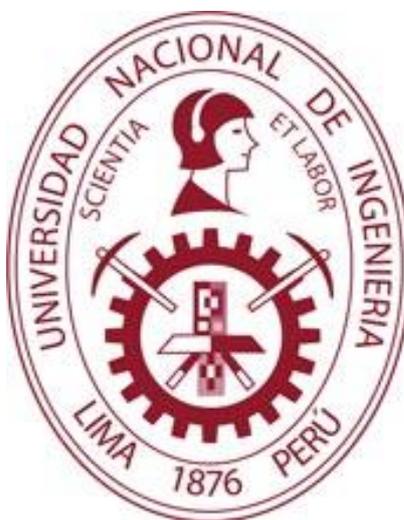


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

“COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DE DOS FILTROS LENTOS USANDO ZEOLITA Y ANTRACITA COMO MEDIOS FILTRANTES PARA EL TRATAMIENTO DEL EFLUENTE DE UN REACTOR UASB”

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO SANITARIO

ELABORADO POR:

VALENZUELA CONTRERAS, LUIS EDUARDO

ASESOR:

ING. JUAN CARLOS ALARCÓN CÓNDOR

LIMA, PERU

2021

DEDICATORIA

A mis padres, Rosabel y Tito, mis hermanos Angelo, Renatho y familia en general, por su apoyo, comprensión y consejos que me brindaron en todo momento para poder cumplir mis metas y ser mejor cada día.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quisiera agradecer a Dios por haberme dado la vida y haberme permitido poder culminar mi carrera universitaria.

Mi especial agradecimiento al Ing. Otto Rosasco Gerkes y al Ing. Juan Carlos Alarcón Córdor, por haberme brindado todo su apoyo y los consejos que me facilitaron para poder culminar con la presente tesis de investigación.

A todo el equipo del Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos por haberme facilitado la instalación de mi proyecto.

Mi singular gratitud al Sr. Manuel Romero Mamani por su apoyo en la construcción de la planta piloto de filtros lentos.

Asimismo, agradecer a todo el personal del Laboratorio de Investigación del Agua (LIA) de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la UNI, por su contribución con los materiales y equipos que se me brindaron para el monitoreo de mi tesis.

RESUMEN

La presente investigación consiste en la determinación de eficiencias de dos filtros lentos usando antracita y zeolita como medios filtrantes, los cuales tienen ciertas propiedades para la purificación de aguas residuales, utilizando el efluente del reactor UASB del Centro de Investigación y Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería (CITRAR-FIA-UNI). Para esto fue necesario realizar la caracterización de los materiales granulares antes de realizar todo el proceso.

En el análisis granulométrico de la antracita y zeolita, se encontró diversos tamaños entre 5 mm y 0.10 mm. Durante el análisis de los materiales filtrantes se encontró que la zeolita llega a tener una porosidad aproximada de 52% y la antracita un 41%, resultando ser más porosa la zeolita, lo que le facilita en la retención de microorganismos presentes en las aguas residuales. La instalación del módulo se realizó en el CITRAR-FIA-UNI, posterior a ello se pasó a la prueba hidráulica y a la puesta en marcha.

El procedimiento experimental se basó en hacer 3 carreras de filtración con diferentes tasas de filtración, estos fueron $0.0227 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0.0151 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ y de $0.0075 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$. Se pudo observar que la eficiencia de ambos filtros (zeolita y antracita) fue en aumento mientras se iba reduciendo la tasa de filtración, donde la mayor eficiencia se logró con una tasa de $0.0075 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$. Se realizó la medición de los parámetros fisicoquímicos para poder realizar el control en el desarrollo del proceso de filtración, así como la evaluación en la remoción de la DBO_5 , sólidos y coliformes.

La zeolita logró remover hasta un 92.90% de la DBO_5 a comparación de la antracita, el cual alcanzó un 85.92%, además la remoción de sólidos se vio favorable para el caso de la zeolita con un 93% aproximadamente respecto a la antracita el cual tuvo un 88% de eficiencia aproximadamente. Respecto a los coliformes termotolerantes, la zeolita llegó a una eficiencia de 66.17% frente a la antracita que logró una eficiencia de 59.65%. Los análisis se realizaron en el laboratorio de la FIA-UNI y en el laboratorio de CITRAR-FIA-UNI.

ABSTRACT

This research consists of determining the efficiencies of two slow filters using anthracite and zeolite as filter media, which have certain properties for the purification of wastewater, using the effluent from the UASB reactor of the Center for Research and Treatment of Wastewater and Waste. Dangerous of the Faculty of Environmental Engineering of the National University of Engineering (CITRAR-FIA-UNI). For this, it was necessary to carry out the characterization of the granular materials before carrying out the entire process.

In the granulometric analysis of anthracite and zeolite, various sizes were found between 5 mm and 0.10 mm. During the analysis of the filtering materials, it was found that the zeolite reaches an approximate porosity of 52% and the anthracite 41%, the zeolite being more porous, which facilitates the retention of microorganisms present in wastewater. The installation of the module was carried out at CITRAR-FIA-UNI, after which the hydraulic test and start-up were carried out.

The experimental procedure was based on making 3 filtration runs with different filtration rates, these were 0.0227 m³ / m².h, 0.0151 m³ / m².h and 0.0075 m³ / m².h. It was observed that the efficiency of both filters (zeolite and anthracite) increased while the filtration rate was reduced, where the highest efficiency was achieved with a rate of 0.0075 m³ / m².h. The measurement of the physicochemical parameters was carried out to be able to carry out the control in the development of the filtration process, as well as the evaluation in the removal of the BOD₅, solids and coliforms.

The zeolite was able to remove up to 92.90% of the BOD₅ compared to the anthracite, which reached 85.92%, in addition the removal of solids was favorable for the case of the zeolite with 93% approximately compared to the anthracite which had about 88% efficiency. Regarding thermotolerant coliforms, zeolite reached an efficiency of 66.17% compared to anthracite, which achieved an efficiency of 59.65%. The analyzes were carried out in the FIA-UNI laboratory and in the CITRAR-FIA-UNI laboratory.

PRÓLOGO

Esta tesis presenta una alternativa no compleja y eficiente para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, el cual puede ser usado para poblaciones rurales con déficit en su sistema de saneamiento. Este tema se ha escogido con el motivo de poder brindar una nueva alternativa en el uso de materiales de filtración dentro del marco del tratamiento de aguas residuales. La tesis plantea el uso de materiales granulares como la zeolita y antracita.

Al momento de empezar esta investigación me llegue a topar con escasa información relacionada a investigaciones con la zeolita, ya que este material es usado mayormente en otros países como: Estados Unidos, México, Canadá, Holanda, Nueva Zelanda, entre otros, y en nuestro país es limitado su uso. Por otro lado, la antracita tiene mayor acogida y es implementado en diferentes tecnologías, logrando tener mayor información para la implementación del sistema en referencia.

A lo largo de los capítulos encontraremos una breve descripción de los capítulos, iniciando con la introducción, antecedentes y marco teórico, punto donde se aborda y describe las características de los materiales filtrantes a usarse como también los objetivos y variables principales y secundarios. Además, se brinda información de la metodología de la investigación el cual explica el procedimiento usado. Por otro lado, se muestra los resultados, donde se muestra una comparación entre la antracita y zeolita, logrando diferenciar cual de estos materiales llega tener mayor eficiencia en el proceso de tratamiento de las aguas residuales domésticas. Por último, las conclusiones y recomendaciones se presentan en los últimos capítulos.

De esta manera esta investigación muestra el comportamiento de dos materiales litológicos en el tratamiento de aguas residuales por medio de la filtración lenta. Cabe recalcar que esta investigación tiene fines educativos, motivo por el cual se quiere contribuir con estudios relacionados a estos materiales filtrantes (antracita y zeolita) en el tratamiento de aguas residuales.

INDICE

1. CAPÍTULO I	15
INFORMACIÓN GENERAL	15
1.1. ANTECEDENTES REFERENCIALES	16
1.2. PLANTEAMIENTO DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA	17
1.2.1. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA	17
1.2.2. FORMULACIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA	17
1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	18
1.4. OBJETIVOS	18
1.4.1. OBJETIVO GENERAL	18
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.5. HIPÓTESIS	18
2. CAPITULO II	19
MARCO TEÓRICO Y LEGAL	19
2.1. MARCO TEÓRICO	19
2.1.1. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL PERÚ	19
2.1.2. ASPECTOS GENERALES DEL AGUA RESIDUAL	20
2.1.2.1. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL	22
2.1.2.1.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	22
2.1.2.1.2. CARACTERISTICAS QUIMICAS	23
2.1.2.1.3. CARACTERISTICAS BIOLÓGICAS	25
2.1.3. TRATAMIENTO BIOLÓGICO	25
2.1.4. FILTROS LENTOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS MUNICIPALES	26
2.1.4.1. FUNDAMENTO DEL PROCESO DE FILTRACIÓN LENTA	26
2.1.4.2. PARÁMETRO DE SEGUIMIENTO EN LOS FILTROS LENTOS	26
2.1.4.2.1. DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO	27
2.1.4.2.2. COLIFORMES TERMOTOLERANTES	27
2.1.4.2.3. SÓLIDOS TOTALES, FIJOS Y VOLÁTILES	27
2.1.4.2.4. POTENCIAL DE HIDRÓGENO	27
2.1.4.2.5. TURBIEDAD	27
2.1.4.2.6. OXÍGENO DISUELTO	28

2.1.4.2.7.	CONDUCTIVIDAD.....	28
2.1.4.2.8.	TEMPERATURA DEL AGUA RESIDUAL	28
2.1.4.2.9.	TEMPERATURA AMBIENTAL	28
2.1.4.3.	MECANISMOS EN EL PROCESO DE FILTRACIÓN LENTA	29
2.1.5.	CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES GRANUALRES	32
2.1.5.1.	ANTRACITA.....	32
2.1.5.2.	ZEOLITA.....	34
2.2.	MARCO LEGAL	36
2.2.1.	NORMATIVA NACIONAL	36
2.2.1.1.	LIMITES MÁXIMO PERMISIBLES PARA EFLUENTES DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS O MUNICIPALES	36
2.2.1.2.	ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL DEL AGUA	37
3.	CAPITULO III	39
	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	39
3.1.	DESCRIPCION DE LA METODOLOGÍA	39
3.2.	UBICACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	40
3.3.	COMPONENTES DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN	41
3.3.1.	SISTEMA DE BOMBEO	41
3.3.2.	SISTEMA ELÉCTRICO.....	41
3.3.3.	SISTEMA DE ALMACENAMIENTO	43
3.3.4.	SISTEMA DE REGULACIÓN	44
3.3.5.	SISTEMA DE FILTRACIÓN	44
3.4.	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES GRANULARES	46
3.5.	MUESTRA DE DESAGUE PARA SER TRATADA	52
3.6.	CONDICIONES HIDRAULICAS	53
3.6.1.	PRUEBA HIDRÁULICA.....	53
3.6.2.	CAUDAL.....	53
3.7.	PUESTA EN MARCHA	53
3.7.1.	ARRANQUE DE LOS FILTROS	54
3.8.	PUNTOS DE MUESTRO	54
3.9.	ANÁLISIS REQUERIDOS	55
3.9.1.	ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS	55

3.9.1.1.	TEMPERATURA AMBIENTAL.....	55
3.9.1.2.	TEMPERATURA DEL AGUA RESIDUAL	55
3.9.1.3.	PH.....	55
3.9.1.4.	TURBIEDAD.....	55
3.9.1.5.	CONDUCTIVIDAD	55
3.9.1.6.	OXÍGENO DISUELTO	55
3.9.1.7.	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO	56
3.9.1.8.	SOLIDOS TOTALES.....	56
3.9.1.9.	SOLIDOS DISUELTOS	56
3.9.1.10.	SOLIDOS VOLÁTILES Y FIJOS.....	56
3.9.2.	ANALSIS MICROBIOLÓGICOS	56
3.9.2.1.	COLIFORMES TERMOTOLERANTES	56
3.10.	OPERACIÓN DEL SISTEMA	57
3.11.	MANTENIMIENTO DEL SISTEMA.....	58
4.	CAPÍTULO IV.....	59
	OBTENCIÓN DE RESULTADOS	59
5.	CAPÍTULO V.....	62
	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS	62
5.1.	TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO (TRH) Y TASA DE FILTRACIÓN	62
5.2.	ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO	65
5.2.1.	TEMPERATURA AMBIENTAL Y DEL AGUA RESDUAL	65
5.2.2.	PH.....	67
5.2.3.	TURBIEDAD	69
5.2.3.1.	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LA TURBIEDAD DE LA ANTRACITA Y ZEOLITA EN FUNCION DE LA TEMPERATURA AMBIENTE PROMEDIO.....	71
5.2.4.	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.....	72
5.2.5.	OXÍGENO DISUELTO.....	74
5.2.6.	SOLIDOS.....	76
5.3.	ANÁLISIS BIOLÓGICOS	79
5.3.1.	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO ₅)	79

5.3.1.1.	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LA DBO ₅ DE LA ANTRACITA Y ZEOLITA EN FUNCION DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO DE INGRESO (DBO ₅).....	81
5.3.1.2.	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LA DBO ₅ DE LA ANTRACITA Y ZEOLITA EN FUNCION DE LA TEMPERATURA AMBIENTE PROMEDIO (°C)	82
5.4.	ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS.....	83
5.4.1.	COLIFORMES TERMOTOLERANTES	83
6.	CONCLUSIONES.....	86
7.	RECOMENDACIONES.....	89
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
9.	ANEXOS	96
9.1.	ANEXO N° 01: PANEL FOTOGRÁFICO	96

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 01: Inventario tecnológico de las plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).....	19
Figura N° 02: Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales en las Pequeñas Ciudades.....	20
Figura N° 03. Curva granulométrica de la Antracita y Zeolita.....	51
Figura N° 04: Comparación de los TRH de la Antracita y Zeolita	62
Figura N° 05: Variación del tiempo de retención hidráulico en el tiempo de monitoreo	64
Figura N° 06: Variación de la temperatura en el tiempo de monitoreo	66
Figura N° 07: Variación de pH durante el tiempo de monitoreo	68
Figura N° 08: Variación de la Turbidez durante el tiempo de monitoreo	70
Figura N° 09: Comportamiento de la Eficiencia de la Turbiedad de la antracita y zeolita en función de la Temperatura Ambiente promedio	71
Figura N° 10: Variación de la Conductividad en el tiempo de monitoreo	73
Figura N° 11: Variación del Oxígeno Disuelto durante el tiempo de monitoreo	75
Figura N° 12: Valor promedio de sólidos totales, fijos y volátiles de los efluentes del sistema de filtración lenta de antracita, zeolita y del reactor UASB	76
Figura N° 13: Valor promedio de sólidos suspendidos totales, suspendidos fijos y suspendidos volátiles de los efluentes del sistema de filtración lenta de antracita, zeolita y del reactor UASB.....	77
Figura N° 14: Valor promedio de sólidos disueltos totales, disueltos fijos y disueltos volátiles de los efluentes del sistema de filtración lenta de antracita, zeolita y del reactor UASB.....	78
Figura N° 15: Variación de la DBO₅ durante el tiempo de monitoreo	80

Figura N° 16: Comportamiento de la Eficiencia de la DBO₅ de la antracita y zeolita en función de la DBO₅ de ingreso 81

Figura N° 17: Comportamiento de la Eficiencia de la DBO₅ de la antracita y zeolita en función de la Temperatura Ambiental Promedio..... 82

Figura N° 18: Variación de la concentración de Coliformes Termotolerantes NMP/100 ml, durante el tiempo de monitoreo..... 84

Figura N° 19: Resumen de Eficiencias de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos 85

INDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía Nª 01: Prueba Hidráulica de los sistemas de tratamiento..... 53

Fotografía Nª 02: Puntos de muestro del sistema de filtración lenta..... 54

Fotografía Nª 03: Determinación de la Densidad y Porosidad - Antracita ... 96

Fotografía Nª 04: Determinación de la Densidad y Porosidad- Zeolita 96

Fotografía Nª 06: Pesado de una muestra de Antracita para la Determinación de su Granulometría 97

Fotografía Nª 07: Pesado de una muestra de Zeolita para la Determinación de su Granulometría 97

Fotografía Nª 08: Tamizado de las muestras de Antracita y Zeolita..... 98

Fotografía Nª 09: Forma y tamaños de la muestra sacada durante el tamizado de Antracita..... 98

Fotografía Nª 10: Forma y tamaños de la muestra sacada durante el tamizado de Zeolita 99

Fotografía Nª 11: Instalación del tanque de almacenamiento y tanque de regulación 99

Fotografía Nª 12: Instalación de la Zeolita con una altura de 0.55m de altura y radio de 0.55m..... 100

Fotografía Nª 13: Instalación de la Antracita con una altura de 0.55m de altura y radio de 0.55m 100

INDICE DE IMÁGENES

Imagen N° 01: Mecanismo de Sedimentación.....	30
Imagen N° 02: Mecanismo de Impacto	30
Imagen N° 03: Mecanismo de Intercepción.....	31
Imagen N° 04: Esquema de las unidades que conforma el sistema de tratamiento	42
Imagen N° 05.- Tanque de almacenamiento.....	43
Imagen N° 06.- Sistema de regulación.....	44
Imagen N° 07.- Sistema de filtración	45

INDICE DE CUADROS

Cuadro N° 01: Contaminantes de importancia en el tratamiento del agua residual.....	21
Cuadro N° 02: Clasificación del carbón mineral según norma ASTM D388	32
Cuadro N° 03: Características generales de los carbones en el Perú.....	33
Cuadro N° 04: Propiedades Físicas de la Zeolita natural.....	34
Cuadro N° 05: Clasificación de las Zeolitas naturales	35
Cuadro N° 06: Límites Máximos Permisibles para efluentes de PTAR.	36
Cuadro N° 07: Estándares de Calidad Ambiental para Agua, Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales.....	37
Cuadro N° 08: Fases de la Investigación	39
Cuadro N° 09: Resumen de análisis granulométrico.	52
Cuadro N° 10: Valores promedio de las unidades de captación y efluente UASB – CITRAR-FIA-UNI - noviembre 2019	52
Cuadro N° 11: Actividades de operación del sistema de filtros lentos.....	57
Cuadro N° 12: Actividades de mantenimiento del sistema de filtros lentos	58

Cuadro N° 13: Resultados de la Primera carrera de Filtración	59
Cuadro N° 14: Resultados de la Segunda carrera de Filtración	60
Cuadro N° 15: Resultados de la Tercera carrera de Filtración	61

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla N° 01. Volumen requerido por el tanque de almacenamiento</i>	44
<i>Tabla N° 02. Tamizado de la antracita</i>	50
<i>Tabla N° 03. Tamizado de la zeolita</i>	51
<i>Tabla N° 04: Valores máximos, mínimos y promedio de la temperatura de los efluentes del sistema de filtración lenta de la antracita, zeolita y del reactor UASB</i>	65
<i>Tabla N° 05: Valores máximos, mínimos y promedio del pH de los efluentes del sistema de filtración lenta de la antracita, zeolita y del reactor UASB ..</i>	67
<i>Tabla N° 06: Valores máximos, mínimos y promedio de la turbiedad de los efluentes del sistema de filtración lenta de la antracita, zeolita y del reactor UASB</i>	69
<i>Tabla N° 07: Eficiencia de la turbiedad en los efluentes de los sistemas de filtración lenta de la antracita, zeolita y del reactor UASB.....</i>	69
<i>Tabla N° 08: Variación de eficiencias en la remoción de Turbiedad en función del caudal de ingreso y de la Temperatura Ambiental promedio ...</i>	71
<i>Tabla N° 09: Valores máximos, mínimos y promedio de la conductividad de los efluentes del sistema de filtración lenta de la antracita, zeolita y del reactor UASB</i>	72
<i>Tabla N° 10: Valores máximos, mínimos y promedio del oxígeno disuelto de los efluentes del sistema de filtración lenta de la antracita, zeolita y del reactor UASB</i>	74
<i>Tabla N° 11: Valores máximos, mínimos y promedio de la demanda bioquímica de oxígeno de los efluentes del sistema de filtración lenta de la antracita, zeolita y del reactor UASB.....</i>	79

Tabla N° 12: Variación de eficiencias en la remoción de DBO_5 en función del caudal de ingreso y de DBO_5 de ingreso..... 81

Tabla N° 13: Variación de eficiencias en la remoción de DBO_5 en función del caudal de ingreso y de la Temperatura Ambiental promedio..... 82

1. CAPÍTULO I

INFORMACIÓN GENERAL

En el Perú, el tratamiento de las aguas residuales, se encuentra ligado a un problema medio ambiental ya que, en muchas zonas aún no hay infraestructura y tecnología adecuada para poder realizar el tratamiento de las aguas residuales. Dentro de la composición de las aguas residuales podemos encontrar materia orgánica, inorgánica y sales minerales, los cuales son procedentes de la actividad humana e industrial.

Cada tecnología o investigación nueva, es fundamental para poder cerrar brechas en infraestructura. Una de las tecnologías más efectivas y económicas viene a darse a través de los sistemas de filtración lenta. Este sistema puede reducir considerablemente los sólidos (totales, fijos y volátiles) y microorganismos como los coliformes termotolerantes. La eficiencia de esta tecnología radica en el uso de materiales filtrantes que facilita la retención de la materia orgánica.

La evaluación de las características físicas de los materiales filtrantes, resulta de gran importancia antes de realizar el proceso de tratamiento, ya que el tamaño, la forma y la cantidad de estos, son determinantes en la obtención de los resultados.

Uno de los materiales presentes en nuestro país es la “antracita y zeolita”, estos materiales tienen diferentes propiedades que ayudan a la eliminación de cierta materia contaminante. En la actualidad se usan estos materiales para el tratamiento de agua potable, pero, así como se puede obtener agua apta para consumo humano, también puede llegar a ser eficiente para el tratamiento de aguas residuales. Tanto la antracita como la zeolita resultan ser materiales porosos, lo cual es beneficioso para la remoción de toda materia contaminante.

En base a lo expuesto se planteó usar a la antracita y zeolita de manera paralela para así comparar los resultados y evaluar la eficiencia de cada uno de estos materiales, para ello se fijó el análisis de determinados parámetros físico-químicos y biológicos. Los resultados mostrados para cada material serán evaluados y comparados mediante gráficos y tablas.

1.1. ANTECEDENTES REFERENCIALES

Una de las tecnologías usadas a lo largo de los años, viene a ser los filtros lentos los cuales tienen grandes beneficios en la remoción de materia orgánica para el tratamiento de aguas residuales. El uso de materiales granulares como la antracita y zeolita ha llegado a tener grandes beneficios en el tratamiento de aguas residuales.

En el año 2018, se realizó un estudio basado en el tratamiento de aguas residuales, provenientes del río Portoviejo en la provincia de Manabí (Ecuador), utilizando a la zeolita como medio filtrante. Para esto se usaron diferentes tamaños de este material granular: 1.70mm, 2.00mm, 2.63mm, y 4.75mm. Con este proceso se quiso comprobar el poder absorbente y adsorbente de este material, corroborándolo con los resultados de DBO₅, sólidos disueltos y sólidos suspendidos. De estos resultados se pudo obtener una remoción de sólidos suspendidos hasta un 85% y llegar a un 50% en la remoción de DBO₅ (Guerrero, Vázquez y Rodríguez, 2018).

En la investigación denominada “Depuración de aguas residuales domésticas por adsorción química en material reciclado”, surge como una alternativa para la depuración de aguas residuales provenientes de la actividad humana de las comunidades de la provincia de San Pedro de Totora, departamento de Oruro, Bolivia. El eje central se basó en el uso del carbón activado para la depuración de aguas residuales domésticas mediante las propiedades de adsorción química propias de este material granular, el cual alcanzó un rendimiento promedio de 62.4% de depuración. Según las dos pruebas de análisis que se realizaron, la segunda prueba presenta mejores resultados en parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos (Godoy, 2013).

Según la investigación titulada: “Zeolitas nativas en el tratamiento de agua residual doméstica”, se contempló el diseño en la construcción de 3 biorreactores de lecho fijo de 1.5 metros y diámetro de 12 cm, donde se usó 3 tipos de zeolitas: río, cerro y comercial. Cada una de estas tenía diferentes alturas de lecho con su respectivo tiempo de retención hidráulico. A la vez se evaluó las características fisicoquímicas como: densidad, peso específico, porosidad y absorción. Por otro lado, antes de realizar este proceso se realizó un pretratamiento el cual constó de: rejilla, desarenador, desnatador y fosa séptica. De estos 3 biorreactores el que presentó mejores resultados fue la zeolita de cerro obteniendo los siguientes resultados: 71.42% de remoción de sólidos disueltos

totales, 84.34% para turbiedad, 96.33% para color y 97.28% para demanda química de oxígeno (Méndez y Gaspar, 2007).

En la Planta Tratadora de Agua Residual, dentro de la Sede Orinoquía de la Universidad Nacional de Colombia, se llevó a cabo una investigación usando a la antracita como medio filtrante para el tratamiento de aguas residuales. Se propuso algunas variables para la cuantificación de los valores resultantes al final del proceso de filtración, estas variables fueron: coliformes fecales, sólidos suspendidos totales y DBO₅. De esta investigación se obtuvo una remoción de coliformes fecales de 59.81%, sólidos suspendidos totales en 79.31% y para la DBO₅ en 32.43%. (Salmerón, 2017).

