

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, ALIMENTOS Y AMBIENTAL

UDLAP®

CRECIMIENTO DE BIOGRÁNULOS EN AGUA SINTÉTICA DE ORIGEN INDUSTRIAL EN UN REACTOR TIPO BATCH PARA LA REMOCIÓN DE FENOL COMO CONTAMINANTE PRIORITARIO.

Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores presenta la
estudiante

GERMÁN MIRANDA FLORES

167119

INGENIERÍA QUÍMICA

DRA. ERNESTINA MORENO RODRÍGUEZ

San Andrés Cholula, Puebla.

Verano I

Hoja de firmas

Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores presenta el
estudiante **Germán Miranda Flores con ID: 167119**

Director de Tesis

Dra. Ernestina Moreno Rodríguez

Presidente de Tesis

Dra. Nelly Ramírez Corona

Secretario de Tesis

Dr. René Alejandro Lara Díaz

Agradecimientos

A mi maestra, mentora y guía Ernestina Moreno Rodríguez por todo su apoyo y retroalimentación a través de los años para la culminación de este trabajo, por confiar en mí y alentarme a superarme como investigador, usted fue mi primer maestra en la Universidad y gran parte del amor que le tengo a la carrera es gracias a usted, me siento orgulloso de saber que de sus tesis soy el único que se atrevió a llegar al final del camino y el que se atrevió a intentar publicaciones académicas por otros medios, las puertas académicas que se me están abriendo ahorita son gracias a su confianza en mí y su trabajo conmigo, de todo corazón gracias y la quiero mucho.

A mi querida amiga Andrea Flores por todo su trabajo y esfuerzo para la realización y culminación de la experimentación de este trabajo, sin tu ayuda no hubiera podido realizar gran parte de este proyecto y publicarlo, te deseo lo mejor para tu carrera y espero sigas siendo una luz en la vida de los demás, atrévete a participar en todo aquello que te apasiona y recuerda que la limitación más difícil es la que tú misma te pones, toma riesgos y sé mejor cada día de tu vida.

A mi querida maestra y sinodal Nelly Ramírez Corona, usted fue mi maestra favorita por muchos motivos, agradezco el haberla conocido y le agradezco que haya aceptado supervisar este trabajo. Espero coincidir con usted en un futuro donde podamos hablar de doctor a doctora, siga siendo esa profesora con tanta chispa, estilo y amor a lo que hace. Usted mencionaba que amaba dar clases y creo que por eso yo amaba tomar clases de usted, nos compartía ese amor y pasión que gracias a usted me volví experto en ciertas áreas de conocimiento, se le quiere bastante.

A mi querido maestro y sinodal René Alejandro Lara Díaz, usted fue el primer académico que conocí antes de entrar a la Universidad y por usted pude formar parte de esta comunidad, sin sus enseñanzas y conocimientos no me hubiera cuestionado tantas cosas de la industria y procesos, sé que no fui su mejor alumno, pero eso no quiere decir que no me esté llevando lo mejor de usted. Fue un honor tomar clases con alguien tan multidisciplinario como usted, un hombre tan preparado, culto, amable y servicial, a donde

quiera que vaya voy a llevar su nombre con orgullo al saber que fue mi profesor y decano, de todo corazón gracias.

A los maestros Tania Jenise Muñoz Sánchez y Arnold Freddy Valerdi Moroni que estuvieron apoyándome constantemente con material, consejos, retroalimentación y buenos momentos. Gracias por la confianza durante este año de experimentación.

A mi mejor amiga Sofía Quiroz (Oyesoff) que desde que la conozco ha sido una luz de esperanza y apoyo respecto a varios factores de mi vida, nunca dejaste de creer en mí neni y siempre me extendiste la mano cuando más lo necesitaba. Te espera un futuro brillante mi querida Judi, muchas gracias por todo bebecita y recuerda que tu neni bichota siempre estará aquí para apoyarte.

A mi segunda mejor amiga Alexandra Rodríguez que fuiste como mi madre universitaria, a pesar de ser de distintas carreras siempre fuiste una inspiración y un modelo a seguir, creo que sin tu presencia en mi vida nunca me hubiera puesto tantos desafíos académicos, gracias por brindarme hogar y sustento en el depa de todos, por las salidas donde cuidábamos muertos jajaja, por escucharme, aconsejarme y por siempre apoyarme cuando nadie quería hacerlo y siempre alentarme a ser la mejor versión de mí mismo.

A todos mis profesores que fueron inspiración, apoyo y guías en mi vida académica a los cuales les debo alguna cualidad que me caracteriza hoy en día

A la Dra. Adriana Palacios: gracias por elegirme para realizar mi Servicio Social con usted, me amplió mis conocimientos en áreas de energía y me ayudó a crear más currículo de investigador.

A la Dra. María Teresa Jiménez: gracias por corregirme a tiempo con mis errores de redacción y citado, espero que al ver este documento y los otros en los cuáles he desempeñado función de autor se sienta orgullosa de la mejoría que tuve como persona.

Al Dr. Aarón Romo: gracias por estar conmigo toda la carrera, por los consejos, las risas, las clases, las tutorías, por todo. Me dio mucho gusto conocerlo y poder haber

aplicado sus enseñanzas y consejos en mi vida, el resultado de ello es que me gradúo con un excelente perfil académico, esto se lo debo a usted.

A mis amigos de la carrera que estuvieron siendo un constante pilar en mi vida y me permitieron crecer como persona y estudiante, y me dieron los mejores momentos de mi vida, al final lo más valioso que me llevo de mi licenciatura son ustedes, por ustedes pude ser libre, pude ser feliz, pude ser valiente, leal, entre otras cosas. Me dieron tantas lecciones de vida para bien y para mal que sin ustedes no sería parte de la persona que soy hoy en día, mis éxitos y fracasos junto a ustedes me han permitido mejorar y retarme para demostrarme que puedo ser mejor.

Obviamente los voy a enlistar a ustedes por grupo porque quiero que sepan a quienes me refiero con estas palabras

A los testigos de Sandra: Marco, Eladio y Edu, que en las adversidades de la pandemia me estuvieron sacando sonrisas, desvelos, desesperación, noches de Minecraft jajaja, llamadas de 8 horas jajaja, y me enseñaron como luce una amistad verdadera. Ustedes 3 son tan diferentes en todos los sentidos posibles y conectamos tan bonito que de verdad espero nos sigamos llevando con el pasar de los años, los amo chicos.

A los 3.1416tu2: Anuar, Rico, José Erick, Kevin, Poncho, Arturo, Tapia. Aunque los conocí en mis últimos semestres, fueron los autores de gran parte de mis risas y sonrisas, fue un gusto y honor el haberlos conocido.

