

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA MEDIANTE LA
TECNOLOGÍA MBBR DEL AGUA RESIDUAL PROCEDENTE DE UNA
PLANTA DE CERVEZA ARTESANAL”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

AUTORES

FRANCISCO, VELA HUAMAN

JAVIER ALESSANDRO, REVOREDO CORNEJO

OSCAR EDUARDO PARZIVAL, MANCO CUEVA

ASESOR

Dr. LUIS CARRASCO VENEGAS

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Callao, 2023

PERÚ

PRÓLOGO DEL JURADO

La presente Tesis fue sustentada por los Bachilleres **FRANCISCO VELA HUAMAN, JAVIER ALESSANDRO REVOREDO CORNEJO y OSCAR EDUARDO PARZIVAL MANCO CUEVA** ante el Jurado de Sustentación de Tesis conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

ING° PABLO BELIZARIO DIAZ BRAVO	Presidente
ING° LEONARDO FELIX MACHACA GONZALES	Secretario
ING° SANTOS PANTALEÓN RODRIGUEZ CHIQUIMANGO	Vocal
ING° LUIS AMERICO CARRASCO VENEGAS	Asesor

Tal como está asentado en el Libro de actas N° 1 Folio N° 114 y Acta N° 113 de fecha 29 de abril del 2023, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Tesis con Ciclo de Tesis, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 27 del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Callao, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 099–2021–CU del 30 de junio de 2021

INFORMACIÓN BÁSICA

FACULTAD: Ingeniería Química

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN: De la Facultad de Ingeniería Química

TÍTULO:

“Eficiencia de remoción de la carga orgánica mediante la tecnología MBBR del agua residual procedente de una planta de cerveza artesanal”

AUTORES

Francisco, Vela Huaman

Código ORCID 0000-0003-4896-2017 / DNI 70021122.

Javier Alessandro, Revoredo Cornejo

Código ORCID 0000-0003-2739-3783 / DNI 47642050.

Oscar Eduardo Parzival, Manco Cueva

Código ORCID 0000-0002-9062-9464 / DNI 46621534.

ASESOR

Dr. Luis Carrasco Venegas

Código ORCID 0000-0002-7832-3366 / DNI 25825871.

LUGAR DE EJECUCIÓN

Laboratorio de Soluciones Químicas Ambientales (SQA), Los Olivos, Lima.

UNIDAD DE ANÁLISIS

Agua residual procedente de una industria de cerveza artesanal.

TIPO / ENFOQUE / DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Aplicada / Cuantitativo / Experimental

TEMA OCDE: Ingeniería de procesos.

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

Mg. Diaz Bravo, Pablo Belizario	Presidente
Mg. Machaca Gonzales, Leonardo	Secretario
Mg. Rodriguez Chuquimango, Santos	Vocal
Dr. Trujillo Perez, Salvador Apolinar	Suplente
Dr. Carrasco Venegas, Luis Américo	Asesor

Libro de actas N°: 1 Folio N° 114 Acta N°: 113

Fecha de aprobación de la tesis: 29 de abril del 2023

DEDICATORIA

Le dedicamos el resultado de este trabajo a todos los miembros de nuestra familia en especial a nuestros padres, que nos apoyaron a lo largo de nuestra etapa de estudiantes y universitarios, nos sostuvieron en los momentos malos y en los menos malos. Gracias por enseñarnos a afrontar todas las dificultades que se presentaron sin perder la cabeza ni darnos por vencido.

Nos enseñaron a ser las personas que somos hoy, nuestros principios, nuestros valores, nuestra perseverancia y nuestro empeño. Todo esto con una enorme dosis de amor y sin pedir nada a cambio.

AGRADECIMIENTO

A nuestros padres, ustedes han sido siempre el motor que nos impulsa a cumplir nuestros sueños y esperanzas, quienes estuvieron siempre a nuestro lado en los días y noches más difíciles durante horas de estudio. Siempre han sido nuestras mejores guías de vida.

A nuestros profesores de la carrera de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Callao, sus palabras fueron sabias, sus conocimientos rigurosos y precisos, a ustedes nuestros profesores queridos, les debemos nuestros conocimientos. Donde quiera que vayamos, los llevaré llevaremos en nuestro transitar profesional.

A la empresa Soluciones Químicas Ambientales SAC - SQA Perú, por prestarnos sus instalaciones y asesoría al momento de realizar nuestras pruebas experimentales, gracias por todo.

ÍNDICE

RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.1. Descripción de la realidad problemática.....	12
1.2. Formulación del problema.....	13
1.2.1 Problema general.....	13
1.2.2 Problemas específicos.....	13
1.3. Objetivos de la investigación.....	13
1.3.1 Objetivo general.....	13
1.3.2 Objetivos específicos.....	13
1.4. Justificación.....	14
1.5. Delimitantes de la investigación.....	14
1.5.1 Teórica.....	14
1.5.2 Temporal.....	14
1.5.3 Espacial.....	14
II. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1. Antecedentes: Internacional y nacional.....	15
2.1.1 Antecedentes internacionales.....	15
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	16
2.2. Bases teóricas.....	18
2.2.1. Remoción de la carga orgánica de aguas residuales.....	18
2.2.2. Tecnologías de tratamiento biológico.....	21
2.2.3. Reactores aerobios de biopelícula (MBBR).....	27

2.2.4. Sólidos en las aguas residuales	32
2.2.5 Coagulación.	34
2.2.6. Marco Legal.....	36
2.3. Marco conceptual.....	38
2.3.1. Remoción de carga orgánica de aguas residuales	38
2.3.2. Tecnologías de tratamiento biológico	39
2.3.3 Normativa legal aplicada al agua residual	41
2.4. Definición de términos básicos.....	41
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	43
3.1. Hipótesis	43
3.1.1 Operacionalización de variables	43
IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO	46
4.1. Diseño metodológico	46
4.2. Método de investigación	47
4.3. Población y muestra	49
4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado	49
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	49
4.6. Análisis y procesamiento de datos	57
4.7. Aspectos éticos en investigación	57
V. RESULTADOS	58
5.1. Resultados descriptivos	58
5.2. Resultados inferenciales	59
VI. DISCUSION DE RESULTADOS	76
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	76
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares	77
6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes	78

VII. CONCLUSIONES	79
VIII. RECOMENDACIONES	80
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
ANEXOS.....	85
Anexo 1: Matriz de consistencia	85
Anexo 2: Informe de ensayo y reporte de resultados para el análisis de resultados de DBO ₅ , DQO y SST.	86
Anexo 3: Resultados experimentales de DBO ₅	89
Anexo 4: Resultados experimentales de DQO	89
Anexo 5: Resultados experimentales de SST	90
Anexo 6: Determinación de DBO ₅ , Incubación y Electrometría. SM 5210B. .	91
Anexo 7: Método de DQO por Reflujo Cerrado y Volumetría S.M. 5220 C ...	94
Anexo 8: Instructivo Determinación de Sólidos Suspendidos Totales	97
Anexo 9: Materiales y equipos	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Fases de funcionamiento de un reactor discontinuo secuencial.....	25
Tabla 2	Valores de SALR para eliminación de DBO en reactores MBBR.	33
Tabla 3	Comparación entre sulfato de aluminio y PAC.....	36
Tabla 4	VMA para descarga de efluentes no domésticas al alcantarillado.....	37
Tabla 5	Límites máximos permisibles de efluentes para alcantarillado.....	37
Tabla 6	Límites máximos permisibles de efluentes para aguas superficiales	38
Tabla 7	Operacionalización de variables	45
Tabla 8	Diseño experimental	46
Tabla 9	Matriz de experimentación.....	47
Tabla 10	Caracterización del agua residual muestreada	58
Tabla 11	Resultados de los porcentajes de Remoción de DBO ₅	59
Tabla 12	Resultados de los porcentajes de Remoción de DQO	60
Tabla 13	Resultados de los porcentajes de Remoción de SST	61
Tabla 14	Análisis de varianza para para %Remoción de DBO ₅ , DQO y SST. .	62
Tabla 15	Resumen de los modelos.	63
Tabla 16	Coeficientes.....	64
Tabla 17	Notación de niveles de los factores.....	64
Tabla 18	Ecuaciones de regresión	65
Tabla 19	t student del % de remoción de DBO ₅ , DQO y SST	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Proceso de producción de cerveza artesanal	19
Figura 2	Proceso de oxidación aerobia	20
Figura 3	Remoción de material orgánico en función del tiempo de contacto ..	21
Figura 4	Esquema del reactor de mezcla completa con recirculación	23
Figura 5	Secuencia de funcionamiento típica para un reactor discontinuo	24
Figura 6	Esquema de un reactor biológico de membrana (MBR)	26
Figura 7	Esquema de un reactor biológico de lecho móvil (MBBR)	27
Figura 8	Soportes típicos utilizados en los sistemas MBBR	27
Figura 9	Clasificación moderna de procesos de tratamiento aerobio	28
Figura 10	Mecanismos de la conversión de sustrato en las biopelículas	29
Figura 11	Distribución de reacción de oxidación-reducción en la biopelícula ..	30
Figura 12	Esquema de las etapas involucradas en el transporte de oxígeno ..	31
Figura 13	Clasificación de los Sólidos en las Aguas Residuales	34
Figura 14	Diagrama de bloques de las etapas experimentales	48
Figura 15	Crecimiento y estabilización biológica de los reactores	52
Figura 16	Tamizado y almacenamiento del agua residual	53
Figura 17	Caracterización del agua residual	53
Figura 18	Dosificación de coagulante y sedimentación en conos Imhoff	54
Figura 19	Diagrama del módulo MBBR	55
Figura 20	Módulo MBBR	55
Figura 21	Equipo multiparámetro	58
Figura 22	Gráfica de probabilidad normal para %Remoción de DBO ₅	66
Figura 23	Gráfica de probabilidad normal para %Remoción de DQO	66
Figura 24	Gráfica de probabilidad normal para %Remoción de SST	67
Figura 25	Gráfica de residuos vs orden de observación de DBO ₅	68
Figura 26	Gráfica de residuos vs orden de observación de DQO	68
Figura 27	Gráfica de residuos vs orden de observación de SST de SST	69
Figura 28	Diagrama de Pareto para %Remoción de DBO ₅	70
Figura 29	Diagrama de Pareto para %Remoción de DQO	71
Figura 30	Diagrama de Pareto para %Remoción de SST	72
Figura 31	Gráfica de efectos principales para %Remoción de DBO ₅	73

Figura 32 Gráfica de efectos principales para %Remoción de DQO	74
Figura 33 Gráfica de efectos principales para %Remoción de SST	75

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

DQO: Demanda Química de Oxígeno

DBO: Demanda Biológica de Oxígeno

SST: Sólidos Suspendidos Totales

LMP: Límites máximos permisibles

MBBR: Reactor de biopelícula de lecho móvil

VMA: Valores Máximos Admisibles

SALR: Tasa de carga del área superficial

PAC: Policloruro de Aluminio

TRH: Tiempo de retención hidráulica

RESUMEN

Las aguas residuales de la industria cervecera tienen un gran contenido de carga orgánica en su composición, industrias de cerveza artesanal de menor escala productiva en su mayoría no realizan el saneamiento de sus efluentes antes de ser vertidas al alcantarillado, generando un problema medioambiental. Esta investigación tiene como objetivo determinar la eficiencia de remoción de la carga orgánica mediante la tecnología MBBR del agua residual procedente de una industria de cerveza artesanal; La metodología utilizada fue experimental a nivel de laboratorio, nuestro diseño fue de 3 factores y 2 niveles dando un total de 8 corridas experimentales, siendo nuestros factores variables el tiempo de retención hidráulica (h), porcentaje en volumen de llenado de carriers (%) y la dosificación de coagulante policloruro de aluminio (ppm). Los resultados obtenidos en la caracterización indican que el agua muestreada tiene una concentración de contaminantes para SST, DBO₅ y DQO de 274 mg/L, 1494.2 mg/L y 3114 mg/L respectivamente. Aplicando la tecnología MBBR se logró obtener un porcentaje de remoción para DBO₅, DQO y SST de 83.55%, 92.44% y 93.19 % respectivamente, permitiendo cumplir con los límites máximos permisibles de efluentes para alcantarillado según DS 003-2002 PRODUCE. En conclusión, logramos obtener una remoción mayor al 80% de carga orgánica, demostrando que la tecnología MBBR es una alternativa viable para ser aplicada en el tratamiento de aguas residuales procedente de la industria de cerveza artesanal.

Palabras claves: Reactor de biopelícula de lecho móvil (MBBR), Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), Demanda química de oxígeno (DQO), Sólidos suspendidos totales (SST).

ABSTRACT

The wastewater from the brewing industry has a high content of organic load in its composition, craft beer industries of a smaller productive scale mostly do not clean up their effluents before being discharged into the sewer, generating an environmental problem. This research aims to determine the removal efficiency of the organic load through the MBBR technology of the residual water from a craft beer industry; The methodology used was experimental at the laboratory level, our design was of 3 factors and 2 levels giving a total of 8 experimental runs, our variable factors being the hydraulic retention time (h), percentage by volume of carrier filling (%) and the dosage of aluminum polychloride coagulant (ppm). The results obtained in the characterization indicate that the sampled water has a concentration of contaminants for TSS, BOD₅ and COD of 274 mg/L, 1494.2 mg/L and 3114 mg/L respectively. Applying the MBBR technology, it was possible to obtain a removal percentage for BOD₅, COD and TSS of 83.55%, 92.44% and 93.19% respectively, allowing compliance with the maximum permissible limits of sewage effluents according to DS 003-2002 PRODUCE. In conclusion, we managed to obtain a removal greater than 80% of organic load, demonstrating that MBBR technology is a viable alternative to be applied in the treatment of wastewater from the craft beer industry.

Keywords: Moving bed biofilm reactor (MBBR), Biochemical oxygen demand (BOD₅), chemical oxygen demand (COD), Total suspended solids (TSS).

INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos para el desarrollo sostenible, planteados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) es garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos. Una de las razones por la cual se habla de gestión sostenible y saneamiento del agua, es la de evitar la generación de contaminación ambiental producida por los efluentes con alta carga orgánica procedentes de distintas industrias y que en algunos casos son descargados en cuerpos de agua como son cuencas hidrográficas y los mares, perjudicando la calidad de este recurso y afectando a personas que tienen contacto directo o indirecto con aguas contaminadas, además de perjudicar la vida ictiológica y a otros seres vivos que dependen de este recurso hídrico vital. En el año 2020, en el Perú, se vertieron 1198.87 millones de m^3 de agua, de los cuales solo 931.57 millones de m^3 de agua fueron tratadas, y 267.30 millones de m^3 de agua fueron vertidas sin tratamiento alguno. [1]

En el Perú existen 202 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), de las cuales 171 están en funcionamiento, 4 en construcción y 27 en situación de obra paralizadas por problemas de diseño o en la ejecución de obras. [1]

En Lima y el Callao se tratan las aguas servidas de 6,900,000 habitantes, que corresponden al 80% de las aguas residuales generadas en estas regiones. El tratamiento de estas aguas residuales se da en la PTAR Taboada que se encuentra en el Callao y la PTAR La Chira que se encuentra en Chorrillos, las plantas tratan $14 m^3/s$ y $6.3 m^3/s$ de aguas residuales respectivamente. [1]

El 95% del peso de la cerveza es agua, por tanto, el consumo anual en el mundo de agua en forma de cerveza es de aproximadamente 85 millones de m^3 . Este volumen no incluye toda el agua consumida por la industria cervecera. Las industrias de cerveza emplean gran parte de agua en limpieza; se gastan volúmenes considerables en la generación de vapor, evaporación, y se pierde mucha en los vertidos a los desagües como agua de enfriamiento o calentamiento y acompañando a los materiales extraídos. Las distintas industrias cerveceras difieren mucho en su eficacia en la utilización del agua. Las que

menos agua derrochan utilizan volúmenes aproximadamente cuatro veces superiores al de cerveza producida, pero muchas industrias emplean volúmenes más de diez veces superior al de la cerveza que producen. [2]

Es por esta razón que se debe prestar gran importancia al saneamiento de las aguas residuales generadas por esta industria y garantizar que estos efluentes cumplan con las normas y requisitos mínimos establecidos por las autoridades sanitarias.

En el Perú existen plantas de elaboración de cerveza que no tratan sus efluentes antes de descargarlos al alcantarillado, sin embargo, hay normativas que indican las concentraciones máximas permisibles que deben contener estos efluentes; el Decreto supremo N°003-2002-PRODUCE [3], indica los límites máximos permisibles de efluentes para alcantarillado para descarga de efluentes de la industria del cemento, cerveza, papel y curtiembre.

Existen diversas tecnologías aplicables al tratamiento de las aguas residuales, pero cuando se habla de aguas residuales con alta carga orgánica como es el caso de la industria cervecera, entran a tallar tecnologías que aplican tratamiento biológico en sus procesos. En este caso optamos por usar la tecnología de Biorreactores de Lecho Móvil (tecnología MBBR, por sus siglas en inglés), este tratamiento biológico utiliza microorganismos que crecen en una biopelícula inmovilizada en un medio portador, este medio portador es conocido comercialmente como carrier. Un factor crucial para que el proceso MBBR se realice adecuadamente es el contacto suficiente y frecuente entre los componentes del agua residual (sustrato) y los microorganismos adheridos al medio portante (biopelícula). La necesaria mezcla de los elementos portantes en el reactor (reactor MBBR) se puede conseguir gracias al suministro de aire en el proceso. [4]

Por ello, en el presente trabajo de investigación se plantea determinar, cuál es la eficiencia de remoción de la carga orgánica mediante la tecnología MBBR de una planta de cerveza artesanal.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

Los vertimientos aguas residuales de las diferentes industrias en el territorio peruano, según datos del Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA) desde el año 2015 al 2019 ha venido creciendo, dando su pico más alto el año 2019 con vertimientos de 2 001 714 260.86 m³ de aguas residuales a nivel nacional [5], además, según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) la generación de agua residual en lima metropolitana en el año 2020 fue de 550 420 000 m³, pero el pico más alto se dio en el año 2019 con 677 576 000 m³ [6].

En el Perú la industria de la cerveza artesanal ha venido creciendo en los últimos años. Esta industria en sus procesos usa gran cantidad de agua potable por lo que genera un gasto de este recurso hídrico, generando una gran cantidad de aguas residuales producto de su proceso productivo. En el año 2020 se produjo 1 500 000.00 de litros de cerveza artesanal según la UCAP, si por litro de cerveza artesanal producida se gasta un promedio de 5 litros de agua, entonces al año se obtendría 6 000 000.00 de litros de aguas residuales provenientes de esta industria. [7]

Estas aguas residuales de la industria cervecera tienen un gran contenido de carga orgánica en su composición, el cual genera un problema medioambiental al verterse al sistema de alcantarillado sin un tratamiento previo.

En la actualidad existen diferentes tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales industriales; en el presente proyecto desarrollaremos la tecnología MBBR para el tratamiento de aguas residuales de una planta de cerveza artesanal con el fin de determinar la eficiencia de remoción de la carga orgánica realizando un comparativo entre la concentración de DBO₅ en el afluente y efluente del sistema de tratamiento y de esta manera poder obtener un agua residual tratada que pueda cumplir con los estándares de los límites máximos permisibles de aguas residuales no domésticas para descarga al alcantarillado, dado en las leyes de nuestro territorio.

1.2. Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuál es la eficiencia de remoción de la carga orgánica mediante la tecnología MBBR del agua residual procedente de una planta de cerveza artesanal?

1.2.2 Problemas específicos

¿Qué características de carga orgánica tiene el agua residual procedente de una industria de cerveza artesanal?

¿Cómo influye el tiempo de retención hidráulica en la eficiencia de la remoción de la carga orgánica?

¿Cómo influye el porcentaje de volumen de carriers en la eficiencia de remoción de la carga orgánica?

¿Cómo influye la dosificación de coagulante en la eficiencia de remoción de la carga orgánica?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Determinar la eficiencia de remoción de la carga orgánica mediante la tecnología MBBR de una planta de cerveza artesanal.

1.3.2 Objetivos específicos

Determinar las características de carga orgánica del agua residual procedente de una industria de cerveza artesanal.

Determinar la influencia del tiempo de retención hidráulica en la eficiencia de la remoción de la carga orgánica.

Determinar la influencia del porcentaje de volumen de carriers en la eficiencia de remoción de la carga orgánica.

Determinar la influencia de la dosificación de coagulante en la eficiencia de remoción de la carga orgánica.

1.4. Justificación

Los resultados de esta investigación aportarán a mejorar la calidad de descarga de los efluentes generados en la industria de cerveza artesanal, para reducir la contaminación por concentración de carga orgánica, aplicando un sistema de tratamiento biológico MBBR como alternativa de saneamiento de aguas residuales, evitando contaminar el ecosistema, la vida ictiológica y reduciendo el impacto medioambiental que estas puedan generar.

En la actualidad son pocas las industrias de cerveza artesanal que implementan un sistema de tratamiento de agua residual en sus procesos; este proyecto busca dar una alternativa viable para dar solución a esta problemática y de esta manera garantizar el cumplimiento de la normativa vigente en materia de descarga de efluentes con alta carga orgánica de tipo no domésticos.

1.5. Delimitantes de la investigación

1.5.1 Teórica

La presente investigación se fundamentó en la biotecnología ya que se aplicó un tratamiento biológico a un efluente para degradar los contaminantes de aguas residuales procedentes de una industria cervecera artesanal; en el manejo de aguas residuales de la industria química y en el Decreto supremo N°003-2002-PRODUCE para cumplir los límites máximos permisibles para descarga de efluentes al alcantarillado.

1.5.2 Temporal

La producción de cerveza artesanal se da durante todo el año, así como la descarga del efluente generado, sin embargo, es en la época de verano (entre los meses de enero y abril) donde alcanza la producción máxima.

Esta investigación se realizó entre los meses de diciembre del año 2022 y abril del año 2023.