1.2. PLANTEAMIENTO DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

La calidad del efluente de un reactor UASB, presenta aun valores fuera de los márgenes establecidos según Decreto Supremo N°003-2010-MINAM, es por ello que se requiere de tratamiento posterior. Para este caso se quiere utilizar un sistema de tratamiento a base de filtros lentos de antracita y zeolita, el cual permitirán la reducción de ciertos parámetros como la turbiedad, sólidos, demanda bioquímica de oxígeno, entre otros.

1.2.1. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA

Debido al incremento de la población humana, se ha ido aumentando la producción de aguas residuales las cuales en su mayoría no tienen un adecuado tratamiento, originándose una creciente contaminación en el entorno donde vivimos. Esta problemática hace que día a día busquemos nuevas tecnologías que nos ayuden a poder minimizar la contaminación de los cuerpos de agua y mejorar la calidad de vida de la población.

1.2.2. FORMULACIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

El tratamiento en las aguas residuales es fundamental para poder obtener un efluente de calidad, el cual deba cumplir con las normas vigentes para su buen rehúso o eliminación a los cuerpos de agua. Debido a este problema surge la idea de tratar las aguas provenientes de un reactor UASB, mediante filtros de zeolita y antracita, de esta manera se evaluará la disminución de contaminantes presentes en estas aguas residuales provenientes de un Asentamiento Humano.

1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Se debe entender al tratamiento de aguas residuales como una necesidad de primer orden para poder brindar condiciones adecuadas de salud para la población, es así que, en la actualidad se elimina gran cantidad de aguas residuales a cuerpos de agua sin tratamiento, siendo los filtros lentos una alternativa para la descontaminación de las aguas residuales. Uno de los materiales litológicos que es usado en la actualidad es la antracita, el cual tiene un gran poder absorbente y puede ser encontrado de manera natural, por otro lado, encontramos a la zeolita el cual se encuentra en zonas volcánicas y llega a tener propiedades muy interesantes ya que tiene una estructura tipo jaula que alberga grandes áreas tanto externa como internamente.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Comparación y determinación de eficiencias de dos filtros lentos usando zeolita y antracita como medios filtrantes para el tratamiento del efluente de un reactor UASB.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno, sólidos, coliformes termotolerantes, temperatura, turbiedad, oxígeno disuelto y potencial de hidrógeno en el agua residual, antes y después del tratamiento en ambos filtros lentos.
- Comparar los porcentajes de remoción de los parámetros analizados para los filtros lentos de zeolita y antracita.
- Analizar el comportamiento de la zeolita y la antracita como medios filtrantes para el tratamiento del efluente de un reactor UASB.

1.5. HIPÓTESIS

La remoción de sólidos suspendidos totales utilizando a la antracita y zeolita como medio granular en un proceso de filtración lenta, para el tratamiento de aguas residuales domésticas, produce una remoción igual o superior al 50%.

2. CAPITULO II

MARCO TEÓRICO Y LEGAL

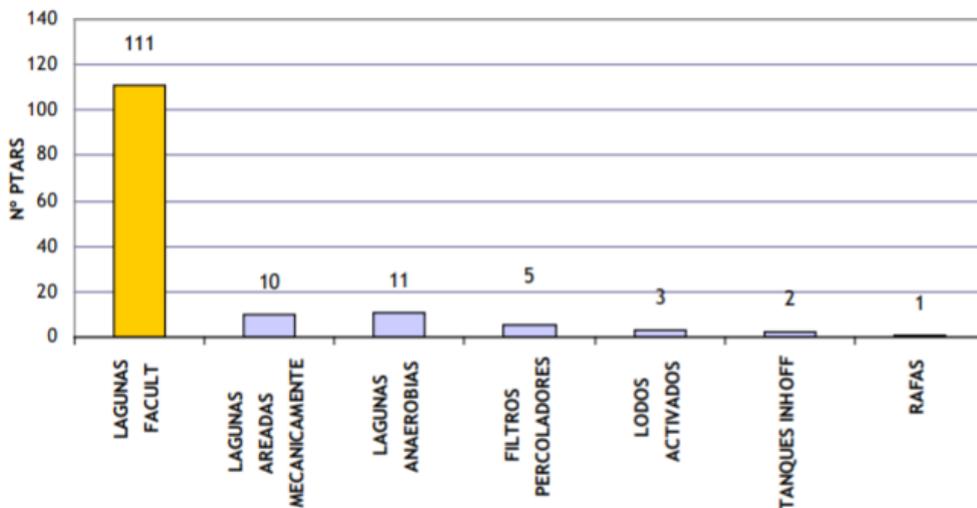
2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL PERÚ

El tratamiento de aguas residuales, es fundamental para el bienestar tanto de la población como de los ecosistemas. Dentro de su composición, pueden derivarse aguas residuales provenientes del sector domiciliario e industrial, donde el gobierno a través de sus políticas públicas trata de cerrar las brechas y así lograr un mejor desarrollo sostenible para la población. En el informe publicado por la Sunass sobre el “Diagnóstico de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales” (2015), de las 253 localidades a cargo de las EPS, 89 no cuentan con un sistema de tratamiento de aguas residuales. Por otro lado, de las 164 localidades restantes, gran parte vierte las aguas residuales al sistema de alcantarillado, las cuales son conducidas a una planta de tratamiento de aguas residuales.

Según el informe de la Sunass (2015) de las diferentes tecnologías de tratamiento en las PTAR, se ha evidenciado diferentes tecnologías las cuales se pueden evidenciar en la Figura N° 01.

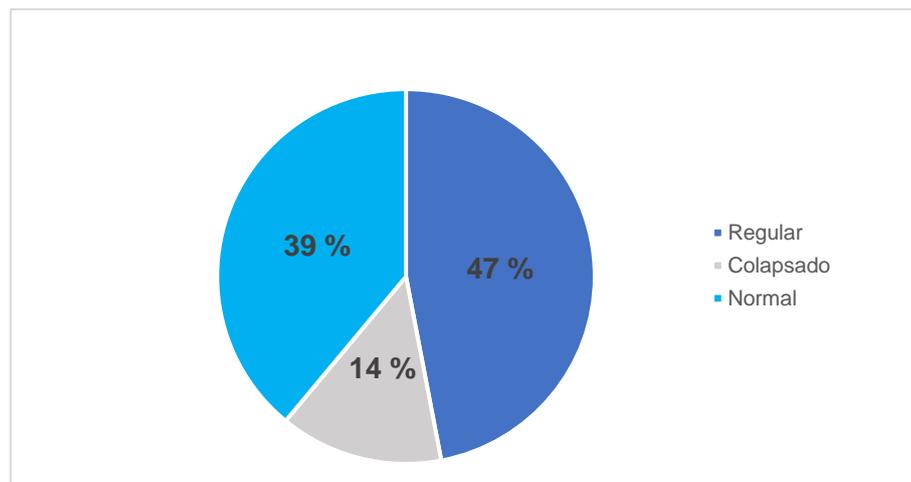
Figura N° 01: Inventario tecnológico de las plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)



Fuente: Fondo Nacional del Ambiente

En el Perú, hay aproximadamente 265 pequeñas ciudades, donde solo 147 cuentan con PTAR, mientras que las restantes 118 no cuentan con servicios de saneamiento. De estas 147 pequeñas ciudades, el 39% de estas plantas de tratamiento se encuentran en un estado regular, el 47% en estado regular y el 14% en estado de colapso o abandono, lo cual se refleja en la Figura N° 02.

Figura N° 02: Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales en las Pequeñas Ciudades.



Fuente: Diagnóstico Pequeñas Ciudades – Sunass

La mala calidad de los servicios de saneamientos trae repercusiones sobre la salud y la población, generando un aumento de pobreza, además todo ello afecta al desarrollo socioeconómico y la estabilidad política.

2.1.2. ASPECTOS GENERALES DEL AGUA RESIDUAL

Las aguas residuales domésticas provienen del sector residencial y comerciales, en esta última se incluyen instituciones y zonas recreativas y tienen una disposición final al sistema de alcantarillado, la cual posteriormente es llevada a una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

Las normas que regulan los principales contaminantes presentes en el agua residual, por lo general toman en cuenta la eliminación de materia orgánica, sólidos en suspensión y principales patógenos. Para el caso en que se piense reutilizar el agua residual, las normas vigentes incluyen la eliminación de algunos compuestos orgánicos, metales pesados y sólidos inorgánicos disueltos, los cuales se pueden mencionar en el siguiente cuadro:

Cuadro Nº 01: Contaminantes de importancia en el tratamiento del agua residual

Contaminantes	Razón de la importancia
Sólidos en suspensión	Los sólidos en suspensión pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales. La materia orgánica biodegradable se mide (en la mayoría de las ocasiones) en función de la DBO ₅ (demanda bioquímica de oxígeno) y de la DQO (demanda química de oxígeno).
Patógenos	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua residual.
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento de microorganismos. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada.
Contaminantes Prioritarios	Son compuestos orgánicos o inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda conocida o sospechada.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento. Ejemplos típicos son los agentes tensoactivos, los fenoles y los pesticidas agrícolas
Metales pesados	Los metales pesados son, frecuentemente, añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y puede ser necesario eliminarlos si se pretende reutilizar el agua residual.

Sólidos inorgánicos disueltos	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua, y es posible que se deban eliminar si se va a reutilizar el agua residual.
-------------------------------	--

Fuente: Metcalf & Eddy (2013)

2.1.2.1. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL

Las aguas residuales provienen de diferentes efluentes es así que poseen diferente composición, de esta manera poseen diferentes características físicas, químicas y biológicas. La composición de estas puede estar influenciada por las aguas residuales domésticas (alta carga orgánica) y de las aguas residuales industriales (alta carga inorgánica).

2.1.2.1.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Una de las características físicas más importantes en las aguas residuales es la presencia de sólidos, y en esta se incluye la cantidad de sólidos suspendidos, sedimentables, disueltos y volátiles. Existen otras características físicas como: el olor, la turbiedad, temperatura, pH, el color y la densidad que también son importantes.

a) Olores

Normalmente, los olores son generados por la descomposición de la materia orgánica y el olor más característico del agua residual es el del sulfuro de hidrógeno producido por los microorganismos anaerobios que reducen los sulfatos y sulfitos, es así que la presencia de olores en las aguas residuales puede causar muchos problemas dentro de una sociedad.

b) Color

Las aguas residuales por lo general tienen una coloración gris, mientras se va desarrollando condiciones anaeróbicas va tomando una coloración de gris a gris oscuro, hasta que finalmente llega a tomar un color negro, para este caso suele clasificarse el agua residual como séptica. La coloración oscura se debe

a la formación de sulfuros metálicos que llega a desarrollarse en condiciones anaeróbicas.

c) Densidad

Es una importante característica física (de las aguas residuales) expresada en kg/m^3 que puede estimar la cantidad de sedimentos presentes. La densidad por lo general depende de la temperatura y varía en función de la concentración total de sólidos en el agua. Para el caso en que el agua residual no contenga gran cantidad de sólidos suspendidos y sedimentables se podría asemejar al valor de la densidad del agua.

2.1.2.1.2. CARACTERISTICAS QUIMICAS

Las aguas residuales contienen varios componentes químicos lo que nos lleva a examinar su naturaleza para el control de la calidad del agua. Para poder realizar un estudio de las características químicas de las aguas residuales se podría clasificar por su constituyente orgánico, inorgánico y gases.

a) Compuestos Inorgánicos

Existen muchos constituyentes inorgánicos estos pueden ser:

Cloruros. Un parámetro importante para la medición de la calidad del agua residual son los cloruros. Podemos encontrar gran cantidad de este compuesto cuando las aguas superficiales lleguen a disolver los suelos y las rocas. Para el caso de las aguas que se encuentren cerca a la costa, una intrusión de aguas saladas podría incrementar el contenido de cloruros.

Alcalinidad. Se debe generalmente a la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos, entre los más comunes son el bicarbonato de calcio y el bicarbonato de magnesio. El agua residual proveniente de las zonas residenciales es alcalina, debido a que el agua de suministro llega con un pH neutro o alcalino.

Nitrógeno. Es un compuesto esencial y básico para la síntesis de las proteínas, viene a ser un elemento nutritivo para el crecimiento de los microorganismos,

además es esencial para el crecimiento de plantas. En el agua residual, el nitrógeno se halla principalmente en forma de nitrógeno orgánico, amonio, nitrito y nitrato.

Fósforo. Viene a ser un elemento esencial para el crecimiento de algas y otros organismos biológicos. En cantidades mayores puede afectar la vida acuática (ríos, lagos, mares), generándose el crecimiento de algas, lo que conllevaría a realizar un control de vertimientos de aguas residuales provenientes de las viviendas, industrias o del sector agrícola.

Azufre. Tanto en las aguas de abastecimiento como en las aguas residuales podemos encontrar al ion sulfato. Para el proceso de síntesis de proteínas es fundamental la presencia del azufre, el cual será liberado durante el proceso de degradación de la materia orgánica. Los sulfatos se reducen químicamente a sulfuros de hidrógeno, los cuales pueden alterar el normal desarrollo de los procesos de tratamiento biológicos en el caso exceda los 200mg/L..

b) Compuestos Orgánicos

Los principales grupos de sustancias orgánicas que se encuentran en las aguas residuales son: proteínas (40-60%), hidratos de carbono (25-50%) y grasas y aceites (10%), donde los principales elementos que constituyen estos grupos orgánicos son: el carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno (C,H,O y N).

c) Gases

En las aguas residuales podemos encontrar una gran variedad de gases como: nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂), dióxido de carbono (CO₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S), amoníaco (NH₃) y metano (CH₄). Los tres primeros gases se encuentran en la atmósfera y por ende en aquellas aguas que se encuentren en contacto con la atmósfera, por otro lado, las 3 últimas son generados por la descomposición de la materia orgánica. Existen otros gases que se encuentran en el agua residual como el cloro y el ozono.

Oxígeno disuelto. En gran medida todos los organismos vivos necesitan del oxígeno para poder llevar a cabo su proceso metabólico, de esta manera producir energía para el crecimiento y reproducción. En las aguas residuales,

la medición oxígeno disuelto es necesario para poder comprobar que la vida microbiana tiene un buen ambiente para su mejor desarrollo.

Sulfuro de hidrógeno. Es un gas que contiene azufre y se forma por el proceso de la descomposición de la materia orgánica, pero cuando hay presencia de cantidades considerables de oxígeno, se inhibe la presencia de sulfuro de hidrógeno. Tiende a tener un olor característico parecido al de la descomposición de la materia orgánica y es el principal responsable del color negruzco de las aguas residuales junto con el sulfuro ferroso (FeS).

Metano. Viene a ser el principal subproducto de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica. En las aguas residuales podemos obtener metano en pequeñas cantidades, en las plantas de tratamiento de aguas residuales lo podemos encontrar durante la estabilización de los fangos.

2.1.2.1.3. CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS

En las aguas residuales podemos encontrar una serie de microorganismos, los cuales que en cierta medida pueden llegar a ser buenos o perjudiciales para la degradación de la materia orgánica. En el análisis de una muestra de agua residual, podemos encontrar: bacterias, hongos, algas, entre otros grupos de vida microbiana. Las bacterias desempeñan un papel importante en la descomposición y estabilización de la materia orgánica, pero a la vez puede ser un indicador de contaminación por desechos humanos, como en el caso de los coliformes. Los hongos cumplen un papel importante en la descomposición del carbono en la biósfera, estos organismos tienen cierta ventaja para su desarrollo, ya que crecen en climas de baja humedad y en donde pueda haber pH bajos. Por otro lado, la presencia de algas puede originar problemas de olor y sabor en las aguas naturales. Para una buena gestión de la calidad del agua, es importante realizar un control periódico de la presencia de algas, tanto en agua de abastecimiento como aguas residuales.

2.1.3. TRATAMIENTO BIOLÓGICO

La importancia de procesos biológico, se basa en la degradación de la materia orgánica, convirtiéndola en materia inerte. En el tratamiento de las aguas

residuales, las bacterias cumplen su función natural para cerrar ciclos elementales como la del carbono, fósforo y nitrógeno. Para alcanzar un tratamiento biológico eficiente es necesario tener en cuenta la aireación y la cantidad de biomasa, que requieren los microorganismos. La composición típica dentro de una planta de tratamiento de aguas residuales, es de 75-80% agua y de 20-25% de materia seca. La radiación solar cumple un papel muy importante en los procesos biológicos ya que puede producir el crecimiento logarítmico de las algas, los cuales son esenciales para el crecimiento de los microorganismos.

2.1.4. FILTROS LENTOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS MUNICIPALES

2.1.4.1. FUNDAMENTO DEL PROCESO DE FILTRACIÓN LENTA

Para el tratamiento de las aguas residuales municipales, se requiere realizar todo un sistema de procesos para la reducción de la materia orgánica. Para poder realizar el tratamiento a base de filtros lentos, se requiere que el agua residual haya pasado por un pretratamiento y un tratamiento primario, ya que los filtros pueden llegar a colmatarse rápidamente, reduciendo la eficiencia del proceso (Barzola, 2010)

El proceso de filtración lenta consiste en hacer pasar el agua a través de un medio filtrante el cual retiene las impurezas, generándose procesos químicos y biológicos, los cuales reducen la materia orgánica en componentes más simples (Rosas y Ugaz, 2014). En la capa biológica los microorganismos digieren y degradan la materia orgánica reteniendo las partículas en suspensión, otros procesos que llegan a ocurrir son la degradación de los compuestos nitrogenados y remoción de color. La eficiencia que puede llegar a tener el sistema de filtración va depender mucho del tipo del material filtrante, así como del tamaño y cantidad (López, Buitron, García y Cervantes, 2008).

2.1.4.2. PARÁMETRO DE SEGUIMIENTO EN LOS FILTROS LENTOS

Durante el proceso de filtración ocurren procesos físicos, químicos y biológicos, que ayudan a purificar el agua contaminada, por ello para poder determinar qué tan eficiente es este sistema se debe realizar la medición de algunos parámetros que ayudarán a caracterizar el proceso de filtración lenta, desde el ingreso hasta

la salida de la unidad. Algunos de estos parámetros importantes que se usan para el control de los procesos de tratamiento son los siguientes:

2.1.4.2.1. DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO

Es un parámetro que mide el grado de contaminación de las aguas residuales como también de las aguas superficiales. Está relacionado con la medición del oxígeno disuelto que necesitan los microorganismos para poder degradar la materia orgánica presente en el agua. El ensayo consiste brindarles condiciones favorables a los microorganismos a través de nutrientes a una temperatura de incubación de 20°C, por un periodo de 5 días.

2.1.4.2.2. COLIFORMES TERMOTOLERANTES

Los coliformes termotolerantes se encuentran en gran cantidad en las aguas residuales, debido a ello este parámetro es fundamental para poder medir el grado de contaminación a la que se encuentra esta.

2.1.4.2.3. SÓLIDOS TOTALES, FIJOS Y VOLÁTILES

Se entiende como la cantidad de materia que se obtiene como residuo luego de someter al agua a un proceso de evaporación de 103°C y 105°C, mas no de aquella materia que se pierde durante la evaporación. Los sólidos fijos vienen ser aquellos que quedan como residuo de someter una muestra a 550°C, por otro lado, los sólidos volátiles resultan de la diferencia de los sólidos totales y los sólidos fijos.

2.1.4.2.4. POTENCIAL DE HIDRÓGENO

Es un parámetro físico-químico muy importante para el tratamiento de aguas residuales. Para el mejor desarrollo de la actividad biológica es mejor mantener un pH neutro que podría encontrarse entre 6.5 a 8.5, el control de este parámetro viene a ser muy importante, ya que su variación puede modificar la composición biológica de las aguas residuales.

2.1.4.2.5. TURBIEDAD

Viene a ser un parámetro usado para ver la calidad de las aguas vertidas o de las aguas naturales en relación con la materia coloidal y en suspensión, a través de una medida óptica. Para poder medir la turbiedad se realiza una

comparación entre la intensidad de la luz dispersada por la muestra y la intensidad registrada en una suspensión de referencia en las mismas condiciones.

2.1.4.2.6. OXÍGENO DISUELTO

Todos los seres vivos necesitamos de oxígeno para poder vivir y crecer, es así que los microorganismos necesitan de este elemento para poder realizar su proceso metabólico (crecimiento y reproducción), de esta manera su medición nos indicará si los microorganismos están desarrollando un proceso aerobio (presencia de oxígeno), anaerobio (ausencia de oxígeno) u anóxico (ausencia de oxígeno y presencia de nitratos).

2.1.4.2.7. CONDUCTIVIDAD

La conductividad, viene a ser un valor numérico que expresa la capacidad de una solución para transportar la corriente eléctrica. Su valor va depender de la cantidad de iones y de la temperatura. Viene a ser un parámetro de seguimiento tanto para aguas residuales como para aguas superficiales. En el caso de aguas residuales, si su valor resulta muy alto, nos podrá decir que hubo vertimientos de sustancias con elevadas concentraciones de salinidad.

2.1.4.2.8. TEMPERATURA DEL AGUA RESIDUAL

La temperatura del agua residual por lo general llega a ser similar a la del suministro de agua potable con un valor promedio de 15°C. El incremento de la temperatura del agua residual puede influir en la flora y fauna de los cuerpos de agua, lo que puede conllevar al crecimiento de algas u hongos, incluso podría contribuir al agotamiento del oxígeno disuelto.

2.1.4.2.9. TEMPERATURA AMBIENTAL

El aumento o la disminución de la temperatura, puede afectar en la velocidad de las reacciones químicas y de la actividad metanogénica. La temperatura ambiental óptima para la actividad bacteriana es de 25°C a 35°C. Para una temperatura mayor de los 50°C se suspende la actividad aeróbica, y para una temperatura menor de los 15°C la actividad aeróbica podría a llegar a ser muy lenta.

2.1.4.3. MECANISMOS EN EL PROCESO DE FILTRACIÓN LENTA

Existen mecanismos que ayudan en la remoción de partículas durante la filtración de aguas residuales. Entre las más importantes podemos mencionar algunas: retención, sedimentación, impacto, intercepción y adhesión.

a) MECANISMO DE RETENCION

Podemos subdividirla en retención mecánica y contacto aleatorio.

Retención mecánica: Toda partícula que tiene un tamaño mayor a los poros del material granular, llegan a ser retenidos por estos intersticios. En caso el tratamiento se dé para un efluente primario o secundario, el filtro quedará colmatado rápidamente, las partículas de mayor tamaño serán retenidas por el material granular

Retención por contacto aleatorio: Toda partícula que tiene menor tamaño a los poros del material granular tienden a transitar por medio del material granular, pero son retenidas por medio del contacto aleatorio a través de otras partículas que también van quedando durante el transcurso.

b) MECANISMO DE SEDIMENTACION

Existen partículas que por efecto de la gravedad sedimentan más rápido que otras, las cuales quedarán sobre el medio filtrante. El cálculo de la velocidad de sedimentación se puede dar a través de la fórmula de Stokes, la cual se representa con la siguiente ecuación:

$$v_s = \frac{g(\rho_s - \rho_a)d^2}{18\mu} \dots (1)$$

v_s = Velocidad de sedimentación

ρ_s = Densidad de las partículas

ρ_a = Densidad del agua

d = Diámetro de las partículas

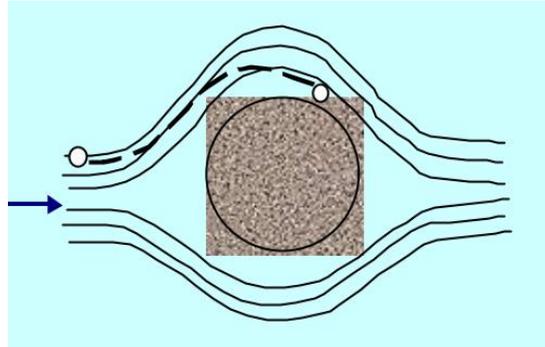
μ = Viscosidad absoluta del agua

g = Aceleración de la gravedad

Según la ecuación (1), se cumple para un flujo vertical y horizontal, donde la aceleración de la gravedad es determinante para que se produzca la

sedimentación. En la Imagen N° 01, se puede observar que la velocidad tangencial decrece hasta hacerse cero al momento de llegar a la superficie.

Imagen N° 01: Mecanismo de Sedimentación

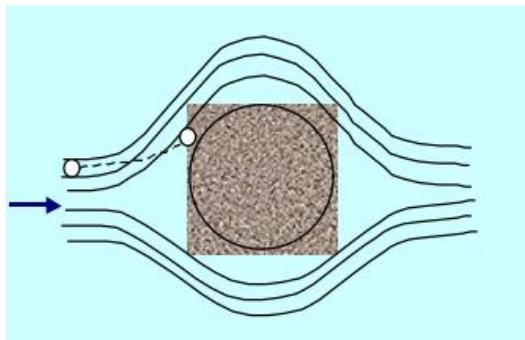


Fuente: Cristóbal, W. (2005).

c) MECANISMO DE IMPACTO

Aquellas partículas que son de mayor peso no podrán seguir el transcurso del agua que va pasando por el medio filtrante, la fuerza de gravedad que va ejerciendo el flujo de agua, hace que al momento de ingresar al material granular, se produzca la retención de la partícula.