A la comadre Norma Hernández, muchas gracias por tu apoyo y compromiso en clase para ayudarme a culminar este trabajo, por tu amistad y por tu humor. Mucho éxito en la vida comadre.

A Legacy (Fabri, Alexa, Andrea y nuevamente Ale): el resultado de esas votaciones es insignificante cuando mi victoria fue el haberlos conocido y haber emprendido este proceso con ustedes, para mí nosotros fuimos los verdaderos ganadores de acuerdo a principios y unidad.

A mi dúo Oriente (Andy y Víctor): gracias por enseñarme que, sin importar la distancia, la Universidad, las adversidades, las peleas y los problemas, hay personas que seguirán ahí para ti, sé que a veces no fui el amigo que esperaban que fuera, pero agradezco que a pesar de todo puedo seguir llamándolos hermanos, por más años juntos donde pueda verlos triunfar, formar familias, ser líderes exitosos y donde pueda seguir viéndolos felices, los amo mis niños.

A mis niños del apartamento 303A: Lu, Pauchis, Day, Alex, Taquito, Ethel, los quiero demasiado y siempre los llevaré en mi corazón hermosos.

A la bella exrepre de ciencias Liz “Duckling” Quinn, muchas gracias por siempre echarme porras y ser un motivo para seguir echándole ganas a mi investigación.

A la famosísima Yari Corona, fue un placer conocerte hermana, sé que llegarás a la cima en este mundo de investigación, eres una deidad.

A mi primer amigo de la Universidad, Juan Carlos García, hermano, aunque no terminamos este camino universitario juntos puedo decir que estoy feliz que a pesar de la distancia podamos seguir siendo buenos amigos, te admiro bastante, eres un genio en lo que haces y eres asombroso. Te quiero mucho hermanito.

A mis amigos de camión: Gaby y Hugo, muchas gracias por tantas aventuras y buenos recuerdos, les deseo lo mejor para sus vidas.

Quiero agradecer a mi familia en general, en especial a Antonio Merchant por apoyarme como a uno de sus hijos para permitirme culminar mis estudios, te quiero mucho tío.

Me gustaría también agradecer a Pato Lira por todo tu apoyo y confianza. Te deseo lo mejor y recuerda que siempre podrás contar conmigo para lo que necesites, no te sientas solo en este viaje, todo tiene solución y se encuentra muchas veces más rápido si te apoyas en más personas.

Finalmente quiero agradecer al Ing. Roberto López Ventura por su liderazgo para impulsarme profesionalmente y apoyarme incondicionalmente en mi proceso de prácticas

para poder pertenecer a la empresa con la que siempre soñé. Rober, no tengo suficientes palabras para agradecerte, pero quiero que sepas que aprecio bastante que nuestros caminos hayan coincidido.

Dedicatoria

Para mi madre Liliana Flores por su esfuerzo para pagar mis estudios y por su constante apoyo para que pudiera alcanzar mis metas, por apoyarme en cada uno de mis proyectos, actividades, viajes y salidas. Por ser mi impulso cuando tenía miedo y por ser mi refugio cuando sentía que todo se derrumbaba.

Para mi hermana María José, te quiero mucho Majito.

Estás parado en un desierto lleno de rocas.

Hay montañas en el horizonte.

Estás parado en la base de las montañas.

Allí, un árbol negro, su corteza chamuscada.

La plata brota de los brotes verdes del árbol.

*El metal líquido corre por ramitas y ramas, endureciéndose alrededor de las raíces como hielo
brillante.*

“Unless someone like you cares a whole awful lot, nothing is going to get better. It’s not.”

-Dr Seuss

Índice	
Lista de Tablas	XII
Lista de Figuras	XIII
Resumen	18
1. Introducción	19
1.1. Antecedentes	19
1.2. Impactos ambientales de los efluentes de agua domésticos	20
1.3. Impactos ambientales de los efluentes de origen industrial	21
1.4. Justificación	22
1.5. Hipótesis	22
1.6. Objetivos	23
2. Marco Teórico	23
2.1. Situación actual de los cuerpos de agua en México	25
2.2. Impacto de las industrias en la contaminación de cuerpos de agua	28
2.3. Métodos de tratamientos de aguas residuales en México	31
2.4. Biogranulación	36
2.4.1. Crecimiento y adaptación de biogránulos	37
2.4.2. Mecanismos de formación	38
2.4.3. Ciclos aerobios	41
2.4.4. Ciclos anaerobios	41
2.5. Remoción de contaminantes	42
2.5.1. DQO	42
2.5.2. DBO	42
2.5.3. Nitrógeno y Fósforo Total	42
2.5.4. Fenol	42
3. Metodología	43
3.1. Análisis de varianza	46
3.2. Análisis de regresión	46
3.3. Análisis de regresión	49
3.4. Transformación de Box-Cox	49
3.5. Análisis de Componentes Principales	51

3.6.	Análisis gravimétrico para la medición de sólidos.....	51
3.8.	Análisis multivariable	52
4.	Resultados y Discusión	54
4.1.	Normalización de datos.....	54
4.2.	PCA.....	73
4.3.	Modelos de regresión definitivos.....	75
4.4.	Determinación de sólidos.....	76
4.5.	Estabilización de los biogránulos.....	78
4.6.	Remoción de fenol	82
5.	Conclusiones	82
5.1.	Recomendaciones	84
6.	Referencias.....	86
7.	ANEXOS	100
	A1 Modelos de regresión obtenidos en Minitab[®] 21.2 para obtener columnas simétricas.....	100
	A2 Modelos de regresión ajustados obtenidos en Minitab[®] 21.2.....	101
	A3 Modelos de regresión ajustados con la transformación de Box-Cox obtenidos en Minitab[®] 21.2.....	102
	A4 Gráficos residuales 4 en 1 para variables ajustadas obtenidos en Minitab[®] 21.2.....	103
	A5 Interpretación de análisis de correlaciones.	106
	A6 Productos del Trabajo de Investigación	108