1.5.3 Espacial

El efluente consistió en muestras obtenidas de aguas residuales de una industria de cerveza artesanal ubicada en el distrito de Barranco - Lima. El tratamiento fue realizado en Los Olivos - Lima. Sin embargo, este proceso puede replicarse en zonas con condiciones ambientales similares.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes: Internacional y nacional

2.1.1 Antecedentes internacionales

En el trabajo de investigación “Optimización de la operación del reactor de biopelícula de lecho móvil (MBBR) para el tratamiento de aguas residuales de cervecería”, el objetivo fue optimizar el funcionamiento del reactor MBBR para tratar agua residual de cervecería, para lo cual trabajó con dos reactores MBBR usando dos diferentes carriers (Kaldnes K5 and Kontakt) y un reactor de lodos activados como patrón de control. En dicho trabajo se analizaron dos variables independientes: variación de las tasas de carga de superficie (SALR) (10-55 g-s DQO/m²/d) y el tiempo de retención hidráulico (HRT) (4 - 12 hr), logrando una remoción del 92% de DBO₅ obteniendo como condiciones óptimas de TRH 4 horas y SALR de 40 g-s DQO/m²/d [8].

En el trabajo de investigación “La aplicación del biorreactor de lecho móvil (MBBR) en el tratamiento de aguas residuales de lavandería comercial”, los autores realizaron pruebas de tratamiento biológico a escala de laboratorio de aguas residuales generadas en una gran instalación de lavandería industrial. Esta investigación incluyó pruebas de un biorreactor de lecho móvil de dos etapas: un reactor MBBR lleno de carriers Kaldnes K5 (área específica: 800 m²/m³) en condición aeróbica. El agua residual de la ropa contenía principalmente tensoactivos e impurezas procedentes de tejidos lavados; agregaron una solución de urea para complementar el contenido de nitrógeno y una solución de ácido para corregir el pH. El flujo diario de aguas residuales crudas Q_d varió de 0,6 - 1,0 m³/d. Durante las corridas alcanzaron un valor de flujo horario de Q_h = 33 L/h, HRT = 7,8 h. Además, agregaron una solución surfactante aniónica a 5 mg/L. Los indicadores de calidad de las aguas residuales mostraron que la reducción de la contaminación fue: DBO₅ (95 - 98%), SST (85- 96%) y DQO (89 - 94%) [9].

En el artículo “Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la industria

alimentaria basada en Flotación y MBBR”, el autor trabajó en el tratamiento de agua residual procedente de la industria alimentaria italiana que contenía como equipos principales un reactor biofilm de lecho móvil MBBR (148 m³) relleno con 35% de AnoxKaldnes (carrier) seguidos de un tanque de oxidación de lodos activados (292 m³) y un tanque de sedimentación (superficie 33 m², volumen 73 m³), el reactor biológico fue aireado por un soplador a 480 Nm³/h, el aire ingreso al MBBR híbrido a través de difusores de burbuja media. El tratamiento primario de flotación removi6 el 64% de DQO y el 65% de aceites y grasas, mientras que la etapa de oxidación biológica removi6 el 92% de DQO y el 96% de aceites y grasas [10].

En el artículo “Tratamiento de aguas residuales lácteas en un biofilm de lecho móvil”, los autores evaluaron la eficiencia del tratamiento de aguas residuales lácteas mediante la aplicación de un MBBR a escala piloto, la concentración de oxígeno disuelto en el MBBR oscil6 entre 0,5 y 5 mgO₂L⁻¹ dependiendo de la carga orgánica afluente, la relación de llenado de carriers en la planta piloto fue de 60%. El caudal de aguas residuales de la entrada de la planta piloto se estableci6 en el rango de 29 a 78 L h⁻¹. En consecuencia, el tiempo de retención hidráulica (HRT) en el tanque de oxidación y en el decantador vari6 entre 8 y 31 horas y entre 1,2 y 3,2 horas respectivamente. Obtuvieron una eficiencia de eliminación de DQO total superior al 80% y una eficiencia de remoci6n del DBO₅ de 96.2% [11].

2.1.2. Antecedentes Nacionales

En el trabajo de investigación “Diagn6stico del m6todo del tratamiento de agua residual en cervecera BACKUS- Motupe”, el autor realiz6 un an6lisis descriptivo de las instalaciones de la planta de tratamiento de agua residual de la Cervecería Backus, ubicada en el distrito de Motupe - Lambayeque; Primero caracteriz6 el agua residual dando valores de: PH = 8.7 – 12.7, DBO ≤ 3450 mg/L, DQO ≤ 4600 mg/L y SST ≤ 600 mg/L. Se emple6 un Reactor anaer6bico de flujo ascendente (UASB) como tratamiento secundario, este procedimiento la materia orgánica (como las proteínas y carbohidratos) se transforman en ácidos grasos ante la

ausencia de oxígeno, por lo tanto, se reduce aproximadamente un 80% de la materia orgánica y entre un 50-80 % de la DQO. El tanque del reactor es de capacidad para 4,080 m³/día y 18,768 Kg DQO/día. [12]

En el artículo “Optimización del tratamiento de aguas residuales domésticas mediante la implementación del Sistema MBBR-Caylloma”, el autor optimizó el funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas del tipo biológico y que usan lechos móviles en el distrito de Caylloma que pertenece a la región Arequipa, ubicado al sur del Perú, a una altitud promedio de 4310 msnm. Durante la investigación se desarrolló la evaluación, análisis y optimización del tratamiento de aguas residuales mediante el adición de Biocarriers a los dos tanques reactores biológicos, lo cual permitió que el sistema de lodos activados se transforme en un sistema “Moving Bed Biofilm Reactor” – MBBR. Se trabajó con 2 reactores MBBR para un caudal de 280 m³/d y TRH de 11 horas, con una superficie específica relleno 400 m²/m³ de los Biocarriers, se usó volumen de aire requerido de 0.091 m³/h logrando eficiencias de remoción de DQO de hasta 92% y para la DBO₅ por sobre el 97%., obtuvo un incremento del 40% de la capacidad total de tratamiento de la planta, se aumentó el caudal promedio de tratamiento de 200 m³/d a 280 m³/d. [13]

La investigación: “Evaluación del sistema biológico MBBR en la ampliación de capacidad de tratamiento en una PTAR existente para aguas residuales de la industria de alimentos” (2018), el objetivo de la investigación fue comprobar la viabilidad de implementar un Sistema Biológico de Lecho Móvil, MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) para tratar aguas residuales procedentes de la industria de golosinas y chocolates, ubicada en el distrito de Los Olivos- Lima. Esta ampliación consta de un pretratamiento (equalización y filtración), tratamiento primario (Coagulación, floculación y flotación) y 2 reactores en serie MBBR como tratamiento secundario. Se presentó un caudal de 320 m³/día y una calidad de agua de 11164 mg/L, 7186 mg/L, 2 555 mg/L y 73 mg/L para los parámetros DQO, DBO₅, SST y AyG (Aceites y Grasas) respectivamente. Los reactores se trabajaron al 55 % porcentaje de llenado de portadores con una capacidad de capacidad de 500 m²/m³, el valor de pH de 6.5 - 7 y un TRH de 11 horas logrando

una eficiencia de remoción de 95.4 %, 95.8 %, 62.0 % y 60.0 % para los parámetros DQO, DBO5, SST y AyG (Aceites y Grasas), respectivamente. [14]

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Remoción de la carga orgánica de aguas residuales

Aguas residuales. El agua es uno de los recursos más importantes para la vida, sin embargo, este recurso no es solo usado para su consumo directo, sino también como materia prima principal para la producción de diferentes productos usados cotidianamente por el ser humano, como resultado se produce ensuciamiento por impurezas, generando que este recurso requiera métodos especializados para su tratamiento y saneamiento.

Aguas residuales domésticas. Las diferencias en descarga, tipo y concentración de contaminantes en las aguas residuales domésticas urbanas se reducen al combinar agua de actividades comerciales e industriales en áreas urbanas, así como agua de lluvia en el caso de un sistema de drenaje combinado. En este sentido, las aguas residuales municipales son más homogéneas, dentro de ciertos límites, en su composición y por eso son relativamente fáciles de tratar. [15]

Aguas residuales industriales. Las aguas residuales generadas en los procesos industriales tienen mayor complejidad para ser tratadas, ya que los tipos de contaminantes pueden variar completamente según el tipo de industria, es por esta razón que es necesaria la caracterización de los efluentes y luego seleccionar la tecnología adecuada para su tratamiento, sin embargo, en la actualidad se tiene conocimiento de los tipos de efluentes y el método de tratamiento recomendado para un determinado tipo de industria.

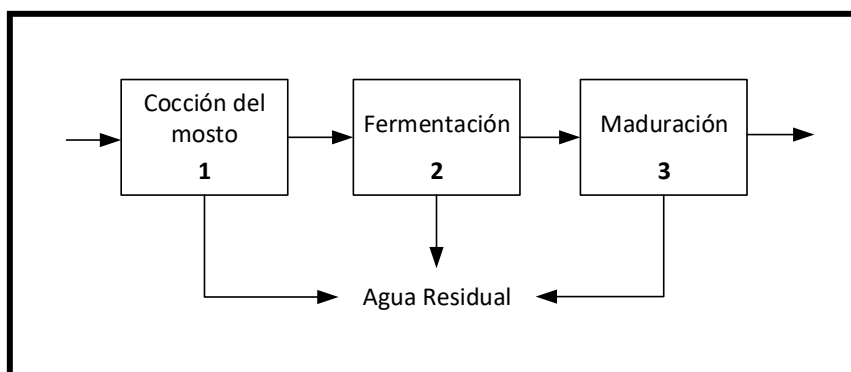
Aguas residuales de las cervecerías. Las industrias cerveceras suelen tratar sus propias aguas residuales, sin embargo, este no es el caso de la industria cervecera artesanal, evitando así cumplir con la normativa vigente en cuanto a la descarga de aguas residuales al sistema de alcantarillado. La contaminación de las aguas residuales se puede medir determinando la concentración de sólidos en suspensión, la concentración de sustancias que pueden oxidarse químicamente al llevarlas a ebullición con dicromato de potasio

y ácido sulfúrico concentrado (Demanda química de oxígeno o DQO). La alta concentración de DQO es perjudicial debido a que cuando se descargan en un cuerpo de agua, los microorganismos aeróbicos consumen oxígeno disuelto para metabolizar la materia orgánica. Por lo tanto, cuanta más materia orgánica, más oxígeno disuelto se utiliza. Las altas concentraciones de materia orgánica pueden eliminar completamente el oxígeno del agua y causar la muerte de los organismos aeróbicos. Por esta razón, es necesario reducir la concentración de DQO de las aguas residuales. Los sólidos en suspensión también deben limitarse; No solo porque a menudo representa materia orgánica, sino también porque tiende a asentarse en las corrientes de agua, creando lodos anaeróbicos. Los efluentes globales de una industria cervecera suelen tener valores de sólidos suspendidos del orden de 240 ppm y valores de DQO de unos 1800 ppm. [3]

El proceso de producción de cerveza artesanal tiene 3 etapas principales y son como sigue: luego de molienda de la cebada y la maceración de la malta se realiza la cocción del mosto (1), este es enfriado y pasa a la etapa de fermentación (2), una vez fermentado se continúa con la maduración (3), luego el producto es embotellado; el proceso de producción se representa en la figura 1. En la producción de cerveza artesanal las aguas residuales son generadas en las siguientes etapas del proceso: Cocción del mosto (Pailas) (1), Fermentadores (2), Maduración (3); estas aguas residuales se obtienen al momento de realizar el lavado de los equipos.

Figura 1

Diagrama de bloques: Equipos principales para producción de cerveza artesanal



Procesos de tratamiento biológico. “El proceso de tratamiento biológico consiste en el control del medio ambiente de los microorganismos, de modo que se consigan condiciones de crecimiento óptimas” [16]

Uno de los factores importantes a controlar antes que el afluente ingrese al reactor biológico es el pH, el crecimiento óptimo de bacterias ocurre generalmente a pH entre 6,5 y 7,5 y la mayoría no toleran pH mayor de 9,5 o inferior a 4,0

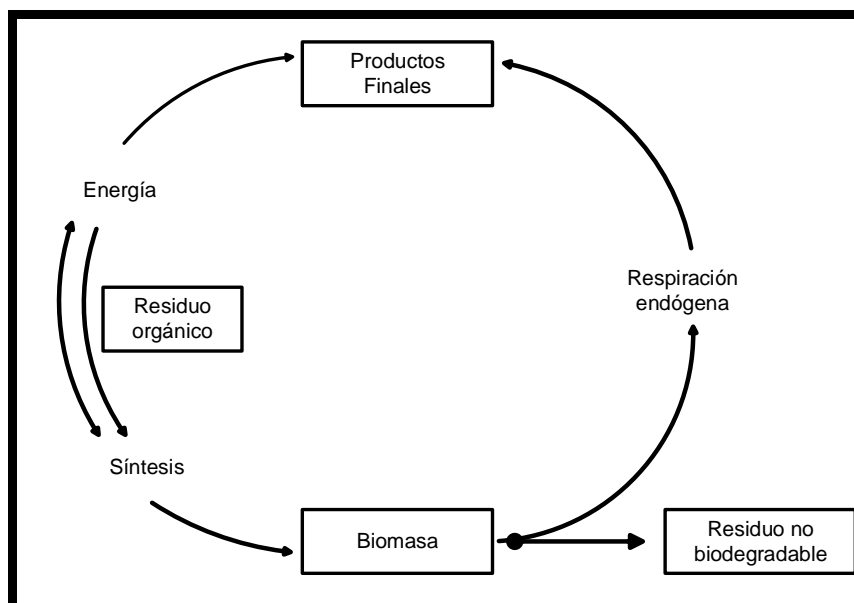
La temperatura afecta en forma importante la actividad bacteriana; en general se afirma que la tasa de crecimiento bacteriana se dobla para un incremento de 10°C, hasta que se alcanza la temperatura óptima. [17]

Proceso aerobio. El proceso aerobio es un proceso de respiración de oxígeno en el cual el oxígeno libre es el único aceptor final de electrones; el oxígeno es reducido y el carbono es oxidado, al igual que la materia orgánica o inorgánica. Todos los organismos que usan oxígeno libre como aceptor final de electrones son aerobios.

En la figura 2 se observa el proceso de oxidación aerobia. [18]

Figura 2

Proceso de oxidación aerobia



Fuente: Romero (2004)

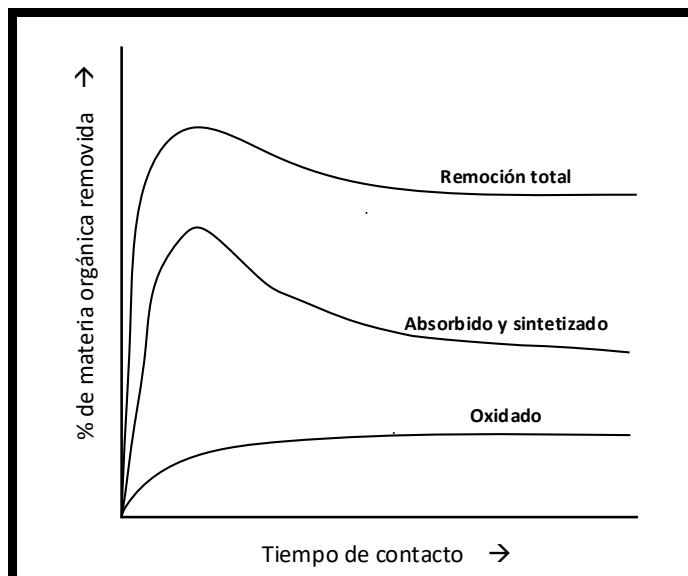
Aplicación de los procesos de tratamiento biológico. Las principales aplicaciones de estos procesos son: 1. La eliminación de la materia orgánica carbonosa del agua residual, normalmente medida como DBO₅, carbono orgánico total (COT) o demanda química de oxígeno (DQO); 2. nitrificación; 3. desnitrificación; 4. eliminación de fósforo, y 5. estabilización de fangos [16].

2.2.2. Tecnologías de tratamiento biológico

Lodos activados. Los procesos de lodos activados se basan en el contacto de aguas residuales con floc biológico previamente formado en un tanque de aireación. El lodo activado es una masa de microorganismos, materia orgánica muerta y materiales inorgánicos. El lodo posee una superficie altamente activa para la adsorción de materiales coloidales y suspendidos, a la cual debe su nombre de activado. La materia orgánica, susceptible de descomposición biológica es convertida en compuestos inorgánicos y el resto, transformada en lodo activo adicional. En la figura 3 se ilustra claramente el fenómeno de adsorción. [18].

Figura 3

Remoción de material orgánico en función del tiempo de contacto

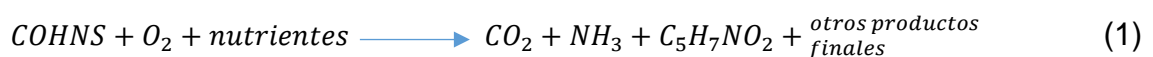


Fuente: Romero (2004)

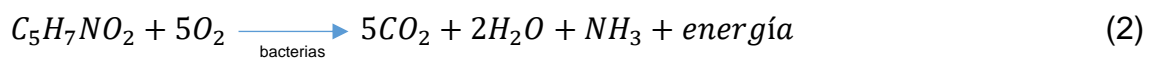
En la figura 3 se indica cómo la remoción inicial se debe casi completamente a la adsorción puesto que el material sintetizado es proporcional a la oxidación biológica, la cual contribuye muy poco al total removido en los momentos iniciales del proceso de aireación. La porción de materia orgánica adsorbida inicialmente, no oxidada ni utilizada, en síntesis, es almacenada en el floc biológico. Cuando se ha usado la capacidad de almacenamiento total del lodo, el lodo deja de ser activo en el sentido adsortivo. La actividad se recupera solamente después de un período de aireación durante el cual el material orgánico se emplea en oxidación y síntesis. Este proceso de aireación, con el propósito de restablecer la actividad y estimular la capacidad adsortiva, se reconoce como estabilización del lodo. [18]

Desde el punto de vista del funcionamiento, el tratamiento biológico de aguas residuales mediante el proceso de fangos activados se suele llevar a cabo utilizando un diagrama de flujo como el de la figura 4. En el reactor, el cultivo bacteriano lleva a cabo la conversión en concordancia general con la estequiometría de las ecuaciones 1 y 2. [16]

Oxidación y síntesis:



Respiración endógena:

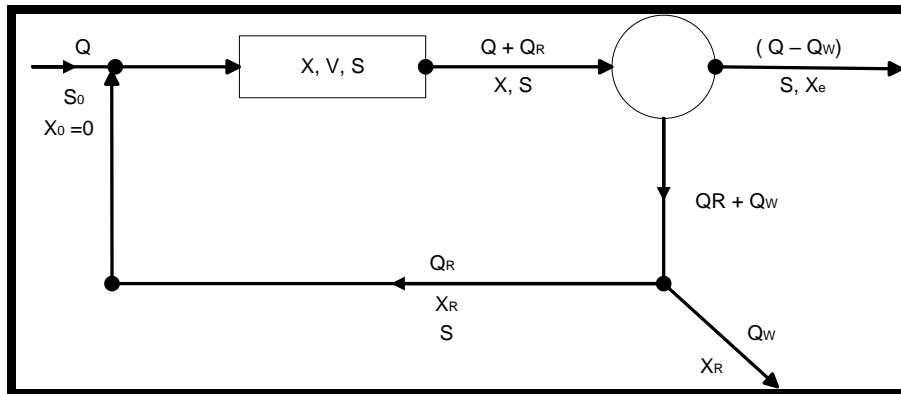


(células)	
113	160
1	1,42

En estas ecuaciones, COHNS representa la materia orgánica del agua residual. A pesar de que la reacción de la respiración endógena conduce a la formación de productos finales relativamente sencillos y al desprendimiento de energía, también se forman algunos productos orgánicos estables. A partir de la ecuación 2 se puede observar que, si todas las células se oxidan por completo, la DBO última de las células equivale a 1,42 veces el valor de la concentración de células. [16]

Figura 4

Esquema de un reactor de mezcla completa con recirculación celular y purga



Fuente: Romero (2004)

Donde: Q: Caudal de alimentación al sistema, S_0 : Sustrato inicial (DBO_5), X_0 : Biomasa inicial, X: Biomasa en el licor de mezcla, V: Volumen del reactor, S: Sustrato en el licor de mezcla, Q_R : Caudal de recirculación de lodos, X_e : Biomasa en el efluente, Q_w : Caudal de purga de lodos, X_R : Biomasa sedimentada.

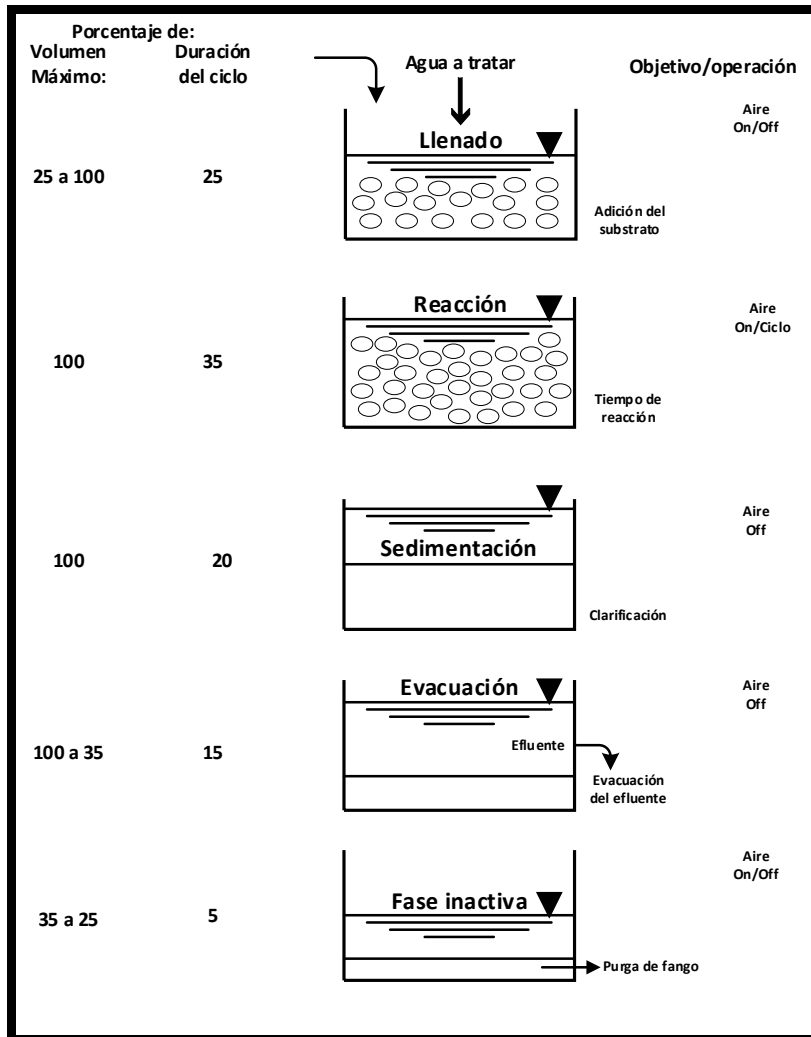
Modificaciones del proceso de lodos activados. Existen muchas variantes del proceso de lodos activados, a continuación, se describen las más usadas:

Reactor discontinuo secuencial (SBR). Un reactor discontinuo secuencial (SBR) es un sistema de tratamiento de fangos activados cuyo funcionamiento se basa en la secuencia de ciclos de llenado y vaciado. Los procesos unitarios que intervienen son idénticos a los de un proceso convencional de fangos activados con la diferencia que, en los SBR, los procesos tienen lugar secuencialmente en el mismo tanque.