Imagen N° 02: Mecanismo de Impacto



Fuente: Cristóbal, W. (2005).

Las líneas de corriente divergen al estar ceca de los granos del medio filtrante, es en donde las partículas al lograr mantener su trayectoria llegan a colisionar con los materiales granulares, lo cual se muestra en la Imagen N° 02. Para poder caracterizar la eficiencia de este mecanismo se desarrolló dos modelos matemáticos:

$$II = \frac{\rho_s d^2 v_{oo}}{18\mu D} \dots (2)$$

$$\frac{F_I}{F_g} = \frac{2v_i^2}{gD} \dots (3)$$

Donde:

II = Parámetro adimensional que representa la eficiencia del mecanismo

ρ_s = Densidad de las partículas suspendidas

d = Diámetro de las partículas suspendidas

D = Diámetro de los granos del medio filtrante

v_{oo} = Velocidad de aproximación

μ = Viscosidad absoluta del agua

F_I = Fuerza de inercia

F_g = Fuerza de gravedad

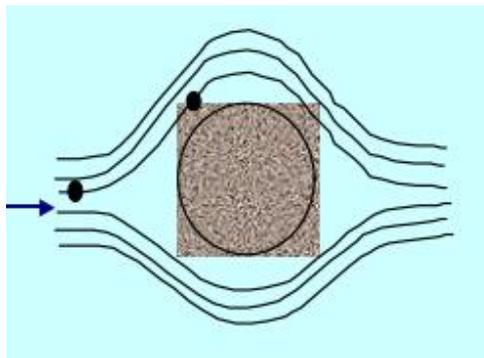
v_i = Velocidad intersticial

g = Aceleración de la gravedad

d) MECANISMO DE INTERCEPCIÓN

Aquellas partículas que siguen las líneas de corriente son interceptadas por la superficie del medio filtrante. Por lo general durante el escurrimiento se presenta un régimen laminar, ya que las partículas presentan una densidad similar al del agua como se puede ver en la Imagen N°03.

Imagen N° 03: Mecanismo de Intercepción



Fuente: Cristóbal, W. (2005).

Se ha desarrollado una ecuación propuesta por Ives, el cual califica a partículas en suspensión y granos del medio filtrante que tengan forma esférica, se podría aplicar a la siguiente ecuación:

$$I = \frac{d}{D} \dots (4)$$

Donde:

I = Parámetro adimensional de intercepción

d = Diámetro de las partículas suspendidas

D = Diámetro de los granos del medio filtrante

e) MECANISMO DE ADHESIÓN

En la filtración gran parte de las partículas adheridas tienden a ser trasladadas por medio de las fuerzas de corriente las cuales terminan llevándolo al fondo del medio filtrante.

2.1.5. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES GRANUALRES

2.1.5.1. ANTRACITA

La antracita está compuesto por carbono al 95%. Se forma a elevadas presiones y temperaturas, lo cual lo hace un material con alta dureza y densidad. La antracita se encuentra dentro de la clasificación de tipo de carbón, como se puede observar en el Cuadro N° 02.

Cuadro N° 02: Clasificación del carbón mineral según norma ASTM D388

Tipo de carbón	Grupo
Antracita	Metaantracita
	Antracita
	Semiantracita
Bituminoso	Bituminoso de bajo volátil
	Bituminoso de volátil intermedio
	Bituminoso A de alto volátil
	Bituminoso B de alto volátil
Subbituminoso	Bituminoso C de alto volátil
	Subbituminoso A
	Subbituminoso B
Lignito	Subbituminoso C
	Lignito A
	Lignito B

Fuente: Giraldo & Blas, 2008

En el Cuadro N° 03, se puede observar algunas características de la antracita, comparándola con otros tipos de carbonos en el Perú.

Cuadro N° 03: Características generales de los carbonos en el Perú

Características	Cuenca del Alta Chicama	Cuenca del Santa	Cuenca de Oyón-Gazuna		Cuencas de Goyllarisquizga y Jatunhuasi		Yacimientos de Piñapata y Tuco	Yacimiento de Tumbes
			Oyón	Gazuno	Goyllarisquizga	Jatunhuasi		
Cuenca	-	-	Oyón	Gazuno	Goyllarisquizga	Jatunhuasi	-	-
Tipo de carbón (ASTM)	Antracita	Antracita - Metaantracita	Semibituminoso	Antracita-Semiantracita	Bituminoso y subbituminoso		Antracita	Lignito
Humedad (%)	4.0 - 12.0	4.0 - 6.0	6.0	6.0		6.0 - 10.0	4.0 -4.5	9.0 - 18.0
Materia volátil (%)	2.5 - 12.0	3.0 - 6.0	16.0 - 22.0	6.0 - 14.0	23.4	32.0 - 38.0	4.0 - 4.8	27.0 - 32.0
Cenizas (%)	8.0 - 10.0	7.0 - 12.0	6.0 - 12.0	5.0 - 10.0	54.0	6.0 - 20.0	6.0 - 35.0	20.0 - 36.0
Azufre (%)	1.0 - 2.5	0.5 - 1.0			12.1	0.60 - 2.0	0.6 - 1.2	4.0 - 5.0
Carbón fijo	80 - 85	80 - 85	65 - 75	70 - 80	22.6	40 - 60	52 - 85	20 -30
Poder calorífico (kcal/kg)	7000 - 7500	6000 - 7500	7000 - 7600	6500 - 7500		5000 - 7000	6400 - 7600	2700 - 4300
Densidad (t/m ²)	1.6	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (Ingemmet), citado en Giraldo & Blas, 2008:79.

En el Cuadro N° 03, se puede observar las características de la antracita, así como de otros tipos de carbón. De todas las cuencas mostradas, en la zona Alta de Chicama, se encuentra la mayor cantidad de antracita de todo el Perú, el cual tiene gran porcentaje de carbón en su estructura. Este material, al tener gran porcentaje de humedad y porosidad, lo hace adecuado para la descontaminación de las aguas residuales, donde ya se ha demostrado su eficiencia en algunas investigaciones realizadas.

2.1.5.2. ZEOLITA

Actualmente se pueden encontrar zeolitas naturales y sintéticas. La zeolita natural pertenece al grupo de aluminosilicatos cristalinos hidratados (aluminio, silicio, sodio, calcio, magnesio, potasio y agua), el cual puede ser de origen natural o sintético. Presenta una orientación tridimensional, el cual lo favorece para ceder agua y cationes (sin alterar su estructura cristalina). La formación de las zeolitas naturales se debe a las erupciones volcánicas de silicio con gran proporción en álcalis. Para el caso del tratamiento de agua, es beneficioso para la reducción de costos en el uso de materiales químicos como coagulantes. Por otro lado, oxida el amonio (NH_4), a NO_3 , esto se va produciendo mientras la capa biológica del filtro va madurando. A continuación, se menciona algunas características físicas de la zeolita natural, Cuadro N°04:

Cuadro N° 04: Propiedades Físicas de la Zeolita natural

Propiedad Física	Valor aproximado
Color	Blanco
Retención de humedad (%)	30-40
Porosidad (%)	30-55
Área de superficie (m^2/gramo)	25
Absorción Superficial	Hidrofílica
Carga superficial	Negativa
Densidad específica (kg/m^3)	1830
Coefficiente de variación	2.45
Peso volumétrico (kg/m^3)	725
Peso volumétrico varillado (kg/m^3)	780
Dureza (Mohs)	3
Estabilidad térmica ($^{\circ}\text{C}$)	hasta 500°

Fuente: Rodas, M. y Tuesta, M. (2018)

En el mundo existen aproximadamente 40 tipos de zeolitas naturales (ver Cuadro N° 05), los cuales tienen diferentes aplicaciones, algunos de ellos son: la medicina natural, agricultura, industrias petroleras y depuración de aguas contaminadas. Dentro de todos estos tipos de zeolitas la “clinoptilolita” es la más abundante y económica, estudios han demostrado que este es muy eficiente para el tratamiento de aguas residuales y otros rubros.

Cuadro Nº 05: Clasificación de las Zeolitas naturales

Clasificación	Fórmula molecular	Volumen de poro cm ³ H ₂ O/cm ³ cristal
Grupo de las analcimas		
Analcimas	Na ₁₆ (Al ₁₆ Si ₃₂ O ₉₆)16H ₂ O	0.18
Wairakita	Ca ₈ (Al ₁₆ Si ₃₂ O ₉₆)16H ₂ O	0.18
Keucita	K ₁₆ (Al ₁₆ Si ₃₂ O ₉₆)	0.00
Grupo de las natrolitas		
Natrolita	Na ₁₆ (Al ₁₆ Si ₂₄ O ₈₀)16H ₂ O	0.21
Edingtonita	Ba ₂ (Al ₄ Si ₆ O ₂₀)6H ₂ O	0.35
Thomsonita	Na ₄ (Al ₂₀ Si ₂₀ O ₈₀)24H ₂ O	0.32
Grupo de las Filipsitas		
Filipsita	(K,Na) ₅ (Al ₃ Si ₁₁ O ₃₂)10H ₂ O	0.30
Garronita	NaCa _{2.5} (Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂)14H ₂ O	0.41
Gismondina	Ca ₄ (Al ₈ Si ₈ O ₃₂)16H ₂ O	0.47
Grupo de las heulanditas		
Heulandita	Ca ₄ (Al ₈ Si ₂₈ O ₇₂)24H ₂ O	0.35
Clinoptilolita	Na ₆ (Al ₆ Si ₃₀ O ₇₂)24H ₂ O	0.34
Estilbita	Na ₂ Ca ₄ (Al ₁₀ Si ₂₆ O ₇₂)32H ₂ O	0.38
Grupo de las modernitas		
Modernita	Na ₈ (Al ₈ Si ₄₀ O ₉₆)24H ₂ O	0.26
Ferrierita	Na _{1.5} Mg ₂ (Al ₈ Si ₄₀ O ₉₆)18H ₂ O	0.24
Epistibita	Ca ₃ (Al ₆ Si ₁₈ O ₄₈)16H ₂ O	0.34
Grupo de las Chabacitas		
Chabacita	Ca ₂ (Al ₄ Si ₈ O ₂₄)13H ₂ O	0.48
Erionita	(Ca,Mg,Na, K) _{4.5} (Al, Si ₂₇ O ₇₂)27H ₂ O	0.26
Zeolita L	K ₆ Na ₅ (Al ₉ Si ₂₇ O ₇₂)21H ₂ O	0.28
Grupo de las faujasitas		
Faujasitas (X,Y)	Na ₁₂ Ca ₁₂ Mg ₁₂ (Al ₅₉ Si ₁₅₅ O ₅₈₄)26H ₂ O	0.53
Zeolita A	Na ₁₂ (Al ₁₂ Si ₁₂ O ₄₈)27H ₂ O	0.47
Zeolita ZK-5	Na ₁₀ (Al ₃₀ Si ₆₆ O ₁₉₂)98H ₂ O	0.45
Grupo de las Laumontitas		
Laumontita	Ca ₄ (Al ₄ Si ₁₆ O ₄₈)16H ₂ O	0.35
Yugawaralita	Ca ₄ (Al ₈ Si ₁₆ O ₄₈)16H ₂ O	0.30
Grupo de las Pentasil		
Zeolita ZSM-5	Na _n (Al _n Si _{96n} O ₁₉₂)16H ₂ O	0.32
Zeolita ZSM-11		

Fuente: Bosch, P y Schifter, I. (1988)

2.2. MARCO LEGAL

2.2.1. NORMATIVA NACIONAL

Para la presente investigación, en base a los resultados obtenidos se tomará en cuenta los Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas y los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), categoría N°3 para el riego de vegetales.

2.2.1.1. LÍMITES MÁXIMO PERMISIBLES PARA EFLUENTES DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS O MUNICIPALES

Con el propósito de poder evitar daños en la salud y el ambiente, además de poder controlar los excesos en los niveles de concentración de sustancias físicas, químicas y biológicas presentes en los efluentes, el Ministerio del Ambiente publicó el D.S. N° 003-2010-MINAM, que aprueba los Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales. Su cumplimiento es exigible legalmente por el MINAM y los organismos que confirman el Sistema de Gestión Ambiental, lo cual se puede ver a más detalle en el Cuadro N° 06.

Cuadro N° 06: Límites Máximos Permisibles para efluentes de PTAR.

Parámetro	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpo de agua
Aceites y grasas	mg/l	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100ml	10,000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	200
pH	unidad	6.5-8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mg/l	150
Temperatura	°C	<35

Fuente: DS 003-2010-MINAM

2.2.1.2. ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL DEL AGUA

El Ministerio del Ambiente, optando por la seguridad hídrica y la protección de nuestros ecosistemas, publicó el D.S. N° 004-2017-MINAM, que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua.

Con el objetivo de establecer un nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos que no presenta riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente. Los Estándares aprobados son aplicados a los cuerpos de agua del territorio nacional en su estado natural y son obligatorios en el diseño de las normas legales y las políticas públicas siendo un referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental

Los estándares de calidad ambiental se encuentran sujetos a parámetros establecidos según los usos de cuerpo receptor y han sido divididas en cuatro categorías:

Categoría 1: Poblacional y Recreacional.

Categoría 2: Actividades Marino Costeras.

Categoría 3: Riego de Vegetales y Bebida de Animales.

Categoría 4: Conservación del Ambiente Acuático.

Cuadro N° 07: Estándares de Calidad Ambiental para Agua, Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales.

Parámetro	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido(c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
FÍSICOS-QUÍMICOS				
Aceites y Grasas	mg/l	5		10
Cloruros	mg/l	500		**

Color	Color verdadero Escala Pt/Co	100(a)	100(a)	
Conductividad	(μ S/cm)	2500	5000	
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/l	15	15	
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	40	40	
Fenoles	mg/l	0.002	0.01	
Oxígeno Disuelto	mg/l	≥ 4	≥ 4	
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 – 8,5	6,5 – 8,4	
Sulfatos	mg/l	1000	1000	
Temperatura	°C	$\Delta 3$	$\Delta 3$	
INORGÁNICOS				
Aluminio	mg/l	5	5	
Arsénico	mg/l	0.1	0.2	
Boro	mg/l	1	5	
Cobre	mg/l	0.2	0	
Cobalto	mg/l	0.05	1	
Manganeso	mg/l	0.2	0.2	
Mercurio	mg/l	0.001	0.01	
Plomo	mg/l	0.05	0.05	
Zinc	mg/l	2	24	
MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICOS				
Coliformes Termotolerantes	NMP/100ml	1000	2000	1000
Escherichia Coli	NMP/100ml	1000	**	**
Huevos de Helmintos	Huevo/L	1	1	**

(a): Para aguas claras. Sin cambio anormal (para aguas que presentan coloración natural).

- El símbolo ** dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para esta Subcategoría.

Fuente: DS 004-2017-MINAM

3. CAPITULO III

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

La presente investigación se basó en la comparación de eficiencias de dos medios filtrantes: antracita y zeolita para el tratamiento del efluente de un UASB, alterando los caudales de ingreso a las unidades de filtración. Estos medios filtrantes fueron caracterizados en un inicio para poder ver sus principales propiedades. El estudio se desarrolló en 8 fases, el cual se puede resumir en el siguiente cuadro:

Cuadro N° 08: Fases de la Investigación

Fase	Descripción	Análisis	Duración
N°1	Caracterización de la antracita y zeolita , este proceso se realizó con el hecho de comprender mejor las características de los materiales granulares adquiridos (antracita y zeolita).	Porosidad, tamaño Forma Densidad aparente Coeficiente de uniformidad Coeficiente de curvatura	1 semana
N°2	Instalación del sistema , se dio a cabo en el CITRAR-FIA-UNI, se usó tuberías de PVC, tanque elevado de 600L, válvulas de control, cilindros para el material filtrante y una bomba de eje vertical unida a una paleta giratoria.	Ninguno	1 semana
N°3	Prueba hidráulica , consistió en llenar todo el sistema con agua potable para poder corroborar algún problema durante la instalación del sistema y no tener inconvenientes posteriores.	Ninguno	1 semana
N°4	Proceso de arranque o puesta en marcha , en esta fase se dio inicio a la investigación. La importancia de esta fase radica en la adaptación del medio filtrante ante la carga orgánica proveniente del reactor UASB.	Turbiedad, pH, OD, conductividad, temperatura del agua y temperatura ambiental.	2 semanas

Nº5	Primera Tasa de Filtración , consistió en la comparación de eficiencias de los medios filtrantes (antracita y zeolita) usando una tasa de filtración de 0.0227 m ³ /h.m ² . El caudal usado de 129.6 L/d, se tuvo que calibrar mínimo 2 veces al día.	Turbiedad, pH, OD, Conductividad, Temperatura, DBO ₅ , Coliformes Termotolerantes y Sólidos	2 meses
Nº6	Segunda Tasa de Filtración , consistió en la comparación de eficiencias de los medios filtrantes (antracita y zeolita) usando una segunda tasa de filtración de 0.0151 m ³ /h.m ² . El caudal que se usó fue de 86.4 L/d el cual se tuvo que calibrar mínimo 2 veces al día	Turbiedad, pH, OD, Conductividad, Temperatura, DBO ₅ , Coliformes Termotolerantes y Sólidos	2 meses
Nº7	Tercera Tasa de Filtración , consistió en la comparación de eficiencias de los medios filtrantes (antracita y zeolita) usando una tercera tasa de filtración de 0.0075 m ³ /h.m ² . El caudal usado fue de 43.2 L/día, este valor se tuvo que calibrar mínimo 2 veces al día para que el sistema trabaje fuera de variaciones.	Turbiedad, pH, OD, Conductividad, Temperatura, DBO ₅ , Coliformes Termotolerantes, Sólidos Totales, Fijos y Volátiles.	2 meses
Nº8	Tiempo de retención Hidráulico , se determinó a través del método de trazadores, usando “sal” para la determinación de la conductividad como variable de medición.	Conductividad	2 semanas

Fuente: Elaboración propia

3.2. UBICACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación se desarrolló en el Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos (CITRAR-FIA-UNI), puerta Nº7 de la Universidad Nacional de Ingeniería, en el distrito del Rímac departamento de Lima.

3.3. COMPONENTES DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN

El CITRAR-FIA-UNI es una planta piloto que tiene diferentes componentes que ayudan a la descontaminación de las aguas residuales provenientes de los asentamientos humanos El Milagro y El Carmen. Antes de que se bombee el agua residual al sistema de filtración, este pasa por un tratamiento primario y secundario. Luego de estos procesos es direccionado a la planta piloto de filtros lentos a través de una bomba de eje horizontal, lo cual se puede apreciar en la Imagen N° 04.

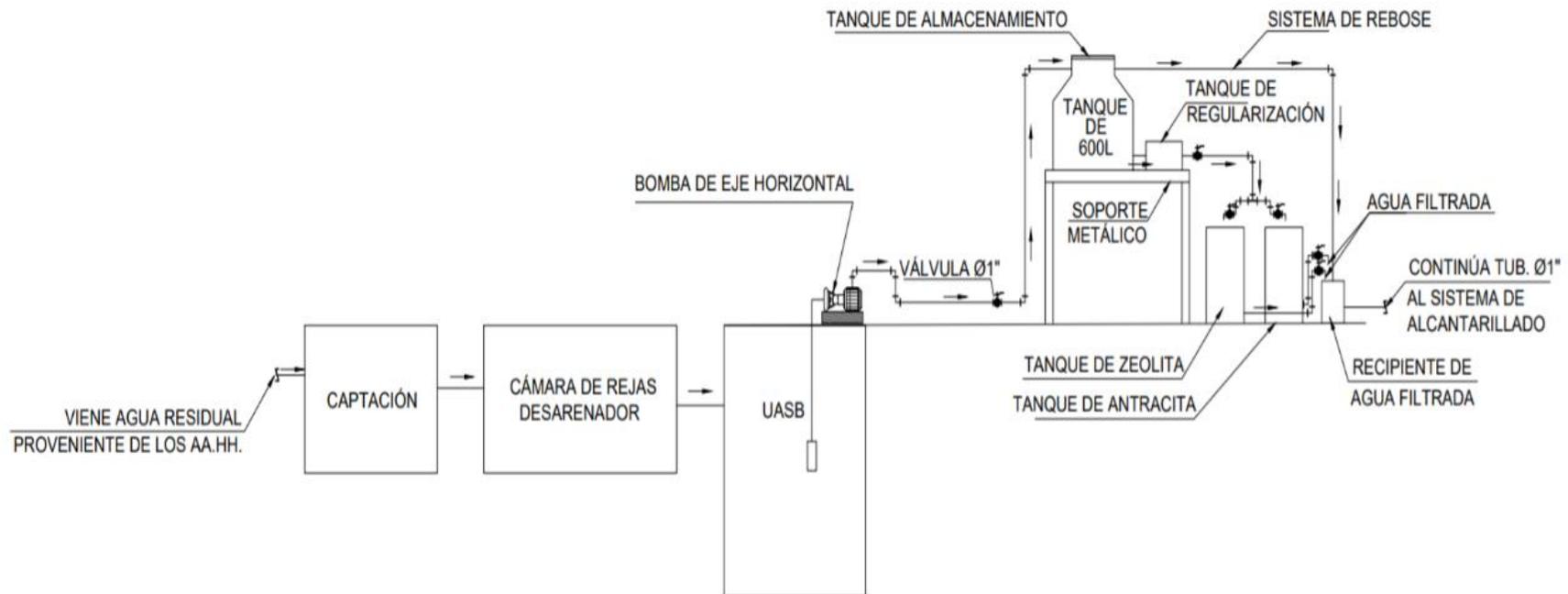
3.3.1. SISTEMA DE BOMBEO

Se usó una bomba de eje horizontal para poder impulsar el agua residual proveniente del reactor UASB del CITRAR-FIA-UNI, a un tanque de almacenamiento de 600L, el cual abastecerá a los filtros de antracita y zeolita. El bombeo se realizó a diario ya que el agua residual no viene a ser uniforme ya que, durante el día la concentración del efluente es variable, es por ello que fue necesario realizar el bombeo una vez por día.

3.3.2. SISTEMA ELÉCTRICO

El sistema eléctrico estuvo asociado a una fuente de energía, el cual generaba movimiento a una paleta giratoria, la cual estuvo instalado en el tanque de almacenamiento para así mantener homogénea la muestra de agua residual. El sistema eléctrico estuvo compuesto por un tablero eléctrico instalado en el muro de la planta piloto, una fuente de energía de 3V-24V con un amperaje de 3A, un timer (para poder realizar la programación del uso de la fuente) y un motor que produjo el movimiento de una paleta, la cual estuvo instalado en el tanque de almacenamiento.

Imagen N° 04: Esquema de las unidades que conforma el sistema de tratamiento.

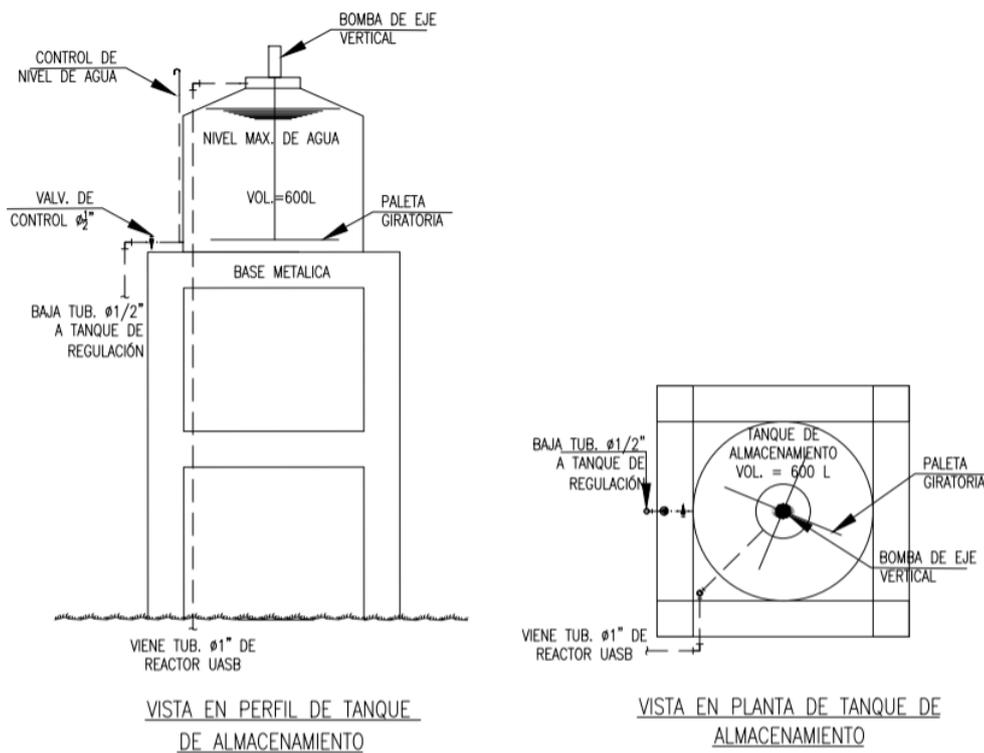


Fuente: Elaboración propia

3.3.3. SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

Para poder realizar el almacenamiento se usó un tanque de 600L, el cual fue instalado sobre un soporte metálico a una altura mayor al de los tanques de filtración, de esta manera el agua residual alimentara a los filtros de antracita y zeolita por gravedad. El tanque de almacenamiento cuenta con un sistema de control de nivel de agua, por otro lado, en caso se realice su limpieza se instaló una conexión de purga conectándolo al sistema de alcantarillado. Al tanque de almacenamiento se le instaló un sistema giratorio (incluye hélice y bomba de eje vertical) ver Imagen N° 05.