Lista de Tablas

Tabla 1. Contaminantes del Río Atoyac. Adaptado de: (Comisión Nacional del Agua, s.f); (Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021).	26
Tabla 2. Métodos de tratamientos de aguas residuales en México al año 2021. Elaborada con información de: (CONAGUA, 2021).	31
Tabla 3. Composición de una bacteria. Adaptado de (Romero Zúñiga, 2001).	40
Tabla 4. Composición del sustrato sintético. Adaptada de información de: (Muda et.al, 2010); (Sánchez, 2022).	43
Tabla 5. Concentración de fenol de acuerdo con los ciclos. Elaborada por autor.	44
Tabla 6. Interpretación de la correlación. Adaptada de (Datatab, 2023).	47
Tabla 7. Interpretación de coeficientes de correlación de Pearson. Adaptada de: (Zou et.al, 2003).	48
Tabla 8. Exponentes λ óptimos para realizar la transformación de Box-Cox sugeridos por Minitab [®] 21.2. Elaborada por autor.	71
Tabla 9. Comparación de las correlaciones de las variables. Elaborado por autor.	75
Tabla 10. Modelos de regresión lineal definitivos para el control de las condiciones operativas del reactor. Elaborada por autor.	75
Tabla 11. Condiciones preferidas promedio de operación de reactores biológicos. Adaptada de: (Boelee et al., 2014); (Huang et al., 2015); (Cobos et al., 2011); (Jiang et al., 2016); (Wang et al., 2018); (J.-H. Tay et al., 2004); (Qin et al., 2004); (De Kreuk et al., 2005); (de Kreuk & van Loosdrecht, 2006); (Yong Li et al., 2008); (Coma et al., 2012); (Dahalan et al., 2015); (Dahalan et al., 2017); (Zou et al., 2019).	78
Tabla 12. Condiciones preferidas promedio de la operación del reactor SBR. Elaborada por el autor.	79
Tabla 13. Crecimiento y estabilidad visual de los gránulos. Elaborada por autor.	80

Lista de Figuras

Figura 1. Plantas de tratamiento de aguas residuales en México al año 2021. Elaborada con información de (CONAGUA,2021).....	25
Figura 2. Estructura de un gránulo aerobio. Adaptada de: (Sharma et al., 2019).....	38
Figura 3. Metodología empleada. Elaborada por autor en Microsoft Visio	43
Figura 4. Reactor fotosecuencial modelo 2F-5000 empleado en el proceso de biogranulación experimental.....	45
Figura 5. Microscopio modelo Nikon Eclipse E200 empleado para la visualización de los biogránulos. Obtenida de (Nikon Instruments, s.f).....	46
Figura 6. Interpretación de la relación de las variables con el grado de la fuerza de correlación. Obtenido de (Morales, 2011).	47
Figura 7. Análisis de correlación para los datos sin modificar obtenido en Minitab ® 21.2. Elaborado por autor.....	54
Figura 8. Normalización de valores de pH obtenido en Minitab ® 21.2. Elaborado por autor.	55
Figura 9. Normalización de valores de temperatura obtenido en Minitab ® 21.2. Elaborado por autor.....	56
Figura 10. Normalización de valores de OD obtenido en Minitab ® 21.2. Elaborado por autor.	57
Figura 11. Normalización de valores de conductividad obtenido en Minitab ® 21.2. Elaborado por autor.....	57
Figura 12. Normalización de valores de la agitación obtenido en Minitab ® 21.2. Elaborado por autor.....	58
Figura 13. Normalización de valores de la densidad obtenido en Minitab ® 21.2. Elaborado por autor.....	59
Figura 14. Normalización de valores de NT obtenido en Minitab ® 21.2. Elaborado por autor.	60
Figura 15. Normalización de valores de PT obtenido en Minitab ® 21.2. Elaborado por autor.	60

Figura 16. Normalización de valores de DBO ₅ obtenido en Minitab [®] 21.2. Elaborado por autor.....	61
Figura 17. Normalización de valores de DQO obtenido en Minitab [®] 21.2. Elaborado por autor. (Las siglas RA corresponden a que el vial fue de rango alto; no obstante, esto no influye en la interpretación de resultados).....	61
Figura 18. Normalización de valores de fenol obtenido en Minitab [®] 21.2. Elaborado por autor.....	62
Figura 19. Análisis de correlación para los datos modificados con regresión lineal obtenido en Minitab [®] 21.2. Elaborado por autor.....	63
Figura 20. Normalización de valores del pH ajustados con regresión lineal obtenido en Minitab [®] 21.2. Elaborado por autor.	63
Figura 21. Normalización de valores de temperatura ajustado con promedio obtenido en Minitab [®] 21.2. Elaborado por autor.	64
Figura 22. Normalización de valores de agitación ajustados con regresión lineal considerando únicamente los valores correspondientes a ciclos aerobios obtenido en Minitab [®] 21.2. Elaborado por autor.	64
Figura 23. Normalización de valores de densidad ajustados con regresión lineal obtenido en Minitab [®] 21.2. Elaborado por autor.	65
Figura 24. Normalización de valores de NT ajustados con regresión lineal obtenido en Minitab [®] 21.2. Elaborado por autor.	66
Figura 25. Relación entre la nitrificación- desnitrificación simultánea con el OD. Obtenida de (Layer et al., 2020).	67
Figura 26. Normalización de valores de PT ajustados con regresión lineal obtenido en Minitab [®] 21.2. Elaborado por autor.	68
Figura 27. Normalización de valores de DBO ₅ ajustados con regresión lineal obtenido en Minitab [®] 21.2. Elaborado por autor.	69
Figura 28. Normalización de valores de DQO ajustados con regresión lineal obtenido en Minitab [®] 21.2. Elaborado por autor.	69

<i>Figura 29. Normalización de valores de fenol ajustados con regresión lineal obtenido en Minitab ® 21.2. Elaborado por autor.</i>	<i>70</i>
Figura 30. <i>Análisis de correlación para los datos modificados con regresión lineal y transformación de Box-Cox obtenido en Minitab ® 21.2. Elaborado por autor.</i>	<i>71</i>
Figura 31. <i>Normalización de valores de OD ajustados con regresión lineal y transformación de Box-Cox obtenido en Minitab ® 21.2. Elaborado por autor.</i>	<i>72</i>
Figura 32. <i>Normalización de valores de conductividad ajustados con regresión lineal y transformación de Box-Cox obtenido en Minitab ® 21.2. Elaborado por autor.</i>	<i>73</i>
Figura 33. <i>Gráfico de influencias de componentes principales obtenido en Minitab ® 21.2. Elaborado por autor.</i>	<i>74</i>
Figura 34. <i>Gráfica de doble proyección de componentes principales obtenido en Minitab ® 21.2. Elaborado por autor.</i>	<i>74</i>
Figura 35. <i>Contenido de sólidos totales presentes en el reactor. Elaborado por autor.</i>	<i>77</i>
Figura 36. <i>Contenido de sólidos totales volátiles. Elaborado por autor.</i>	<i>77</i>
Figura 37. <i>Contenido de sólidos suspendidos totales presentes en el reactor. Elaborado por autor.</i>	<i>78</i>
Figura 38. <i>Contenido de sólidos suspendidos volátiles. Elaborado por autor.</i>	<i>78</i>
Figura 39. <i>Curva de calibración del fenol. Elaborada por autor.</i>	<i>82</i>

