradas y preservadas con HNO <sub>3</sub> (pH<2)											
Las muestras para metales pesados están preservadas con HNO <sub>3</sub> (pH<2)		NA									
Las muestras para análisis físico-químico están refrigeradas y al pH de acuerdo al	X										
Las muestras para análisis microbiológicos están refrigeradas	X										
Las muestras para nutrientes están preservadas con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (pH<2)	X										
Las muestras para aceites y grasas están preservadas con H <sub>2</sub> O @ 4(p Q)	X										
Las muestras para DQO están preservadas con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (pH<2)	X										
La muestra para DBP está completamente llena y refrigerada		NA									
La muestra para el análisis de cianuro está preservada con NaOH (pH>12)		NA									
Se recibieron contramuestras		X									
Se recibieron muestras dirigidas		X									
<p>“Lectura de la Temperatura de las muestras(°C)”</p> <table border="1"> <tr> <td>Celómetro T03bl4T</td> <td>“Muestras Químicas”</td> <td>“Muestras microbiología”</td> </tr> <tr> <td></td> <td>T°= 17 °C</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>“Realizado por:” HP</td> <td>“Realizado por:”</td> </tr> </table>			Celómetro T03bl4T	“Muestras Químicas”	“Muestras microbiología”		T°= 17 °C			“Realizado por:” HP	“Realizado por:”
Celómetro T03bl4T	“Muestras Químicas”	“Muestras microbiología”									
	T°= 17 °C										
	“Realizado por:” HP	“Realizado por:”									
<b>CANTIDAD DE MUESTRA Y CONTRAMUESTRA RECIBIDA:</b>											
2/1000P	2/ 1000V	2/500P									
<b>OBSERVACIONES RESPECTO A CONDICIONES DE RECEPCIÓN NO DESCRITAS ANTERIORMENTE:</b>											
<b>OBSERVACIONES</b>											

NA: No Aplica, P (plástico), V (vidrio).

**Criterio de aceptación:**  
**“Muestras químicas: ≤ 6 °C”**  
**“Muestras microbiología: ≤ 10 °C”**