Imagen N° 05.- Tanque de almacenamiento



Fuente: Elaboración propia

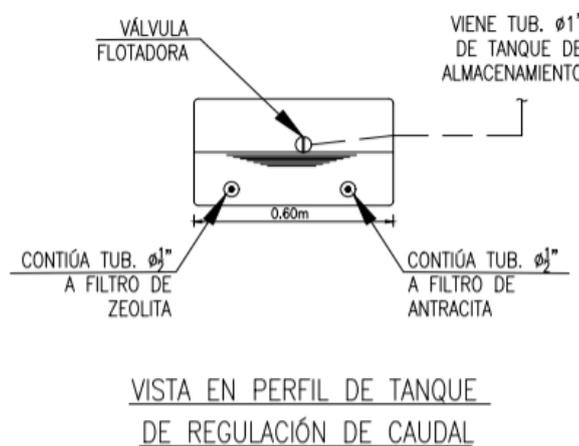
Durante la investigación fue variando el caudal de ingreso de las unidades de filtración (antracita y zeolita), por ende, hubo un requerimiento diario de parte del tanque de almacenamiento, lo cual se puede reflejar en la siguiente tabla:

Tabla N° 01. Volumen requerido por el tanque de almacenamiento

Carrera de filtración	Volumen (L/d)		Volumen requerido/día
	Antracita	Zeolita	
N°1	129.6	129.6	259.2 L
N°2	86.4	86.4	172.8 L
N°3	43.2	43.2	86.4 L

3.3.4. SISTEMA DE REGULACIÓN

Durante la investigación se consideró el cambio de las tasas de filtración, el cual se fijó como una variable para observar los cambios en las eficiencias de los filtros lentos de antracita y zeolita. Durante estos cambios de tasa de filtración se usó un sistema de regulación el cual comprende de una válvula flotadora, este permite el cierre del ingreso al momento de haber llegado a su nivel máximo (Imagen N° 06).

Imagen N° 06.- Sistema de regulación

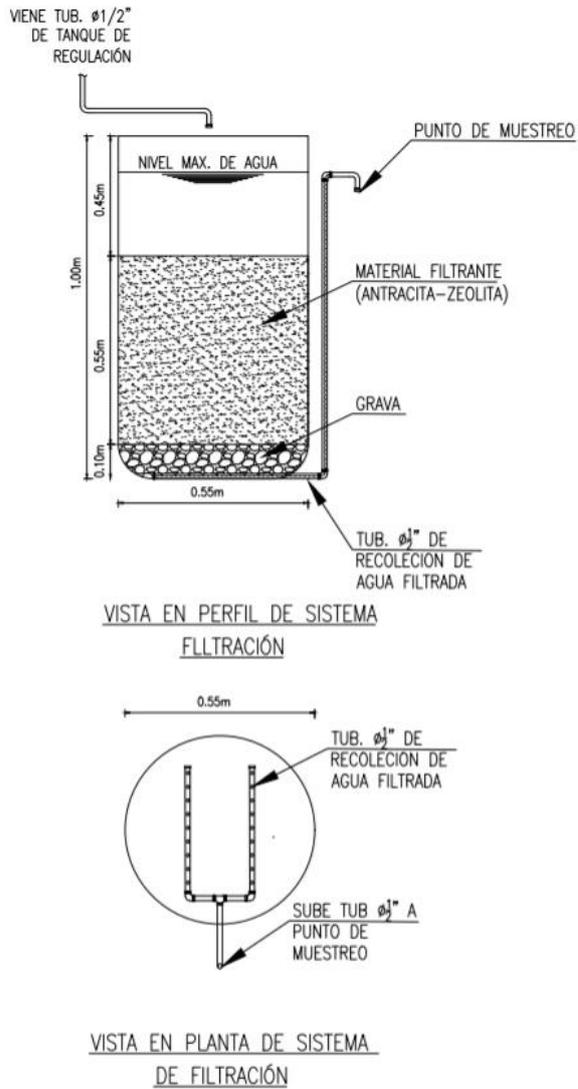
Fuente: Elaboración propia

3.3.5. SISTEMA DE FILTRACIÓN

Se tomó en cuenta 2 cilindros de capacidad 210 L (55 gal), el cual se instaló de forma paralela. La configuración para ambos fue la misma, en la base se colocó un sistema de drenaje de recolección de agua filtrada compuesta por tuberías de 1/2" PVC, al cual se le hicieron perforaciones para el drenaje de agua filtrada, por

encima se colocó grava y superior a este el material filtrante. Por otro lado, en caso haya una colmatación de los filtros se instaló una conexión al sistema de alcantarillado (ver Imagen N° 07).

Imagen N° 07.- Sistema de filtración



Fuente: Elaboración propia

Características de los recipientes:

Característica	Recipiente
Material	PVC
Tipo	Cilíndrico
Capacidad	210 L – 55 gal
Diámetro (m)	0.55
Área superficial (m ²)	0.238
Altura (m)	1.00

Fuente: Elaboración propia

3.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES GRANULARES

Para el diseño del sistema de filtración se tomaron en cuenta características de los materiales filtrantes como: porosidad, coeficiente de uniformidad, coeficiente de curvatura, tamaño efectivo, densidad aparente.

a) Densidad aparente

Antracita

- Se usó una porción de antracita de manera aleatoria, una probeta de 500 ml y una balanza calibrada.
- Para poder hallar el peso de la antracita inmerso en una probeta, se hallará la diferencia entre el peso probeta-antracita y el peso de la probeta, mediante la siguiente ecuación

$$P_a = P_x - P_p$$

Donde:

P_a = Peso de la antracita.

P_x = Peso promedio de la probeta con la antracita.

P_p = Peso promedio de la probeta de 500 ml.

- En una balanza previamente calibrada, se pesó una probeta graduada de 500 ml (4 veces)

Repetición	Peso (gr.)
1	456.75
2	456.73
3	456.76
4	456.75
P_p	456.75

$$P_p = 456.75 \text{ g}$$

- Luego se colocó la antracita dentro de la probeta hasta ocupar el volumen de 500 ml y se procedió a pesar 4 veces para obtener un valor promedio.

Repetición	Peso (gr.)
1	939.60
2	939.58
3	939.59
4	939.58
P_x	939.59

$$P_x = 939.59 \text{ g}$$

- Entonces, el peso de la antracita sería:

$$P_a = P_x - P_p$$

$$P_a = 939.59 \text{ g} - 456.75 \text{ g}$$

$$P_a = 482.84 \text{ g}$$

- Por otro lado, el volumen usado fue de 500 ml, lo equivale a 500 cm³.
Con la siguiente fórmula se obtiene el valor de la densidad aparente:

$$\rho_a = \frac{P_s}{V}$$

Donde:

ρ_a = Densidad aparente del material granular.

P_a = Peso de la antracita sin compactar.

V = Volumen ocupado por la antracita en la probeta de 500 cm³.

$$\rho_a = \frac{482.84 \text{ g}}{500 \text{ cm}^3} = 0.965 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Zeolita

- Se usó una porción de zeolita de manera aleatoria, una probeta de 500 ml y una balanza calibrada.
- Para poder hallar el peso de la zeolita inmerso en una probeta, se hallará la diferencia entre el peso probeta- zeolita y el peso de la probeta, mediante la siguiente ecuación

$$P_a = P_x - P_p$$

Donde:

P_a = Peso de la zeolita.

P_x = Peso promedio de la probeta con la zeolita.

P_p = Peso promedio de la probeta de 500 ml.

- En una balanza previamente calibrada, se pesó una probeta graduada de 500 ml (4 veces)

Repetición	Peso (gr.)
1	456.75
2	456.73

3	456.76
4	456.75
P_p	456.75

$$P_p = 456.75 \text{ g}$$

- Luego se colocó la zeolita dentro de la probeta hasta ocupar el volumen de 500 ml y se procedió a pesar 4 veces para obtener un valor promedio.

Repetición	Peso (gr.)
1	887.40
2	887.41
3	887.38
4	887.40
P_x	887.40

$$P_x = 887.40 \text{ g}$$

- Entonces, el peso de la zeolita sería:

$$P_a = P_x - P_p$$

$$P_a = 887.40 \text{ g} - 456.75 \text{ g}$$

$$P_a = 430.65 \text{ g}$$

- Por otro lado, el volumen usado fue de 500 ml, lo equivale a 500 cm³. Con la siguiente fórmula se obtiene el valor de la densidad aparente:

$$\rho_a = \frac{P_s}{V}$$

Donde:

ρ_a = Densidad aparente del material granular.

P_a = Peso de la antracita sin compactar.

V = Volumen ocupado por la zeolita en la probeta de 500 cm³.

$$\rho_a = \frac{430.65 \text{ g}}{500 \text{ cm}^3} = 0.869 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

b) Porosidad del medio filtrante

Antracita

- Se usó dos probetas de 500 ml, el primero se llenó de antracita hasta cubrir el volumen de 500 ml, luego la segunda probeta fue llenada por agua destilada.

- La probeta con antracita se compacto en la mesa 40 veces para poder cubrir los vacíos que inicialmente se presentaba.
- Seguidamente se vertió el agua destilada a la probeta con antracita hasta llegar al tope de 500 ml, de esta manera obtendremos el volumen de los poros.

Se usó la siguiente relación

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100$$

Donde:

n = Porosidad del material filtrante

V_v = Volumen de poros

V = Volumen total

Para este caso, se obtuvo los siguientes datos:

$$n = \frac{205}{500} \times 100 \qquad n = 41 \%$$

Zeolita

- Se usó dos probetas de 500 ml, el primero se llenó de zeolita hasta cubrir el volumen de 500 ml, luego la segunda probeta fue llenada por agua destilada.
- La probeta con zeolita se compacto en la mesa 40 veces para poder cubrir los vacíos que inicialmente se presentaba.
- Seguidamente se vertió el agua destilada a la probeta con zeolita hasta llegar al tope de 500 ml, de esta manera obtendremos el volumen de los poros.

Se usó la siguiente relación

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100$$

Donde:

n = Porosidad del material filtrante

V_v = Volumen de poros

V = Volumen total

Para este caso, se obtuvo los siguientes datos:

$$n = \frac{260}{500} \times 100 \qquad n = 52 \%$$

c) Análisis granulométrico

La determinación del análisis granulométrico es fundamental para conocer la distribución de tamaños de las partículas, tanto de la antracita como de la zeolita. La norma de referencia fue la ASTM D-422 y AASHTO T88, los cuales describen el procedimiento y método para determinar los porcentajes de partículas que pasan por los distintos tamices, hasta la malla de 74 mm (N° 200). De esta manera, se podrá realizar un mejor análisis en la determinación de los parámetros físico-químicos y biológicos. Para el presente análisis se tomó una muestra de un 1.0 kg tanto de la antracita como de la zeolita, cada uno fue llevado a tamizar para poder disgregarla en tamaños diferentes, las cuales quedarán retenidas en diferentes números de mallas, todo esto por 25 minutos. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla N° 02. Tamizado de la antracita

Tamiz	Tamaño de apertura (mm)	Masa retenida (gr)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
N° 8	2.380	167.390	16.739	16.739	83.261
N° 10	2.000	197.710	19.771	36.510	63.490
N° 12	1.680	161.000	16.100	52.610	47.390
N° 14	1.410	150.110	15.011	67.621	32.379
N° 16	1.190	82.310	8.231	75.852	24.148
N° 18	1.000	117.150	11.715	87.567	12.433
N° 20	0.841	58.484	5.848	93.415	6.585
N° 25	0.707	36.150	3.615	97.030	2.970
N° 30	0.595	20.080	2.008	99.038	0.962
N° 35	0.500	8.300	0.830	99.868	0.132
N° 40	0.420	0.920	0.092	99.960	0.040
N° 50	0.297	0.180	0.018	99.978	0.022
N° 70	0.210	0.050	0.005	99.983	0.017
N° 100	0.149	0.009	0.001	99.984	0.016
N° 140	0.106	0.007	0.001	99.985	0.015
N° 200	0.074	0.150	0.015	100.000	0.000
TOTAL		1000.000	100.000		

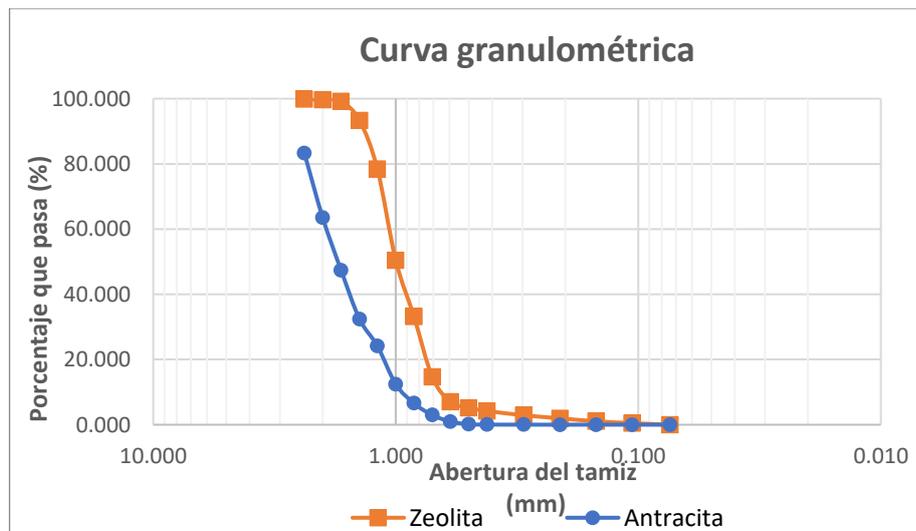
Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 03. Tamizado de la zeolita

Tamiz	Tamaño de abertura (mm)	Masa retenida (gr)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
N° 8	2.380	1.330	0.133	0.133	99.867
N° 10	2.000	2.230	0.223	0.356	99.644
N° 12	1.680	4.370	0.437	0.793	99.207
N° 14	1.410	59.300	5.930	6.723	93.277
N° 16	1.190	149.020	14.902	21.625	78.375
N° 18	1.000	279.410	27.941	49.566	50.434
N° 20	0.841	172.730	17.273	66.839	33.161
N° 25	0.707	185.230	18.523	85.362	14.638
N° 30	0.595	76.240	7.624	92.986	7.014
N° 35	0.500	18.400	1.840	94.826	5.174
N° 40	0.420	9.500	0.950	95.776	4.224
N° 50	0.297	13.180	1.318	97.094	2.906
N° 70	0.210	9.490	0.949	98.043	1.957
N° 100	0.149	9.070	0.907	98.950	1.050
N° 140	0.106	5.650	0.565	99.515	0.485
N° 200	0.074	4.850	0.485	100.000	0.000
TOTAL		1000.000	100.000		

Fuente: Elaboración propia

Con estos resultados podemos obtener las curvas granulométricas:

Figura N° 03. Curva granulométrica de la Antracita y Zeolita.

De esta manera obtendremos los coeficientes de uniformidad y de curvatura, de acuerdo al d10, d30 y d60, los cuales se resumen en la Cuadro N° 09.

Cuadro N° 09: Resumen de análisis granulométrico.

Característica del material granular	Antracita	Zeolita
Forma*	Alargada-ovalada	Esférica
D10	0.946	0.649
D30	1.353	0.825
D60	1.938	1.076
Coefficiente de Uniformidad	2.050	1.656
Coefficiente de Curvatura	1.000	0.975
Tamaño aproximado (mm)**	5 - 0.144	5 – 0.111
Porosidad %	41	52
Densidad aparente (g/cm ³)	0.965	0.869

* La forma tanto de la antracita como de la zeolita se verán en el Anexo N° 02

** El tamaño de la antracita y zeolita se podrá ver en el Anexo N° 02

3.5. MUESTRA DE DESAGUE PARA SER TRATADA

Para la presente investigación se tomó al efluente del reactor UASB para poder ser tratada mediante los filtros lentos de antracita y zeolita. En el siguiente cuadro se observa las características que tiene el agua residual del UASB del CITRAR.

Cuadro N° 10: Valores promedio de las unidades de captación y efluente UASB – CITRAR-FIA-UNI - noviembre 2019

PARÁMETRO	Captación	Efluente UASB
Ph	7.51	6.98
Temperatura (°C)	22.71	23.35
Turbiedad (NTU)	177.97	50.97
OD (mg/L)	2.29	0.61
Conductividad (µS/cm)	916.7	1174.63
DBO₅ (mg/L)	567.81	74.27
DQO TOTAL (mg/L)	1182	208
Solidos suspendidos (mg/L)	470.59	12

Fuente: CITRAR-FIA-UNI

3.6. CONDICIONES HIDRAULICAS

3.6.1. PRUEBA HIDRAÚLICA

Este procedimiento consistió en llenar de agua potable todo el sistema durante un periodo mínimo de 24 horas, todo esto con el propósito de encontrar alguna interferencia o fuga que pueda generar problemas posteriores (Fotografía N° 01).

Fotografía N° 01: Prueba Hidráulica de los sistemas de tratamiento



Fuente: Elaboración propia

3.6.2. CAUDAL

Para poder controlar el caudal al ingreso de los filtros de antracita y zeolita se usó una válvula de control para cada uno, el cual a través de una probeta de 250 ml y un cronómetro fue posible el control del caudal. Por otro lado, debido a la posible obstrucción entre las conexiones y válvulas que podría generar el efluente del reactor UASB, se realizó la calibración de las válvulas de control como mínimo 2 veces al día.

3.7. PUESTA EN MARCHA

Una vez terminado las pruebas hidráulicas y ya corrigiendo algunas fallas durante la instalación, se procedió a la puesta en marcha que no es más que el ingreso

del agua residual a la planta piloto de tratamiento. Esto se hizo mediante una bomba de eje horizontal, el cual se ubica aledaño al reactor UASB.

3.7.1. ARRANQUE DE LOS FILTROS

Durante el arranque de los filtros de antracita y zeolita se formó una capa biológica por encima del lecho filtrante. Esta capa biológica no es más que microorganismos y materia orgánica que va siendo retenida por el material filtrante. Para poder comenzar con las siguientes fases fue necesario ver la formación de esta capa biológica y de la medición de algunos parámetro físico-químicos.

3.8. PUNTOS DE MUESTRO

Para la presente investigación se realizó 3 puntos de muestreo las cuales se pueden observar en la Fotografía N° 02. La importancia de la información del punto N°1(efluente del reactor UASB) toma valor al momento de realizar la comparación con los resultados de los análisis de los puntos N°2 (filtro de antracita) y N°3 (filtro de zeolita), donde se determina la eficiencia para el proceso de filtración lenta.

Fotografía N° 02: Puntos de muestro del sistema de filtración lenta



Fuente: Elaboración propia

- 1.- El primer punto de muestreo corresponde al efluente del reactor UASB.
- 2.- El segundo punto de muestreo del agua tratada por el filtro de zeolita.
- 3.- El tercer punto de muestro corresponde al agua tratada por el filtro de antracita.

3.9. ANALISIS REQUERIDOS

3.9.1. ANALISIS FISICOQUIMICOS

3.9.1.1. TEMPERATURA AMBIENTAL

Gran parte del estudio se realizó en las estaciones de primavera y verano, donde los microorganismos actuaron con mayor rapidez en sus procesos, lo cual se reflejó en la rápida formación de la capa biológica.

3.9.1.2. TEMPERATURA DEL AGUA RESIDUAL

Si se realiza una comparación entre la temperatura del agua residual y la temperatura ambiental, podremos verificar que este último resulta mayor, lo cual se comprobó durante el monitoreo diario. La medición se realizó a diario de las muestras del efluente del reactor UASB y del agua tratada de los filtros

3.9.1.3. PH

Es importante mantener un pH estable de 6 - 8, para que los microorganismos puedan degradar la materia orgánica y así facilitar el tratamiento. Con valores mayores o menores de pH podría generarse ineficiencia en el proceso. Este parámetro se midió de manera diaria a través de un medidor de pH.

3.9.1.4. TURBIEDAD

Durante el tratamiento del agua residual es fundamental realizar la medición diaria de la turbiedad, ya que el incremento o disminución de este valor podría indicarnos lo que está sucediendo, para un caso favorable nos podría indicar que la eficiencia del proceso va en aumento.

3.9.1.5. CONDUCTIVIDAD

Debido a la presencia de sales minerales en las aguas residuales, hace que sea de importancia medir este parámetro, los elevados valores podrían afectar a los microorganismos, lo cual conllevaría a una degradación de los procesos biológicos. Se realizó la medición de este parámetro a diario de los tres puntos de medición considerados.

3.9.1.6. OXÍGENO DISUELTO

El análisis del oxígeno disuelto nos demuestra el tipo de proceso que se puede estar llevando durante el sistema de tratamiento, el cual puede ser aerobio,

anaerobio o mixto. La medición del oxígeno disuelto se realizó de manera diaria, a través de un oxímetro multiparámetro.

3.9.1.7. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO

Este parámetro se realizó en el Laboratorio de Investigación del agua, ubicado en la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería. Para su determinación se usó el método Winkler, este proceso se realizó una vez por semana.

3.9.1.8. SOLIDOS TOTALES

La determinación de sólidos totales se realizó una vez por semana, para este proceso se pesaba la cápsula, seguidamente se tomaba una muestra de agua residual y se vertía a una cápsula, esta se colocaba en una plancha de calentamiento para realizar la evaporación, seguidamente fue llevada a un horno a 105°C por espacio de 40 min. Se dejaba enfriar la cápsula en un desecador por 15 min y por último era llevado a una balanza para su pesaje.

3.9.1.9. SOLIDOS DISUELTOS

Para determinar la cantidad de sólidos disueltos, primeramente, se pesaba la cápsula, luego se realizaba la filtración del agua residual por medio de un embudo y papel filtro (tamaño 47mm), seguidamente se llevaba a un horno a 105°C por un espacio de 40 min, luego se llevaba a un desecador por 15 min.

3.9.1.10. SOLIDOS VOLÁTILES Y FIJOS

Una vez realizada el pesaje de las cápsulas de sólidos totales y disueltos, estas son llevadas a un horno de 600°C (durante una hora), seguidamente es llevado al horno a 105°C (durante 15 min), luego se lleva al desecador para eliminar la humedad y por último se realiza el pesaje.

3.9.2. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS

3.9.2.1. COLIFORMES TERMOTOLERANTES

Se utilizó el método de los tubos múltiples, el cual a partir de la formación de gas (en las campanas "Durham"), se puede confirmar su presencia. La determinación de este parámetro se realizó una vez por semana y el método que se usó fue el de "tubos múltiples" y se realizó según el Anexo N°01.