Nomenclatura

AlCl ₃	Cloruro de alumínio
ANOVA	Análisis de varianza
C ₂ H ₃ NaO ₂	Acetato de sódio
C ₆ H ₆ O	Fenol
CaCl ₂	Cloruro de cálcio
CF	Coliformes fecales
Cm ³	Centímetros cúbicos
CO ₂	Dióxido de carbono
CuSO ₄	Sulfato cúprico
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
FeCl ₃	Cloruro férrico
KCl	Cloruro de potasio
KH ₂ PO ₄	Fosfato de potasio monobásico
LG	Lodos granulares
LMP	Límite máximo permisible
mS	Milisiemens
MgSO ₄	Sulfato de Magnesio
NH ₄ Cl	Cloruro de amonio
NT	Nitrógeno total
OD	Oxígeno disuelto

PCA	Análisis de Componentes Principales
pH	Potencial de hidrógeno
PT	Fósforo total
RA	Rango alto
RB	Rango bajo
Rpm	Revolución por minuto
SDT	Sólidos disueltos totales
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
ST	Sólidos totales
STV	Sólidos totales volátiles
UV	Ultravioleta
ZnSO ₄	Sulfato de zinc

Resumen

El tratamiento de aguas residuales con procesos biológicos es uno de los métodos más importantes para la remoción de contaminantes presentes en aguas residuales. Se ha buscado implementar lodos granulares para la remoción de contaminantes industriales como lo es el fenol por su complejidad para degradarse y por los efectos secundarios que presenta en la naturaleza. Es por ello que, en este trabajo se someterán condiciones de estrés a lodos granulares para su adaptación y estabilización en un reactor tipo batch, y de este modo puedan degradar fenol de manera rápida y eficiente simulando el tratamiento de efluentes industriales empleando biogranulación, los resultados muestran una metodología para la remoción de fenol como contaminante prioritario de hasta 16 mg/L.

Palabras clave: *fenol, lodos granulares, batch, efluentes industriales.*

Abstract

The wastewater treatment with biological processes is one of the most important methods for the removal of pollutants present in wastewater. It has been sought to implement granular sludge for the removal of industrial pollutants such as phenol because of its complexity to degrade and the secondary effects it presents in nature. That is why, in this work, granular sludge will be subjected to stress conditions for its adaptation and stabilization in a batch reactor, and thus can degrade phenol quickly and efficiently simulating the treatment of industrial effluents using biogranulation, the results show a methodology for the removal of phenol as a priority pollutant up to 16 mg / L.

Key words: *phenol, granular sludge, batch, industrial effluents.*

1. Introducción

1.1. Antecedentes

El ser humano desde la revolución industrial ha buscado implementar nuevas formas de vida para agilizar sus actividades cotidianas, gran parte de este avance científico se le debe a la química y los productos derivados de esta; sin embargo, al momento de manejar desechos en cuerpos de agua donde se genera una contaminación de la que se deben tomar acciones para disminuir o neutralizar.

Desde el Siglo XIX se realizaba el saneamiento desechando los residuos sanitarios en las calles y cuerpos de agua como ríos y lagos se han enfrentado desafíos como el cólera, lo que orilló al ser humano a construir sistemas de alcantarillado para tratar este tipo de desechos con la finalidad de poder disminuir los problemas de salud y la contaminación emergente (Rojas, 2002).

No fue hasta el Siglo XX que se modernizó el sistema de alcantarillado con medidas tecnológicas de la época que incluían sistemas de bombeo, implementación de pozos de visita y nuevos materiales; no obstante, el avance más importante se obtuvo hasta 1960 donde se implementaron las tecnologías de tratamiento de aguas residuales que conocemos en la actualidad donde se daba solución al problema de contaminación, incluso pudiendo potabilizar dicha agua (E. & Vázquez, 2003).

Mientras tanto en México, durante gran parte del Siglo XX no se tomaron acciones referentes al tratamiento de aguas residuales debido a la falta de normativa que regulara las descargas domésticas e industriales a los cuerpos de agua, desencadenando una contaminación acuífera exagerada que convirtió gran parte de estos cuerpos de agua en lugares peligrosos que perdieron su belleza estética, su posible utilización y siendo vectores de peligrosas enfermedades que puede poner en riesgo a la vida humana.

A la actualidad aproximadamente el 60% de las aguas residuales del país solo cumplen con un mínimo de requisitos de las normas oficiales establecidas lo que se llega a ver reflejado como impactos negativos como enfermedades y daño en los ecosistemas (Alicia et al., 2020), en especial en sectores de nivel bajo que obtienen su agua de descargas

municipales e industriales ya sea para uso personal o para riego lo que genera mayores daños a la salud pública.

Cabe mencionar que debido a la creciente demanda de agua destinada para el consumo humano la sociedad se ha visto orillada a implementar nuevos métodos para aprovechar el agua, es así que surgen los tratamientos fisicoquímicos, tratamientos terciarios y tratamientos biológicos; no obstante, dichas tecnologías están limitadas a la capacidad de tratamiento, a los costos de operación y el nivel de producción de residuos (Thamaria & Unigarro et al, 2005).

1.2. Impactos ambientales de los efluentes de agua domésticos

Para hablar de descargas municipales primero debemos entender que dichas aguas cuentan con la presencia de contaminantes emergentes como fármacos, hormonas, compuestos perfluorados, drogas, productos de limpieza, entre otros (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2018); que son compuestos de distinto origen y naturaleza química que cuya presencia en el medio ambiente y efectos negativos que pudiesen ocasionar han pasado inadvertidos. Es por ello por lo que, en apego a la Normativa Oficial Mexicana se han estudiado en numerosas ocasiones los efluentes domésticos con la finalidad de determinar qué sustancias se están liberando a los cuerpos de agua.

De esta manera en algunos estudios, además de encontrar la carga orgánica esperada de la que destaca la presencia de fuentes de carbono, nitrógeno y fósforo, así como presencia de microorganismos como los coliformes fecales, se han encontrado contaminantes emergentes como productos de limpieza y de higiene personal como suavizantes, detergentes, pasta de dientes, limpiador de vidrios, ácidos, compuestos clorados, bencenos, metales pesados, entre otros; y fármacos que no llega a absorber el organismo como también la presencia de algunas drogas (Reinoso Carrasco et al., 2017); (Robles Molina, 2014); (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2018); (Bonilla et al., 2014).

Es importante recalcar que si no se tratan dichos contaminantes de la manera adecuada se puede generar acumulación de sustancias que, aunque lleguen a ser en menor

concentración se pueden ir acumulando en la naturaleza generando efectos tróficos irremediables, mientras que en temas de salud humana además de enfermedades pueden llegar a generar cambios hormonales (Reinoso Carrasco et al., 2017).

Se sabe que actualmente en México las principales fuentes de agua potable que corresponden al agua subterránea se encuentran en semáforo rojo debido a los altos niveles de contaminación por negligencia humana, en la actualidad se cuentan con 1292 sitios de monitoreo de los cuales todos presentan algún indicio de contaminación fuerte (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2021).