Tal como se emplean hoy en día, todos los sistemas de SBR tienen en común cinco etapas, que tienen lugar de forma secuencial: (1) llenado; (2) reacción (aireación); (3) sedimentación (clarificación); (4) extracción (vaciado por decantación), y (5) fase inactiva. Cada uno de estos pasos se ilustra en la figura 5 y se describen en la tabla 1 [16].

Figura 5

Secuencia de funcionamiento típica para un reactor discontinuo



Fuente: Metcalf y Eddy (1995)

Tabla 1*Fases de funcionamiento de un reactor discontinuo secuencial*

Fase de funcionamiento	Descripción
Llenado	El objetivo de esta fase es la adición de substrato (agua residual bruta o efluente primario) al reactor. Esta fase permite que el nivel del líquido en el depósito ascienda desde cerca del 25 por 100 de la capacidad (al final de la fase inactiva) hasta el 100 por 100 de su capacidad. Este proceso suele llevar aproximadamente el 25 por 100 de la duración total del ciclo.
Reacción	El propósito de esta fase es que se completen las reacciones iniciadas durante la fase de llenado. Suele ocupar el 35 por 100 de la duración total del ciclo.
Sedimentación	El objetivo de esta fase es permitir la separación de sólidos, para conseguir un sobrenadante clarificado como efluente. En un reactor de este tipo, este proceso suele ser mucho más eficiente que en un reactor de flujo continuo, debido a que el contenido del reactor está completamente en reposo.
Vaciado	El propósito de la fase de vaciado es la extracción del agua clarificada del reactor. Actualmente se emplean muchos métodos de decantación, siendo los más empleados los vertederos flotantes o ajustables. El tiempo que se dedica al vaciado del reactor puede variar entre el 20 y el 50 por 100 de la duración total del ciclo (entre 15 minutos y 2 horas), siendo 45 minutos una duración típica.
Fase Inactiva	El objetivo de la fase inactiva en un sistema de múltiples tanques es permitir que un reactor termine su fase de llenado antes de conectar otra unidad. Puesto que no es una fase necesaria, en algunos casos se omite.

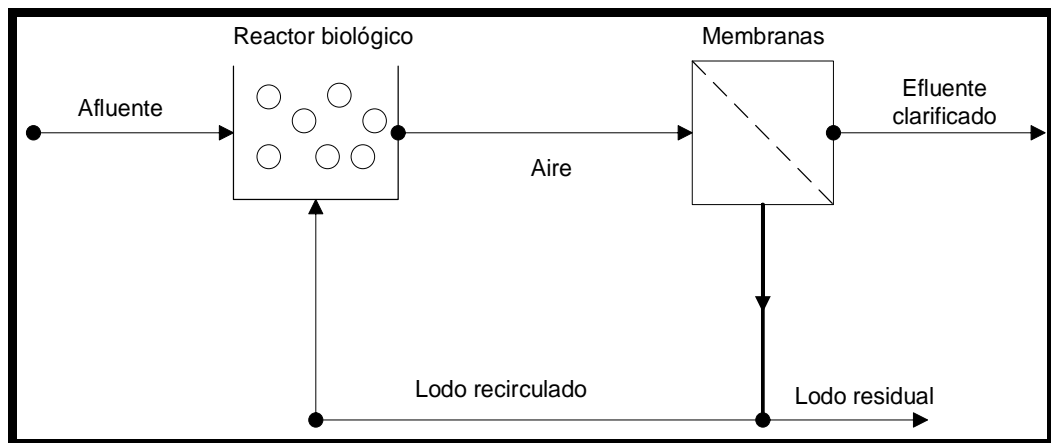
Fuente: Metcalf y Eddy (1995)

Reactor biológico de membrana (MBR).

El esquema de un proceso de lodos activados con membranas (Figura 6) es conceptualmente el mismo que el proceso convencional de lodos activados; la única diferencia es la forma en que se obtiene la separación sólido-líquido, que es por medio de separación por membranas [19].

Figura 6

Esquema de un reactor biológico de membrana (MBR)



Fuente: Dionisi (2017)

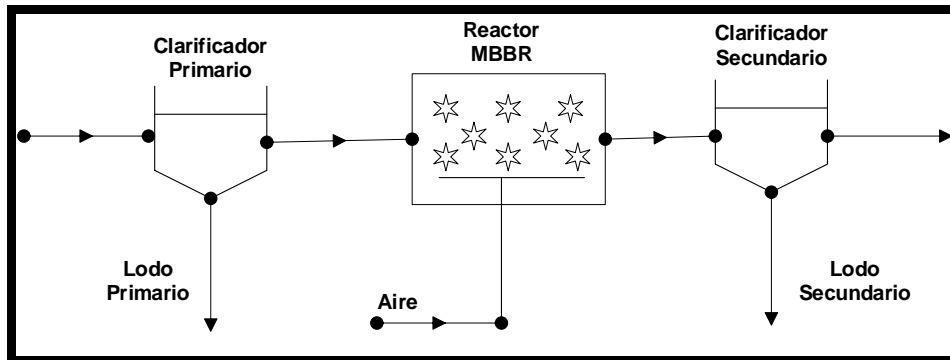
Reactor biológico de lecho móvil (MBBR). Un proceso MBBR utiliza medios portadores de plástico pequeños sobre el cual los microorganismos se adhieren formando una biopelícula.

Los reactores de tipo MBBR son similares a un tanque de aireación de lodos activados o reactor de lodos activados, donde los medios portadores se mantienen suspendidos por medio de un sistema de aireación para un proceso aeróbico o por medio de un sistema de mezcla mecánica para un proceso anóxico o proceso anaeróbico, como se ilustra en la figura 7. Normalmente se utiliza un tamiz en la salida del reactor MBBR para mantener el medio portador en el tanque.

La clarificación primaria se usa típicamente antes del tanque MBBR y típicamente después, pero no hay lodo activado reciclado que se devuelve al proceso como sí ocurre en el proceso de lodos activados convencional porque los microorganismos se mantienen adheridos al medio (figura 8) [20].

Figura 7

Esquema de un reactor biológico de lecho móvil (MBBR)



Fuente: Bengtson (2017)

En la figura 7 se muestran los carriers del módulo MBBR construido, los cuales actúan como medios de soporte de la biomasa. Modelo PE04, de 6 cavidades, con un área de superficial específica de $1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$, hecho de 100% material virgen de HDPE, diámetro 16 mm, altura de 10 mm, relación peso/volumen: $120\text{Kg}/\text{m}^3$, temperatura preferencial $< 65^\circ\text{C}$ y vida útil ≥ 10 años.

Figura 8

Medios de soporte utilizados en los sistemas MBBR



2.2.3. Reactores aerobios de biopelícula (MBBR)

Los reactores con biomasa adherida usan un material con una gran superficie específica para la unión de la biomasa, que pueden ser granos de pequeño diámetro (0,2 a 2 mm) o un material con alta porosidad (por ejemplo, esponjas). En estos procesos se alcanzan altas concentraciones de biomasa ($> 20 \text{ kg SST}/\text{m}^3$), resultando en una alta capacidad de tratamiento. Su principal ventaja con relación con los procesos de lecho fijo es la ausencia de obstrucción del medio

filtrante, y sus principales desventajas son los altos costos operativos (especialmente de energía) y los sofisticados dispositivos necesarios para una adecuada distribución del flujo y aireación.

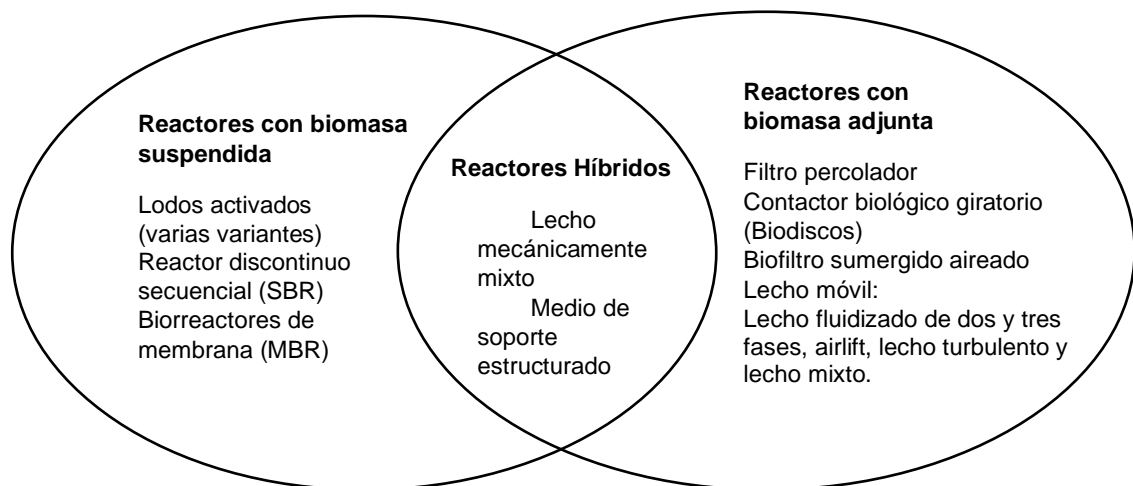
Entre los principales procesos destacan los reactores bifásicos de lecho fluidizado, contando con muchas plantas de tratamiento a gran escala que operan en los EE. UU. y en Europa.

Lazarova y Manen (1994, como se citó en Von Sperling, 2007) Indica que, para el tratamiento de efluentes diluidos, los costos de construcción son más bajos que los de los sistemas de lodos activados, aunque los costos de operación y mantenimiento pueden ser mayores (debido a la saturación en oxígeno y bombeo) [21].

En la figura 9 se puede observar la clasificación moderna de los procesos de tratamiento aerobio mecanizado, con respecto al estado de la biomasa en el reactor.

Figura 9

Clasificación moderna de procesos de tratamiento aerobio



Fuente: Von Sperling (2007)

En todos los reactores con biomasa adherida, los procesos de conversión metabólica toman lugar dentro de la biopelícula. El transporte de sustrato ocurre por procesos de difusión, inicialmente a través de la película líquida en la interfaz líquido-biopelícula y luego a través de la biopelícula (Figuras 10 y 11). Los productos de las reacciones de oxidación y reducción son transportados en la

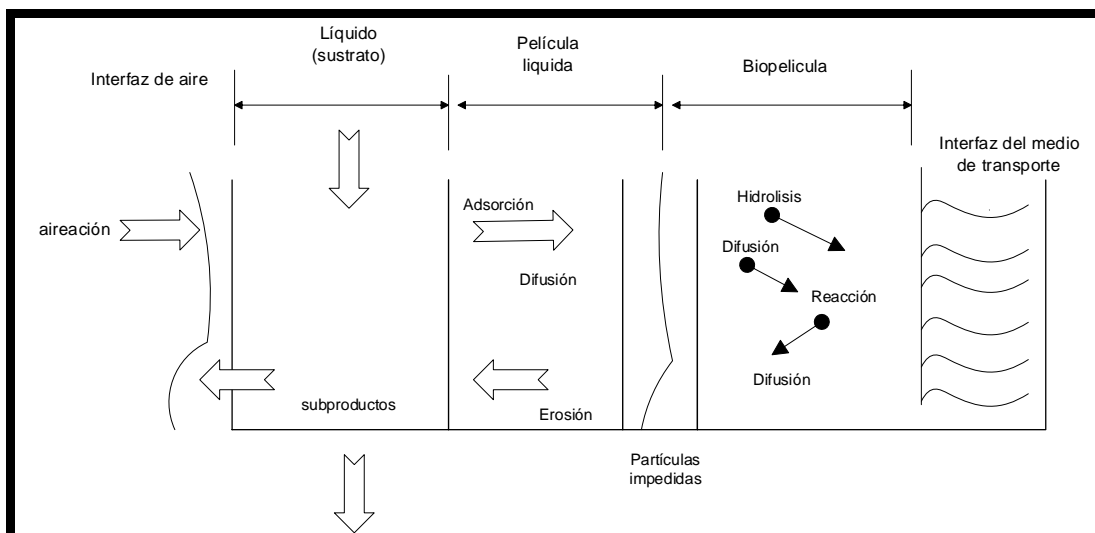
dirección opuesta, al exterior de la biopelícula. Tanto el sustrato como el aceptor de electrones deben penetrar la biopelícula para que se lleve a cabo la reacción bioquímica. [21].

En muchos sistemas aeróbicos, la tasa de transferencia de oxígeno a las células es el factor limitante que determina la tasa de conversión biológica. La disponibilidad de oxígeno para los microorganismos depende de la solubilidad y transferencia de masa, así como de la velocidad en el que se utiliza oxígeno disuelto. En reactores de biopelícula utilizados para el post tratamiento de efluentes anaerobios involucran el mecanismo de transporte de oxígeno y nitrógeno amoniacal (O_2 y $N-NH^+4$), además del intermedio ($N-NO^{-2}$) y nitrógeno final ($N-NO^{-3}$). Las principales etapas involucradas son:

- Transferencia de oxígeno de la fase gaseosa al medio líquido
- Transferencia de oxígeno, amoníaco y nitrato de la fase líquida a la biopelícula
- Transferencia de oxígeno, amoníaco y nitrito dentro de la biopelícula
- transferencia del producto intermedio ($N-NO^{-2}$) y del producto final ($N-NO^{-3}$) al medio líquido [20].

Figura 10

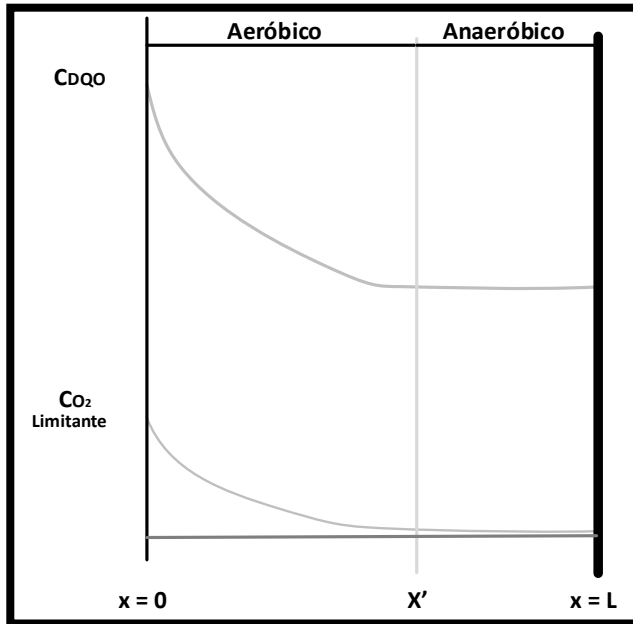
Mecanismos involucrados en la conversión de sustrato en las biopelículas



Fuente: Von Sperling (2007)

Figura 11

Distribución de la concentración de dos compuestos implicados en reacción de oxidación-reducción en la biopelícula (O_2 y DQO)

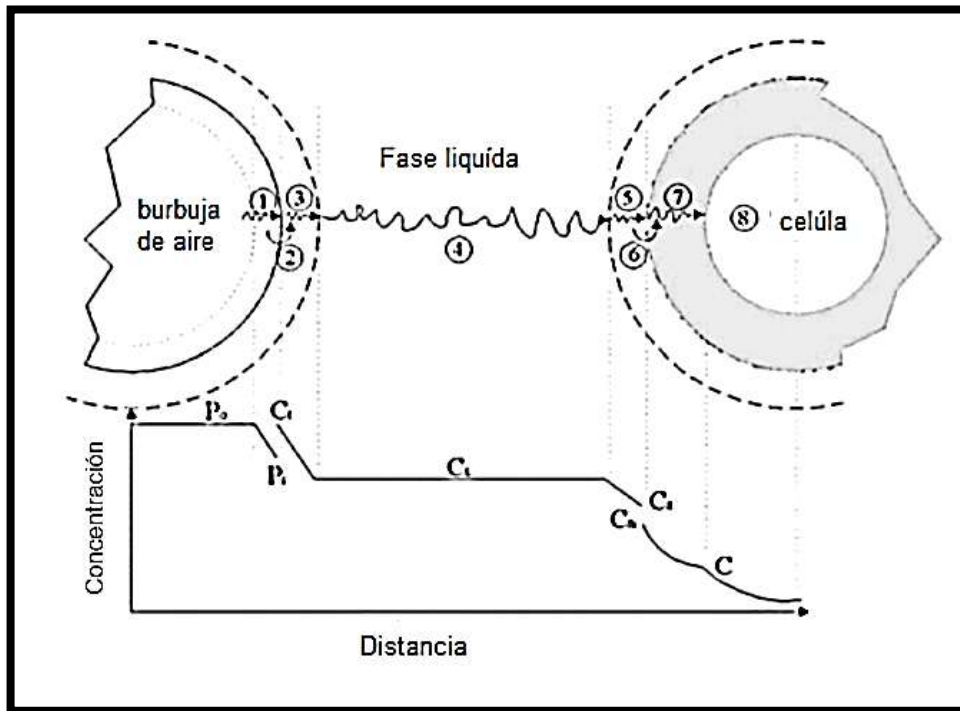


Fuente: Von Sperling (2007)

Según Chisti et al. (1989, como se citó en Von Sperling, 2007), el oxígeno, al ser escasamente soluble en agua, a menudo se convierte en el factor limitante en los procesos de biopelícula aeróbica. Las principales etapas de transferencia de oxígeno se ilustran en la figura 12, en la que se identifican ocho posibles resistencias a la transferencia de masa. [21]

Figura 12

Diagrama esquemático de las etapas involucradas en el transporte de oxígeno



Fuente: Von Sperling (2007)

Las resistencias consideradas en los sistemas de tres fases son:

1. Transferencia en la película gaseosa dentro de la burbuja, entre el núcleo del gas en la burbuja y la interfaz gas-líquido.
2. Transferencia en la interfaz gas-líquido.
3. Transferencia en la película líquida, cerca de la interfaz gas-líquido, entre esta interfaz y el medio líquido.
4. Transferencia en el medio líquido.
5. Transferencia en la película líquida, entre el medio líquido y la interfaz líquido-sólido (resistencia externa).
6. Transferencia en la interfaz líquido-sólido.
7. Transferencia en la fase sólida (resistencia interna).
8. Transferencia en los sitios de reacción bioquímica (dentro de los microorganismos).

Medios de soporte biológico de los sistemas MBBR. Los procesos MBBR utilizan medios plásticos de soporte similares a los que se muestran en la figura

8. Como se observa, el portador se diseña típicamente para tener un área de superficie alta por unidad de volumen, de modo que hay mucha superficie en la que los microorganismos se adhieren y crecen. Los medios de soporte como los que se muestran en la figura pueden ser obtenidos a través de numerosos proveedores. Los soportes tienen dos propiedades necesarias para describir los cálculos de diseño del proceso, esas propiedades son la superficie específica en m^2/m^3 y la proporción de vacíos. El área de superficie específica de los portadores MBBR se encuentra típicamente en el rango de 350 a 1200 m^2/m^3 y la relación de vacíos suele oscilar entre el 60% y el 90%. Dichas propiedades del medio, que son necesarias para el diseño deben obtenerse del fabricante o vendedor [20]

Tasa de carga del área superficial. El parámetro de diseño clave para dimensionar el tanque MBBR es la tasa de carga del área superficial (SALR), generalmente con unidades de $g/m^2/día$, es decir, $g/día$ de DBO que ingresa al tanque MBBR por m^2 de superficie del soporte (Carrier). Usando el caudal y la concentración de DBO que ingresan al tanque de MBBR, se puede obtener la tasa de carga en g DBO/ $día$. Luego, dividiendo la tasa de carga de DBO en $g/día$ con el SALR en $g/m^2/día$, obtendremos el área de superficie del portador requerida en m^2 . El porcentaje de llenado de carriers, el área de la superficie específica del carrier y el porcentaje de espacio vacío del Carrier, se pueden usar para calcular el volumen de carriers requerido, el volumen del tanque y el volumen de líquido en el reactor [19].

2.2.4. Sólidos en las aguas residuales

Los sólidos es otro parámetro de gran importancia en el tratamiento de aguas residuales. La materia orgánica (MO) a menudo está en forma de partículas en suspensión, por lo que es necesario diferenciar entre los sólidos suspendidos (SS), y los sólidos disueltos (SD).

Además, los sólidos pueden ser volátiles, sólidos volátiles (SV), que indican procedencia orgánica, o fijos, sólidos fijos (SF), que se presumen como sólidos inorgánicos.

Tabla 2

Valores típicos de SALR para eliminación de DBO en reactores MBBR.