3.10. OPERACIÓN DEL SISTEMA

Cada unidad del sistema de filtración lenta tanto para los filtros de antracita y zeolita se realizó de la misma manera, cada componente tenía un proceso diferente, las actividades de operación se mencionan en el siguiente cuadro:

Cuadro N° 11: Actividades de operación del sistema de filtros lentos

Tipo de Sistema	Actividad	Descripción de la Operación	Frecuencia
Sistema de bombeo	Encendido de la bomba de eje horizontal	Se realizó la impulsión del efluente del reactor UASB, al sistema de filtración	Diario
Sistema Eléctrico	Verificación del Sistema eléctrico	Debido a que el tablero eléctrico se automatizó usando un "timer", no generó operación manual para su uso	Diario
Sistema de Almac.	Llenado de tanque de almacenamiento y verificación de las unidades	Se realizó el llenado del tanque de almacenamiento a diario, según los requerimientos de cada fase de filtración.	Diario
Sistema de Regulación	Cierre y apertura de las válvulas de control	El proceso de regulación se llevó a cabo mediante las válvulas de control, calibrándose 2 veces al día..	Diario
Sistema de Distribución	Verificación del sistema de distribución	Se realizó la verificación de este sistema de manera frecuente para poder corregirlo en caso se produzca algún inconveniente.	Diario
Sistema de Filtración	Proceso de filtración de la antracita y zeolita	El proceso se dio de manera diaria y continúa, tanto la antracita como la zeolita fueron operando de manera paralela.	Diario

Fuente: Elaboración propia

3.11. MANTENIMIENTO DEL SISTEMA

El mantenimiento de las unidades de filtración tanto de la antracita como de la zeolita se dieron de manera similar, tal como lo figura el siguiente cuadro:

Cuadro N° 12: Actividades de mantenimiento del sistema de filtros lentos

Unidad del Sistema	Actividad	Descripción del Mantenimiento	Frecuencia
Sistema de bombeo	Limpieza de línea de impulsión y bomba horizontal	Se realizó el cebado de la bomba, así como la limpieza de algunos sólidos que quedaban suspendidos en el reactor UASB.	Semanal
Sistema Eléctrico	Inspección del motor y fuente de energía	El mantenimiento de este sistema se realizó haciendo una limpieza constante.	Semanal
Sistema de Almac.	Limpieza de tanque de almacenamiento	La limpieza se realizó de manera diaria, se purgaba el volumen restante y se limpiaba paredes del tanque de almacenamiento.	Diario
Sistema de Regulación	Limpieza de tanque de regulación	Para realizar la limpieza de esta unidad se desmontaba sus accesorios y se procedía a la limpieza.	Diario
Sistema de Filtración	Raspado de filtros de antracita y zeolita	Durante cada cambio de fase se realizó el raspado de las unidades de filtración (antracita y zeolita).	Bimestral

Fuente: Elaboración propia

4. CAPÍTULO IV

OBTENCIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los tres periodos de investigación:

A) Resultados de la Primera Carrera de Filtración

Cuadro N° 13: Resultados de la Primera carrera de Filtración

Parámetro	Efluente de reactor UASB	Efluente de Antracita	Efluente de Zeolita
Temperatura (°C)	22.00 ± 1.30	21.88 ± 1.27	22.01 ± 1.30
pH	7.47 ± 0.14	7.53 ± 0.12	8.28 ± 0.10
Turbiedad (UNT)	75.97 ± 5.45	13.81 ± 1.71	12.82 ± 1.28
Conductividad (µS/cm)	1181.59 ± 52.01	1208.59 ± 54.88	1126.74 ± 63.88
Oxígeno Disuelto (mg/L)	0.09 ± 0.02	0.18 ± 0.07	0.14 ± 0.06
Sólidos Totales (mg/L)	612.67 ± 76.29	149.00 ± 23.93	109.50 ± 19.24
Sólidos Fijos Totales (mg/L)	493.00 ± 88.50	130.67 ± 18.53	98.00 ± 12.33
Sólidos Volátiles Totales (mg/L)	119.67 ± 56.77	18.33 ± 7.20	11.50 ± 7.25
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	32.75 ± 11.36	5.57 ± 1.49	4.68 ± 1.23
Sólidos Suspendidos Fijos (mg/L)	8.88 ± 2.97	1.91 ± 0.63	1.51 ± 0.70
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L)	23.87 ± 8.54	3.67 ± 1.11	3.17 ± 0.94
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	579.91 ± 78.49	143.43 ± 23.00	104.82 ± 18.47
Sólidos Disueltos Fijos (mg/L)	484.12 ± 88.06	128.76 ± 18.38	96.49 ± 12.34
Sólidos Disueltos Volátiles (mg/L)	95.79 ± 61.06	14.67 ± 6.15	8.33 ± 6.49
DBO (mg/L)	80.87 ± 15.35	42.96 ± 10.32	29.73 ± 8.12
Coliformes Termotolerantes (NMP/100 ml)	1.75E+07 ± 1.02E+07	9.98E+05 ± 9.00E+05	6.37E+05 ± 5.42E+05

Fuente: Elaboración propia

B) Resultados de la Segunda Carrera de Filtración**Cuadro Nº 14: Resultados de la Segunda carrera de Filtración**

Parámetro	Efluente de reactor UASB	Efluente de Antracita	Efluente de Zeolita
Temperatura (°C)	26.42 ± 1.54	26.39 ± 1.58	26.43 ± 1.57
pH	7.43 ± 0.16	7.7.60 ± 0.14	8.12 ± 0.15
Turbiedad (UNT)	68.03 ± 8.36	9.36 ± 1.12	8.56 ± 0.82
Conductividad (µS/cm)	1142.60 ± 48.05	1174.51 ± 54.23	1102.42 ± 50.08
Oxígeno Disuelto (mg/L)	0.10 ± 0.02	0.17 ± 0.07	0.11 ± 0.02
Sólidos Totales (mg/L)	483.33 ± 60.32	81.33 ± 11.50	60.67 ± 8.54
Sólidos Fijos Totales (mg/L)	388.67 ± 66.71	66.00 ± 14.48	54.00 ± 9.38
Sólidos Volátiles Totales (mg/L)	94.67 ± 52.80	15.33 ± 8.17	6.67 ± 4.84
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	30.67 ± 5.87	4.64 ± 0.98	3.52 ± 0.32
Sólidos Suspendidos Fijos (mg/L)	6.33 ± 1.21	1.02 ± 0.79	0.65 ± 0.53
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L)	24.33 ± 4.84	3.62 ± 0.80	2.88 ± 0.46
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	452.67 ± 59.62	76.70 ± 12.43	57.14 ± 8.66
Sólidos Disueltos Fijos (mg/L)	382.33 ± 66.82	64.98 ± 14.81	53.35 ± 9.50
Sólidos Disueltos Volátiles (mg/L)	70.33 ± 49.69	11.72 ± 8.15	3.79 ± 4.66
DBO (mg/L)	96.55 ± 3.26	28.83 ± 3.22	19.20 ± 2.38
Coliformes Termotolerantes (NMP/100 ml)	4.33E+07 ± 3.52E+07	3.95E+04 ± 1.66E+04	2.27E+04 ± 1.04E+04

Fuente: Elaboración propia

C) Resultados de la Tercera Carrera de Filtración

Cuadro Nº 15: Resultados de la Tercera carrera de Filtración

Parámetro	Efluente de reactor UASB	Efluente de Antracita	Efluente de Zeolita
Temperatura (°C)	27.80 ± 0.97	27.88 ± 0.93	27.98 ± 1.07
pH	7.13 ± 0.16	7.27 ± 0.13	7.69 ± 0.17
Turbiedad (UNT)	65.37 ± 8.99	4.17 ± 0.72	3.48 ± 0.55
Conductividad (µS/cm)	914.40 ± 76.66	944.97 ± 74.17	885.42 ± 72.80
Oxígeno Disuelto (mg/L)	0.10 ± 0.02	0.19 ± 0.07	0.15 ± 0.06
Sólidos Totales (mg/L)	455.89 ± 66.02	59.11 ± 6.76	36.67 ± 5.66
Sólidos Fijos Totales (mg/L)	282.00 ± 14.31	45.44 ± 6.11	32.11 ± 3.48
Sólidos Volátiles Totales (mg/L)	173.89 ± 76.77	13.67 ± 4.10	4.57 ± 2.33
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	25.33 ± 8.99	3.60 ± 0.92	2.13 ± 0.84
Sólidos Suspendidos Fijos (mg/L)	6.00 ± 1.92	0.88 ± 0.50	0.61 ± 0.48
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L)	19.33 ± 7.16	2.73 ± 1.40	1.53 ± 1.03
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	430.56 ± 73.03	55.50 ± 6.65	34.53 ± 5.42
Sólidos Disueltos Fijos (mg/L)	276.00 ± 13.55	44.57 ± 5.88	31.50 ± 3.53
Sólidos Disueltos Volátiles (mg/L)	154.56 ± 82.38	10.94 ± 2.96	3.03 ± 1.97
DBO (mg/L)	92.94 ± 4.75	15.27 ± 1.74	8.34 ± 1.19
Coliformes Termotolerantes (NMP/100 ml)	6.73E+07 ± 3.30E+07	2.48E+03 ± 3.20E+03	8.50E+02 ± 1.06E+03

Fuente: Elaboración propia

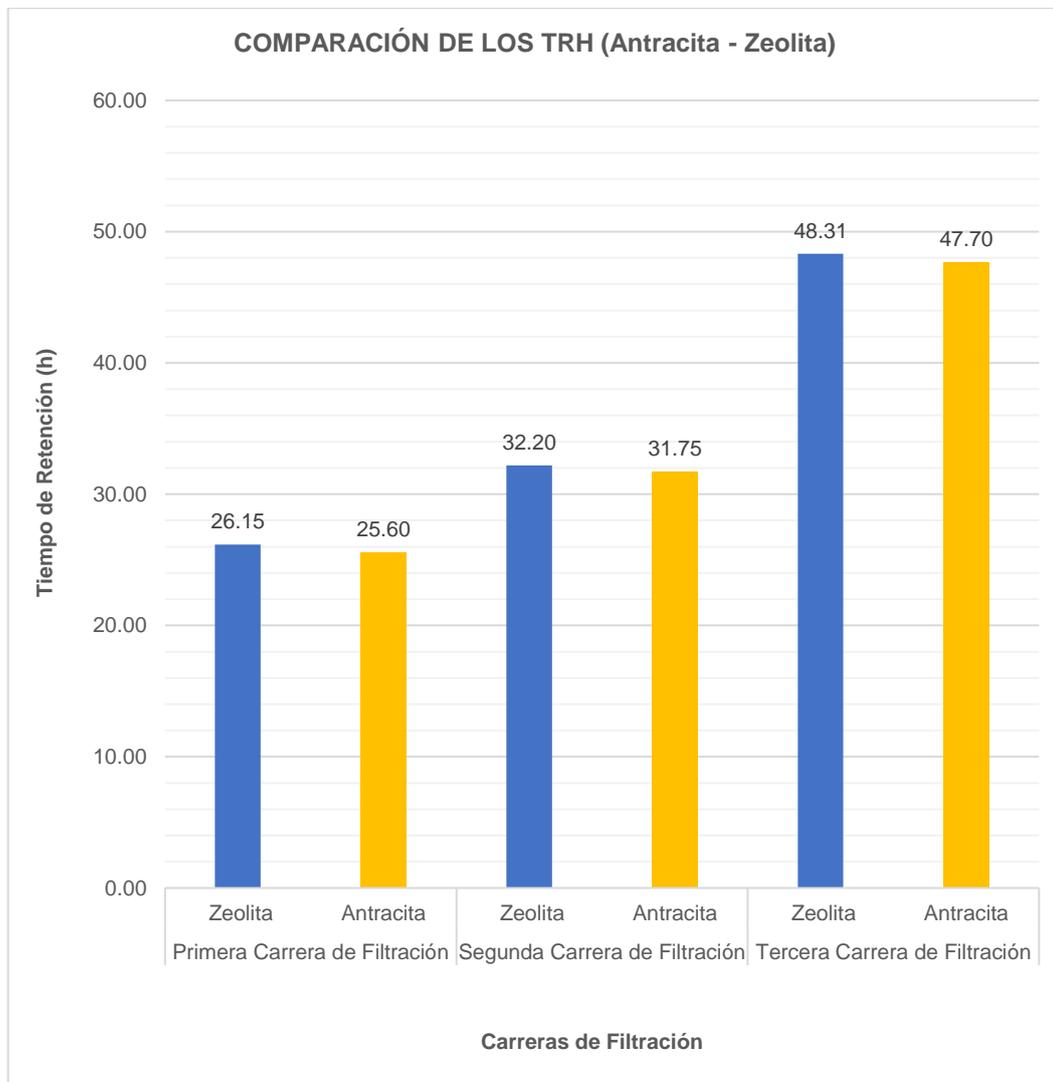
5. CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

5.1. TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO (TRH) Y TASA DE FILTRACIÓN

Respecto a la tasa de filtración, esta fue variando durante el tiempo de manera decreciente: $0.0227 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0.0151 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ y $0.0075 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$. Esta variación se puede ver en el Figura N° 04, el cual corresponde al filtro de la antracita y de la zeolita respectivamente.

Figura N° 04: Comparación de los TRH de la Antracita y Zeolita



Fuente: Elaboración propia

De los resultados mostrados, la zeolita llegó alcanzar un mayor TRH respecto a la antracita, lo que hace que haya una mayor cantidad de contacto entre la materia orgánica y el medio filtrante. Hubo una diferencia entre 25-40 min, respecto a los TRH, esto debido a que el tamaño de los granos de antracita resultó de mayor tamaño respecto a la zeolita (ver cuadro N° 09).

El Figura N° 04, muestra que la antracita tuvo un TRH, mínimo de 25.60 horas y como valor máximo de 47.70 horas, por otro lado, la antracita muestra un TRH mínimo de 26.15 horas y como valor máximo de 48.31 horas. Estos resultados se dieron gracias a que se usó cloruro de sodio, y se fue midiendo la conductividad en la salida de los filtros, de esta manera se logró determinar los TRH.

En la Figura N° 05, se puede observar la relación que se obtiene entre el tiempo de retención hidráulico, la tasa de filtración y el caudal. Se puede observar que tanto los caudales como las tasas de filtración presentan los mismos valores respecto a cada fase de filtración, esto debido a que el caudal de ingreso fue el mismo y por otro lado, el tamaño de la superficie del filtro fue el mismo para ambos, de esta manera se obtuvo una misma tasa para ambos filtros. Lo que, si no viene a ser similar, viene a ser los tiempos de retención hidráulicos, ya que esto depende directamente de las propiedades físicas del material filtrante.

Según el cuadro N°09, se puede observar la diferenciar las características físicas tanto de la antracita como de la zeolita, la cual influye en los tiempos de retención durante la filtración. Por otro lado, es importante destacar el área de contacto que tiene la antracita como la zeolita. La antracita puede filtrar partículas mayores a 15 micras, mientras que la zeolita puede filtrar partículas mayores a 5 micras (Bueno, 2015). Estos datos demuestran que la zeolita presenta una mayor área de contacto frente a la antracita, lo que le permite de cierta manera obtener mayor tiempo de retención hidráulico, logrando una mayor remoción de partículas.

Los THR pueden ser alterados en caso el sistema no presente un mantenimiento de las unidades, esto puede variar en caso se colmate el sistema, para ello es necesario tener en cuenta la limpieza del sistema de filtración. Por otro lado, se realizó el calibrado de las válvulas de control antes del ingreso a cada filtro, esto permitió que el caudal de ingreso se mantenga uniforme, de esta manera

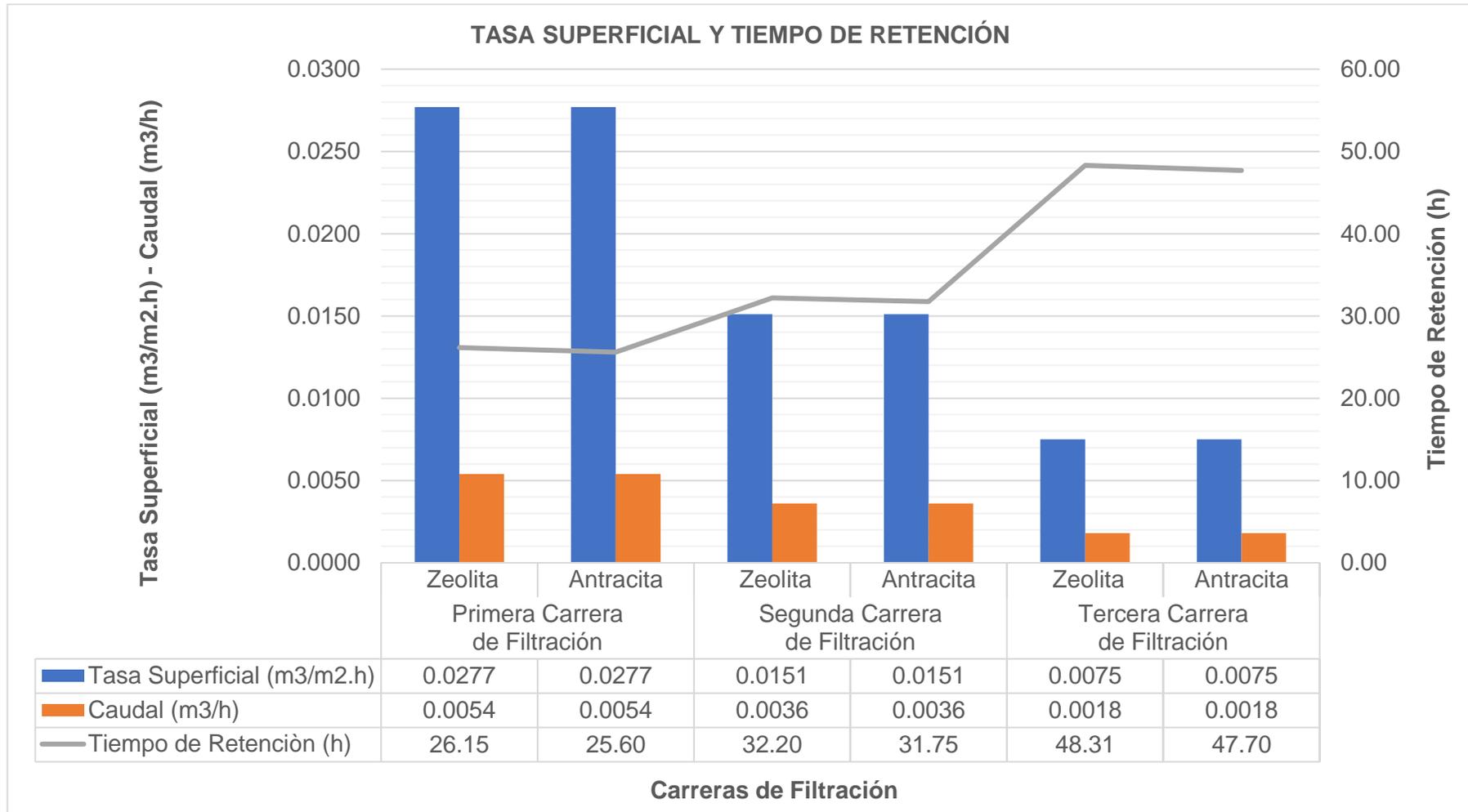


Figura N° 05: Variación del tiempo de retención hidráulico en el tiempo de monitoreo

5.2. ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO

5.2.1. TEMPERATURA AMBIENTAL Y DEL AGUA RESDUAL

La temperatura juega un rol muy importante durante el tratamiento de aguas residuales ya que este puede producir un retardo o aceleración en los procesos biológicos. Durante el proceso de investigación se realizó la medición de la temperatura 2 veces al día (mañana y tarde), El tiempo de la investigación abarcó las estaciones de primavera y verano, donde la temperatura promedio fue mayor de 18°C, lo cual favoreció al proceso biológico. En el Figura N° 06, se observa que la temperatura ambiental a partir de la segunda carrera de filtración llega a ser mayor a la temperatura del agua residual, por otro lado, la temperatura del agua filtrada y del reactor UASB, llegaron a ser similares durante todo el proceso de análisis, el cual también fue en aumento debido al cambio estacional, ya que el análisis de la investigación empezó en primavera y finalizó en verano, del año consiguiente. Las altas temperaturas promueven la rápida asimilación microbiana, lo cual justifica el alto rendimiento de los microorganismos (Carreño et al., 2018).

Por otro lado, La temperatura no se vio influenciada por la variación de las tasas de filtración, sino por el cambio estacionario.

En la Tabla N° 04, se puede apreciar los valores máximos, mínimos y promedio de la temperatura de los efluentes (antracita, zeolita y reactor UASB).

Tabla N° 04: Valores máximos, mínimos y promedio de la temperatura de los efluentes del sistema de filtración lenta de la antracita, zeolita y del reactor UASB

	Antracita	Zeolita	UASB
Valor min	18.60	18.50	18.50
Valor max	29.80	30.70	29.80
Promedio	25.39	25.48	25.42

Fuente: Elaboración propia

El incremento de la temperatura producirá mejores resultados durante el proceso de filtración, ya que el aumento de energías térmicas en los líquidos y gases promueve la difusión como mecanismo de filtración, además se produce la reducción de la viscosidad que facilita la sedimentación de las partículas de tamaño mayores hasta 1 µm (Maldonado, 2004).

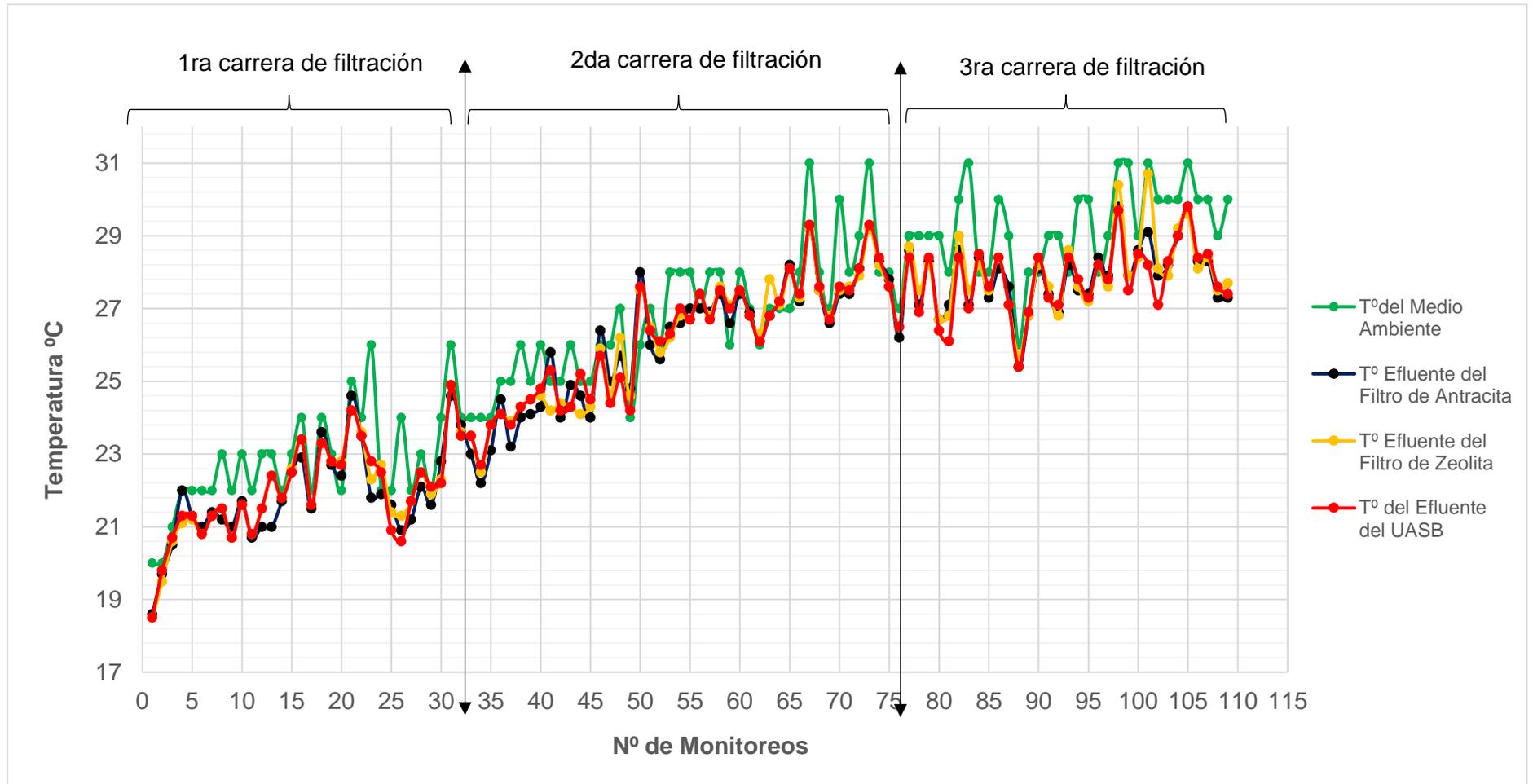


Figura Nº 06: Variación de la temperatura en el tiempo de monitoreo

5.2.2. PH

Debido a que la muestra analizada es agua residual proveniente de un asentamiento humano, conlleva a que el pH sea similar al del agua potable, por ende, este parámetro se mantuvo entre un valor promedio de 7, esto favoreció a que la actividad microbiana no se vea afectada durante el proceso de degradación de la materia orgánica. La variación de las tasas de filtración: $0.0227 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0.0151 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ y $0.0075 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, afectaron mínimamente los valores de pH.

En la Figura N° 07, se puede observar que el pH del efluente de la zeolita fue relativamente un poco mayor al efluente de la antracita y del UASB, como se muestra en la Tabla N° 05, esto debido a que la zeolita viene a tener en su composición moléculas de calcio y aluminio (aluminosilicatos), además tiene la capacidad de intercambio iónico (Dal Bosco et al.).

Por otro lado, se puede observar que el pH fue disminuyendo durante el tiempo, esto tuvo relación con el efluente del reactor UASB, ya que esta muestra fue decreciendo durante el paso del tiempo, lo cual se refleja con los valores de los efluentes tanto de la antracita como de la zeolita. Se puede mencionar que los filtros biológicos llegaron a estabilizarse a un pH neutro ya casi finalizando el proceso de investigación, esto debido a que los microorganismos tienden a equilibrar su medio, generando un mejor clima para el desarrollo de sus procesos biológicos.

Tabla N° 05: Valores máximos, mínimos y promedio del pH de los efluentes del sistema de filtración lenta de la antracita, zeolita y del reactor UASB

	Antracita	Zeolita	UASB
Valor min	7.02	7.33	6.82
Valor max	7.86	8.47	7.76
Promedio	7.49	8.06	7.36

Fuente: Elaboración propia

El intercambio iónico juega un papel importante dentro del proceso de filtración, ya que para pH menores a 7 disminuye el intercambio catiónico y aumenta el aniónico sobre las superficies positivas. Por otro lado, para pH mayores a 7, incrementa el intercambio catiónico dando por consecuencia la disminución de aniones en las superficies negativas (Maldonado, 2004). En el estudio realizado, los valores promedio de pH oscilan entre 7 y 8 según la Tabla N° 05.