1.3. Impactos ambientales de los efluentes de origen industrial

A diferencia de las aguas domésticas, el agua de origen industrial presenta contaminantes muy complejos que no se pueden degradar en la naturaleza, lo que afecta de manera aún más significativa los ecosistemas puesto que afecta de manera directa la toxicidad, olor, color, pH, entre otras cosas (Navarrete et al., 2006). El caso más notorio de dichos contaminantes es la presencia de mercurio, fármacos, ácidos, arsénico, cianuro, plaguicidas, HPA, cloroformo, microcistina, entre muchos otros (Lima et al., 2010).

Sin mencionar que con la creciente expansión industrial en la actualidad se encuentran cada vez más desechos de origen farmacéutico, textil, metalúrgico, automotriz, entre otros; lo que vuelve aún más difícil establecer plantas de tratamiento que puedan remover los químicos específicos que emplean cada una de estas industrias. Debido a esto se han implementado nuevos métodos de tratamiento de aguas residuales con la finalidad de poder degradar dichas sustancias y así evitar su liberación en la naturaleza.

Y si bien, de manera natural los ecosistemas no pueden degradar en periodos cortos de tiempo dichas sustancias, existen métodos de tratamiento que permiten la degradación de las sustancias previamente mencionadas. Mediante métodos biológicos se puede remover mercurio (Vera Rodríguez, 2016), con métodos biológicos y empleando técnicas como la fotocatalisis es posible remover fármacos (Cruz Carrillo, 2019), el arsénico mediante biopolímeros (Claudio & Manuel, 2010), cloroformo empleando carbón activado (Torres Zapata, 1999), por mencionar algunos.

Cabe mencionar que estos no son los únicos métodos existentes para la remoción de contaminantes prioritarios puesto que existen diferentes metodologías para cada sustancia de estudio, pero vale la pena enfatizar que la gran mayoría es mediante métodos biológicos o adición de componentes orgánicos que permiten la degradación de dichas sustancias lo que vuelve una realidad la eliminación de la toxicidad de los cuerpos de agua.

1.4. Justificación

En México con el creciente aumento poblacional no cuenta actualmente con la infraestructura necesaria para cubrir las necesidades básicas de la sociedad tanto en temas de potabilización como de alcantarillado (Virginia Lahera Ramón, 2010), ya ni mencionar el tema industrial donde no se puede dar tratamiento a la totalidad de químicos liberados a la naturaleza, es por ello que se deben impulsar nuevas maneras de tratar las aguas residuales para poder darle un reúso al agua y así disminuir la problemática de la escasez del agua.

La finalidad de este trabajo fue la creación de modelos de correlación entre variables fisicoquímicas que afectan de manera directa la remoción de contaminantes en tratamiento de aguas de origen industrial en aguas residuales empleando lodos activados para la formación y adaptación de biogránulos a las condiciones de estrés empleando agua sintética preparada de un efluente industrial, para tener un antecedente de la capacidad de remoción de los microorganismos y de contaminantes prioritarios como lo es el fenol y de esta manera se pueda cuantificar dicho proceso a escala industrial y controlarlo de manera óptima con los modelos de correlación.

1.5. Hipótesis

El tratamiento de aguas residuales empleando biogránulos se puede adaptar para soportar condiciones toxicológicas a altas concentraciones de fenol, y de esta manera se pueda degradar contaminantes prioritarios sin dañar las propiedades de los biogránulos como lo es compacidad, alta velocidad de sedimentación y alta remoción de carga orgánica.

1.6. Objetivos

Adaptar y estabilizar biogránulos a escala laboratorio en un reactor tipo batch para soportar condiciones toxicológicas industriales y remover contaminantes peligrosos que se suelen emplear en procesos industriales como lo es el fenol.

Obtener modelos de correlación que permitan identificar qué aspectos fisicoquímicos afectan directamente las características del biogránulo (tiempo de sedimentación, comunidad microbiana, geometría y densidad de masa) y la remoción de contaminantes en aguas residuales.

2. Marco Teórico

Desde hace más de 100 años la sociedad ha buscado maneras de detener la contaminación de suelo, aire y agua buscando generar procesos de cero residuos con la finalidad de volver los procesos de actividad humana más eficientes, es así que, a lo largo del mundo han ido surgiendo métodos con diferentes enfoques que han sido de utilidad a la hora de tratar residuos. En tema de tratamiento de aguas se tiene registro que a finales del Siglo XIX, Estados Unidos y el Reino Unido trabajaron en la creación de un sistema capaz de albergar microorganismos llamado filtros biológicos, que consistían en biopelículas que colocaban sobre rocas en los lechos de los ríos y brindaban cierto grado de remoción de contaminantes (Romero Zúñiga, 2001).

No fue hasta 1920 que se implementaron a mayor escala en dichas ciudades para tratar la contaminación generada por dichas ciudades y así disminuir el impacto generado por la sociedad; no obstante, en 1913 surgió otro proceso que se volvió el más competitivo en la actualidad, el tratamiento con lodos activados, pero al ir identificando problemas con el agua a lo largo de los años como la acumulación de fósforo y nitrógeno mediante la eutrofización del agua, se fue adaptando el tratamiento de lodos activados para que pudiera satisfacer las necesidades de esa época, es así que, se implementaron métodos cinéticos a los lodos donde se relacionaba la edad del lodo con la capacidad de remoción (Romero Zúñiga, 2001).

Es así como el tratamiento biológico empezó a cobrar importancia puesto que era necesario eliminar la carga orgánica presente en los desechos urbanos ya que esta representaba una carga microbiana que debía ser eliminada ya que representa un daño a los ecosistemas como crecimiento de bacterias portadoras de patógenos que pudiesen acarrear peces, otros animales y humanos, y se debían tratar las sustancias liberadas en hogares e industrias que pudiesen terminar en cuerpos de agua.

Pero para tener un mejor control sobre estos microorganismos y los contaminantes liberados, se empezaron a realizar mediciones de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO), donde el DBO permite cuantificar el nivel de oxígeno necesario que los microorganismos consumen durante un periodo de tiempo, dicha prueba se realiza a lo largo de 5 días. Mientras que el DQO determina la cantidad necesaria de oxígeno para oxidar la materia orgánica contenida en una muestra con ayuda de un ácido fuerte y un agente oxidante, generalmente dicromato de potasio (Dionisi, 2017).

En aguas residuales domésticas no suele ser un problema la presencia de metales pesados, sin embargo, en las industrias se suelen liberar metales pesados como cobre, níquel, plomo, mercurio, zinc, cadmio, magnesio, entre muchos otros que causan daños irremediables a la vida y a los ecosistemas (Caviedes Rubio et al., 2015) ya que industrias como la minera, de fundición, metalúrgica, galvanoplastia, de pinturas, baterías, electrónica, agricultura, entre muchas otras promueven el desechos de dichas sustancias en cuerpos de agua.