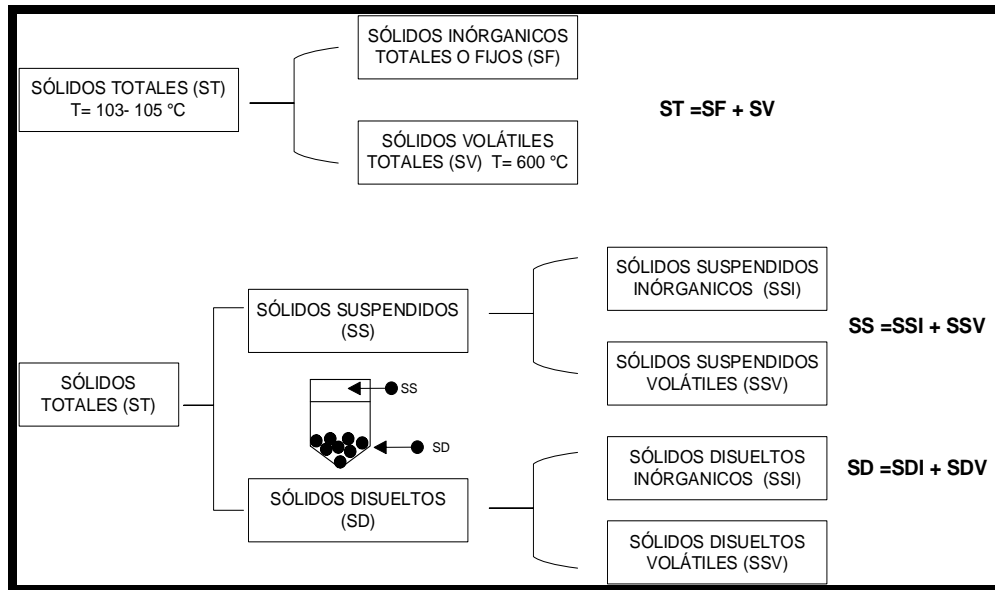
Propósito	Objetivo de tratamiento %de remoción	SALR de diseño $g/m^2 \times d$
Eliminación de DBO		
Alta tasa	75-80 (DBO_5)	25 (DBO_5^*)
Tasa Normal	85-90 (DBO_5)	15 (DBO_5^*)
Baja tasa	90-95 ($BD O_5$)	7.5 (DBO_5^*)

Fuente: Bengston (2017)

Los Sólidos Totales (ST), se componen de los sólidos suspendidos (SS) y sólidos disueltos (SD). A su vez éstos se subdividen en sólidos suspendidos volátiles (SSV) y sólidos suspendidos fijos (SSF), y en sólidos disueltos volátiles (SDV) y sólidos disueltos fijos (SDF). Los más importantes en aguas residuales son los sólidos suspendidos (SS), especialmente los sólidos suspendidos volátiles (SSV) que son la materia orgánica (MO) presente en el agua residual en forma de partículas. La medición de los sólidos se hace gravimétricamente, es decir por peso, y consiste en filtrar la muestra con un filtro seco de peso conocido. Después de secarlos en un horno a 105 °C se vuelve a pesar el conjunto filtro y sólidos filtrados, y por diferencia se conoce el peso de los sólidos filtrados de un volumen determinado de muestra, y así su concentración en mg/L. Los sólidos volátiles se determinan por su evaporación a más de 550 °C en una mufla (mientras los sólidos inorgánicos o fijos no evaporan hasta una temperatura mucho mayor). [22]

Figura 13

Clasificación de los sólidos en las aguas residuales



Fuente: Orozco (2014)

Otro tipo de sólido importante en agua residual son los sólidos sedimentables, SS_{Sed}, que se determinan por el volumen (mL) de sólidos que se asienta en 30 minutos en un recipiente cónico conocido como el Cono de Imhoff. Sirven para determinar la cantidad y asentabilidad de los lodos presentes en el agua residual o el licor mixto. [22]

2.2.5 Coagulación.

Es el proceso de formación de pequeñas partículas gelatinosas mediante la adición de un coagulante al agua y la aplicación de energía de mezclado que desestabiliza las partículas suspendidas por neutralización de las cargas de coloides cargados negativamente. La coagulación comienza en el mismo instante en que se agrega el coagulante y dura solo fracciones de segundo. Desde el punto de vista electrostático, el propósito de la coagulación es reducir el potencial zeta por adición de iones específicos e inducir la desestabilización de las partículas para aglomerarlas.

La coagulación es el tratamiento más eficaz para la eliminación de impurezas en el agua y también puede representar un gasto elevado cuando no se realiza

adecuadamente. La dosis de coagulante condiciona el funcionamiento de las unidades de sedimentación y es imposible realizar una buena clarificación si la cantidad de coagulante no es la adecuada, para ello se debe realizar la técnica de prueba de jarras para determinar la dosis óptima de coagulante a utilizar. [23]

Agentes coagulantes. Son sustancias químicas utilizadas para inducir la aglomeración de partículas coloidales y dar origen a la formación de flóculos más grandes que son más rápidos de sedimentar. [23]

Coagulantes convencionales. Los coagulantes más comunes que se usan en el tratamiento de aguas son compuestos inorgánicos de aluminio o hierro como el sulfato de aluminio, aluminato de sodio, sulfato ferroso, sulfato férrico y cloruro férrico. Cada coagulante tiene un rango específico de pH donde tiene la mínima solubilidad y ocurre la máxima precipitación dependiendo, también, las características químicas del agua a tratar. [23]

La reacción de hidrólisis del sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ está dada por la siguiente ecuación:



Los iones de aluminio hidratados $[Al(H_2O)_6]^{3+}$ actúan como un ácido en el sentido Brönsted y reaccionan, por tanto, con las bases que encuentran en el agua. Según la definición de Brönsted, se considera que una molécula actúa como un ácido cuando dona un protón (H^+); y como base, cuando acepta un protón (H^+). [25]

Coagulantes alternativos. En los últimos 25 años se ha desarrollado una nueva generación de coagulantes inorgánicos prepolimerizados tales como el policloruro de aluminio (PAC), el cual se comporta diferente a los coagulantes convencionales en el proceso de clarificación debido a sus características de espesación química. Los flóculos de policloruro de aluminio (PAC) tienden a ser grupos de pequeñas esferas y/o estructuras tipo cadena con tamaño menor a 25 mm, mientras que los flóculos sulfato de aluminio son usualmente estructuras esponjosas y porosas con tamaño de 25 a 100 mm. Esta diferencia estructural

hace que los floculos de PAC produzcan una menor turbidez en suspensión que el sulfato de aluminio.

El policloruro de aluminio (PAC) se consideran más eficientes que el sulfato de aluminio dadas las ventajas de menor producción de lodos y la menor dependencia de la temperatura y el pH. [23]

Tabla 3

Comparación entre sulfato de aluminio y PAC.

Criterio	Sulfato de Aluminio	PAC
Temperatura	La temperatura afecta a la hidrólisis y, por ende, la producción de complejos hidroxilos cargados positivamente esenciales para la coagulación.	Menor efecto de la temperatura por la presencia de formas de aluminio prepolimerizadas.
pH	El rango de pH controla cuál especie de hidroxilo de aluminio se produce.	Se espera menor impacto del pH por la presencia de formas de aluminio prepolimerizadas.
Especie de aluminio	La mayoría de especies de aluminio son complejos hidroxilo monoméricos con una carga catiónica de +1 a +3.	Presencia de formas de aluminio monoméricas y poliméricas.
Cinética	Más lenta.	Más rápida.

Fuente: Cogollo (2010)

2.2.6. Marco Legal

D.S. N°010-2019-VIVIENDA. Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario.

D.S N°003-2002-PRODUCE. Aprueban Límites Máximos Permisibles y Valores Referenciales para las actividades industriales de cemento, cerveza, curtiembre y papel.

Tabla 4*VMA para descarga de aguas residuales no domésticas al alcantarillado*

Parámetro	Unidad	Simbología	VMA para descargas al sistema de alcantarillado
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l	<i>DBO₅</i>	500
Demanda química de oxígeno	mg/l	DQO	1000
Sólidos suspendidos totales	mg/l	S.S.T.	500
Aceites y grasas	mg/l	A y G	100

*Fuente: Anexo N°1 del Decreto supremo N°010-2019- VIVIENDA.***Tabla 5***Límites máximos permisibles de efluentes para alcantarillado*

Parámetros	Cemento	Cerveza	Papel
pH	6 - 9	6 - 9	6 - 9
Temperatura (°C)	35	35	35
Sólidos Susp. Tot. (mg/l)	50	350	500
Aceites y Grasas (mg/l)	---	15	50
DBO ₅ (mg/l)	---	500	500
DQO (mg/l)	---	1000	1000

Fuente: Tomado del Decreto supremo N°003-2002-PRODUCE.

Tabla 6*Límites máximos permisibles de efluentes para aguas superficiales*

Parámetros	Cemento	Cerveza	Papel
pH	6 - 9	6 - 9	6 - 9
Temperatura (°C)	35	35	35
Sólidos Susp. Tot. (mg/l)	50	30	30
Aceites y Grasas (mg/l)	---	3	10
DBO ₅ (mg/l)	---	30	30
DQO (mg/l)	---	50	50

Fuente: Tomado del Decreto supremo N°003-2002-PRODUCE.

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Remoción de carga orgánica de aguas residuales

Al hablar del tratamiento de aguas residuales de tipo domésticas se puede aplicar generalmente tratamientos biológicos como por ejemplo la tecnología de lodos activados, incluso es factible diseñar y dimensionar una planta solo conociendo el caudal a tratar y su concentración de carga orgánica. Para diseñar y seleccionar una tecnología de tratamiento para el saneamiento de las aguas residuales industriales, primero es necesario conocer la industria en donde están generando estos efluentes y en base a ello seleccionar los parámetros necesarios a analizar según la normativa de descarga, luego de acuerdo a los tipos y niveles de concentración de contaminantes elegir la tecnología adecuada. En este caso al tratarse de un agua residual procedente de la industria de cerveza artesanal, se tendrá un agua con concentración de carga orgánica elevada que hay que tratar con la tecnología más eficiente. Se sabe que los métodos aerobios y anaerobios combinados han obtenido buenos resultados, sin embargo, han sido aplicados a escala de gran industria, en este caso al tratarse

de una industria de cerveza artesanal es importante tomar en cuenta el factor de espacio disponible, por lo que se busca utilizar un método de tratamiento de una sola etapa, en este caso se decidió estudiar la eficiencia de remoción orgánica aplicando la tecnología MBBR.

Características del agua residual de la industria de cerveza. En el proceso de elaboración de la cerveza se generan tanto residuos líquidos como sólidos y semisólidos. Según la literatura en la producción de 1 L de cerveza, se generan de 3 a 10 L de aguas residuales.

Los rangos promedios de valores de DQO, DBO₅ y S.S.T. son de 2000-6000, 1200-3600 mg/L y 5100-8750 mg/L respectivamente. [26]

2.3.2. Tecnologías de tratamiento biológico

Existen diferentes tecnologías de tratamiento biológico aplicados a efluentes procedentes de las industrias de bebidas como la industria cervecera, dentro de las cuales se destacan los tratamientos combinados, en donde en una primera etapa se remueve parcialmente la carga orgánica haciendo uso de un reactor anaerobio, donde se puede lograr hasta un 80% de remoción, luego este efluente es llevado a una etapa de pulido aplicando un tratamiento aerobio logrando hasta un 95% de remoción de carga orgánica. En este caso al tratarse de una industria de cerveza artesanal, es necesario tomar en cuenta el factor espacio disponible, por lo tanto no es posible desarrollar un tratamiento que implique implementar grandes instalaciones, es por esa razón que se pensó en evaluar la eficiencia de un reactor aerobio tipo MBBR que utiliza medios de soporte para incrementar el área de crecimiento biológico, reduciendo considerablemente el volumen del reactor y permitiendo aplicar el tratamiento en una sola etapa.

Parámetros importantes para el tratamiento MBBR. La principal función de la tecnología MBBR aplicada a las aguas residuales, es la de remover los contaminantes que pueden ser biodegradables por lo que debe cumplir con ciertos parámetros que son determinantes para su aplicación y funcionamiento. Al tratarse de un proceso aerobio, debe considerarse el control del oxígeno disuelto en el licor de mezcla, es por eso que se controlará la alimentación de

aire. También es importante mantener la temperatura, presión y pH con poca variación, para mantener estable las condiciones de crecimiento. El pH de ingreso al sistema debe estar en el rango de 6.5-8.5.

Se seleccionaron tres parámetros como variables, el tiempo de retención hidráulico (TRH), el porcentaje en volumen de llenado de carriers en el reactor y la dosificación de coagulante, los dos primeros relacionados directamente a la remoción de contaminantes biodegradables y al crecimiento biológico, y el último como factor importante para lograr una sedimentación de lodos eficiente, luego de la etapa de tratamiento biológico.

Porcentaje en volumen de carriers. Como recomendación de las bibliografías consultadas, el llenado en volumen de carriers no debe ser menor al 40% por que se reduce el área superficial de crecimiento biológico, ni mayores al 60% para evitar un movimiento deficiente de los carriers en el reactor.

Tiempo de retención hidráulico (TRH). Se seleccionó un volumen de reactor definido, conocido el volumen del reactor y el porcentaje en volumen de carriers, se puede calcular el volumen ocupado por los carriers y el líquido en el reactor. Fijado el volumen del reactor, obtenido el volumen ocupado por líquido y conocida la concentración de la carga orgánica biodegradable en el afluente (DBO_5), se puede calcular el caudal de diseño hipotético. Dividiendo el volumen ocupado por el líquido y el caudal de diseño, obtendremos el tiempo de retención hidráulico.

Dosificación de coagulante. Para garantizar una sedimentación eficiente, la correcta formación de flóculos y favorecer la remoción de SST, se probaron dos productos en diferentes dosis.

Mediante la técnica de prueba de jarras se probó primero con el coagulante convencional sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) y después con el coagulante alternativo (PAC, Policloruro de aluminio), obteniendo mejor formación de flocs y mejorando la eficiencia de sedimentación con el producto policloruro de aluminio (PAC). [25]

2.3.3 Normativa legal aplicada al agua residual

El uso de la tecnología MBBR para el tratamiento de aguas residuales de la industria cervecera artesanal, remueve la carga orgánica posibilitando el cumplimiento del D.S. N°010-2019- VIVIENDA y D.S N°003-2002-PRODUCE.

2.4. Definición de términos básicos

Agua residual industrial. Son aquellas aguas con contaminantes procedentes de cualquier actividad industrial.

Carrier. Medio de soporte biológico de material polimérico, que tiene un área de superficie alta por unidad de volumen en donde se formará la biopelícula [17]

Cerveza artesanal. Se elabora a partir de ingredientes totalmente naturales, que no llevan aditivos artificiales ni conservantes, simplemente agua, levadura, maltas y lúpulos [7]

Coagulante. Son sustancias químicas utilizadas para inducir la aglomeración de partículas coloidales y dar origen a la formación de flóculos más grandes que son más rápidos de sedimentar. [25]

MBBR. Reactor de biopelícula de lecho móvil. [18]

TRH. Tiempo de retención hidráulica. Su valor se obtiene al dividir el volumen de la parte líquida en el reactor entre el caudal de diseño.

SST. Sólidos suspendidos totales. Cantidad de residuos retenidos en un filtro de fibra de vidrio con tamaño de poro nominal de 0.45 micras y hace referencia al material particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual.

SALR. Tasa de carga del área superficial (SALR). Con unidades de $g/m^2/día$, es decir, $g/día$ de DBO que ingresa al tanque MBBR por m^2 de superficie del soporte (Carrier). [19]

VMA. Valores máximos admisibles. Son aquellos valores de concentración de elementos, sustancias, parámetros físicos o químicos, que caracterizan a un efluente (fluido procedente de una instalación industrial) que va a ser

descargado a la red de alcantarillado y que, al ser excedidos, causan daño inmediato o progresivo a las instalaciones o infraestructura sanitaria. [25]

LMP. Límites máximos permisibles. Es la concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o a una emisión, que al ser excedido causa o puede causar daños a la salud, bienestar humano y al ambiente. [3]

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

Hipótesis general

La eficiencia de remoción de la carga orgánica mediante la tecnología MBBR es mayor a 80%.

Hipótesis específicas

La concentración de la DBO, DQO y SST del agua residual procedente de la industria de cerveza artesanal no cumple con los límites máximos permisibles de efluentes para alcantarillado según DS 003-2002 PRODUCE.

El tiempo de residencia tiene influencia significativa en la eficiencia de remoción de carga orgánica.

El porcentaje de volumen de carriers tiene influencia significativa en la eficiencia de remoción de carga orgánica.

La dosificación de coagulante tiene influencia significativa en la eficiencia de remoción de carga orgánica.

3.1.1 Operacionalización de variables

Variable dependiente

Y= Eficiencia de remoción de la carga orgánica. Porcentaje de remoción de la carga orgánica del agua residual de una industria de cerveza artesanal. Lo que se busca es obtener el porcentaje de remoción de los contaminantes orgánicos o la carga orgánica biodegradable del agua residual.

Variables independientes

X₁ = Tiempo de retención hidráulico. Variable controlante que indica el tiempo de residencia hidráulica del agua residual en el reactor MBBR.

X₂ = Porcentaje de llenado de carriers. Variable controlante que indica el porcentaje en volumen de llenado de carriers con respecto al volumen del reactor MBBR.

X₃ = Dosificación de coagulante. Variable controlante que indica la concentración de coagulante óptima en el agua residual para lograr la separación sólido-líquido.

Tabla 7

Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO	TÉCNICA
Y=Eficiencia de remoción de la carga orgánica.	Eficiencia de tratamiento que tiene una tecnología para remover los contaminantes o sustratos presentes en un agua residual. (Metcalf & Eddy)	Eficiencia de la remoción de la carga orgánica de las aguas residuales de la industria cervecera artesanal	Porcentaje de remoción de carga orgánica (%)	DBO ₅ DQO SST	Cálculo	$\%R = \frac{S_o - S}{S_o} \times 100$
X₁ = Tiempo de retención hidráulico (TRH)	Tiempo durante el que se almacena un volumen de agua residual en una de las instalaciones (De Anda Valades, 2021)	Tiempo que el agua residual permanece en el tanque MBBR para ser tratada.	Tiempo	4 h 8 h	Observacional	Medición directa
X₂= Dosificación de coagulante	Graduación de la cantidad o porción de algunas cosas (RAE, https://dle.rae.es/dosificar?m=form)	Graduación de la concentración de coagulante.	Concentración de coagulante (ppm)	23 mg/L 46 mg/L	Observacional	Medición directa
X₃ = Porcentaje de llenado de carriers	Proporción entre el volumen del carrier y el volumen de tanque que toma como referencia el número 100. (RAE, https://dle.rae.es/porcentaje)	Es la proporción entre el volumen ocupado por los carriers respecto al volumen total de tanque	Porcentaje de llenado de carriers	40% 60%	Observacional	Medición directa

IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

4.1. Diseño metodológico

La presente investigación se tipifica por su naturaleza como aplicada ya que cubre una necesidad a través del conocimiento científico [28] (Concytec). Por su enfoque es cuantitativo porque prueba una hipótesis planteada a través de la recolección de datos. Por su nivel es explicativa porque explica causa y efecto (Hernandez Sampieri) [29]. Por su diseño es experimental, porque se busca obtener una respuesta de la variable dependiente (Y) al manipular variables independientes (X).

El diseño experimental se muestra en la tabla 8 donde vemos que usaremos 3 factores y 2 niveles.

Tabla 8

Diseño experimental

N°	Factores	Unidades	Notación	Niveles	
				Menor	Mayor
1	Tiempo de Retención Hidráulica	horas	X ₁	4	8
2	Dosificación de Coagulante	ppm	X ₂	23	46
3	Porcentaje de llenado de Carriers	%	X ₃	40	60

Tabla 9*Matriz de experimentación*

N°	X ₁	X ₂	X ₃	Eficiencia de remoción DBO ₅ (%)	Eficiencia de remoción DQO (%)	Eficiencia de remoción SST (%)
1	4	23	40	Y ₁	Y ₂	Y ₃
2	4	23	60	Y ₁	Y ₂	Y ₃
3	4	46	40	Y ₁	Y ₂	Y ₃
4	4	46	60	Y ₁	Y ₂	Y ₃
5	8	23	40	Y ₁	Y ₂	Y ₃
6	8	23	60	Y ₁	Y ₂	Y ₃
7	8	46	40	Y ₁	Y ₂	Y ₃
8	8	46	60	Y ₁	Y ₂	Y ₃

El experimento básico es de 8 corridas, 3 factores cada uno con 2 niveles. Tres réplicas para cada uno, haciendo un total de 24 corridas experimentales.

4.2. Método de investigación

Etapas de la investigación

La investigación se realizó en 4 etapas:

Primera etapa: Caracterización del agua residual. Como primera etapa de este proyecto se realizó la caracterización del agua residual, que fue muestreada en una industria de cerveza artesanal ubicada en el distrito de Barranco, siendo analizada en un laboratorio acreditado para obtener los niveles de carga orgánica (DBO₅, DQO, SST)

Segunda etapa: Selección del volumen de los reactores y cálculo del volumen de carriers. Como segunda etapa se seleccionaron recipientes para ser usados como reactores a escala de laboratorio, una vez adquiridos, se procedió a realizar los cálculos para el llenado de los reactores al 40% y 60% de volumen de carriers.