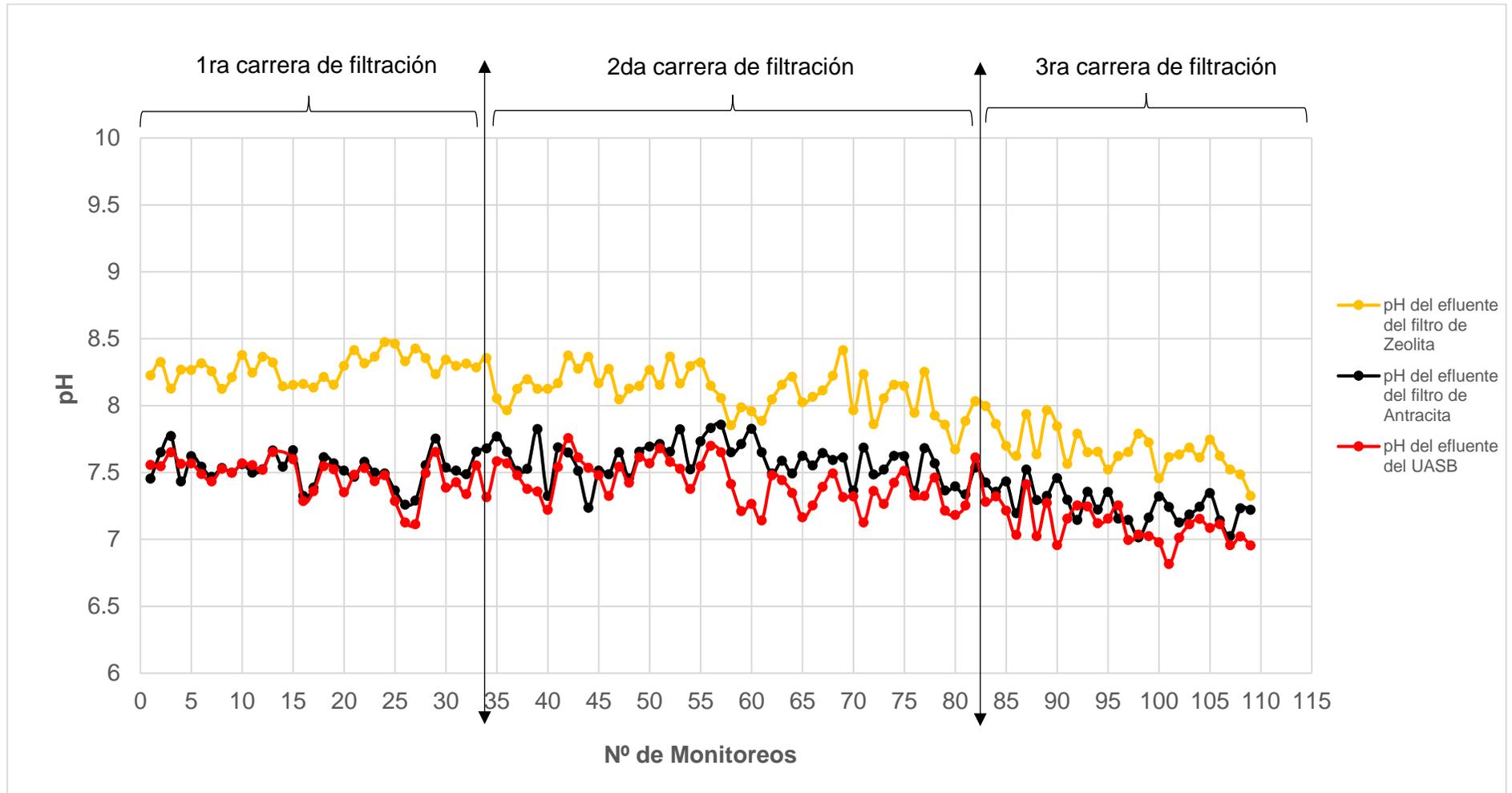


Figura Nº 07: Variación de pH durante el tiempo de monitoreo

5.2.3. TURBIEDAD

Como bien se sabe, cada carrera de filtración presenta diferente tasa de filtración, la cual va de mayor a menor y según los resultados obtenidos se puede mencionar ambos sistemas de filtración (antracita y zeolita), llegan a tener mejores resultados de remoción de la turbiedad mientras las carreras de filtración van en descenso (ver Figura N° 08). Este parámetro se vio afectado con el cambio de las tasas de filtración, lo que promovió la remoción de la turbiedad de agua residual. Tanto la antracita como la zeolita tienen propiedades en la retención de la materia suspendida, esto debido a los microporos pertenecientes según la estructura que la conforman.

Tabla N° 06: Valores máximos, mínimos y promedio de la turbiedad de los efluentes del sistema de filtración lenta de la antracita, zeolita y del reactor UASB

	Antracita	Zeolita	UASB
Valor min	3.03	2.45	39.80
Valor max	18.12	15.69	89.10
Promedio	9.32	8.49	69.78

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla N° 07, se puede observar que la zeolita tuvo un mejor resultado en la remoción de la turbiedad comparándola con la antracita durante las tres carreras de filtración propuestas en la investigación.

Tabla N° 07: Eficiencia de la turbiedad en los efluentes de los sistemas de filtración lenta de la antracita, zeolita y del reactor UASB

Material Filtrante	1ra Carrera de Filtración (Q = 90ml/min)		2da Carrera de Filtración (Q = 60ml/min)		3ra Carrera de Filtración (Q = 30ml/min)	
	A	Z	A	Z	A	Z
Eficiencia (%)	84.9	85.5	89.3	90.0	94.8	95.1

(A) = Filtro de Antracita

(Z) = Filtro de Zeolita

Fuente: Elaboración propia

La filtración lenta genera buenos resultados en la clarificación, en tanto el agua se mantenga poco cargada de materias en suspensión y se respete una pequeña velocidad final de filtración; por otro lado, en caso el agua llegase muy cargada la turbiedad de los sistemas de filtración podría elevarse (Orellana, 2005)



Figura Nº 08: Variación de la Turbidez durante el tiempo de monitoreo

5.2.3.1. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LA TURBIEDAD DE LA ANTRACITA Y ZEOLITA EN FUNCION DE LA TEMPERATURA AMBIENTE PROMEDIO

En la tabla N°08, se muestra los valores de caudal de ingreso y Temperatura (promedio) en función de las eficiencias de turbiedad de la antracita y zeolita. El caudal de ingreso presenta un descenso mientras las eficiencias van en aumento.

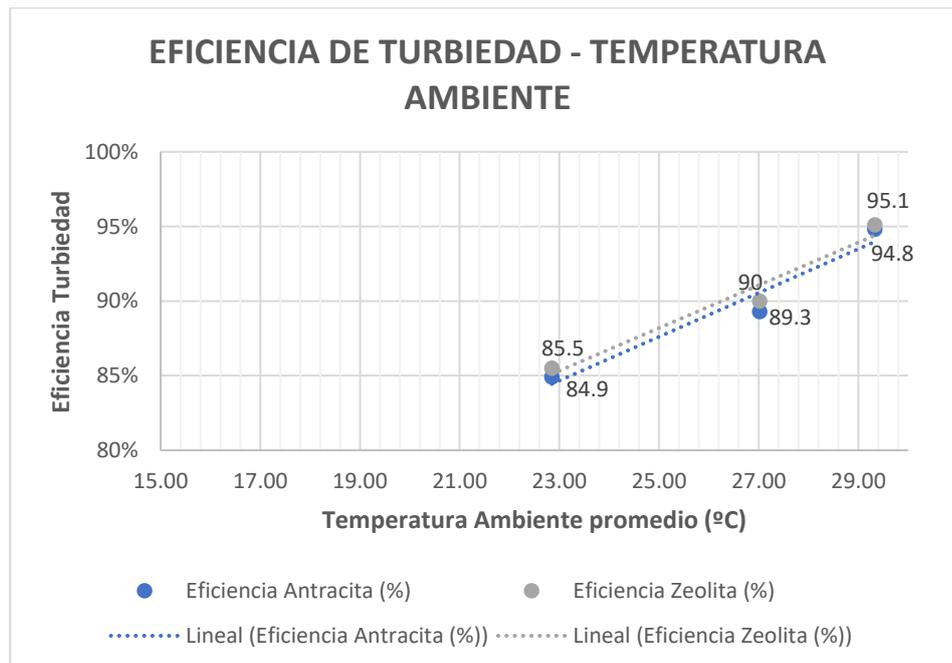
Tabla N° 08: Variación de eficiencias en la remoción de Turbiedad en función del caudal de ingreso y de la Temperatura Ambiental promedio

Caudal de Ingreso (ml/min)	Eficiencia Zeolita (%)	Eficiencia Antracita (%)	Temperatura Ambiental promedio (°C)
90	85.5	84.9	22.85
60	90	89.3	27.02
30	95.1	94.8	29.33

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la Figura N° 09, los valores de la Temperatura Ambiente promedio presentaron valores entre 15 a 30 °C, en este proceso la eficiencia de remoción de la turbiedad tanto de la antracita como de la zeolita va en aumento de manera directa al incremento de la temperatura.

Figura N° 09: Comportamiento de la Eficiencia de la Turbiedad de la antracita y zeolita en función de la Temperatura Ambiente promedio



5.2.4. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La zeolita a comparación de la antracita, maneja propiedades de intercambio que facilitan el intercambio iónico, lo cual favorece para la eliminación de minerales o iones presentes en el agua, esto se ve reflejado en los resultados obtenidos durante las 3 carreras de filtración (ver Figura N° 10). La zeolita tiene una estructura tridimensional el cual es caracterizado por la habilidad de retener y liberar agua e intercambiar cationes como Ca⁺, Mg⁺, K⁺ y NH₄ (Chica, Londoño y Álvarez, 2006). El favorecimiento de estas propiedades hace que la zeolita respecto a la antracita muestre menores valores de conductividad. La medición de este parámetro da un significado claro de la cantidad de cationes y aniones presentes en el agua residual, el desbalance de estos valores podría mostrar el ingreso de alguna sustancia que haya modificado los electrolitos presentes en el agua e indica que podría haber afecciones durante el tratamiento. Por otro lado, los valores promedios estuvieron oscilando entre 1000 a 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, según Tabla N°09.

Tabla N° 09: Valores máximos, mínimos y promedio de la conductividad de los efluentes del sistema de filtración lenta de la antracita, zeolita y del reactor UASB

	Antracita	Zeolita	UASB
Valor min	780.00	712.00	771.00
Valor max	1299.00	1234.00	1265.00
Promedio	1121.96	1050.28	1091.95

Fuente: Elaboración propia

Mientras la conductividad del agua sea menor nos indicaría mejor calidad del agua, lo cual también está relacionado con la cantidad de sólidos suspendidos y el contenido de sales presentes en el agua (Díaz, 2018). Las variaciones en los resultados de conductividad se pueden deber a los componentes químicos presentes en los materiales litológicos, como metales y sales minerales las cuales afectan el intercambio iónico y absorción, dando como resultado un aumento de la conductividad (Gómez, 2018). Por otro lado, los valores de la conductividad se vieron afectadas por la modificación de las tasas de filtración: 0.0227 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, 0.0151 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ y 0.0075 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$.

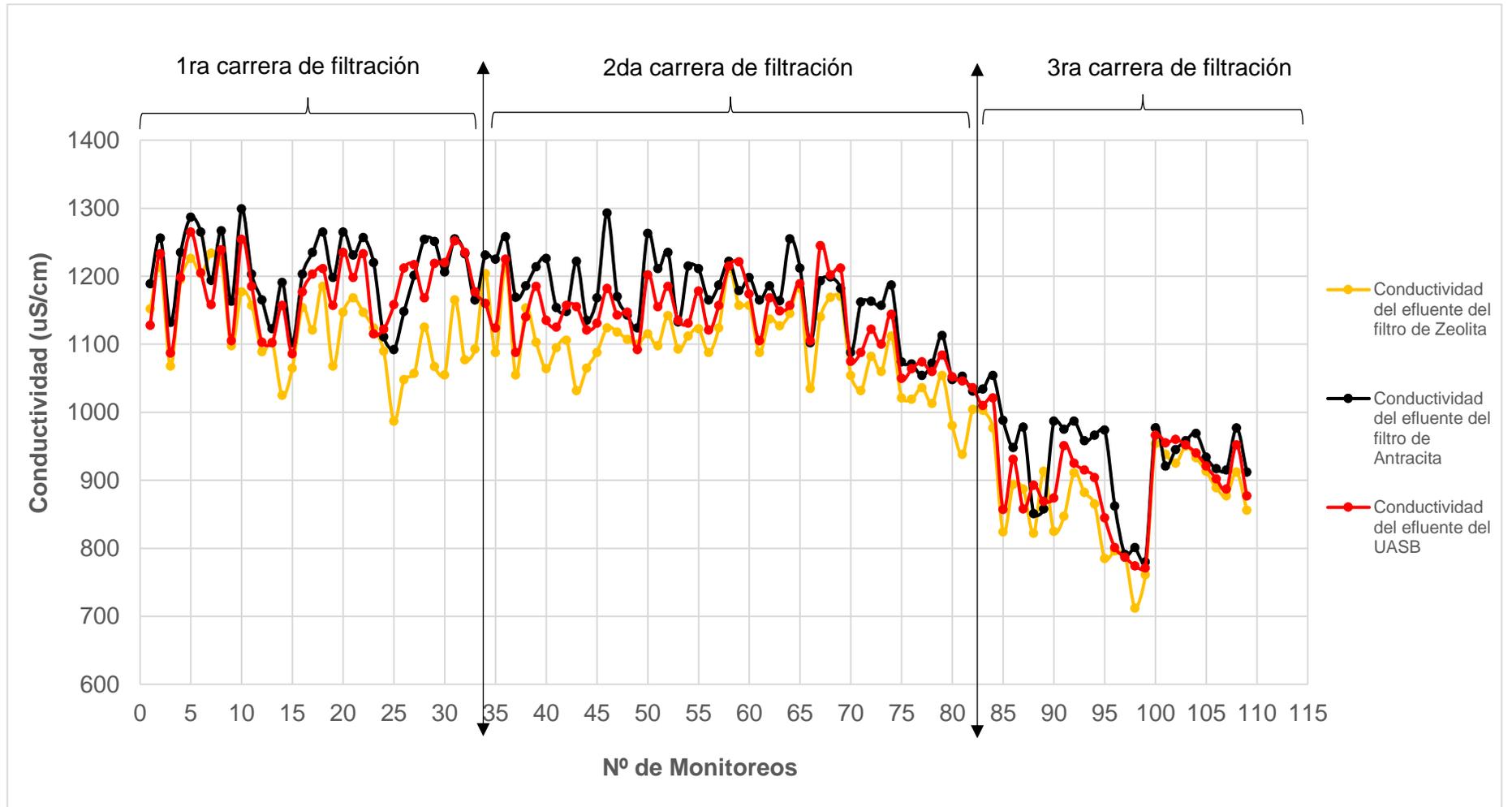


Figura Nº 10: Variación de la Conductividad en el tiempo de monitoreo

5.2.5. OXÍGENO DISUELTO

Los procesos biológicos, fueron producto de las reacciones ocurridas dentro de cada filtro lento (antracita y zeolita), donde el proceso “anaerobio” fue el que se presentó durante las 3 carreras de filtración, en ambos sistemas de filtración. La recopilación de información fue a diario (con rangos variables de minutos, por cada día), lo cual se refleja en el Figura N° 10, aquí se muestra que la variación de oxígeno disuelto se mantuvo entre 0.05 a 0.50 mg/L, lo que demuestra que desde un inicio hasta el final se llegó a mantener un proceso con ausencia de oxígeno. Según la Tabla N° 10, se puede mostrar los valores mínimos, máximos y el promedio de oxígeno disuelto, donde el promedio general estuvo en el rango de 0.10 – 0.18 mg/L.

Tabla N° 10: Valores máximos, mínimos y promedio del oxígeno disuelto de los efluentes del sistema de filtración lenta de la antracita, zeolita y del reactor UASB

	Antracita	Zeolita	UASB
Valor min	0.07	0.05	0.06
Valor max	0.44	0.35	0.18
Promedio	0.18	0.13	0.10

Fuente: Elaboración propia

El oxígeno disuelto del efluente del filtro compuesto de zeolita, muestra ganancia de oxígeno respecto al efluente del reactor UASB en un 40% aproximadamente, investigaciones precedentes confirman el incremento del oxígeno en tratamiento de efluentes por filtración con zeolitas hasta en un 7% (Guerrero, Vázquez y Rodríguez, 2018). Por otro lado, revisando los resultados del oxígeno disuelto del efluente del filtro compuesto de antracita, también se encuentra un incremento notable del oxígeno, llegando a un 60% aproximadamente, mucho mayor al de la zeolita. El proceso de degradación fue en ausencia de oxígeno, no obstante, hay muchas ventajas en este tipo de procesos, como en la baja producción de lodo, debido a que la mayoría de material orgánico se convierte en biogás, además que resulta beneficioso en el tema de instalación y en el bajo consumo de energía por la ausencia de oxígeno (Lorenzo A. y Obaya M., 2005). La variación de la tasa de filtración afectó mínimamente, a los valores de oxígeno disuelto, esto se vio reflejado en el Figura N°11.

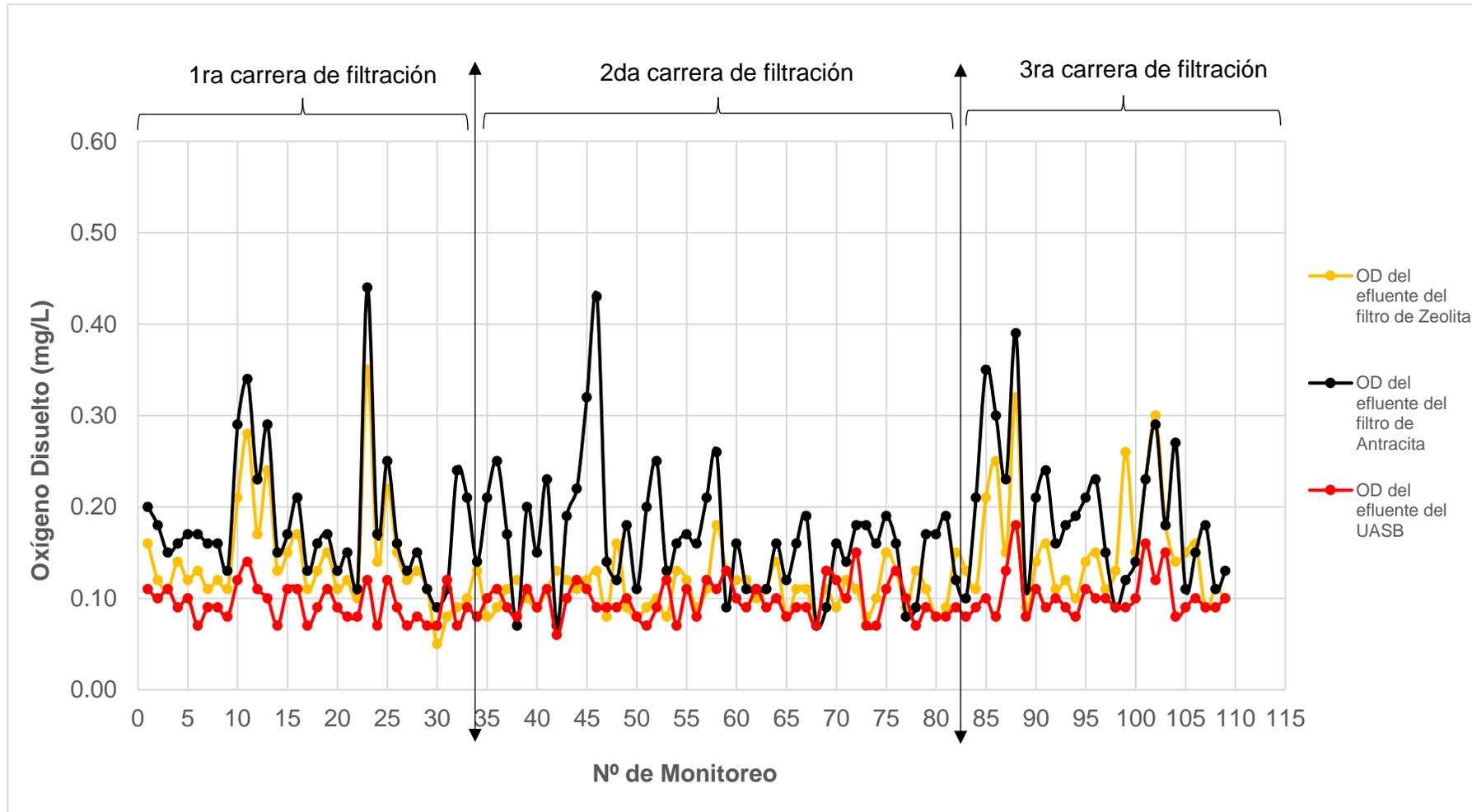
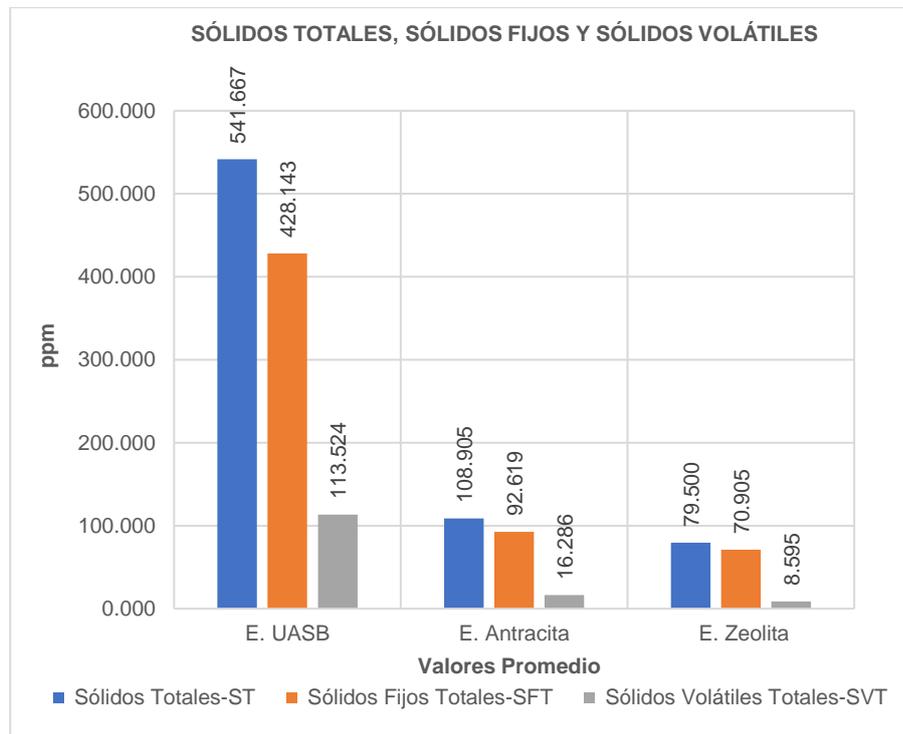


Figura Nº 11: Variación del Oxígeno Disuelto durante el tiempo de monitoreo

5.2.6. SÓLIDOS

Durante la investigación se pudo apreciar una notable disminución de los sólidos procedente del efluente del reactor UASB, usando filtros lentos de antracita y zeolita. Los resultados de remoción de sólidos fueron en aumento mientras se iba disminuyendo la tasa superficial de filtración. El efluente del reactor UASB, presentó un valor promedio de 542 mg/L, el efluente del filtro de zeolita cerca de 79 mg/L y de la antracita 108 mg/L de sólidos totales, cerca del 85% de este correspondió a los sólidos fijos y el 15% a los sólidos volátiles, para ambos efluentes aproximadamente. El efluente del filtro de zeolita tuvo mejores resultados en la remoción de sólidos totales, fijos y volátiles, respecto al efluente de la antracita, lo cual se muestra en la Figura N° 12.