Esto es bastante alarmante, ya que dichos metales son los generadores de enfermedades como cáncer, daño renal, dolor de cabeza, diarrea, náuseas, daños hepáticos, enfermedad de Wilson, insomnio, depresión, letargo, enfermedades vasculares, artritis reumatoide, enfermedades neuronales, entre otros malestares (Caviedes Rubio et al., 2015).

Es así, que tecnologías emergentes y métodos convencionales llamados así por las limitaciones que abarcan, fueron cobrando importancia para poder remediar el efecto de todas estas sustancias liberadas en los ecosistemas; no obstante, vamos a hablar

particularmente del tratamiento con lodos activados que es uno de los más antiguos e importantes.

2.1. Situación actual de los cuerpos de agua en México

En México la situación en tema de tratamientos de aguas residuales no ha sido del todo un sistema eficiente, no fue hasta 1996 que se empezaron a implementar normativas en temas de calidad de agua a lo largo del país para tener un control de los contaminantes que se liberaban en cuerpos de agua nacionales, municipales y sobre control de agua para reúso ya sea en temas de riego o potabilización.

Es así que, se empezaron a implementar a lo largo del país plantas de tratamientos de aguas residuales para poder dar abasto a la creciente necesidad de mantenerse en norma; no obstante, esto no ha sido del todo efectivo ya que (CONAGUA, 2021) reporta que a la fecha se trata un 67.5% de las aguas residuales municipales producidas en el país, lo cual es una cifra preocupante ya que esto refleja los altos índices de contaminación en México.

Al 2021 se encontraban 2872 plantas en funcionamiento a lo largo de la República Mexicana, enfocadas principalmente a tratamiento municipal. En la Figura 1 se puede apreciar la distribución de plantas de tratamiento de aguas residuales en México.

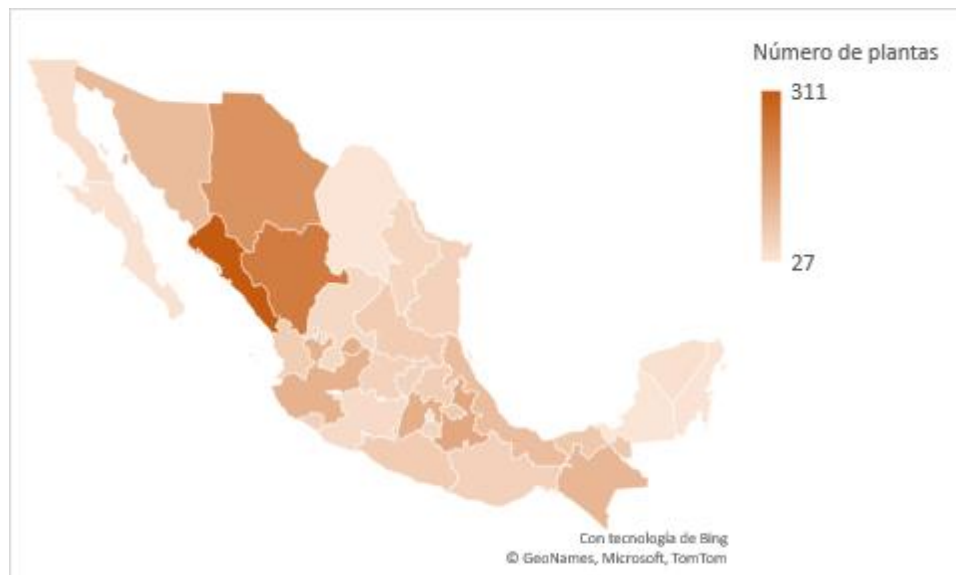


Figura 1. Plantas de tratamiento de aguas residuales en México al año 2021. Elaborada con información de (CONAGUA,2021).

CONAGUA declara que para el año 2021 la calidad del agua superficial era la siguiente: 39.6 % del agua de los sitios estudiados cumplía los límites aceptables del agua, 20.7 % incumplía en algún o varios parámetros: e-coli, coliformes fecales (CF), sólidos suspendidos totales (SST), oxígeno disuelto (OD), y el 39.7 % incumplían en uno o varios puntos de los siguientes parámetros: DQO, DBO₅ (Comisión Nacional del Agua, 2021).

Respecto a la calidad del agua subterránea, el 42.4 % de los sitios estudiados cumplieron los límites aceptables del agua, el 13.7 % incumplía en algún o varios parámetros: alcalinidad, conductividad, dureza, sólidos disueltos manganeso total, hierro total; el 43.9 % incumplían en uno o varios puntos de los siguientes parámetros: fluoruros, coliformes fecales, nitrógeno de nitratos, arsénico total, cadmio total cromo total, mercurio total y plomo total (Comisión Nacional del Agua, 2021).

Estas cifras son preocupantes ya que nos revelan que no solo tenemos índices grandes de contaminación, sino que dicha contaminación está conformada principalmente por metales pesados de alta toxicidad, dependiendo de la región serán los índices de contaminación.

Si nos centramos en una zona como lo es el Estado de Puebla y analizamos el río Atoyac observaremos que dicho río se encuentra fuertemente contaminado, principalmente por descargas que contienen materia orgánica, sólidos suspendidos, nutrientes tóxicos, carga microbiológica, colorantes, metales pesados y contaminantes como cloroformo, cloruro de metilo, cianuros, sulfatos, grasas y aceites (Comisión Nacional del Agua, 2020).

En la tabla 1 se podrán apreciar los contaminantes promedio emitidos por el Río Atoyac y sus respectivos límites normados por la NOM-001-SEMARNAT-2021, NOM-002-SEMARNAT-1996 y NOM-127-SSA1-1994.

Tabla 1. Contaminantes del Río Atoyac. Adaptado de: (Comisión Nacional del Agua, s.f);
(Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021).