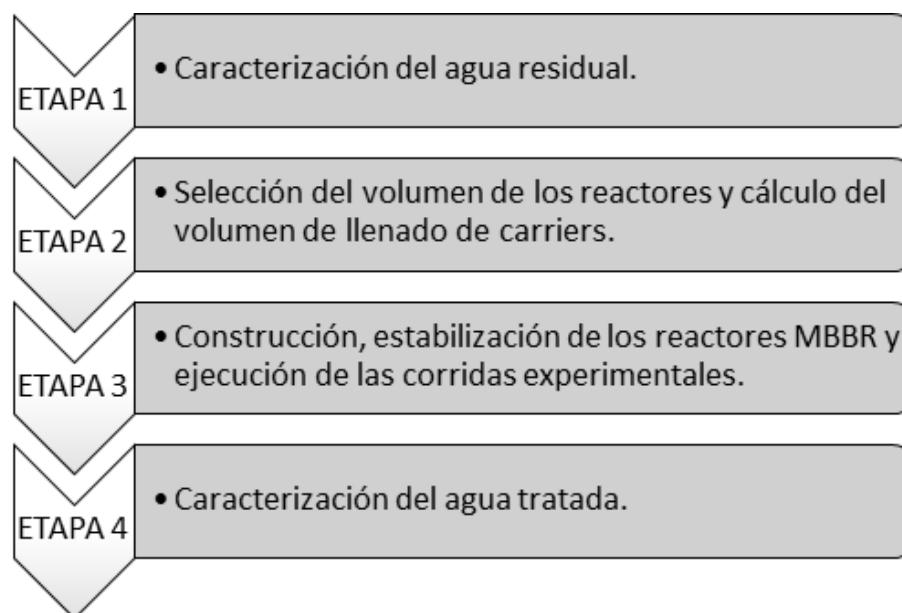
Tercera etapa: Construcción, estabilización de los reactores MBBR y ejecución de las corridas experimentales. En la tercera etapa se construyeron dos módulos MBBR incluyendo el sistema de alimentación de aire, luego se inocularon para favorecer al crecimiento biológico en los carriers, una vez estabilizados los módulos se procedió a realizar las corridas experimentales.

Cuarta etapa: Caracterización del agua tratada. En la cuarta etapa se realizó la caracterización del agua tratada y se procedió a realizar el análisis y procesamiento de datos.

En la figura 14 se muestra un diagrama de bloques de las etapas de la investigación.

Figura 14

Diagrama de bloques de las etapas experimentales



4.3. Población y muestra

Población

La población de esta investigación está conformada por las aguas residuales procedentes de una planta de cerveza artesanal, ubicada en el distrito de Barranco.

Muestra

La muestra está constituida por el volumen de agua residual utilizada para cada tratamiento que de acuerdo al tamaño de los reactores utilizados fue de un promedio de 11 L.

4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado

La construcción del equipo, puesta en marcha del módulo MBBR y evaluación de los parámetros de operación se realizaron en el distrito de Los Olivos entre los meses de febrero y marzo del 2023. Los análisis de la caracterización del agua residual procedente de la cervecería artesanal se realizaron en un laboratorio con equipos debidamente calibrados. La muestra de agua residual se obtuvo de una industria de cerveza artesanal ubicada en el distrito de Barranco.

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

4.5.1. Determinación de las variables de diseño

Tratándose de un proceso biotecnológico y a escala de laboratorio se trabajó en un sistema por lotes. Se seleccionaron dos recipientes con volumen útil de 13 L para ser usados como reactores MBBR.

Los parámetros considerados como variables fueron: tiempo de retención hidráulica, porcentaje de llenado de carriers y dosificación de coagulante.

Porcentaje de llenado de carriers. El porcentaje de llenado de carriers fue seleccionado en base a recomendaciones de diversas bibliografías, indicando que no debe ser menor al 40%, ni mayor al 60% de llenado; por lo tanto, se decidió seleccionar los valores extremos del intervalo. Reactor MBBR 1 al 40% de llenado de carriers. Reactor MBBR 2 al 60% de llenado de carriers.

Tiempo de retención hidráulica. Se realizaron cálculos con ecuaciones de diseño como sigue:

Cálculo del volumen ocupado por los carriers. Fijado el volumen de los reactores, se procedió a calcular el volumen ocupado por los carriers al 40% y 60% de llenado.

$$V_T = \frac{V_c}{f_c} \quad (4)$$

V_c : Volumen de carrier requerido (L)

f_c : Fracción de llenado de carrier

V_T : Volumen requerido del tanque (L)

Reactor MBBR 1: $V_c = 5.2 L$

Reactor MBBR 2: $V_c = 7.8 L$

Cálculo del área de superficie del carrier. Para calcular el área de superficie del carrier, se necesita el área de superficie específica del carrier que es proporcionada por el proveedor.

$$V_c = \frac{A_c}{A_e} \quad (5)$$

A_c : Área de superficie del carrier requerida (m^2)

A_e : Área de superficie específica del Carrier (m^2/m^3)

V_c : Volumen de carrier requerido (m^3)

$$A_e = 1000 m^2/m^3$$

Reactor MBBR 1: $A_c = 5.2 m^2$

Reactor MBBR 2: $A_c = 7.8 m^2$

Cálculo de la tasa de carga. La tasa de carga del área superficial se tomó de la Tabla 2 como carga normal.

$$A_c = \frac{DBO_5^*}{SALR} \quad (6)$$

DBO_5^* : Tasa de carga de DBO (g/d)

SALR: Tasa de carga del área superficial (g/m².d)

A_c : Área de superficie del carrier requerida (m²)

SALR = 15

Reactor MBBR 1: $DBO_5^* = 78 \text{ g/d}$

Reactor MBBR 2: $DBO_5^* = 117 \text{ g/d}$

Cálculo del caudal de diseño. Se calculó el caudal de diseño hipotético, ya que como se mencionó el módulo trabajará con alimentación por lotes. La DBO_5 del afluente se consideró de 2000 mg/L, cercano al valor promedio según las características del agua residual procedente de las cervecerías.

$$DBO_5^* = S_0 \times Q \quad (7)$$

Q: Caudal del afluente (m³/d)

S_0 : DBO_5 del afluente (g/m³)

DBO_5^* : Tasa de carga de DBO (g/d)

Reactor MBBR 1: $Q = 78 \text{ m}^3/\text{d}$

Reactor MBBR 2: $Q = 117 \text{ m}^3/\text{d}$

Cálculo del tiempo de retención hidráulico.

$$\theta = \frac{V_L}{Q} \quad (8)$$

V_L : Volumen de líquido en el tanque (m³)

Q: Caudal del afluente (m³/d)

θ : Tiempo de retención hidráulico (d)

Reactor MBBR 1: $\theta = 0.306 \text{ d} = 7.34 \text{ h}$

Reactor MBBR 2: $\theta = 0.195 \text{ d} = 4.68 \text{ h}$

Se decidió seleccionar el tiempo de retención hidráulico del inmediato inferior y superior a los obtenidos en los cálculos; 4 y 8 horas, como niveles de la variable.

Dosificación de coagulante. La dosis óptima de concentración de coagulante aplicada según pruebas de jarras, varió entre 23 y 46 mg/L. Los valores extremos del intervalo fueron seleccionados como niveles de la variable.

4.5.2. Procedimiento y desarrollo de las corridas experimentales

Primera etapa: Estabilización biológica. Construido los reactores se procedió a realizar el aporte de nutrientes para favorecer al crecimiento y estabilización biológica en los carriers. Esta etapa tuvo una duración de aproximadamente un mes.

Figura 15

Crecimiento y estabilización biológica de los reactores



Segunda etapa: Muestreo del agua residual. Se realizó la toma de muestras de las aguas residuales generadas en la industria de cerveza artesanal.

Tercera etapa: Almacenamiento y homogenización de la muestra. La muestra fue llevada al laboratorio, tamizada con una tela de nylon para separar sólidos mayores, luego fue almacenada en dos tanques de 200 litros en donde se homogenizó manualmente.

Figura 16

Tamizado y almacenamiento del agua residual



Cuarta etapa: Caracterización del agua residual. Se realizó la caracterización del agua residual almacenada. El pH, la turbidez y la temperatura fueron analizadas con un equipo multiparámetro, y se preservaron muestras en envases de plástico para mandar a servicio de análisis por la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos suspendidos totales (SST).

Figura 17

Fotografía de la caracterización del agua residual



Quinta etapa: Elaboración de las corridas experimentales. Se realizaron los tratamientos según el diseño experimental. Se homogenizó manualmente el agua almacenada, luego se tomó una muestra para alimentar los reactores completando los 13 litros útiles en cada uno. Pasado el tiempo de retención hidráulica, se continuó con la etapa de dosificación y sedimentación en los conos Imhoff.

Figura 18

Dosificación de coagulante y sedimentación en conos Imhoff



Sexta etapa: Caracterización del agua tratada. Se preservaron muestras del clarificado obtenido en la sedimentación en envases herméticos para mandar a servicio de análisis por la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), la demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos suspendidos totales (SST).

4.5.3. Equipos y materiales.

Módulo MBBR, construido según diagrama en la figura 19. La secuencia de construcción fue la siguiente: (1) Instalación de los difusores de burbuja fina en los reactores. (2) Instalación del tubing de alimentación de aire desde los difusores. (3) Conexión de los tubing a los blowers o sopladores. (4) Cálculo de volumen y llenado de los carriers en los reactores al 40% y 60%. (5) Instalación de los conos Imhoff con soporte y nuez.

En la figura 20 se puede observar los reactores construidos con los carriers en su interior y los blowers correctamente instalados.

Figura 19

Diagrama del módulo MBBR

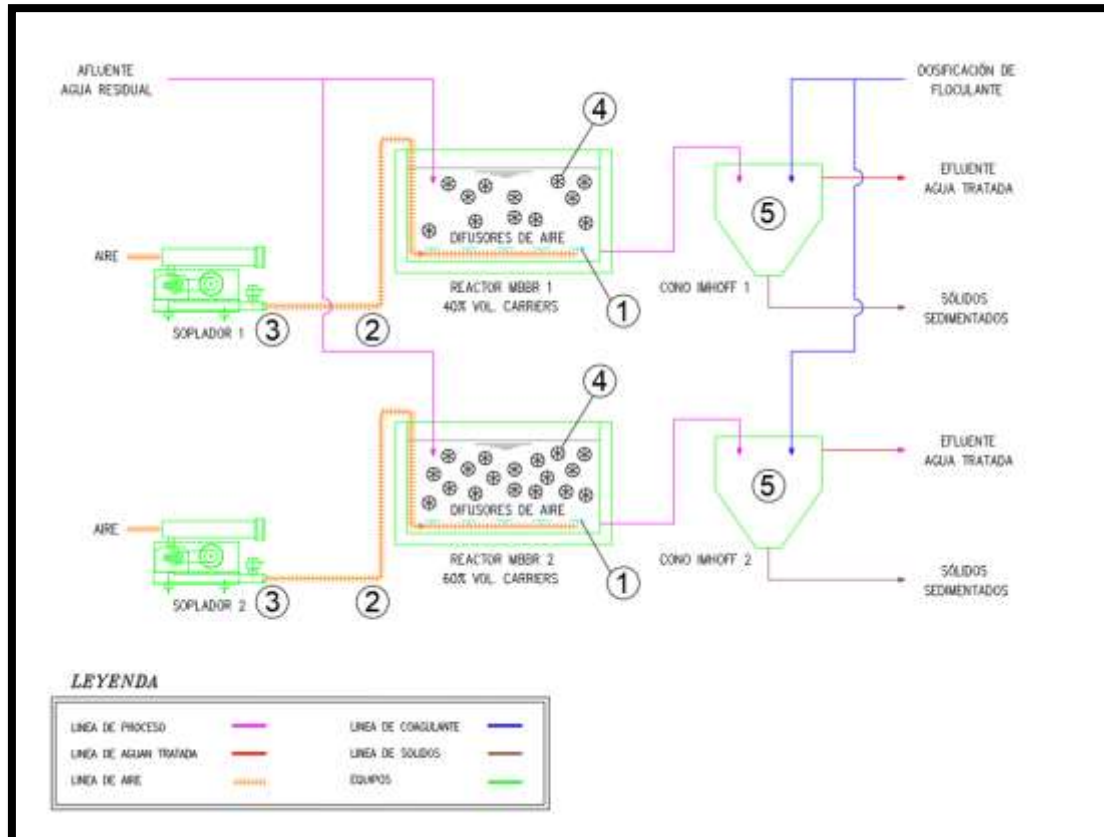


Figura 20

Módulo MBBR



Equipos.

02 Recipientes con caño de purga. Material: Plástico. Volumen útil: 13 L. Funcionarán como reactores MBBR, además, se colocarán los difusores y se añadirán los carriers.

12 Difusores de burbuja fina. Marca: Airstone. Se ubicarán en la base de los recipientes para alimentar oxígeno al proceso MBBR.

02 Sopladores. Marca: RESUN. Modelo: ACO-003. Capacidad: 65 L/min. Con repartidor de caudal. Aportará el aire al módulo de tratamiento.

01 Medidor multiparámetro. Marca: HACH. Modelo: HQ40D. Medición de pH en el afluente y oxígeno disuelto en los recipientes reactores.

01 Colorímetro digital. Marca: HACH. Modelo: DR900. Medición de sólidos suspendidos totales. Medición de DQO usando viales con solución de digestión.

01 Reactor digital. Marca: ROCKER. Modelo: CR-25. Digestión de la muestra de agua residual con los viales para determinación de DQO.

Materiales.

6 m Manguera de silicona transparente. Diámetro exterior 6 mm, diámetro interior 4 mm. Se instalarán los difusores de aire para transportar el aire desde los sopladores.

04 Llaves reguladoras de una salida. Conector de plástico de 4mm de apertura, compatible con manguera siliconada para acuario. Para regular la alimentación de aire al sistema.

13 L de medios de soporte o carriers. Diámetro: 16 mm. Altura: 10 mm. Número de cavidades: 6 unidades. Área de superficie específica: $1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Se integrarán a cada recipiente para soportar el crecimiento biológico.

02 Probetas graduadas. Material: Vidrio. Capacidad: 1000 ml. Medición del índice volumétrico de fangos.

02 Conos imhoff con soportes y nueces. Material: acrílico. Capacidad métrica: 1000 mL. Altura métrica: 480 mm. Cono de sedimentación para medición de sólidos sedimentables a la salida del módulo MBBR.

02 Baldes de 20 L. Material: Plástico. Para almacenamiento de agua residual y agua tratada.

Reactivos.

Hidróxido de sodio (NaOH) para control de pH en el afluente. Dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) para preparación de solución de digestión para determinación de DQO. Sulfato de plata (Ag_2SO_4) para preparación de solución de digestión de DQO. Agua destilada (H_2O). Policloruro de Aluminio (PAC) Marca: Aris. Como coagulante para mejorar la sedimentación de partículas coloidales.

4.6. Análisis y procesamiento de datos

Los datos se procesaron utilizando la estadística descriptiva e inferencial. La comprobación de las hipótesis se realizó utilizando el software MINITAB 19, hojas de cálculo de Excel.

4.7. Aspectos éticos en investigación

Los autores de la investigación se responsabilizan por la información emitida en el presente informe final de investigación. Este trabajo cuenta con datos fidedignos, los resultados fueron obtenidos en un laboratorio acreditado y cumple con todos los requisitos y responsabilidades señaladas en la normativa vigente.

V. RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos

En la tabla 10 se muestra la caracterización fisicoquímica del agua residual compuesta obtenido de una planta de cerveza artesanal ubicada en el distrito de Barranco, para el valor de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) se llevó la muestra a un laboratorio certificado que usaron la metodología descrita en el anexo 5, para demanda química de oxígeno (DQO) se llevó la muestra a un laboratorio certificado que usaron la metodología descrita en el anexo 6, para sólidos suspendidos totales (SST) se llevó la muestra a un laboratorio certificado en donde usaron la metodología descrita en el anexo 7 y para el resto de valores fue una medición directa usando el equipo multiparámetro.

Tabla 10

Caracterización del agua residual muestreada

Parámetro	Unidades	Valores
DBO ₅	mg/L	1494.2
DQO	mg/L	3114
SST	mg/L	274
Turbidez	NTU	466
pH	-	6.8
Temperatura	°C	23.62

Figura 21

Equipo multiparámetro



5.2. Resultados inferenciales

A partir de los resultados obtenidos en las corridas experimentales, se calcularon los porcentajes de remoción de la carga orgánica con la siguiente ecuación:

$$\%R = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100 \quad (9)$$

Donde:

%R: Porcentaje de remoción de DBO₅, DQO o SST (%)

S₀: Concentración de DBO₅, DQO o SST en el afluente (mg/L)

S: Concentración de DBO₅, DQO o SST en el efluente (mg/L)

% Remoción DBO₅ vs. TRH, concentración de coagulante, %carriers

En la tabla 11 se observan los resultados de la variable de respuesta “porcentaje de remoción de la DBO₅” se realizaron 8 corridas experimentales por triplicado, según el diseño factorial propuesto, además, se indican los valores promedios.

Tabla 11

Resultados de los porcentajes de remoción de DBO₅

N°	X ₁	X ₂	X ₃	Porcentaje de remoción			Promedio (%)
				de DBO ₅ (%)			
				1	2	3	
1	4	23	40	72.21	74.03	73.01	73.52
2	4	23	60	78.17	79.09	77.74	78.33
3	4	46	40	75.08	73.73	75.37	74.73
4	4	46	60	80.66	81.82	80.43	80.97
5	8	23	40	83.32	82.47	84.19	83.33
6	8	23	60	91.75	91.38	92.03	91.72
7	8	46	40	88.56	87.82	89.08	88.49
8	8	46	60	92.62	93.13	91.57	92.44

% Remoción DQO vs. TRH, concentración de coagulante, %carriers

En la tabla 12 se observan los resultados de la variable de respuesta “porcentaje de remoción de la DQO” se realizaron 8 corridas experimentales por triplicado, según el diseño factorial propuesto, además, se indican los valores promedios.

Tabla 12

Resultados de los porcentajes de remoción de DQO

N°	X ₁	X ₂	X ₃	Porcentaje de remoción de DQO (%)			Promedio (%)
				1	2	3	
				1	4	23	
2	4	23	60	72.64	72.19	72.90	72.58
3	4	46	40	69.97	69.94	70.39	70.10
4	4	46	60	73.67	71.87	72.99	72.84
5	8	23	40	81.02	80.67	81.21	80.97
6	8	23	60	82.79	81.63	81.98	82.13
7	8	46	40	82.15	81.05	82.53	81.91
8	8	46	60	83.37	84.01	83.27	83.55

% Remoción SST vs. TRH, concentración de coagulante, %carriers

En la tabla 13 se observan los resultados de la variable de respuesta “porcentaje de remoción de SST” se realizaron 8 corridas experimentales por triplicado, según el diseño factorial propuesto, además, se indican los valores promedios.

Tabla 13

Resultados de los porcentajes de remoción de SST

N°	X ₁	X ₂	X ₃	Porcentaje Remoción de SST (%)			Promedio (%)
				1	2	3	
				1	4	23	
2	4	23	60	78.83	77.01	82.48	79.44
3	4	46	40	92.34	88.32	91.24	90.63
4	4	46	60	95.62	91.24	94.53	93.80
5	8	23	40	79.56	80.66	79.20	79.81
6	8	23	60	78.47	78.47	81.02	79.32
7	8	46	40	93.07	90.51	92.34	91.97
8	8	46	60	95.26	89.78	94.53	93.19

En la tabla 14 se observa el análisis de varianza, en donde se puede verificar la contribución que tiene cada factor con la variable de respuesta, basado en los resultados de la suma de cuadrados ajustado.

Se puede interpretar que para la variable de respuesta “%remoción de DBO₅” hay mayor contribución del factor X₁ (Tiempo de retención hidráulica) y en segundo lugar el factor X₃ (Porcentaje de llenado de carriers).

En la variable de respuesta “%remoción de DQO” se puede observar que el factor X₁ (Tiempo de retención hidráulica) es el que más contribución aporta y el que es más determinante respecto a los factores X₂ (Dosificación de coagulante) y X₃ (Porcentaje de llenado de carriers)

Para las variables de respuesta “%remoción de DBO₅” y “%remoción de DQO” se observa que los factores X₁, X₂ y X₃, tienen un valor de p menor al nivel de

significancia, indicando que los factores y la interacción entre ellos son significativos y las medias de los tratamientos difieren, es decir, existe diferencia significativa entre tratamiento, así mismo X_1 , X_2 y X_3 influyen en el %remoción de DBO_5 y DQO.

Para las variables de respuesta “%remoción de SST” se observa que los factores X_1 y X_3 , tienen un valor de p mayor al nivel de significancia, indicando que los factores y la interacción entre ellos no son significativos y las medias de los tratamientos no difieren, mientras que el factor X_2 tiene un valor de p menor al nivel de significancia, indicando las medias de los tratamientos difieren, es decir, existe diferencia significativa entre tratamiento, así mismo X_2 influye en el %remoción de SST.

Tabla 14

Análisis de varianza para para %remoción de DBO_5 , %remoción de DQO y %remoción de SST.

Variable de respuesta	Factor	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados ajustados (SC ajustado)	Contribución (%)	Cuadrados medios ajustados (MC ajustado)	Valor p
%Remoción de DBO_5	X_1	1	895.32	78.04	895.320	0.000
	X_2	1	38.72	3.37	38.721	0.000
	X_3	1	213.23	18.59	213.229	0.000
	Total	3	1147.27	100.00		
%Remoción de DQO	X_1	1	811.58	92.59	811.579	0.000
	X_2	1	14.45	1.65	14.455	0.010
	X_3	1	50.49	5.76	50.491	0.000
	Total	3	876.52	100.00		
%Remoción de SST	X_1	1	6.80	0.59	6.80	0.252
	X_2	1	1128.86	97.74	1128.86	0.000
	X_3	1	19.32	1.67	19.32	0.061
	Total	3	1154.98	100.00		

En la tabla 15 se observa el resumen de los modelos para las tres variables de respuesta, observándose que el R-cuadrado es alto para un modelo de regresión simple, esto quiere decir que el valor de R-cuadrado indica el porcentaje de variabilidad del %remoción de DBO₅, DQO y SST es influenciado por los factores X₁, X₂ y X₃.

Tabla 15

Resumen de los modelos.

Variable de respuesta	Desviación estándar (S)	R-cuadrado (R ²)	R-cuadrado ajustado (R ² ajustado)	R-cuadrado pronosticado (R ² pronosticado)
%Remoción de DBO ₅	1.13560	97.80%	97.47%	96.83%
%Remoción de DQO	1.33925	96.07%	95.48%	94.34%
%Remoción de SST	2.21172	92.19%	91.02%	88.75%

La tabla 16 indica los coeficientes de regresión que describen la relación entre un predictor y la variable de respuesta. Los coeficientes son los números por los cuales se multiplicaron los niveles de los factores para generar la ecuación de regresión.