Figura N° 12: Valor promedio de sólidos totales, fijos y volátiles de los efluentes del sistema de filtración lenta de antracita, zeolita y del reactor UASB



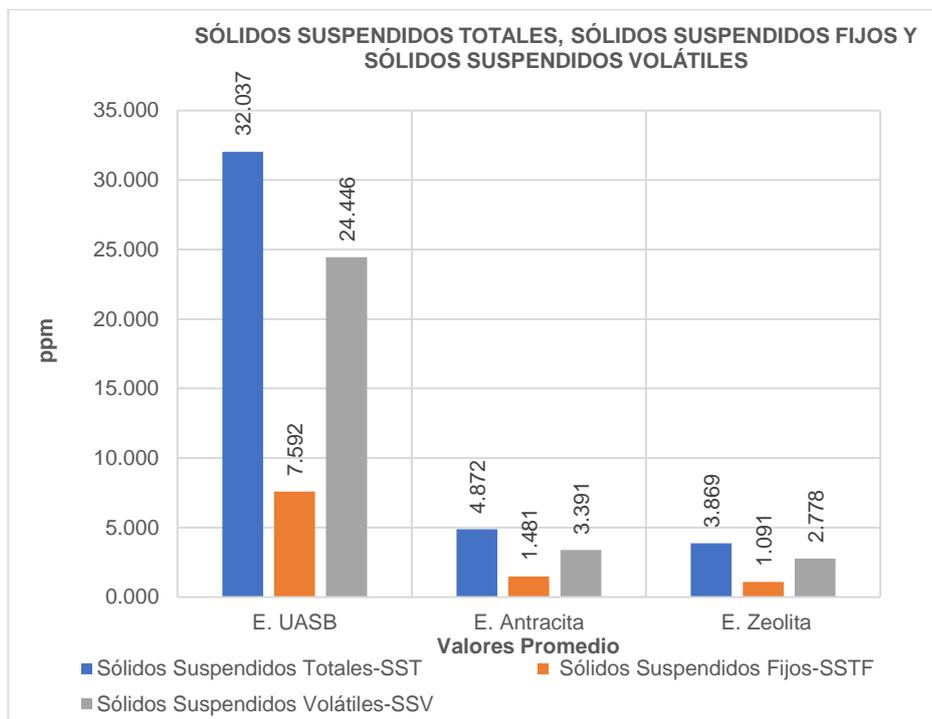
Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de remoción en base a los sólidos fijos y volátiles de la zeolita fue de aproximadamente un 93%, mientras que de la antracita fue del 88%. La porosidad y la estructura interna de cada material ayudan a la retención de la

materia orgánica, muy aparte que la capa biológica que determina una importante función en este hecho. En la filtración en profundidad actúan distintos tipos de fuerzas que provocan la retención de las partículas, además de la simple intercepción actúan fuerzas moleculares, químicas y superficiales. (Rigola, 1990).

Se puede ver la pequeña diferencia entre la antracita y la zeolita, en la remoción de sólidos suspendidos (Figura N° 13). Los sólidos suspendidos llegan a ser cerca al 5% de los sólidos totales, esto se debe a que el reactor UASB, por tener la función de tratamiento secundario (biológico) y ser un proceso aerobio elimina gran parte de sólidos suspendidos (el cual comprende gran porcentaje de lodos). Los sólidos suspendidos fijos y los sólidos suspendidos volátiles representaron aproximadamente el 26% y 74% respectivamente, respecto a los sólidos suspendidos totales, tanto para la zeolita y la antracita.

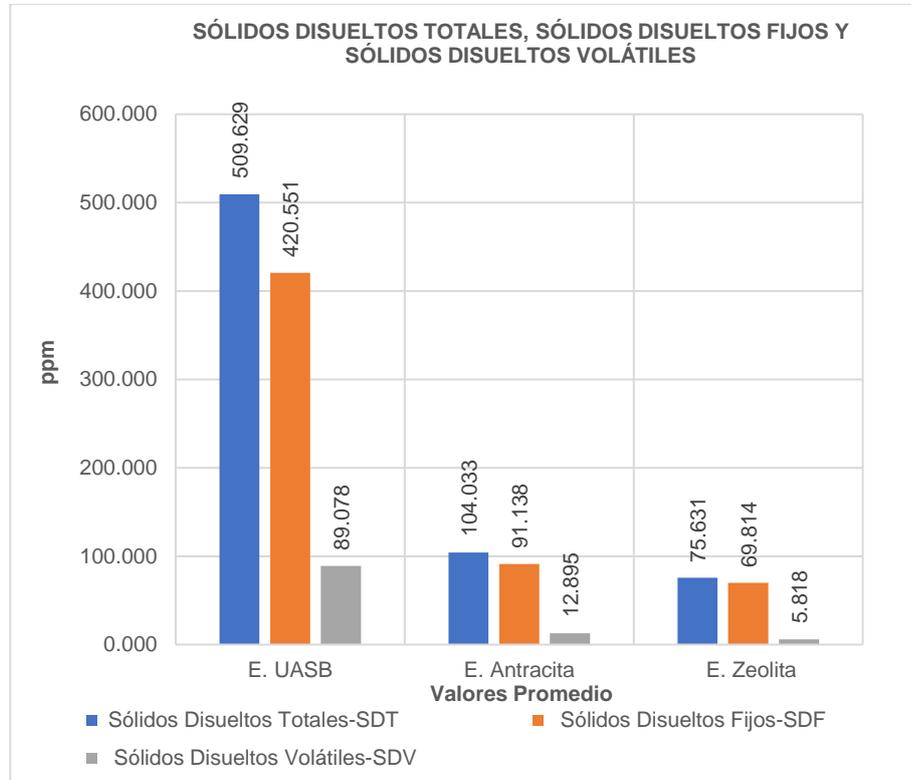
Figura N° 13: Valor promedio de sólidos suspendidos totales, suspendidos fijos y suspendidos volátiles de los efluentes del sistema de filtración lenta de antracita, zeolita y del reactor UASB



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, según los resultados expresados en la Figura N° 14, se pudo observar que el agua residual proveniente del reactor UASB tenía aproximadamente un 95% de sólidos disueltos.

Figura N° 14: Valor promedio de sólidos disueltos totales, disueltos fijos y disueltos volátiles de los efluentes del sistema de filtración lenta de antracita, zeolita y del reactor UASB



Fuente: Elaboración propia

Los Sólidos Disueltos Fijos y los Sólidos disueltos volátiles, representan aproximadamente el 87% y el 13% respectivamente, respecto a los sólidos disueltos totales. Los principales elementos que se pueden encontrar en los sólidos disueltos son las sales inorgánicas como también carbonatos, fosfatos, nitratos, cloruros y sulfatos (Roldán, 2008). El filtro de antracita y zeolita lograron reducir aproximadamente el 87% y 92% respectivamente de los sólidos disueltos totales presentes en el efluente del reactor UASB.

Hablando en términos generales, la variación que se realizó a la tasa de filtración, afectó significativamente al proceso de filtración lo cual se vio reflejado en los resultados de sólidos, al ir disminuyendo las tasas: $0.0227 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0.0151 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ y $0.0075 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, los valores de sólidos fueron mostrando mejores resultados de remoción.

5.3. ANÁLISIS BIOLÓGICOS

5.3.1. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO₅)

Para la presente investigación ambos materiales demostraron considerables resultados, logrando la remoción de la DBO₅. Para la primera carrera de filtración la antracita logró tener un porcentaje de remoción de DBO₅ en 66.41%, mientras que la zeolita logró una remoción del 78.88%, para la segunda carrera de filtración la antracita llegó a tener un porcentaje de remoción de DBO₅ en 74.03%, mientras que la zeolita logró un mejor porcentaje de remoción del 82.29%, para este caso no hubo gran variación en los resultados (comparándola con los resultados de la primera carrera de filtración, ver Figura N° 15). Para la tercera carrera de filtración se obtuvo los mejores porcentajes de remoción en ambos materiales, donde la zeolita obtuvo una remoción de DBO₅ en 92.90% a comparación de la antracita, el cual alcanzó 85.92%. Los valores más resaltantes de DBO₅, se pueden observar en la Tabla N°11.

Tabla N° 11: Valores máximos, mínimos y promedio de la demanda bioquímica de oxígeno de los efluentes del sistema de filtración lenta de la antracita, zeolita y del reactor UASB

	Antracita	Zeolita	UASB
Valor min	12.56	6.34	63.75
Valor max	53.45	41.15	100.61
Promedio	29.83	19.72	89.95

Fuente: Elaboración propia

En las tres carreras de filtración la zeolita demostró mejores resultados en la remoción de la DBO₅ comparándola con la antracita. En la investigación realizada por Ramos C., Espinosa M. y López M. (1997) a través de un proceso de tratamiento de biopelícula fijo constituido con zeolita, muestra una remoción de 94.6% de DBO₅, cercano a lo que se obtuvo en la presente investigación. Por otro lado, según Suarez S. (2014), utilizó antracita para la remoción de aguas residuales, y llegó a una remoción de 86% de DBO₅, aproximado a los resultados mostrados. Como se puede ver en la gráfica N°14, la reducción de la DBO₅ se fundamenta por la variación de la tasa superficial: 0.227 m³/m².h, 0.0151 m³/m².h y 0.0075 m³/m².h, el cual esta en función de las carreras de filtración.

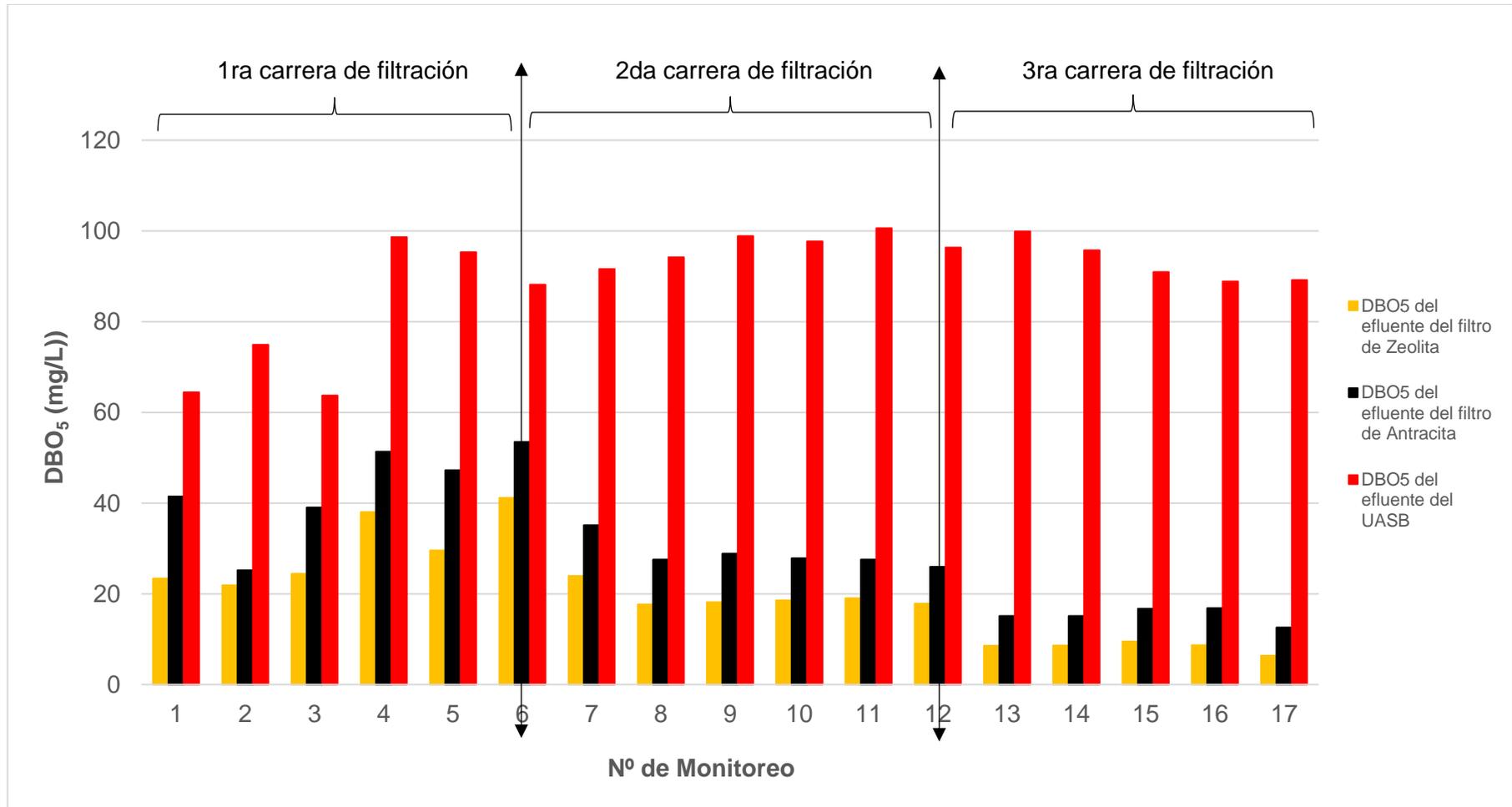


Figura Nº 15: Variación de la DBO₅ durante el tiempo de monitoreo

5.3.1.1. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LA DBO₅ DE LA ANTRACITA Y ZEOLITA EN FUNCION DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO DE INGRESO (DBO₅)

En la tabla N°12, se muestra los valores de caudal de ingreso y DBO₅ de ingreso (promedio) en función de las eficiencias de la antracita y zeolita. El caudal de ingreso presenta un descenso mientras las eficiencias van en aumento.

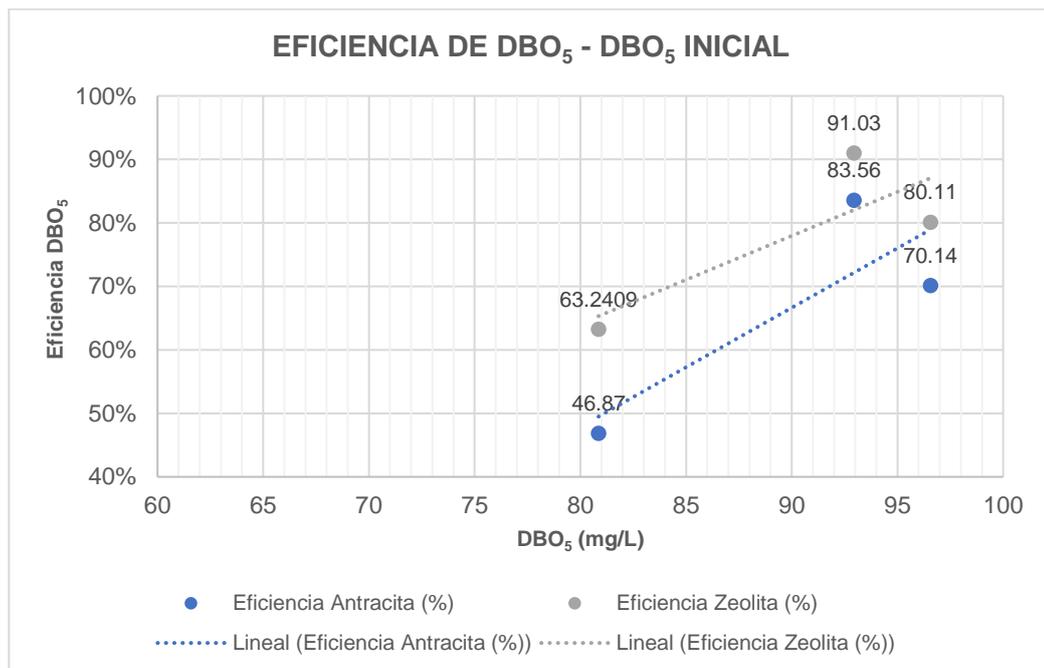
Tabla N° 12: Variación de eficiencias en la remoción de DBO₅ en función del caudal de ingreso y de DBO₅ de ingreso

Caudal de Ingreso (ml/min)	DBO ₅ Ingreso (mg/L)	Eficiencia Zeolita (%)	Eficiencia Antracita (%)
90	80.87	63.24	46.87
60	96.55	80.11	70.14
30	92.94	91.03	83.56

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la Figura N°16, los valores de la DBO₅ de ingreso presentaron valores entre 60 a 100 mg/L (los valores de la tabla representan los promedios en función al caudal de ingreso), en este proceso la eficiencia de la antracita como de la zeolita va en aumento en función de la DBO₅ de ingreso.

Figura N° 16: Comportamiento de la Eficiencia de la DBO₅ de la antracita y zeolita en función de la DBO₅ de ingreso



5.3.1.2. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LA DBO₅ DE LA ANTRACITA Y ZEOLITA EN FUNCION DE LA TEMPERATURA AMBIENTE PROMEDIO (°C)

En la tabla N°13, se muestra los valores de la Temperatura Ambiental (promedio) en función de las eficiencias de la DBO₅ de la antracita y zeolita. El caudal de ingreso presenta un descenso mientras las eficiencias van en aumento.

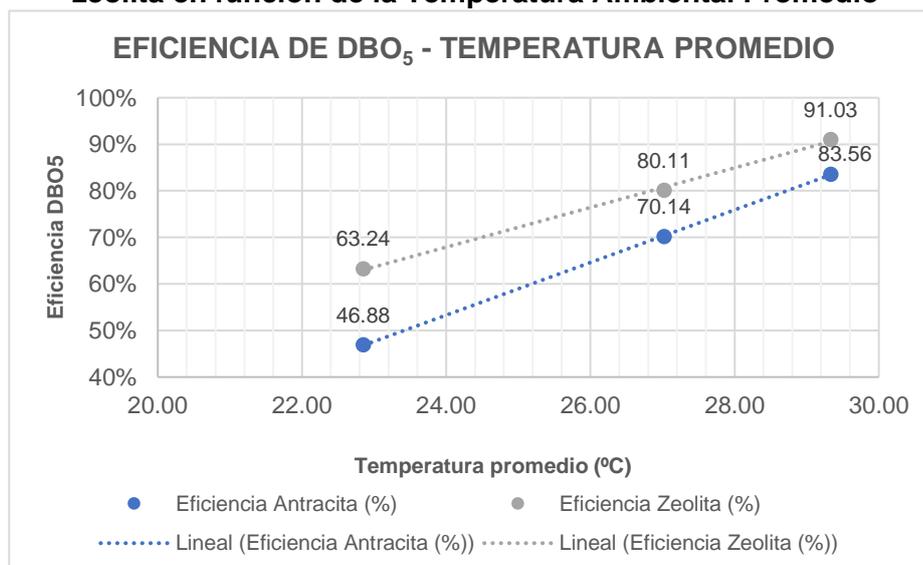
Tabla N° 13: Variación de eficiencias en la remoción de DBO₅ en función del caudal de ingreso y de la Temperatura Ambiental promedio

Caudal de Ingreso (ml/min)	Temperatura Ambiental Promedio (mg/L)	Eficiencia Zeolita (%)	Eficiencia Antracita (%)
90	22.85	63.24	46.87
60	27.02	80.11	70.14
30	29.33	91.03	83.56

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la Figura N°17, los valores de la Temperatura Ambiental promedio presentaron valores entre 17 y 31 °C (los valores de la tabla representan las temperaturas promedio en función al caudal de ingreso), en este proceso la eficiencia de la antracita como de la zeolita va en aumento en función va el incremento de la Temperatura Ambiental Promedio.

Figura N° 17: Comportamiento de la Eficiencia de la DBO₅ de la antracita y zeolita en función de la Temperatura Ambiental Promedio



5.4. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS

5.4.1. COLIFORMES TERMOTOLERANTES

El procedimiento de recuento de coliformes termotolerantes se dio mediante el método de tubos múltiples. En todo el proceso de investigación el efluente del reactor UASB, muestra valores de coliformes termotolerantes entre 10^6 - 10^8 , lo cual está por encima de los límites máximos permisibles. Al comienzo se usó una tasa de filtración de $0.0227 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, y se logró una remoción aproximada de 2 unidades logarítmicas de coliformes termotolerantes, tanto para el filtro de antracita como el de zeolita, debido a ello se fue reduciendo la tasa de filtración para el incremento de la remoción de coliformes termotolerantes. La mayor remoción se dio con una tasa de filtración de $0.0075 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ (tercera carrera de filtración, ver Figura N° 18), tanto para el filtro de antracita como de zeolita. La mayor remoción de coliformes termotolerantes fue de aproximadamente 5 unidades logarítmicas correspondiente al filtro de zeolita, mientras que la antracita logró una remoción de 4 unidades logarítmicas aproximadamente, por lo tanto, el porcentaje de remoción de la zeolita llegó a un 66.17%, mientras que la antracita logró una remoción de 59.65%..

Se han realizado investigaciones relacionadas al tratamiento de agua residuales usando membranas de carbón, para la remoción de coliformes termotolerantes, logrando una remoción de hasta el 66.66%. (Fernández A., Delgado B., Aja R. y Lubián T., 2013). Por otro lado, Larrea C. (2015), realizó una investigación referente a la aplicación de un filtro de zeolita para el tratamiento de agua a nivel domiciliario, el cual demuestra que este material remueve coliformes termotolerantes hasta en un 80%, la variante que se uso fue el tamaño de la zeolita y las dimensiones de los tanques de filtración. En otra investigación respecto el tratamiento de aguas residuales, se usó a la antracita para el proceso de filtración dando como resultado una remoción cerca al 60% de coliformes termotolerantes (Salmerón, 2017).

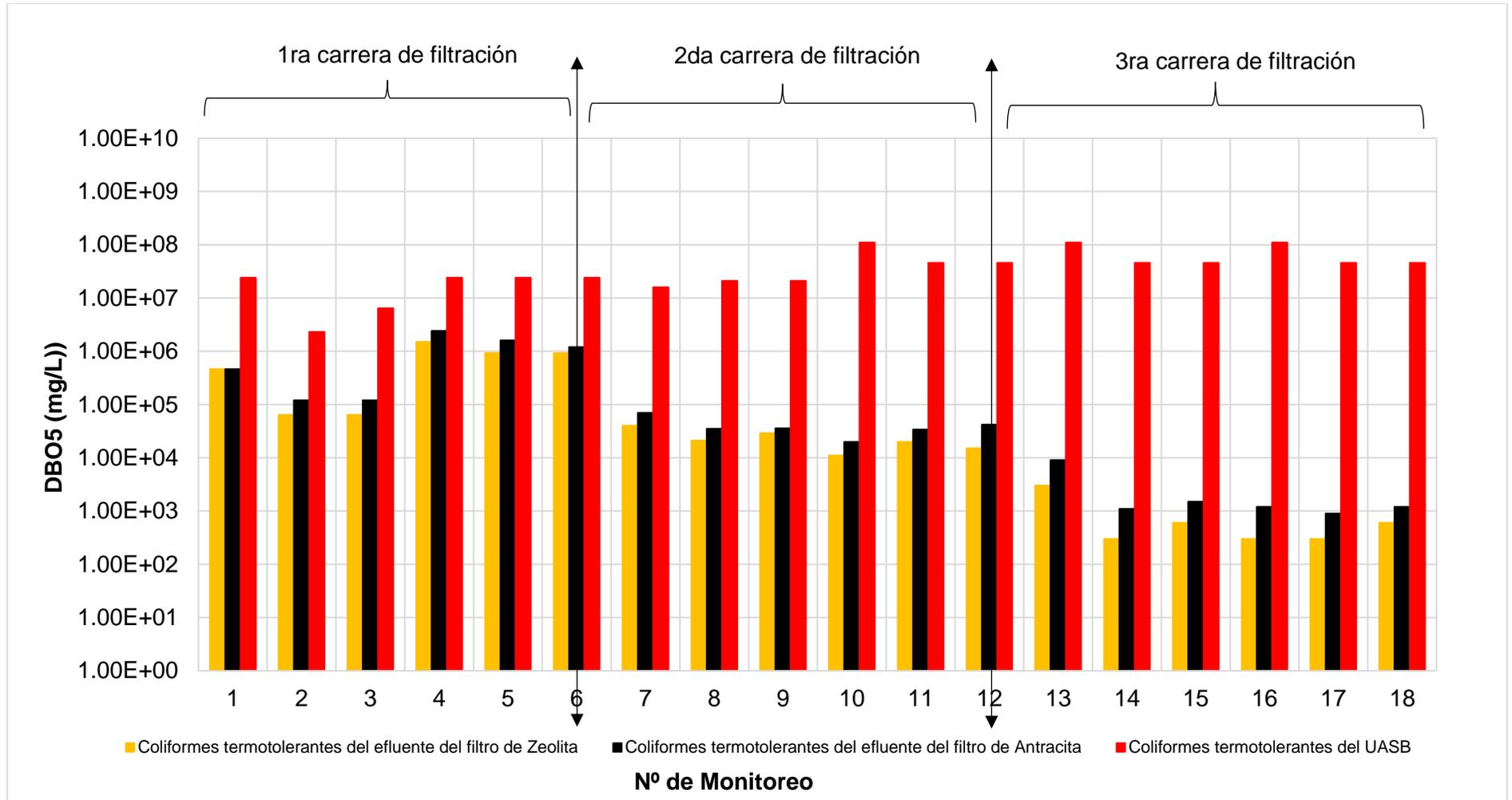
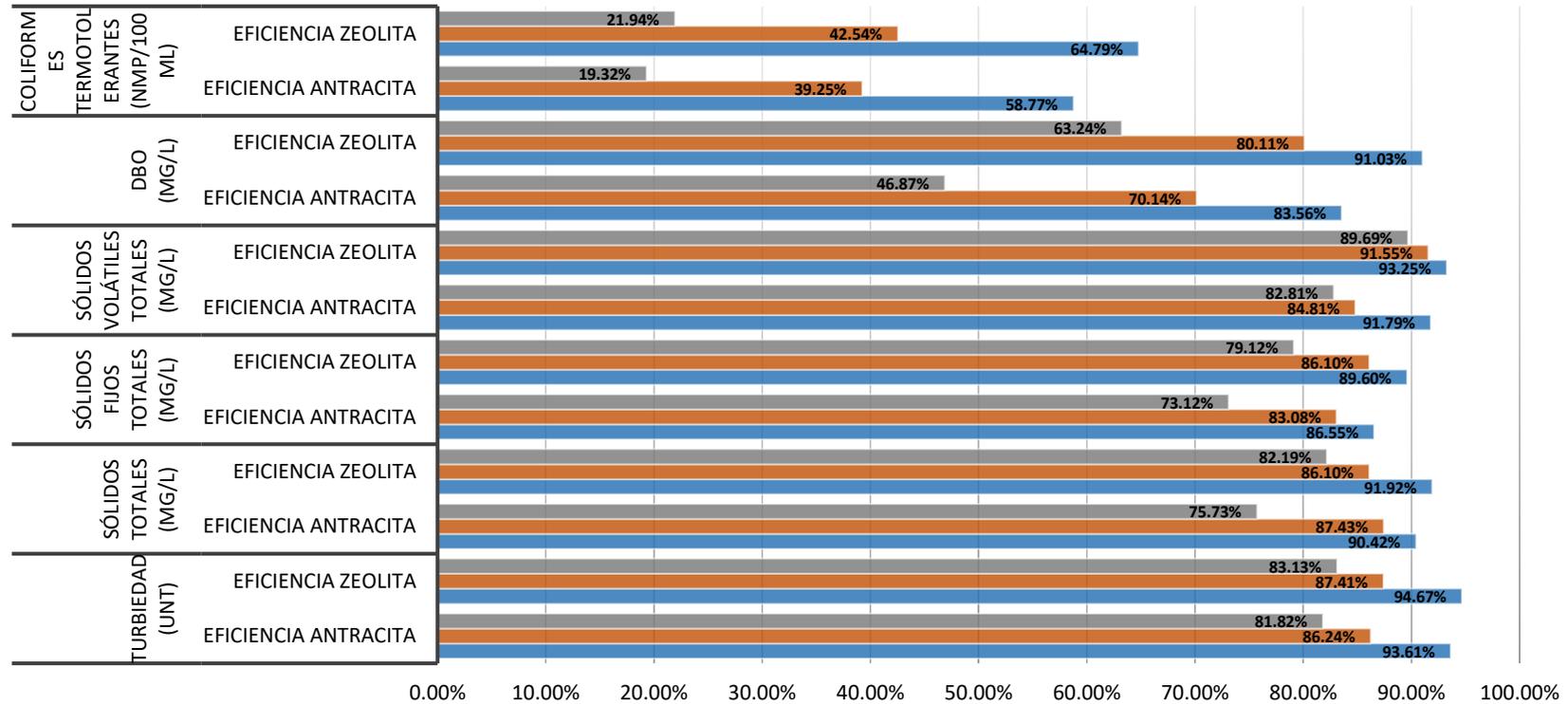