Contaminante	Río Atoyac (mg/L excepto cuando se especifique)	Norma (Promedio Mensual en mg/L excepto cuando se especifique)
Demanda Bioquímica de Oxígeno	71.7	20
Demanda Química de Oxígeno	219.9	150
Sólidos Suspendidos Totales	432	60
Coliformes fecales	28,233 NMP/100 mL	250 NMP/100 mL
Arsénico	< 0.05	0.2
Cadmio	0.03	0.2
Cromo	0.025	1
Mercurio	0.045	0.01
Plomo	0.014	0.2
Nitrógeno Total	13.06	25
Fósforo Total	2.2	15
Nitrógeno Amoniacal	6.1	0.50*
Color	121.7 Pt-Co	15 Pt-Co
Cianuros	0.004	1
Sulfatos	63	-
Aluminio	9.6	-
Benceno	< 0.01	-
Cloroformo	0.003	-
Cloruro de metilo	0.0012	-
Cloruro de vinilo	0.0007	-
Cobre	0.02	4
Fenoles totales	0.028	-
Fierro	0.8	-
Grasas y Aceites	11.8	15
Níquel	< 0.6	2
pH	6.5 < pH < 8.5	6.0 < pH < 9.0
Sólidos disueltos totales	507	-
Temperatura	< 35°C	35 °C
Toluenos	< 0.2	700*
Xilenos	< 0.3	500*
Zinc	< 0.12	10

NMP: número más probable

Analizando esta información podemos apreciar que, pese a que algunos lineamientos se encuentran en norma, hay otros que sobrepasan los límites máximos

permisibles (LMP), siendo el caso del DQO, DBO₅, SST, CF, mercurio, N amoniacal, aluminio, fierro y sólidos disueltos totales (SDT), dichos parámetros son los principales vectores de contaminación peligrosa ya que han mantenido a este río en condiciones lamentables que han impedido su remediación.

Si a esto le sumamos que muchas empresas y familias realizan descargas de manera no normada e ilegal, se vuelve más difícil el monitoreo y gestión de cuerpos de agua como lo es el caso del río Atoyac, esta es una realidad que se vive en México que no permite que la gente goce de la diversidad natural libremente, debido a los altos índices de contaminación que enfrenta el país.

2.2. Impacto de las industrias en la contaminación de cuerpos de agua

Hoy día si bien podemos atribuir gran parte de la contaminación al desarrollo urbano que va surgiendo, no podemos negar la presencia de las industrias en temas de contaminación, sabiendo que las empresas, en especial químicas, son las principales contribuyentes en la liberación de compuestos peligrosos en cuerpos de agua, entre los que destacan metales pesados (Pabón et al., 2020); (Covarrubias & Peña Cabriales, 2017) y compuestos aromáticos (Ferrera-Cerrato et al., 2006); (Zárate, 2015).

Para empresas farmacéuticas y papeleras se estiman descargas entre 35 y 400 mg/L de fenol, mientras que industrias como refinerías desechan hasta 30,000 mg/L, lo que vuelve imposible el uso de tratamientos biológicos para la remediación de este tipo de aguas, puesto que las altas concentraciones de este compuesto aromático inhiben a los microorganismos lo que impide que degraden el fenol (Germán et al., 2009).

En la industria petroquímica se liberan hidrocarburos y carga orgánica es viable emplear tratamiento por lodos activados ya que dichos microorganismos procesan de manera bastante eficiente el DQO, DBO₅ (C. Chen et al., 2019), y aunque para el N amoniacal, el NT y compuestos fenólicos es algo ineficiente, se encontró que en presencia de glucosa aumenta la eficiencia de remoción de dichas sustancias.

En el caso del sector agrícola que emplea pesticidas, de la industria farmacéutica, textil, y en la elaboración de explosivos se suele liberar p-nitrofenol que es un compuesto

aromático con un impacto ambiental bastante importante ya que además de los daños a la salud tiene un gran potencial mutágeno para seres vivos (Yi et al., 2006). Algunos tratamientos biológicos son capaces de eliminar dicho compuesto de manera aerobia al mineralizarlo, pero, así como todo, dicho método tiene sus limitaciones ya que no se pueden tratar cantidades muy grandes de este compuesto (Maszenan et al., 2011).

La industria textil por su parte libera grandes cantidades de agua impregnadas de colorantes por la utilización de tintes para ropa, estos generalmente contienen grupos de ácidos sulfónicos aromáticos xenobióticos que son los responsables de la solubilidad de los tintes en el agua, por esta naturaleza dicho compuesto no puede ser degradado por métodos convencionales como lodos activados o métodos que requieran luz (Pearce et al., 2003). Esta desventaja de los métodos biológicos aplica para compuestos aromáticos como fenoles, ftalatos, benzoatos y aunque pueden llegar a ser procesados por microorganismos, no en las cantidades industriales que se liberan (Maszenan et al., 2011), es ahí donde entra la gran limitación. Es el mismo caso que el p-nitrofenol, y para sustancias como el pentaclorofenol, la piridina, ésteres, ácidos ftálicos, alcohol terbutílico, cloroanilinas, etc.

En la industria minera y en la elaboración de explosivos se suelen emplear compuestos que contienen nitrotoluenos que son compuestos aromáticos de alta carcinogenicidad, toxicidad y persistencia en el medio ambiente (Kiran Kumar Reddy et al., 2017), afortunadamente algunos microorganismos cuentan con la capacidad de remover estas sustancias del medio ambiente, como lo son el *Arthrobacter sp*, *Rhodococcus Pyridinivorans*, *Burkholderia sp* y el *Pseudomonas sp*.

Si bien existen algunos métodos como la utilización de microalgas que se ha demostrado que tienen la capacidad de remover contaminantes como metales pesados gracias a su gran mecanismo de adsorción que le permite almacenar gran cantidad de contaminantes, algunos patógenos mediante la desactivación de ellos al aumentar el pH y modificar la temperatura, y carga orgánica al usarla como nutrientes para sus procesos digestivos, este

método no se recomienda en presencia de sustancias peligrosas ya que las microalgas son muy sensibles a dichas sustancias (Muñoz & Guieysse, 2006).

Aunque, esto no debe ser tan desalentador ya que por su compleja estructura enzimática, las microalgas tienen la capacidad de remover los contaminantes farmacéuticos a través de complejos procesos de oxidación como parte de su proceso de adsorción (Xiong et al., 2018); no obstante, todo va en función del alga que se emplee ya que cada especie tiene sus preferencias y limitaciones en la remediación de contaminantes como la *Chlorella sorokiniana* que puede degradar completamente el ibuprofeno y el paracetamol, a diferencia de la *Nannochloris sp* que le cuesta mucho más degradar dichos compuestos.

Por otro parte, (Mustereț & Teodosiu, 2007) revelan que el uso de métodos como las membranas semipermeables tienen la capacidad de erradicar dichos contaminantes orgánicos persistentes, entre los que destacan hidrocarburos aromáticos policíclicos, pesticidas organoclorados, hexaclorobenceno, bencenos policlorados, bifenilos policlorados, dibencilfuranos y naftalenos policlorados, que se sabe que tienen efectos cancerígenos y generan daños neuronales, a hígado y riñones. Desafortunadamente, además de su alto costo dicho método va perdiendo efectividad, a mayor uso, mayor degradación de la membrana.

Métodos como la nanofiltración son efectivos para la remoción de contaminantes textiles como los tintes, pero son altamente costosos por la tecnología a aplicarse y las condiciones operativas de conductividad y pH de los electrodos para el monitoreo y funcionamiento de dicho método (Paździor et al., 2009).