El valor T es el resultado de dividir el coeficiente entre su error estándar. El valor p asociado al estadístico T es menor que el nivel de significancia, por lo tanto, se concluye que los coeficientes son estadísticamente significativos.

Se observa que el factor de inflación de la varianza es igual a uno, esto significa que no existe multicolinealidad, por lo tanto, se interpreta que los coeficientes son muy estables y que al no estar correlacionados no variarán ampliamente de una muestra a otra.

Tabla 16*Coefficientes.*

Variable de respuesta	Factor	Coefficiente	Error estándar del coeficiente (EE del coeficiente)	Valor T	Valor p	Factor de inflación de la varianza (FIV)
%Remoción de DBO ₅	Constante	82.885	0.232	357.57	0.000	
	X ₁	-6.108	0.232	-26.35	0.000	1.00
	X ₂	-1.270	0.232	-5.48	0.000	1.00
	X ₃	-2.981	0.232	-12.86	0.000	1.00
%Remoción de DQO	Constante	76.325	0.273	279.20	0.000	
	X ₁	-5.815	0.273	-21.27	0.000	1.00
	X ₂	-0.776	0.273	-2.84	0.010	1.00
	X ₃	-1.450	0.273	-5.31	0.000	1.00
%Remoción de SST	Constante	85.538	0.451	189.47	0.000	
	X ₁	-0.532	0.451	-1.18	0.252	1.00
	X ₂	-6.858	0.451	-15.19	0.000	1.00
	X ₃	-0.897	0.451	-1.99	0.061	1.00

En la tabla 17 se especifica la notación para los niveles de cada factor, para presentar las ecuaciones de regresión de manera más didáctica.

Tabla 17*Notación de niveles de los factores.*

Parámetros	Notación de factores	Notación de niveles de los factores	Valores
Tiempo de retención hidráulica (horas)	X ₁	X ₁₋₁	4
		X ₁₋₂	8
Dosificación de coagulante (ppm)	X ₂	X ₂₋₁	23
		X ₂₋₂	46
Porcentaje de llenado de carriers (%)	X ₃	X ₃₋₁	40
		X ₃₋₂	60

La tabla 18 muestra las ecuaciones de regresión que relaciona los factores con las variables de respuesta.

Tabla 18

Ecuaciones de regresión

Variable de respuesta	Ecuación de regresión
%Remoción de DBO ₅	$= 82.885 - 6.108 X_{1-1} + 6.108 X_{1-2} - 1.270 X_{2-1} + 1.270 X_{2-2} - 2.981 X_{3-1} + 2.981 X_{3-2}$
%Remoción de DQO	$= 76.325 - 5.815 X_{1-1} + 5.815 X_{1-2} - 0.776 X_{2-1} + 0.776 X_{2-2} - 1.450 X_{3-1} + 1.450 X_{3-2}$
%Remoción de SST	$= 85.538 - 0.532 X_{1-1} + 0.532 X_{1-2} - 6.858 X_{2-1} + 6.858 X_{2-2} - 0.897 X_{3-1} + 0.897 X_{3-2}$

En la figura 22, 23 y 24 se muestra la gráfica de probabilidad normal para el %remoción de DBO₅, DQO y SST respectivamente, se observa que los datos están relativamente cerca de la línea de distribución normal ajustada, por lo tanto, se puede interpretar que los datos siguen una distribución normal. Se puede ver que el valor de p es mayor al nivel de significancia ($\alpha=0.05$), por lo tanto, no se puede concluir que los datos no siguen una distribución normal y no se puede rechazar la hipótesis nula (H_0).

Figura 22

Gráfica de probabilidad normal para %remoción de DBO₅

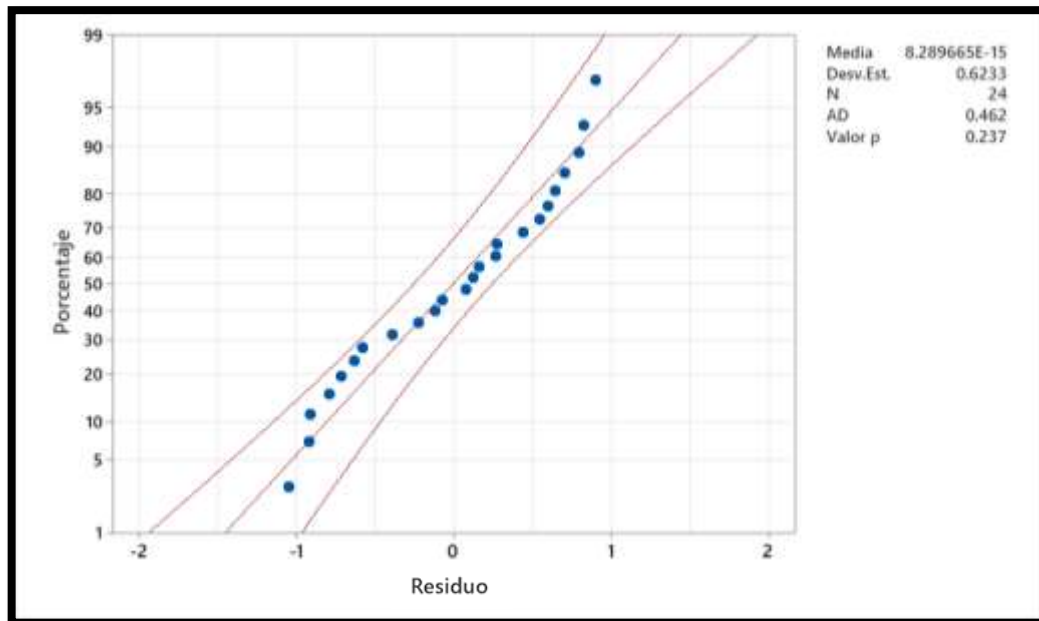


Figura 23

Gráfica de probabilidad normal para %remoción de DQO

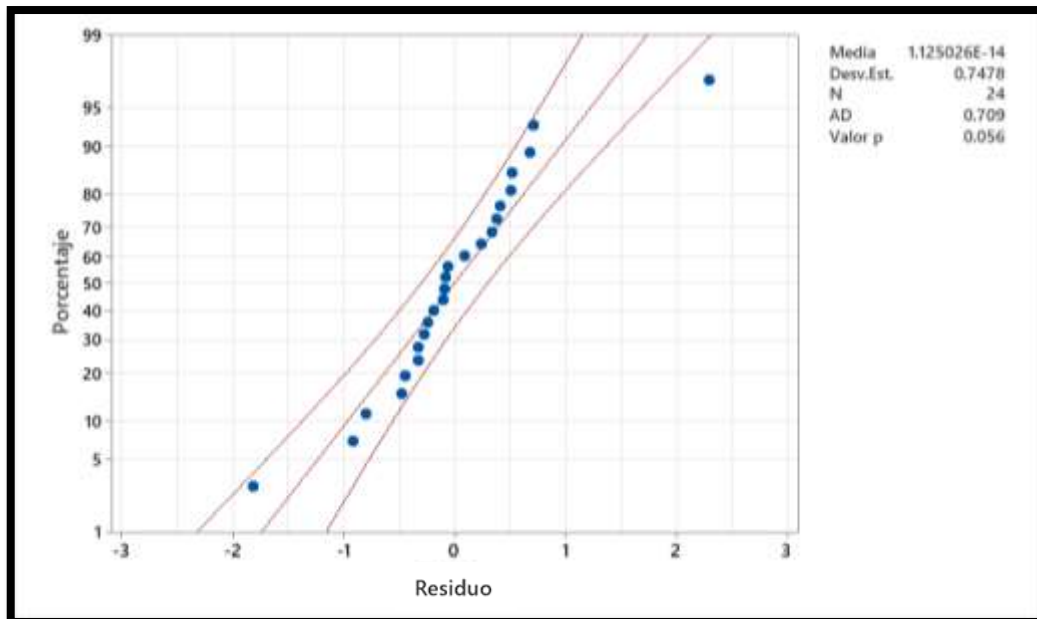
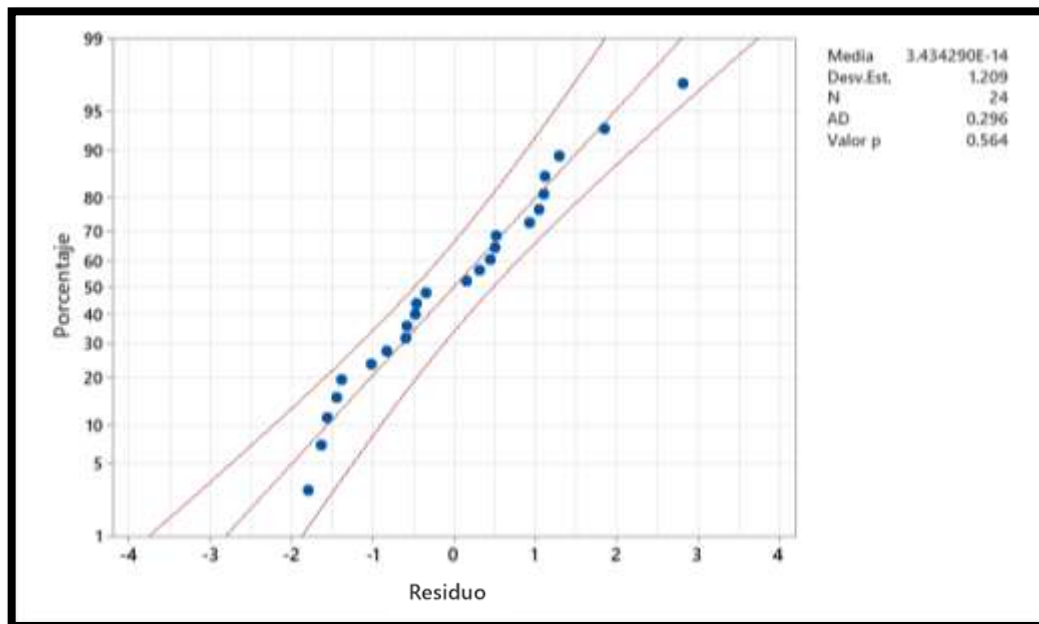


Figura 24

Gráfica de probabilidad normal para %remoción de SST



En la figura 25, 26 y 27 se muestra la gráfica de orden de observación para él %remoción de DBO₅, DQO y SST respectivamente, se observa que los residuos son independientes ya que no muestran tendencia ni patrones en el orden. No hay evidencia de patrones ni correlación. Los puntos se ubican aleatoriamente alrededor de la línea central.

Figura 25

Gráfica de residuos vs orden de observación para %remoción de DBO₅

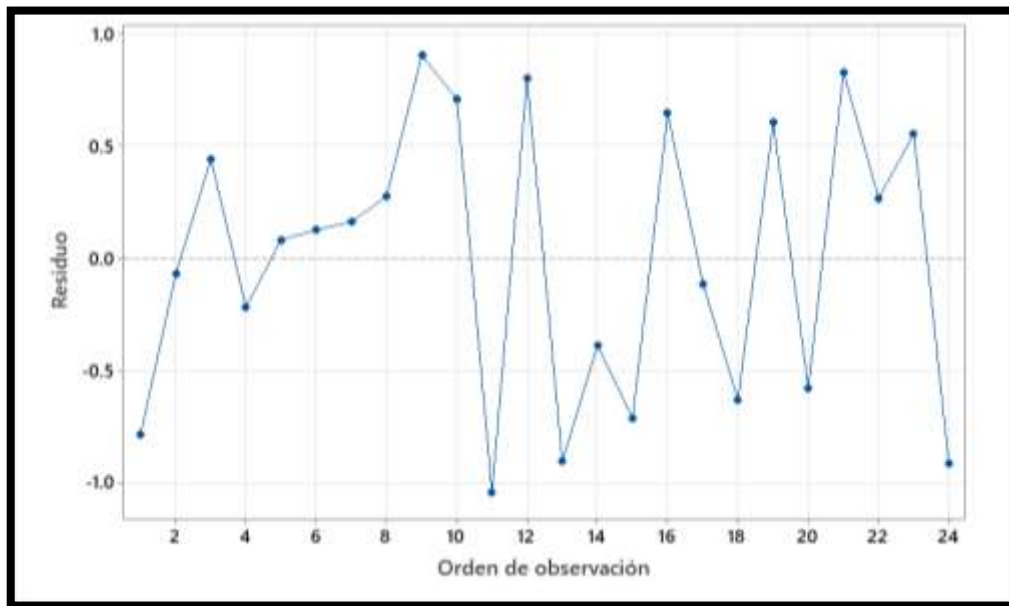


Figura 26

Gráfica de residuos vs orden de observación para %remoción de DQO

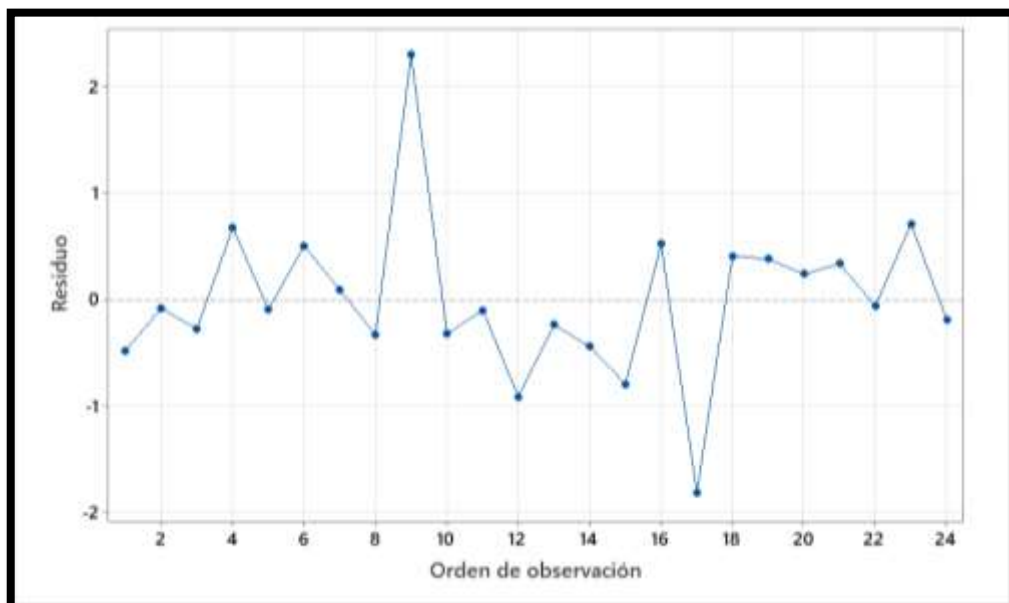
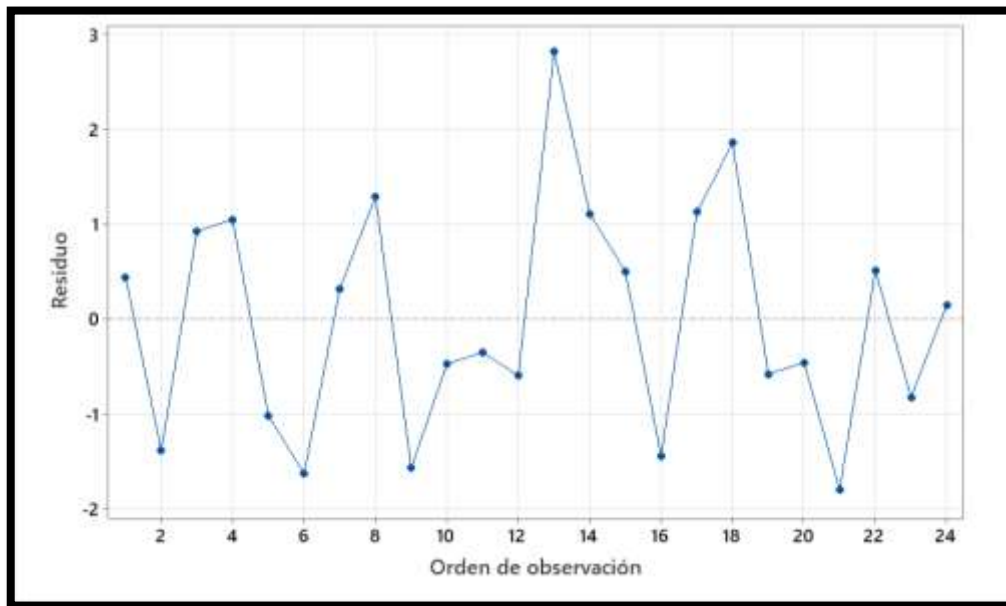


Figura 27

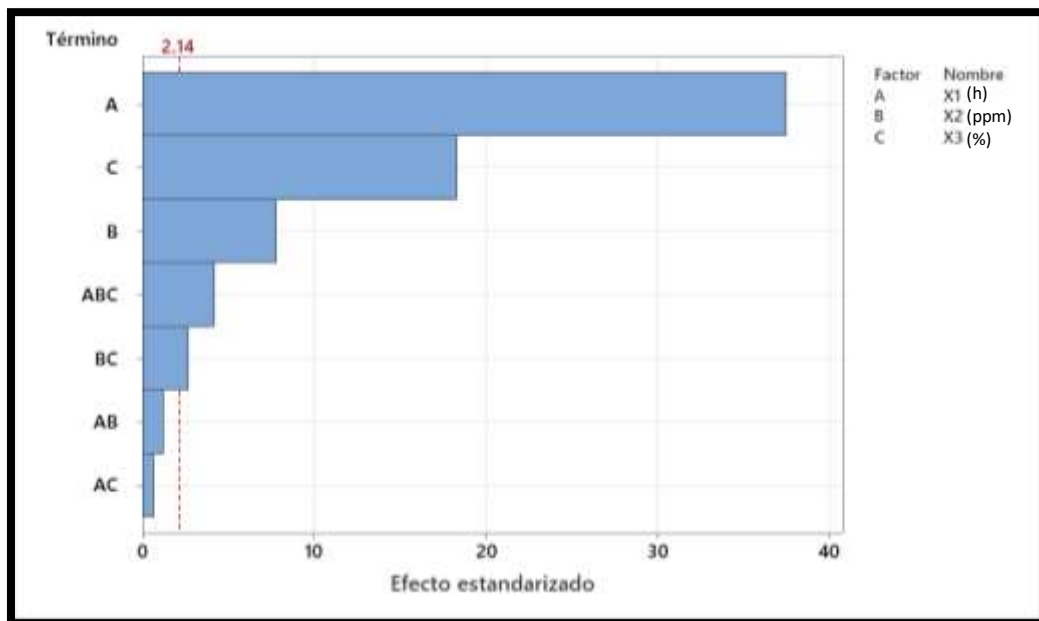
Gráfica de residuos vs orden de observación para %remoción de SST



La figura 28 muestra el diagrama de Pareto para el %remoción de DBO₅, se puede observar que los factores X₁, X₂ y X₃ influyen de manera significativa y positivamente en el %remoción de DBO₅, además, el factor X₁ (Tiempo de retención hidráulica) es el más determinante, seguido del factor X₃ (Porcentaje de llenado de carriers).

Figura 28

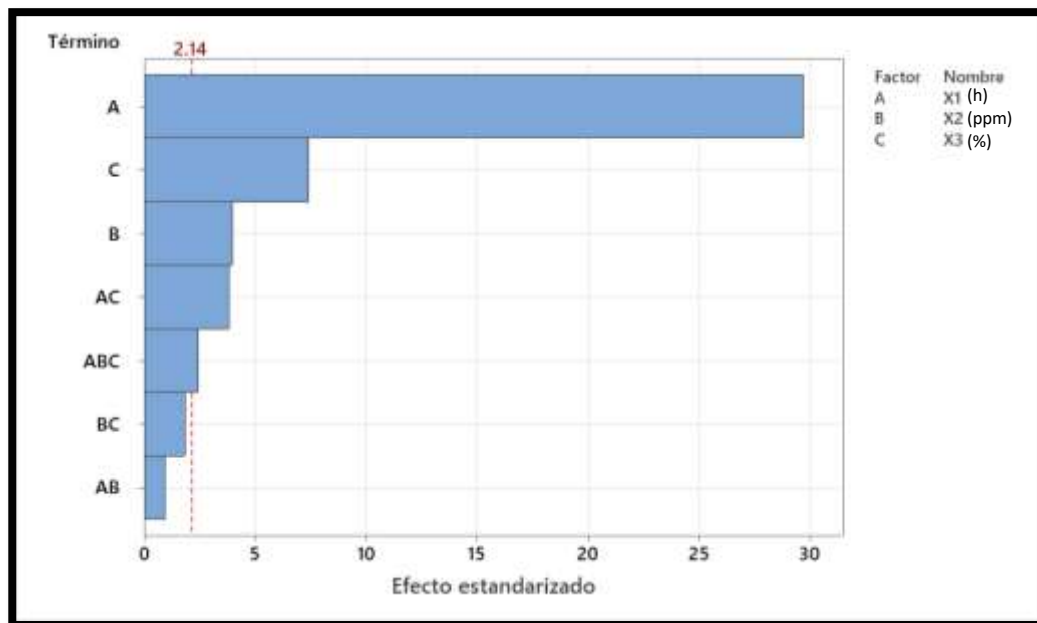
Diagrama de Pareto para %remoción de DBO₅



La figura 29 muestra el diagrama de Pareto para el %remoción de DQO, se puede observar que los factores X_1 , X_2 y X_3 influyen de manera significativa y positivamente en el %remoción de DBO₅, además, el factor X_1 (Tiempo de retención hidráulica) es el más determinante, seguido del factor X_3 (Porcentaje de llenado de carriers) en menor proporción.