Figura Nº 18: Variación de la concentración de Coliformes Termotolerantes NMP/100 ml, durante el tiempo de monitoreo

RESUMEN DE EFICIENCIAS



	Turbiedad (UNT)		Sólidos Totales (mg/L)		Sólidos Fijos Totales (mg/L)		Sólidos Volátiles Totales (mg/L)		DBO (mg/L)		Coliformes Termotolerantes (NMP/100 ml)	
	Efficiencia Antracita	Efficiencia Zeolita	Efficiencia Antracita	Efficiencia Zeolita	Efficiencia Antracita	Efficiencia Zeolita	Efficiencia Antracita	Efficiencia Zeolita	Efficiencia Antracita	Efficiencia Zeolita	Efficiencia Antracita	Efficiencia Zeolita
■ Primera Tasa de Filtración = 0.0277 m3/m2.h	81.82%	83.13%	75.73%	82.19%	73.12%	79.12%	82.81%	89.69%	46.87%	63.24%	19.32%	21.94%
■ Segunda Tasa de Filtración 0.0151 m3/m2.h	86.24%	87.41%	87.43%	86.10%	83.08%	86.10%	84.81%	91.55%	70.14%	80.11%	39.25%	42.54%
■ Tercera Tasa de Filtración = 0.0075 m3/m2.h	93.61%	94.67%	90.42%	91.92%	86.55%	89.60%	91.79%	93.25%	83.56%	91.03%	58.77%	64.79%

Figura Nº 19: Resumen de Eficiencias de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos

6. CONCLUSIONES

- El porcentaje remoción de sólidos suspendidos totales durante las 3 carreras de filtración tanto para la antracita como para la zeolita fue mayor al 50%, dónde la antracita logró un porcentaje de remoción promedio de 84.79%, mientras que la zeolita alcanzó un 87.92%, demostrando resultados por encima al valor supuesto en la hipótesis.
- La eficiencia del proceso va depender directamente del tiempo de retención, la temperatura y el parámetro de medición. Tanto la zeolita como la antracita, presentan mejores eficiencias al ir disminuyendo las tasas de filtración el cual se puede observar en la Figura N°19.
- La temperatura ambiental, fue variando durante el tiempo, generando un incremento sustancial durante el tiempo de monitoreo, el cual favoreció en los resultados de remoción de los filtros biológicos, tanto de la antracita y zeolita, la tasa de filtración no fue motivo de la variación de la temperatura ambiental.
- El pH del efluente de antracita y zeolita fue casi neutro durante el tiempo de investigación, manteniéndose en un promedio de 7.49 y 8.06 respectivamente, hecho que fue beneficioso para los microorganismos y su acción para la degradación de la materia orgánica, esto debido a que a un ph entre 6 – 8 se obtiene una mejor condición microbiana, favoreciendo el proceso de filtración. Por otro lado, el pH del efluente del filtro de zeolita, obtuvo un valor promedio de 7.69 ± 0.17 respecto la antracita 7.27 ± 0.13 (según la tercera carrera de filtración, la cual no varía mucho respecto a las otras carreras de filtración). Esta diferencia de pH se debe a que la zeolita está compuesta de moléculas de calcio y aluminio (aluminosilicatos), lo cual le permite generar valores por encima a la antracita, según la Figura N°07.
- Respecto a la turbiedad, el porcentaje de remoción que logró obtener el filtro de antracita fue del 94.8%, mientras que el filtro de zeolita logró una remoción del 95.1%, ambos con una tasa de filtración de $0.0075 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ (tercera carrera de

filtración). Esto se debe a que para la última carrera de filtración se originó un mayor tiempo de contacto entre la materia orgánica y el material granular lo que produjo una mejor calidad del agua residual. Por otro lado, estos materiales filtrantes tuvieron mayor eficiencia en la remoción de la turbiedad en cuanto la temperatura ambiental fue en aumento, según la Figura N°09.

- En el proceso de filtración se vio la ausencia del oxígeno, lugar en donde predominó el proceso anaerobio, los resultados mostraron que el efluente del filtro de antracita obtuvo un valor promedio de 0.19 ± 0.07 mg/L, mientras que el efluente del filtro de zeolita mostró un valor promedio de 0.15 ± 0.06 mg/L (ambos para la tercera carrera de filtración), estos valores no muestran mucha variación con respecto a las carreras de filtración anteriores, (según Cuadro N°13, 14 y 15). Por otro lado, se ha visto que los procesos aerobios generan lodos como residuo, por el proceso de degradación de materia orgánica, pero para este caso no se presentó la generación de estos residuos. Se pudo ver que la variación de las tasas de filtración no afectó en gran medida los valores de oxígeno disuelto.
- La conductividad del efluente del filtro de zeolita fue menor comparado con el efluente del filtro de antracita (según Cuadro N°13, 14 y 15), esto debido a que la zeolita logra realizar intercambio catiónico Ca^+ , Mg^+ , K^+ y NH_4 , razón por la cual se presentó menores valores respecto a la conductividad.
- La composición de los sólidos presentes en el efluente del reactor UASB, presenta un 85% de sólidos fijos y un 15% de sólidos volátiles; por otro lado, los sólidos suspendidos representan el 5% de los sólidos totales, mientras que la materia disuelta cerca al 95%. Esto se vio reflejado en los resultados mostrados por el filtro de zeolita y antracita. La zeolita obtuvo un porcentaje promedio de remoción de sólidos totales de 85.32%, mientras que del filtro de la antracita fue de 79.81%. Por otro lado, respecto a los sólidos suspendidos totales, la zeolita obtuvo una remoción promedio de 87.92%, mientras que del filtro de la antracita fue de 84.79%. Por último, en base a los sólidos disueltos totales, la zeolita obtuvo una remoción promedio de 85.15% y el filtro de la antracita con 79.58%. De esta manera se podría mencionar que la variación de las tasas de filtración fueron clave

para la reducción de sólidos presentes en las aguas residuales provenientes del reactor UASB.

- El filtro de antracita logró una remoción de la DBO₅ en 83.56% y el filtro de la zeolita una remoción del 91.03%, ambos con una tasa de filtración de 0.0075 m³/m².h (tercera carrera de filtración), la cual representa el mejor resultado frente a las otras tasas de filtración anteriormente realizadas, demostrando así que la zeolita logró una mayor remoción de la DBO₅ frente a la antracita.
- Tanto la Zeolita como la Antracita, presentaron mejor eficiencia en función al aumento de la temperatura ambiental, se logró mayores eficiencias con temperaturas por encima de los 27°C, esto se refleja según la Figura N°17. Por otro lado, se evaluó la eficiencia de la DBO₅ según la DBO₅ de ingreso, donde se vio que hubo mayor eficiencia para un caudal de ingreso de 30ml/min y con valores de DBO₅ de ingreso entre 85 a 95 mg/L, según la Figura N°16.
- El uso de filtros lentos ayuda a la remoción de microorganismos como son los coliformes termotolerantes, tanto la antracita como la zeolita demuestran que los valores de cada carrera de filtración van disminuyendo mientras se va disminuyendo la tasa de filtración (según Cuadro N°13, 14 y 15). El mayor porcentaje de remoción de los coliformes termotolerantes se logró con una tasa de filtración de 0.0075 m³/m².h (tercera carrera de filtración), donde la antracita llegó a una reducción de 4.0 unidades logarítmicas, mientras que la zeolita mostró una mayor remoción, lo cual a su vez representa una reducción de 5.0 unidades logarítmicas. Estos valores demuestran que el filtro de zeolita logra tener mayor poder de retención de coliformes termotolerantes respecto a la antracita.
- Para la presente investigación se llegó a tener mejores resultados utilizando una tasa de filtración de 0.0075 m³/m².h (tercera carrera de filtración), el cual fue usado tanto para el filtro lento de antracita y zeolita. Esto se vio reflejado en los resultados mostrados en el capítulo VIII, la menor tasa de filtración produjo mayores tiempos de contacto entre el material filtrante y la materia orgánica, logrando mejores resultados de remoción.

7. RECOMENDACIONES

- Se debe realizar un correcto mantenimiento a las unidades de filtración, realizando un cronograma de limpieza de cada unidad, ya que de este depende el correcto funcionamiento del proceso de filtración.
- Para el caso de filtros lentos a través de medios granulares, se podrá ver como la eficiencia puede variar según las tasas de filtración. En estos casos se recomienda fijar tasas altas, medianas y bajas para poder diferenciar la eficiencia del proceso de filtración.
- El mantenimiento del taque de almacenamiento debería realizarse una vez a la semana removiendo toda el agua que se encuentra por encima de la capa biológica, de esta manera se podrá remover algunos huevos de mosquitos que llegan del reactor UASB.
- El raspado de los filtros de antracita y zeolita debería realizarse al momento del cambio de tasa de filtración, como manera de mantenimiento, ya que este lecho biológico puede llegar a colmatarse y afecta el proceso de filtración., en la presente investigación no hubo problemas de colmatación, ya que se siguió este procedimiento
- Debido a que el proceso biológico fue anaerobio, sería recomendable emplear un sistema que genere aireación, para poder ver la diferencia entre estos dos tipos de procesos, hecho que generaría un mayor costo, por el uso de un equipo electrógeno para la producción de oxígeno.
- Es recomendable fijar una temperatura ambiental que no varíe durante el tiempo de investigación, el cual puede darse con una temperatura promedio de 20-30 °C, de esta manera se estaría asegurando, una condición ambiental, para una eficiente degradación biológica.

- La investigación se realizó en base a las aguas residuales domesticas provenientes de un asentamiento humano, tocaría realizar alguna investigación que intervenga aguas residuales industriales, de esta manera comparar la los porcentajes de remoción de los filtros de antracita y zeolita, frente a este tipo de aguas residuales.
- Mantener un caudal constante, el cual valide el correcto funcionamiento del proceso de filtración, esto debido a que las válvulas de control, llegaban a descalibrarse, razón por la cual se realizaba una corrección diaria, de esta manera la tasa de filtración no resulto cambiante durante el tiempo.
- El proceso de filtración se dio en ausencia de la luz solar, es por ello que sería recomendable realizar un sistema de filtración que emplee la luz solar y poder ver qué beneficios o desventajas pudiera llegar a ocasionar durante el proceso de investigación.
- En la investigación realizada no se implementó un sistema de sedimentación como proceso final, ya que no se quiso alterar el efluente de los filtros de antracita y zeolita para poder determinar los porcentajes de remoción a la salida de estas unidades, lo que se recomendaría sería hacer el uso de una unidad de sedimentación como proceso final para ver el aporte que brinda esta unidad de tratamiento.
- Resulta de gran ayuda el uso de una bomba para la impulsión del agua residual proveniente del reactor UASB hacia los filtros lentos, ya que, sin el uso de esta bomba, el llenado del tanque de almacenamiento sería de manera manual, lo que causaría pérdida de tiempo y sobre cargo físico.
- Para poder adquirir los materiales filtrantes (antracita y zeolita), se debe averiguar un buen proveedor de confianza el cual tenga garantías. Por otro lado, la obtención de resultados a que sean más precisos va depender del tamizado de la muestra adquirida, ya que ello proporciona la base en el proceso de filtración.

- Se recomienda hacer el uso de una paleta giratoria unida a un motor de eléctrico, de esta manera se realiza la homogenización del agua residual dentro del tanque de almacenamiento. Esto permite que el agua que ingresa a las unidades de filtración no baje la carga orgánica proveniente del reactor UASB. En caso no se realice la instalación de esta, el tanque de almacenamiento llegaría a funcionar como una unidad de sedimentación.
- Para la instalación del sistema de distribución se recomienda el uso de tubería de PVC (así como sus accesorios), esto debido al bajo costo y su instalación sencilla. Por otro lado, se debe hacer un mantenimiento periódico para la correcta operación de la unidad de tratamiento.
- Los recipientes de los filtros de antracita y zeolita, pueden ser de PVC, el tamaño de estos va depender de la cantidad de material granular que va ingresar en este.
- La capacidad del sistema de almacenamiento, va depender de la tasa de filtración que se va a usar, así como la cantidad de unidades de filtración, por ello se pide evaluar la tasa de filtración más desfavorable, para el diseño del tanque de almacenamiento.
- Para la recopilación de las muestras, se recomienda el uso de recipientes adecuados y esterilizados, de esta manera se evitaría la posibilidad en la contaminación de las muestras recopiladas.
- Los equipos para la medición de ciertos parámetros, deben estar calibrados, la alteración de datos puede conllevar a un análisis errado, dando como resultado valores sin ningún significado o conclusiones falsas.
- El uso de materiales de protección como son los guantes, mandiles y lentes de protección, debe realizarse al momento del muestreo, como para el momento de análisis de este, esto debido a que la posibilidad de contaminación por el uso de aguas residuales puede ser perjudicial para la salud.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barzola, C. (2010). “*Estudio del uso de Filtración Lenta en la Remoción de Coliformes Termotolerantes del Efluente del Sistema de Humedales Artificiales – Planta Unitrar*”. (Trabajo Fin de Grado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Bueno, J. (2015). *Filtración Eficiente del Agua: Para una mejor Calidad de Vida en las Poblaciones*. Revista de Saneamiento Ambiental en México. Recuperado de: <https://aguayambiente.com/2015/07/13/filtracion-eficiente-agua/>
- Bosch, P. y Schifter, I. (1988). *La Zeolita una Piedra que Hierve*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Chica, F., Londoño, L. y Álvarez, M. (2006). *La zeolita en la mitigación ambiental*. Revista Lasallista de Investigación, vol. 3, 30-34.
- Cristóbal, F. (2005). *Descripción Hidráulica de la Batería de Filtros de Planta N° 01 de la Atarjea*. (Trabajo de Fin de Grado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Carreño, A., Lucas, L., Hurtado, E., Maestre, R. y Acuña, R. (2018). *Eficiencia de microorganismos y zeolitas en la corrección de propiedades químicas de agua de la microcuenca del Río Carrizal, Ecuador, 68, 22-44*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/344616358_Eficiencia_de_microorganismos_y_zeolitas_en_la_correccion_de_propiedades_quimicas_de_aguas_de_la_microcuenca_del_Rio_Carrizal_Ecuador_Efficiency_of_microorganisms_and_zeolites_in_the_correction_of_the
- Díaz, K. (2018). *Evaluación del comportamiento de materiales alternativos para lechos filtrantes en procesos de potabilización de agua*. (Trabajo de Fin de Grado). Universidad Católica de Colombia, Colombia.

- Fernández A., Delgado B., Aja R. y Lubian T. (2013). *Desarrollo de Membranas de Carbón para Procesos de Tratamiento de Agua*. Centro Investigaciones Industria Minero Metalúrgica, Cuba.
- Gómez, G (2018). *Diseño de un filtro para reducir la turbidez de aguas residuales utilizando material litológico como medio filtrante.*, (Trabajo de Fin de Grado). Universidad de Guayaquil, Ecuador.
- Guerrero, M., Vázquez, A. y Rodríguez, M. (2018). *La zeolita en la descontaminación de aguas residuales*, 2, 109-117. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/328052604 LA ZEOLITA EN LA DE SCONTAMINACION DE AGUAS RESIDUALES](https://www.researchgate.net/publication/328052604_LA_ZEOLITA_EN_LA_DE_SCONTAMINACION_DE_AGUAS_RESIDUALES)
- Giraldo, E. y Blas, W. (2008). *Minería actual del carbón en el norte del Perú*. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG, 10(20):76-81
- Godoy, S. (2013). *“Depuración de Aguas Residuales Domésticas por Adsorción Química en Material Reciclado”* (Tesis Fin de Grado). Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- López, C., Buitrón, G., García, H. y Cervantes, F. (2008). *Tratamiento Biológico de Aguas Residuales: Principios, Modelación y Diseño*. IWA Publishing, Reino Unido.
- Larrea C. (2015). *Aplicación de un Filtro de Zeolita para Potabilización del Agua nivel domiciliario sitio Palestina Cantón el Guabo Provincia el Oro*. (Trabajo de Fin de Grado). Universidad Técnica de Machala, Ecuador.
- Lorenzo, Y. y Obaya, M. *La digestión anaerobia: Aspectos teóricos-Parte 1*. Revista ICIDCA, Tomo 39, N.º 1, pp. 35-48.
- Maldonado, V. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de Filtración rápida* (Tomo II). Lima – Perú: CEPIS/OPS.

- Mendiola, A., Aguirre, C., Chero, Y., Churampi, N., Quispe y J., Sedano, R. (2013). *Explotación del carbón antracita: Viabilidad del Yacimiento Huarday-Ambara*. Esan Ediciones, Lima, Perú.
- Metcalf & Eddy (2013). *Ingeniería de Aguas Residuales Tratamiento, Vertido y Reutilización* (5th ed). New York McGraw-Hill, Inc.
- Orellana, A. (2005). *Tratamiento de las Aguas*. Facultad Regional Rosario, Universidad Nacional Tecnológica, Argentina.
- Pedroza, L. (2017). *Evaluación del Uso de Agua Residual Doméstica como Sustrato para el Tratamiento de Aguas Residuales de Gram empleando un Sistema Biológico a Escala de Laboratorio*. (Trabajo de Fin de Grado). Universidad De La Salle, Bogotá, Colombia.
- Ramos C., Espinosa M. y López M. (1997). *Diseño y Evaluación de una Planta Piloto de Tratamiento de Agua Residuales Biotecnológicas*. Departamento de Estudios sobre Contaminación Ambiental del Centro Nacional de Investigación Científica de Cuba.
- Rigola, M. (1990). *Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y Residuales*. Colombia, Marcombo.
- Rodas, M. y Tuesta, M. (2018). *Aplicación de una batería de filtros empacados en zeolita (Clinoptilolita), para la remoción de hierro y manganeso del agua de la microcuenca Juniguillo la Mina a escala piloto Moyobamba*. (Trabajo de Fin de Grado). Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú.
- Roldán, G. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical (2da ed.)*. Colombia, Universidad de Antioquía.
- Rosas, R. y Ugaz, J. (2014). "Tratamiento de Aguas Residuales por Medio de Filtros de Arena para la Remoción de Coliformes Termotolerantes". (Trabajo de Fin de Grado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

- Suarez, S. (2014). *Diseño de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales provenientes de las descargas de un Centro Comercial de la ciudad de Quito mediante procesos de electrocoagulación y adsorción en carbón activado.* (Trabajo de Fin de Grado). Universidad Politécnica Nacional, Ecuador.
- Salmerón, S. (2017). *Evaluación del carbón Antracita y de la Eichhornia Crassipes como medio filtrante y de soporte, respectivamente, en el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas.* Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México.
- Vargas, M. (2017). *Análisis de la Zeolita como Material Filtrante en el Tratamiento de Aguas Residuales Provenientes de la Curtiembre "PROMACC" Ubicada en la Ciudad de Ambato Provincia de Tungurahua,* (Trabajo de Fin de Grado). Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.
- Zhang, T. and Noike, T. (1994). *Influence of retention time on reactor performance and bacterial trophic populations in anaerobic digestion processes.* Water Research, 28(1), 27-36.

9. ANEXOS

9.1. ANEXO Nº 01: PANEL FOTOGRÁFICO

A) POROSIDAD Y DENSIDAD



Fotografía Nº 03: Determinación de la Densidad y Porosidad - Antracita



Fotografía Nº 04: Determinación de la Densidad y Porosidad- Zeolita

B) GRANULOMETRÍA DE LA ZEOLITA Y ANTRACITA

Fotografía N° 06: Pesado de una muestra de Antracita para la Determinación de su Granulometría

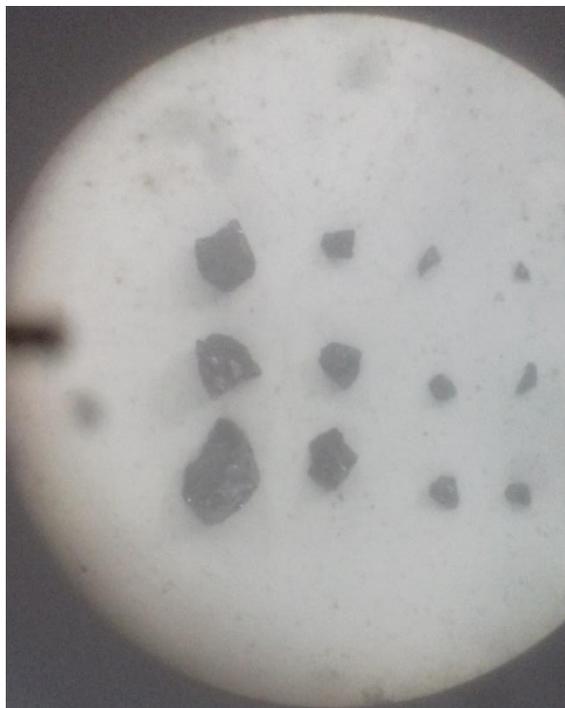


Fotografía N° 07: Pesado de una muestra de Zeolita para la Determinación de su Granulometría

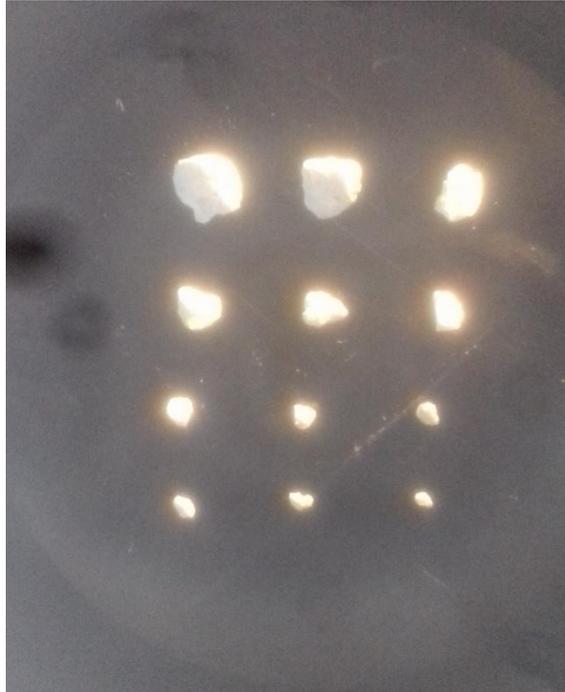


Fotografía N° 08: Tamizado de las muestras de Antracita y Zeolita

C) FORMA Y TAMAÑO DE LA ZEOLITA Y ANTRACITA



Fotografía N° 09: Forma y tamaños de la muestra sacada durante el tamizado de Antracita



Fotografía N° 10: Forma y tamaños de la muestra sacada durante el tamizado de Zeolita

D) INSTALACIÓN DEL SISTEMA PILOTO



Fotografía N° 11: Instalación del tanque de almacenamiento y tanque de regulación



Fotografía N° 12: Instalación de la Zeolita con una altura de 0.55m de altura y radio de 0.55m



Fotografía N° 13: Instalación de la Antracita con una altura de 0.55m de altura y radio de 0.55m