Figura 29

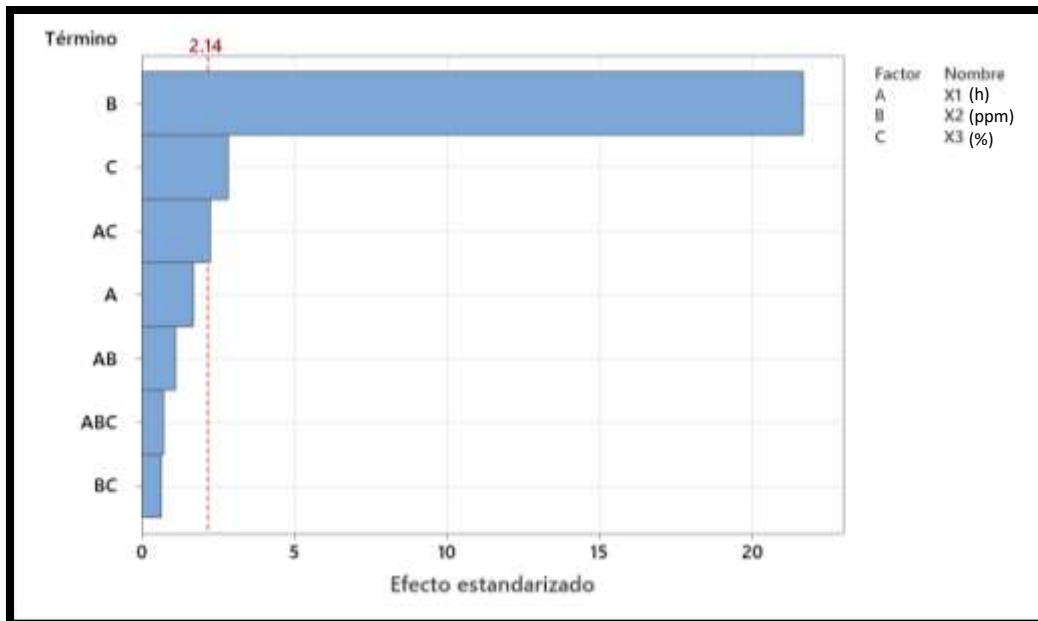
Diagrama de Pareto para %remoción de DQO



La figura 30 muestra el diagrama de Pareto para el %remoción de SST, se puede observar que los factores X_2 y X_3 influyen de manera significativa y positivamente en el %remoción de DBO_5 , además, el factor X_2 (Dosificación de coagulante) es el más determinante, seguido del factor X_3 (Porcentaje de llenado de carriers) en menor proporción.

Figura 30

Diagrama de Pareto para %remoción de SST



En la figura 31 se observa la gráfica de efectos principales para %remoción de DBO₅.

En el factor X₁ se observa que para 8 horas de tiempo de retención hidráulica el %remoción de DBO₅ es mayor que para 4 horas de tiempo de retención hidráulica.

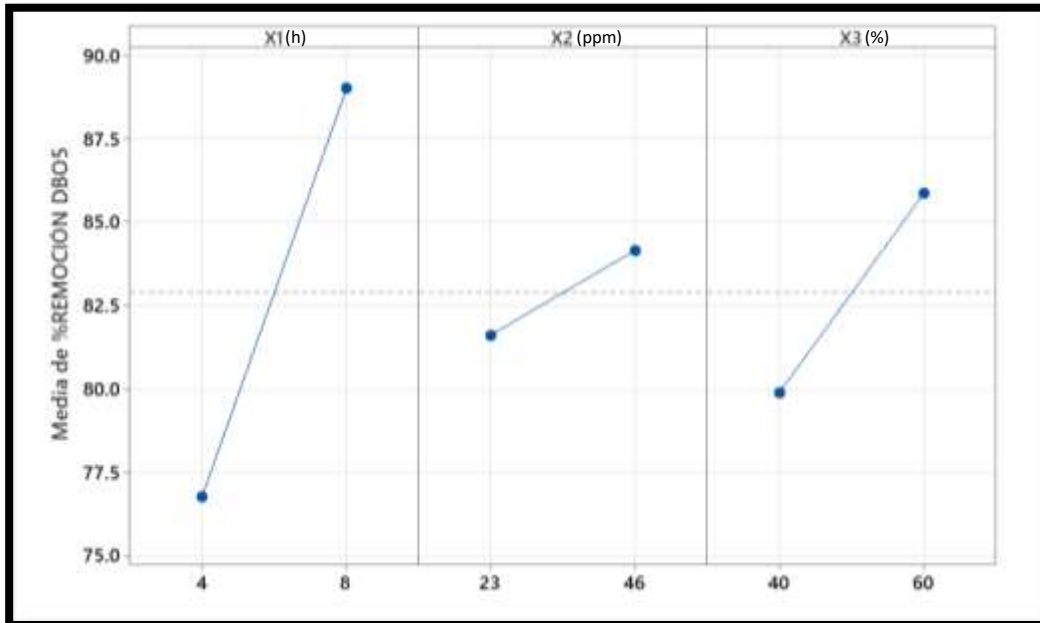
En el factor X₂ se observa que para 46 ppm de concentración final de coagulante en el sedimentador el %remoción de DBO₅ es mayor que para 23 ppm de concentración final de coagulante en el sedimentador.

En el factor X₃ se observa que para un 60% de volumen de llenado de carriers en el reactor el %remoción de DBO₅ es mayor que para un 40% de volumen de llenado de carriers.

Se observa que X₁, seguido de X₃ son los factores más determinantes para el aumento del %remoción de DBO₅.

Figura 31

Gráfica de efectos principales para %remoción de DBO₅



En la figura 32 se observa la gráfica de efectos principales para %remoción de DQO.

En el factor X_1 se observa que para 8 horas de tiempo de retención hidráulica el %remoción de DQO es mayor que para 4 horas de tiempo de retención hidráulica.

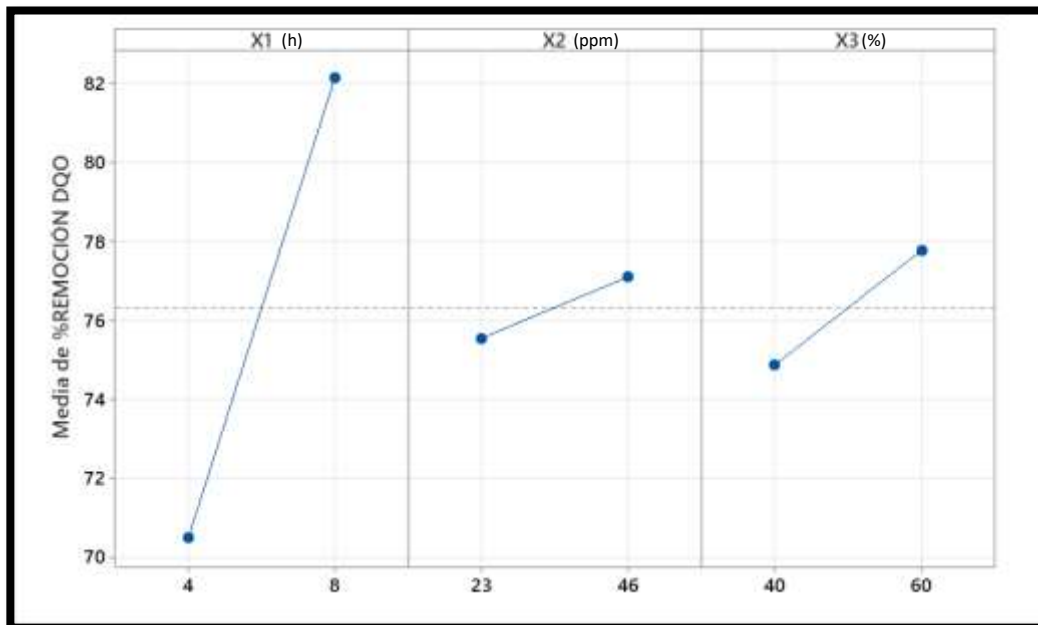
En el factor X_2 se observa que para 46 ppm de concentración final de coagulante en el sedimentador el %remoción de DQO es mayor que para 23 ppm de concentración final de coagulante en el sedimentador.

En el factor X_3 se observa que para un 60% de volumen de llenado de carriers en el reactor el %remoción de DQO es mayor que para un 40% de volumen de llenado de carriers.

Se observa que X_1 es el factor más determinante para el aumento del %remoción de DQO.

Figura 32

Gráfica de efectos principales para %remoción de DQO



En la figura 33 se observa la gráfica de efectos principales para %remoción de SST.

En el factor X_1 se observa que para 8 horas de tiempo de retención hidráulica el %remoción de SST es mayor que para 4 horas de tiempo de retención hidráulica.

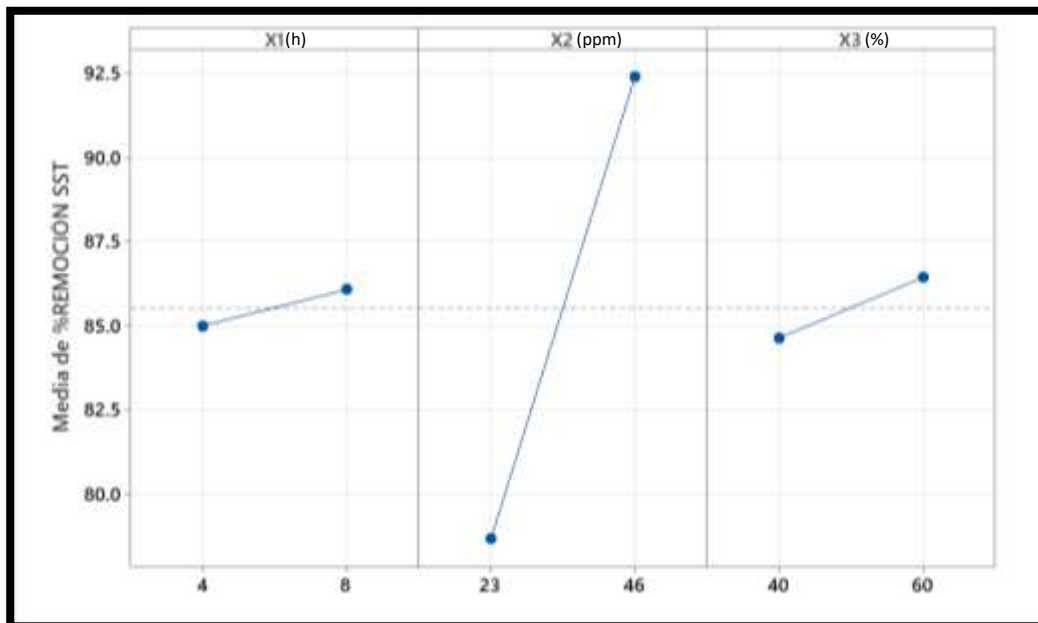
En el factor X_2 se observa que para 46 ppm de concentración final de coagulante en el sedimentador el %remoción de SST es mayor que para 23 ppm de concentración final de coagulante en el sedimentador.

En el factor X_3 se observa que para un 60% de volumen de llenado de carriers en el reactor el %remoción de SST es mayor que para un 40% de volumen de llenado de carriers.

Se observa que X_2 es el factor más determinante para el aumento del %remoción de SST.

Figura 33

Gráfica de efectos principales para %remoción de SST



VI. DISCUSION DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

Según los resultados, se pudo obtener una disminución de la carga orgánica del agua residual de la industria cervecera artesanal, representada en porcentaje de remoción de DBO₅, DQO y SST de 83.55%, 92.44% y 93.19% respectivamente, obtenidos trabajando con la combinación de factores X₁ (Tiempo de retención hidráulica), X₂ (Dosificación de coagulante (PAC)) y X₃ (Porcentaje de llenado de carriers) de 8 horas, 46 ppm y 60% respectivamente.

En análisis de varianza mostrado en la tabla 14, se puede verificar:

Para la variable de respuesta “%remoción de DBO₅” se observa que los factores X₁, X₂ y X₃ tiene un valor de p menor al nivel de significancia ($p < 0.05$), indicando que las medias de los tratamientos difieren, es decir, se acepta la hipótesis alterna, por lo tanto, existe diferencia significativa entre tratamiento, así mismo influyen en el %remoción de DBO₅.

Para la variable de respuesta “%remoción de DQO” se observa que los factores X₁, X₂ y X₃ tiene un valor de p menor al nivel de significancia ($p < 0.05$), indicando que las medias de los tratamientos difieren, es decir, se acepta la hipótesis alterna, por lo tanto, existe diferencia significativa entre tratamiento, así mismo influyen en el %remoción de DQO.

Para la variable de respuesta “%remoción de SST” se observa que los factores X₁ y X₃, tienen un valor mayor al nivel de significancia ($p > 0.05$), indicando que los factores y la interacción entre ellos no son significativos y las medias de los tratamientos no difieren, es decir, se acepta la hipótesis nula, por lo tanto, no existe diferencia significativa entre tratamiento y tienen poca o nula influencia en el %remoción de SST; mientras que el factor X₂ tiene un valor de p menor al nivel de significancia ($p < 0.05$), indicando que las medias de los tratamientos difieren, es decir, se acepta la hipótesis alterna, por lo tanto, existe diferencia significativa entre tratamiento, así mismo X₂ influye en el %remoción de SST.

Los resultados obtenidos nos permitieron probar la hipótesis general, usando la prueba t student como se observa en la tabla 19, se puede verificar que los

valores de p son menores al valor de significancia ($p < 0.05$), por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula ($\mu = 80 \%$) y se acepta la hipótesis alterna ($\mu > 80\%$) para la remoción de carga orgánica usando la tecnología MBBR.

Tabla 19

t student del % de remoción de DBO₅, DQO y SST

Variable respuesta	Valor T	Valor p
% Remoción de DBO ₅	1.98	0.03
% Remoción de DQO	2.41	0.012
% Remoción de SST	3.68	0.001

6.2. Contratación de los resultados con otros estudios similares

Se realizaron tratamientos a una muestra del agua residual domestica proveniente de la una empresa productora de cerveza artesanal en el distrito de Barranco, la mejor combinación de variables obtenida con los factores tiempo de retención hidráulico, concentración de coagulante de PAC y porcentaje de llenado de carriers fue de 8 horas, 46 ppm y 60% respectivamente.

En la caracterización de la muestra se reportó 3114 ppm de DQO inicial, logrando disminuir la concentración de DQO hasta 512 ppm, obteniendo de un porcentaje de remoción de DQO de 92.44%, el valor obtenido guarda similitud con el análisis del trabajo de investigación titulado, “Optimización de la operación del reactor de biopelícula de lecho móvil (MBBR) para tratamiento de aguas residuales de cervecería (Boyle, 2019)” donde se usó 2 reactores MBBR para el tratamiento de aguas procedentes de la industria cervecera en ambos tanques se usaron 2 tipos de carriers que fueron (Kaldnes K5 and Kontakt), el agua de ingreso tenía un valor de 2000 mg/L de DQO, el TRH trabajado fue en un rango de 2 a 12 horas, en ambos tanques se determinó que en el de las 4 horas se obtenía el valor de remoción máxima mientras que a las 12 horas el valor se mantenía constante logrando una eficiencia de 92% de DQO. Comparado con este trabajo logramos igualar obtener una remoción mayor al 80 % de DQO, sin embargo, el TRH seleccionado para nuestro tratamiento fue mayor debido a que nuestra concentración de DQO en el afluente fue superior.

Por otro lado en el trabajo titulado “Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la industria alimentaria basada en Flotación y MBBR (Falleti, 2014)”, el autor trabajó en el tratamiento de agua residual procedente de la industria alimentaria ubicada en Italia, que contenía como equipos principales una etapa de flotación, un reactor híbrido MBBR (relleno con 35% de AnoxKaldnes (carrier)) seguidos de un tanque de oxidación de lodos activados, el tratamiento primario de flotación removió el 64% de DQO y el 65% de aceites y grasas, mientras que la etapa de oxidación biológica removió el 92% de DQO y el 96% de aceites y grasas, comparando con este estudio, se puede confirmar que al igual que nuestro trabajo logramos obtener un porcentaje de remoción de DQO superior al 80%, confirmando resultados similares y contrastables.

6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes

La presente investigación se realizó en cumplimiento de las legislaciones vigentes y directivas involucradas, respetando la ética del proceso de investigación, sin alteración de protocolos y/o métodos de obtención de resultados. De acuerdo al reglamento del código de ética de investigación de la Universidad Nacional del Callao, aprobado por Resolución N° 260-2019-CU.

VII. CONCLUSIONES

En esta tesis se logró determinar la eficiencia de remoción de la carga orgánica aplicando la tecnología MBBR como método de tratamiento para un agua residual procedente de una planta de cerveza artesanal, obteniendo porcentajes de remoción de carga orgánica por encima del 80%, la tecnología MBBR nos permite tratar el agua residual de la industria cervecera de manera eficiente, además, gracias a los carriers, se puede favorecer al aumento del área superficial de crecimiento biológico permitiendo que se use menos espacio para el dimensionamiento del reactor.

Las características fisicoquímicas del agua residual procedente de una planta de cerveza artesanal en las concentraciones de DBO_5 , DQO y SST fue de 1494.2 mg/L, 3114 mg/L y 274 mg/L, respectivamente.

La influencia del tiempo de retención hidráulica en la eficiencia de remoción de carga orgánica del agua residual tuvo mayor efecto en la remoción de la DBO_5 y DQO, y menor efecto en la remoción de SST.

La influencia del volumen llenado de carriers en el reactor en la eficiencia de carga orgánica del agua residual tuvo mayor efecto en la remoción de la DBO_5 , DQO y menor efecto en la remoción de SST.

La influencia de la dosificación de coagulante en la eficiencia de remoción de carga orgánica del agua residual tuvo menor efecto en la remoción de la DBO_5 y DQO, y mayor efecto en la remoción de los SST.

VIII. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar un tratamiento primario a la muestra de agua residual aplicando la operación de tamizaje, para evitar que ingresen sólidos de diámetro aparente superiores a 3 mm al sistema de tratamiento MBBR, ya que, al ser un tratamiento biológico, la biomasa removerá solamente la carga orgánica que se encuentre disuelta, mientras que los sólidos suspendidos que queden sin remover serán separados en la etapa de sedimentación.
2. Es recomendable realizar una marcha blanca con agua potable al equipo de tratamiento MBBR para verificar que la disposición de los difusores de burbuja fina sea la adecuada y evitar se generen puntos muertos de poca agitación que desfavorezcan la acción de lecho móvil y generen la acumulación y saturación de los carriers.
3. Se recomienda medir y ajustar el nivel de pH de la muestra del agua residual antes de que ingrese a los reactores MBBR, ya que, al tratarse de una tecnología basada en la remoción de carga orgánica por medio de la oxidación biológica, valores fuera del rango de 6.5 a 8.5 puede ocasionar la generación de muerte celular y perjudicar la eficiencia del sistema de tratamiento.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el ámbito de las empresas prestadoras*. Lima: Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento - SUNASS, 2022.
- [2] HOUGH, J. *Biotecnología de la cerveza y de la malta*. Zaragoza (España): : Editorial Acribia, S.A.. ISBN: 978-84-200-0681-9, 1990.
- [3] *Decreto Supremo N°003-2002-PRODUCE. Aprueban Límites Máximos Permisibles y Valores Referenciales para las actividades industriales de cemento, cerveza, curtiembre y papel*. Lima: Ministerio de la Producción - PRODUCE, 2002.
- [4] Aguasresiduales.Info. [En línea]. Lima: Perú [fecha de consulta: 16 de octubre del 2022] Disponible en: <https://www.aguasresiduales.info>
- [5] *Sistema Nacional de Información Ambiental*. [En línea]. Lima: Perú. [fecha de consulta: 22 de octubre del 2022] Disponible en: <https://sigea.sinia.pe/variableConsulta?variableId=22787>
- [6] *Instituto Nacional de Estadística e Informática*. [En línea]- Perú. [fecha de consulta: 24 de octubre del 2022]. Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/indices_tematicos/60_1.xlsx, 2020.
- [7] *Unión de Cerveceros Artesanales del Perú*. [En línea]. Lima: Perú. [fecha de consulta: 22 de octubre del 2022]. Disponible en: <https://www.facebook.com/ucap.pe/>, 2020.
- [8] BOYLE, K. *Optimización de la operación del reactor de biopelícula de lecho móvil (MBBR) para el tratamiento de aguas residuales de cervecería*. Ottawa, Ontario (Canadá) : Ottawa-Carleton Institute for Environmental Engineering. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.20381/ruor-23395>, 2019.
- [9] BERING, S. *et al. The application of moving bed bio-reactor (MBBR) in*

commercial laundry wastewater treatment. Szczecin (Poland) : Science of the Total Environment, págs. 1638-1643. Vol. 627, 2018.

[10] FALLETI, L. *et al. Food Industry Wastewater Treatment Plant based on Flotation and MBBR*. Milano (Italia) : Academic Star Publishing Company, págs. 562 - 586. Vol. 1. ISSN 2333-2581. Disponible en: DOI: 10.15341/mes(2333-2581)/02.01.2015/006, 2014.

[11] ANDREOTTOLA, G. *et al. Dairy wastewater treatment in a moving bed biofilm*. Trento (Italy) : IWA Publishing, págs. 321–328. Vol. 45. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0441>. 2002.

[12] DÍAZ, M. *Diagnóstico del método del tratamiento de agua residual en cervecería BACKUS – Motupe* [en línea]. Tesis de grado. Lambayeque(Perú): Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo [consulta: enero de 2023]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12893/9868>. 2021.

[13] REYES, W. *Optimización del tratamiento de aguas residuales domésticas mediante la implementación del Sistema MBBR – Caylloma*. Lima (Perú). Rev. del Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM, págs 43-50. Vol 23 n° 45. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.15381/iigeo.v23i45.18047>, 2020.

[14] BALAREZO, K. *Evaluación del sistema biológico MBBR en la ampliación de capacidad de tratamiento en una PTAR existente para aguas residuales de la industria de alimentos* [en línea]. Tesis de grado. Lima (Perú): Universidad Nacional Agraria La Molina [consulta: enero de 2023]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3200>. 2018.

[15] ADALBERTO, J. *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. 1 ed. México: : Instituto de ingeniería UNAM. ISBN: 978-607-02-4822-1, 2013.

[16] METCALF & EDDY. *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. 3 ed. Madrid (España): : Mc Graw-Hill / Interamericana de España, S.A. ISBN: 10: 8448116070, 1995.

- [17] BEJARANO, M. y ESCOBAR, M. *Eficiencia del uso de microorganismos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en una planta de tratamiento de agua residual* [en línea]. Tesis de grado. Bogotá (Colombia): Universidad de La Salle [consulta: enero de 2023]. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/299
- [18] ROMERO, J. *Tratamiento de Aguas Residuales; Teoría y principios de diseño*. 3 ed. Bogotá: : Escuela Colombiana de Ingeniería. ISBN: 978-958-8060-13-2, 2004.
- [19] DIONISI, D. *Procesos de Tratamiento Biológico de Aguas Residuales. Balances de masa y calor*. 2 ed. Boca Raton (EEUU): : Taylor & Francis Group. ISBN 9780367573935, 2017.
- [20] BENGTON, H. *Procesos de tratamiento biológico de aguas residuales II: Procesos MBBR*. 1 ed. London: : Continuing Education and Development, Inc., ISBN-10:1520316410, 2017.
- [21] VON SPERLING, M. *Serie de tratamiento biológico de aguas residuales Vol. 5, Lodos activados y Reactores de biopelícula aeróbica*. 2 ed. London: : IWA Publishing. ISBN 9781780402123, 2007.
- [22] OROZCO, A. *Bioingeniería de aguas residuales; teoría y diseño*, 1 ed. Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria, ISBN 978-958-96548-2-8, 2014.
- [23] COGOLLO, J. *Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio*, 2019, Universidad Nacional de Colombia.
- [24] *Decreto Supremo N°010-2019-VIVIENDA. Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario*. Lima: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2019.
- [25] ARBOLEDA, J. *Teoría y práctica de la purificación del agua*, 3 ed. Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. ISBN: 958-41-0012-2, 2000.

[26] SIMATE, G. *et al.* *The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art* (USA): Elsevier, págs. 235–247. Vol. 273. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.02.035>, 2011.

[27] REYES, R. Y REYES, S. *Efecto De Las Cargas Hidráulica Y Orgánica Sobre La Remoción Másica De Un Empaque Estructurado En Un Filtro Percolador* (Mexico): Revista Mexicana de Ingeniería Química V, págs. 101–109. Vol. 8., 2009.

[28] Investigación aplicada. En: *Concytec- Glosario de términos* [en línea]. Disponible en: <https://conocimiento.concytec.gob.pe/termino/investigacion-aplicada/> [consulta: 25 enero 2023].

[29] Hernández, R. *Metodología de la investigación* 5 ed. México DF (México): : Mc Graw-Hill / Interamericana de España, S.A. ISBN: 978-607-15-0291-9, 2010.

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

“EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA MEDIANTE LA TECNOLOGÍA MBBR DEL AGUA RESIDUAL PROCEDENTE DE UNA PLANTA DE CERVEZA ARTESANAL”

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p>General</p> <p>¿Cuál es la eficiencia de remoción de la carga orgánica mediante la tecnología MBBR del agua residual procedente de una planta de cerveza artesanal?</p>	<p>General</p> <p>Determinar la eficiencia de remoción de la carga orgánica mediante la tecnología MBBR de una planta de cerveza artesanal.</p>	<p>General</p> <p>La eficiencia de remoción de la carga orgánica mediante la tecnología MBBR es mayor a 80%.</p>	<p>Variables dependientes:</p> <p>Eficiencia de remoción de la carga orgánica.</p>	<p>Remoción Orgánica</p>	<p>Porcentaje de remoción</p>	<p>Tipo de investigación: Cuantitativa Aplicada Diseño de investigación: Experimental</p>
<p>Específico</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Qué características de carga orgánica tiene el agua residual procedente de una industria de cerveza artesanal? • ¿Cómo influye el tiempo de retención hidráulica en la eficiencia de la remoción de la carga orgánica? • ¿Cómo influye el porcentaje de volumen de carriers en la eficiencia de remoción de la carga orgánica? • ¿Cómo influye la dosificación de coagulante en la eficiencia de remoción de la carga orgánica? 	<p>Específico</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinar las características de carga orgánica del agua residual procedente de la industria de cerveza artesanal. • Determinar la influencia del tiempo de retención hidráulica en la eficiencia de la remoción de la carga orgánica. • Determinar la influencia del porcentaje de volumen de carriers en la eficiencia de remoción de la carga orgánica. • Determinar la influencia de la dosificación de coagulante en la eficiencia de remoción de la carga orgánica. 	<p>Específicas</p> <ul style="list-style-type: none"> • La concentración de la DBO₅, DQO y SST del agua residual procedente de la industria de cerveza artesanal no cumple con los límites máximos permisibles de efluentes para alcantarillado según DS 003-2002 PRODUCE. • El tiempo de residencia tiene influencia significativa en la eficiencia de remoción de carga orgánica. • El porcentaje de volumen de carriers tiene influencia significativa en la eficiencia de remoción de carga orgánica. • La dosificación de coagulante tiene influencia significativa en la eficiencia de remoción de carga orgánica. 	<p>Variables independientes: Tecnología MBBR.</p> <ul style="list-style-type: none"> • TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRAÚLICA • DOSIFICACIÓN DE COAGULANTE • PORCENTAJE DE LLENADO DE CARRIERS. 	<p>Tiempo</p> <p>Químicos</p> <p>Volumen</p>	<p>4 h 8 h</p> <p>23 mg/l 46 mg/l</p> <p>40% 60%</p>	<p>Nivel correlacional: Causa-efecto</p>

Anexo 2: Informe de ensayo y reporte de resultados para el análisis de resultados de DBO₅, DQO y SST.



SOLUCIONES QUIMICAS AMBIENTALES SAC

INFORME DE ENSAYO N° 013-2023

I. DATOS DEL SERVICIO

CLIENTE	:	OSCAR MANCO CUEVA
MATRIZ	:	AGUA
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA	:	INDUSTRIAL
MUESTREADO POR	:	CLIENTE
CANTIDAD ENVASES DE MUESTRA	:	75
FECHA DE INICIO DE LOS ENSAYOS	:	11-03-2023
FECHA DE FIN DE LOS ENSAYOS	:	14-03-2023
FECHA DE EMISION DE INFORMES	:	23-03-2023



INFORME DE ENSAYO N° 013-2023

II. RESULTADOS

FECHA			23/03/2023									
CODIGO DE MUESTRA			DBO 00X	DBO 001	DBO 002	DBO 003	DBO 004	DBO 005	DBO 006	DBO 007	DBO 008	
DESCRIPCION DE MUESTRA			AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL									
FECHA Y HORA DE MUESTREO			11/3/2023	11/3/2023	11/3/2023	11/3/2023	11/3/2023	12/3/2023	12/3/2023	12/3/2023	12/3/2023	
			11:51	21:21	21:59	21:25	22:00	04:38	05:02	04:38	05:03	
ENSAYO	VMA	unidad										
DBO	500	mg/l	1494.2	415.3	326.2	372.4	289.0	249.3	123.2	171.0	110.2	
DDO	1000	mg/l	3114	1053	852	935	820	591	536	556	518	
SST	500	mg/l	274	62	58	21	12	56	59	19	13	

Fecha: 23/03/2023

Correo: ventas@sqa Peru.com

Página 2 de 5



INFORME DE ENSAYO N° 013-2023

FECHA			23/03/2023									
CODIGO DE MUESTRA			1 DBO 001	1 DBO 002	1 DBO 003	1 DBO 004	1 DBO 005	1 DBO 006	1 DBO 007	1 DBO 008		
DESCRIPCION DE MUESTRA			AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL									
FECHA Y HORA DE MUESTREO			13/3/2023	13/3/2023	13/3/2023	13/3/2023	13/3/2023	13/3/2023	13/3/2023	13/3/2023		
			01:46	02:20	01:49	02:23	08:53	09:36	08:58	09:36		
ENSAYO	VMA	unidad										
DBO	500	mg/l	388.0	312.5	392.5	271.7	262.0	128.8	182.0	102.6		
DDO	1000	mg/l	973	866	936	876	602	572	590	498		
SST	500	mg/l	75	63	32	24	53	59	26	28		

Fecha: 23/03/2023

Correo: ventas@sqa Peru.com

Página 3 de 5



SOLUCIONES QUÍMICAS AMBIENTALES SAC

INFORME DE ENSAYO N° 013-2023

FECHA			23/03/2023							
CODIGO DE MUESTRA			2 DBO 001	2 DBO 002	2 DBO 003	2 DBO 004	2 DBO 005	2 DBO 006	2 DBO 007	2 DBO 008
DESCRIPCION DE MUESTRA			AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL							
FECHA Y HORA DE MUESTREO			13/3/2023	13/3/2023	13/3/2023	13/3/2023	14/3/2023	14/3/2023	14/3/2023	14/3/2023
			19:04	19:37	19:05	19:57	00:24	00:53	00:25	00:58
ENSAYO	VMA	unidad								
DBO	500	mg/L	403.3	332.6	368.0	292.4	236.2	119.1	163.2	126.0
DOO	1000	mg/L	1102	844	922	841	585	561	544	521
SST	500	mg/L	59	48	24	15	57	52	21	15

*V.M.A.: Valores Máximos Admisibles

Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas, de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce

Fecha: 23/03/2023

Página 4 de 5



SOLUCIONES QUÍMICAS AMBIENTALES SAC

INFORME DE ENSAYO N° 013-2023

III. METODOS Y REFERENCIAS

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO
Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part5220 D, 23 rd Ed. 2017	Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part5220 D, 23 rd Ed. 2017. Biochemical Oxygen Demand (BOD)	5 Day BOD Test
Sólidos Suspendedos Totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 23 rd Ed. 2017	Solids. Total, Suspended Solids Dried at 103-105°C

Anexo 3: Resultados experimentales de DBO₅

N°	X1	X2	X3	Valores finales de		
				DBO ₅ (mg/L)		
				1	2	3
1	4	23	40	415,3	388	403,3
2	4	23	60	326,2	312,5	332,6
3	4	46	40	372,4	392,5	368
4	4	46	60	289	271,7	292,4
5	8	23	40	249,3	262	236,2
6	8	23	60	123,2	128,8	119,1
7	8	46	40	171	182	163,2
8	8	46	60	110,2	102,6	126

Anexo 4: Resultados experimentales de DQO

N°	X1	X2	X3	Valores finales de		
				DQO (mg/L)		
				1	2	3
1	4	23	40	1053	973	1102
2	4	23	60	852	866	844
3	4	46	40	935	936	922
4	4	46	60	820	876	841
5	8	23	40	591	602	585
6	8	23	60	536	572	561
7	8	46	40	556	590	544
8	8	46	60	518	498	521

Anexo 5: Resultados experimentales de SST

N°	X1	X2	X3	Valores finales de		
				DQO (mg/L)		
				1	2	3
1	4	23	40	62	75	59
2	4	23	60	58	63	48
3	4	46	40	21	32	24
4	4	46	60	12	24	15
5	8	23	40	56	53	57
6	8	23	60	59	59	52
7	8	46	40	19	26	21
8	8	46	60	13	28	15

Anexo 6: Determinación de DBO₅, Incubación y Electrometría. SM 5210B.

Alcance:

Esta técnica se aplica en el Laboratorio de Calidad Ambiental para el recurso hídrico superficial. No se hace uso de inhibidor en la técnica; el intervalo empleado es de 2 hasta 5000 mg O₂/L.

Equipos y materiales:

- Balanza analítica de cuatro cifras decimales.
- Estufa a 103 ± 1 °C.
- Medidor de oxígeno. Ver Manual de instrucciones de operación del medidor de oxígeno.
- Incubadora con temperatura controlada $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.
- pH metro.
- Aireador de acuario.
- Plancha de agitación.
- Micro –espátula metálica.
- Balón aforado de vidrio clase A de 1L, con tapa esmerilada.
- Pipetas aforadas de vidrio de 1, 2, 3, 5, 6, 10, 20, 50 mL clase A.
- Pipetas graduadas 10 mL, 20 mL.
- Probetas 25 mL, 50 mL, 100 mL, 250 mL.
- Pera de succión.
- Vasos de precipitados de 10, 50 y 100 mL.
- Botellas Winkler de aproximadamente 300 mL de capacidad
- Garrafa de 20 L de capacidad con llave.
- Agitador magnético.
- Barra agitadora.
- Solución tampón de fosfato
- Solución de sulfato de magnesio
- Solución de cloruro de calcio
- Solución de cloruro de hierro (III)

- Solución de cloruro de amonio

Procedimiento:

- Ajuste la temperatura de la muestra a $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. Establezca la cantidad de muestra que necesita de acuerdo a las diluciones a realizar. Agite suavemente la muestra para homogenización completa y sirva en un vaso de precipitados.
- Compruebe que el pH de la muestra esté entre 6 y 8, de no ser así ajústelo entre 7,0 y 7,2 con ácido sulfúrico 0.1 N o hidróxido de sodio 0.1 N, según sea el caso, dosificando estos reactivos con una pipeta Pasteur.
- Si la muestra presenta cloro residual disípelolo de 1 a 2 horas en la luz, si esto no da resultado adicione una solución de Na_2SO_3 , como agente declorador.
- Las muestras sobresaturadas con oxígeno disuelto se deben ajustar a temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, y agitar vigorosamente en una botella o aireando con aire comprimido filtrado y limpio. Para prevenir pérdidas de oxígeno durante la incubación.
- Aliste las botellas Winkler necesarias, entre 3 y 5 para cada una de las muestras. Rotule las botellas con el número de muestra y volumen correspondiente. Adicione a cada botella la cantidad de muestra que se ha establecido para la dilución. Si se requiere hacer dilución adicional, realícela en un balón aforado, agite y sirva en la botella la cantidad requerida. Registre en el formato M-S-LC-F013 la dilución o volumen de muestra utilizada.
- Si el volumen de la muestra corresponde a más del 67% del volumen de la botella (200 mL), los nutrientes pueden ser limitados en la muestra diluida y, posteriormente, reducir la actividad biológica. En este caso, adicione directamente los nutrientes a la botella Winkler a razón de 1 mL/L, es decir 0,3 mL de cada uno de los nutrientes (para las botellas de 300 mL).

- Adicione 6 mL de cepa liofilizada. Para servir la cepa utilice una pipeta de punta ancha para evitar obstrucción. No realice esta adición si se preparó el agua de dilución con la cepa.
- Adicione agua solamente hasta la mitad del cuello de la botella, para que al introducir el electrodo no haya pérdida de muestra. Lea el oxígeno inicial de las botellas de muestra (ODi). Si al medir el oxígeno disuelto inicial, ha descendido a menos de 6 mg/L, preparar otra botella utilizando un volumen de muestra menor.
- Llene totalmente la botella, evitando la formación de burbujas, deje el sello hidráulico (pequeña película de agua para impedir el intercambio de oxígeno entre la botella y el ambiente), recubra el sello con plástico o papel aluminio. Registre los datos en el formato correspondiente e incube a $20 \pm 1^\circ\text{C}$ por cinco días. Al quinto día lea el Oxígeno disuelto residual (ODr). Calcule la DBO5 con los resultados obtenidos.

Cálculos y Resultados

El cálculo se realiza con las botellas que cumplan con: consumo de OD mayor o igual a 2 mg/L y OD residual mayor o igual a 1.0 mg/L. Efectúe los cálculos por medio de la ecuación:

$$DBO_5 \left(\frac{mgO_2}{L} \right) = \frac{(OD \text{ consumido} - OD \text{ consumo cepa})}{Vm} \times V$$

Dónde:

- OD consumido: ODi – ODr (oxígeno disuelto inicial menos el oxígeno disuelto residual).
- OD consumo cepa: ODi (agua de dilución + cepa) – ODr (agua de dilución + cepa)
- V = Volumen de la botella Winkler, de 300mL.
- Vm = Volumen de alícuota de la muestra.

Anexo 7: Método de DQO por Reflujo Cerrado y Volumetría S.M. 5220 C

Alcance:

Este método de análisis aplica a muestras de aguas superficiales en un rango de 10 – 1000 mgO₂/L, establecido en dos rangos, a saber: Rango bajo hasta 200 mgO₂/L y rango alto hasta 1000 mgO₂/L.

Equipos y materiales:

- Bureta digital
- Agitador magnético
- Balanza analítica
- Microdigestor para micro DQO
- Dosificador digital
- Vórtex
- Reactivo de Ácido Sulfúrico:
- Solución Indicadora de Ferroína
- Solución Titulante de Sulfato Ferroso Amoniacal Hexahidratado
- Balones aforados clase A de 50, 100, 500 y 1000 mL.
- Erlenmeyers de 125 mL.
- Pipetas aforadas clase A de 2, 2,5, 5, 6, 10, 20 y 25 mL.
- Pipetas graduadas de 5 y 10 mL.
- Probetas vidrio de 50 mL.
- Transferpipeta 5 mL
- Pipeta Pasteur.
- Microespátula.
- Tubos de digestión, de vidrio borosilicato, de 16 □ 150 mm, con tapa rosca con empaque de teflón, que soporten temperaturas hasta de 200°C

Procedimiento:

- Todas las muestras se analizan inicialmente con el rango bajo, por tanto la solución de digestión es de concentración 0,1 N. Si para una o varias de ellas el valor de DQO sobrepasa el rango de lectura, proceder con el rango alto en otro lote, utilizando solución de digestión de concentración 0,25 N.
- Blancos: Preparar seis (6) tubos como blancos por cada rango. Servir 2,5 mL de agua ultrapura en un tubo de digestión, adicionar 1,5 mL de solución de digestión y 3,5 mL de reactivo de ácido sulfúrico, el cual debe ser dispensado lentamente por la pared del tubo.
- Agitar vigorosamente la muestra, transferir a un tubo de digestión 2,5 mL de muestra, agregar 1,5 mL de solución de digestión y 3,5 mL de reactivo de ácido sulfúrico por la pared del tubo de tal manera que se forme una capa de ácido sulfúrico en el fondo del tubo.
- Tapar herméticamente, agitar varias veces utilizando un agitador tipo Vórtex: Si en este punto la muestra presenta coloración verdosa o azul, es indicador que el valor de DQO sobrepasa el rango de lectura, por lo que se debe iniciar con un nuevo lote utilizando dicromato de potasio 0,25 N.
- Cuando la muestra corresponda a un adicionado de campo, recordar medir el volumen de la muestra adicionada antes de iniciar el análisis, registrar la información en la toma de datos y también en el envase.
- Tomar cada una de las muestras, los blancos fortificados, la matriz fortificada y sus duplicados, transferirlos cuantitativamente a erlenmeyer de 125 mL, enjuagando el tubo varias veces con agua Tipo I y vertiendo el contenido en el erlenmeyer, e iniciar la titulación.
- Adicionar 5 gotas de indicador de ferroina, mezclar rápidamente con el agitador magnético.
- Titular con el FAS aprox. 0,04 N (para rango bajo de 0,10 N) o FAS aprox. 0,10 N (para rango alto de 0,25N). El punto final de la titulación es el cambio de color de azul verdoso a café rojizo permanente.

Cálculos y Resultados

El cálculo se realiza con las botellas que cumplan con: consumo de OD mayor o igual a 2 mg/L y OD residual mayor o igual a 1.0 mg/L. Efectúe los cálculos por medio de la ecuación:

$$DQO \left(\frac{mgO_2}{L} \right) = \frac{(A - B) \times N \times 8 \times 1000}{mL \text{ de muestra}}$$

Donde:

- A = Volumen promedio (en mL) de FAS que se gastó para los blancos digeridos
- B = Volumen (en mL) de FAS que se gastó para la muestra
- N = Normalidad del FAS
- 8 = Peso equivalente del Oxígeno.

Anexo 8: Instructivo Determinación de Sólidos Suspendidos Totales

Objetivo:

Determinar sólidos suspendidos totales en una muestra de agua mediante el método de espectrofotómetro.

Alcance:

El instructivo aplica a todo el personal que requiera realizar una medición de sólidos suspendidos totales en agua de proceso, cruda y/o residual.

El instructivo aplica para los siguientes equipos:

- colorímetro HACH DR 900.

Método:

Este método de determinación de sólidos suspendidos totales (SST) es una medida simple y directa que no requiere los pasos de filtración o encendido / pesaje que los procedimientos gravimétricos requieren. La USEPA especifica el método gravimétrico para las determinaciones de sólidos, mientras que este método se usa a menudo para verificar los procesos en la planta. La longitud de onda de medición es 810 nm (DR 1900: 800 nm) para espectrofotómetros o 610 nm para colorímetros.

Equipos y reactivos:

- Colorímetro HACH DR 900
- Beaker 600mL
- Licuadora
- Celdas de muestra



1. Tecla de encendido.
2. INICIO: va a la ventana de lectura principal.
3. RETROALIMENTACIÓN: Configura la iluminación de pantalla para que se encienda y se apague.
4. AJUSTES: Selecciona el programa, las opciones de configuración o la gestión de datos.
5. Tecla de selección IZQUIERDA (Contextual): accede a opciones, cancela o sale de la pantalla del menú actual para ir al anterior.
6. Pantalla única.
7. Compartimiento para cubetas.
8. Cubierta para cubetas de muestra.
9. Tecla de selección DERECHA (contextual): lee muestras, selecciona o confirma opciones, abre sub-menús.
10. Teclas de navegación hacia ARRIBA, ABAJO, IZQUIERDA, DERECHA: se desplaza en los menús, introduce números y letras.

Procedimiento:

1. Iniciar programa 630 Sólidos Suspendidos.
Nota: Aunque el nombre del programa puede ser diferente entre los instrumentos, el número de programa no cambia
2. Mezcle 500mL de muestra en una licuadora a alta velocidad durante exactamente dos minutos.
3. Verter la muestra mezclada en un vaso de precipitados de 600 mL.
4. Prepare la muestra: Agite la muestra e inmediatamente vierta 10 mL de la muestra mezclada en una celda de muestra.
5. Prepare el blanco: Llene una segunda celda con 10 mL de agua ionizada
6. Limpie la celda de muestra en blanco.
7. Inserte el blanco en el soporte de la celda.
8. Presione ZERO. La pantalla muestra 0 mg/L TSS
9. Agitar la muestra preparada para eliminar las burbujas de gas y suspender uniformemente cualquier residuo.
10. Limpie la celda de muestra preparada.
11. Inserte la muestra preparada en el soporte de la celda.
12. Presione LEER. Los resultados se muestran en mg/L TSS.

Anexo 9: Materiales y equipos