Es así, que no existe algún método específico que permita remover tantos contaminantes de las empresas con tantos giros industriales, ya que cada sustancia tiene su propia estructura y propiedades, esto vuelve aún más difícil tener una forma eficiente de remover dichos contaminantes de cuerpos de agua puesto que muchas empresas realizan sus descargas de manera clandestina y algunas empresas lo hacen fuera de norma, esto imposibilita el trabajo de los ingenieros químicos para regresar la belleza natural de México.

2.3. Métodos de tratamientos de aguas residuales en México

Actualmente en el país, existe una variedad de tecnologías en tema de calidad del agua para tratamiento de aguas residuales que han ido creciendo año tras año, aunque todavía no se ha satisfecho la demanda de descargas del país, cada vez más empresas invierten en nuevos métodos para poder eliminar contaminantes prioritarios que de manera convencional no se podrían tratar. En la tabla 2 se muestra la distribución de métodos de tratamiento de aguas en el país a la fecha.

Tabla 2. Métodos de tratamientos de aguas residuales en México al año 2021. Elaborada con información de: (CONAGUA, 2021).

Tipo de proceso	Número de PTAR's
Lagunas de Estabilización	843
Lodos Activados	818
Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente	390
Humedal	230
Otro	159
Tanque Séptico	143
Filtros Biológicos	119
Tanque Imhoff	64
Reactor Enzimático	36
Lagunas Aireadas	35
Discos Biológicos	21
Primario Avanzado	11
Primario	3

Para entender a mayor profundidad la diversidad de métodos existentes en el país, se realizará una breve explicación de cada método.

Discos biológicos: es un sistema de tratamiento biológico secundario empleado para la remoción de DBO y para pulir efluentes nitrificados. Con una remoción de DBO entre el 80-95% de eficiencia dependiendo del tipo de agua residual que se esté trabajando. Este método funciona de manera aerobia y son una serie de discos de plástico de 3-4 m de diámetro instalados en un tanque de concreto, se encuentran constantemente girando a

velocidades bajas entre 1 y 2 rpm con un área superficial aproximadamente del 40% sumergida en agua residual (Deloya Martínez, 2001).

Filtros biológicos: consisten en poner en contacto las aguas residuales con la biomasa que se encuentra adherida al medio de soporte, lo que forma un medio de oxidación biológico, a medida que crece la capa biológica la materia orgánica va siendo adsorbida por los microorganismos ubicados en el exterior de la biopelícula, de esta manera los microorganismos del interior de la biopelícula entran en crecimiento endógeno mientras que los del exterior se encuentran en fase aerobia (Efrain & Granda, 2017).

Lagunas biológicas: se refiere a estanques construidos a baja profundidad (menor a 5 m), donde se tratan aguas residuales mediante la interacción de biomasa, materia orgánica de desecho y otros procesos naturales para la obtención de un efluente con características previamente establecidas (*Universidad Autónoma de Nuevo Leon, 2001*).

Lagunas de estabilización: también conocidas como lagunas de oxidación son estanques con características similares a las lagunas biológicas con la diferencia que aquí interactúan algas que oxidan la materia orgánica mediante fotosíntesis, también intervienen otros factores como la estabilización por digestión. Se pueden clasificar en aeróbicas, anaeróbicas y facultativas (*Universidad Autónoma de Nuevo Leon, 2001*).

Lagunas aireadas: mecánicamente hablando son muy similares a las lagunas de estabilización ya que cuentan con profundidades similares entre 3 a 5 m, con la diferencia que estas lagunas cuentan con una fuente de oxígeno artificial. Se les suele añadir el agua residual después de haberlas pasado por un proceso preliminar. Generalmente se emplean para el tratamiento de aguas residuales de ciudades pequeñas y medianas, y por empresas de desechos de origen orgánico, su costo llega a ser muy elevado por el mantenimiento de los equipos electromecánicos y la energía eléctrica que se emplea (Rolim, 1999).

Lodos activados: El método por lodos activados que es en cuál se centrará esta tesis es un proceso en el cual por medio la utilización de microorganismos se tratan aguas industriales, dichos microorganismos suelen ser bacterias heterótrofas facultativas que suelen crecer en aguas residuales y que a través de procesos metabólicos transforman la

carga orgánica en materia más simple como nuevas bacterias, CO₂, biogás, etc (Varila & Diaz, 2008).

Todo el proceso se lleva a cabo en un reactor o tanque de aireación donde los microorganismos se mantendrán en suspensión y en constante aireación para llevar a cabo sus procesos metabólicos, en dicho reactor se regularán las condiciones de operación como pH, temperatura y la presencia de sustancias tóxicas. La fuente de aireación generalmente suele ser un soplador con difusores, aunque se puede emplear una inyección de oxígeno puro a través de aireación mecánica (Valdivielso, n.d).

En este tipo de métodos se suele conducir la mezcla a un tanque de sedimentación para que por decantación natural se puedan realizar dos acciones, la primera es realizar una recirculación de la materia para mantener el número necesario de células en el sistema, mientras que la segunda es una purga para eliminar los excesos de materia orgánica del sistema (Varila & Diaz, 2008).

Tratamiento primario: es un método de carácter fisicoquímico cuya finalidad es eliminar los SST por medio de precipitación, sedimentación u oxidación química. Entre los tipos de procesos que acompañan a este tratamiento se encuentra la sedimentación primaria, flotación y la coagulación-floculación con algún tipo de filtración (Huaranga, 2011).

Tratamiento primario avanzado: es similar al tratamiento primario a diferencia que este consiste en un mecanismo de coagulación-floculación que utiliza diseños compactos y algunos polímeros de alto peso molecular y elevada densidad de carga con la finalidad de que al añadir reactivos químicos como cloruro de hierro o sulfato de aluminio, se pueda eliminar materia orgánica suspendida, materia coloidal y orgánica como DBO₅ (*Tratamiento Primario Avanzado.Pdf*, n.d.).

Reactor anaeróbico de flujo ascendente: este método mejor conocido como R.A.F.A se emplea para el tratamiento de aguas residuales concentradas, generalmente de tipo industrial. Por sus características, para tener un buen funcionamiento requiere de un pretratamiento adecuado para evitar taponar las tuberías del reactor. El proceso consiste

en una serie de reacciones bioquímicas de bajo costo donde los microorganismos involucrados llevan a cabo su proceso metabólico produciendo grandes cantidades de biogás (CONAGUA, 2019).

Reactor enzimático: los biorreactores enzimáticos funcionan en procesos catalíticos mediante la aplicación de enzimas como catalizador heterogéneo. Dichos reactores se pueden operar mediante procesos discontinuos o en flujos continuos, gracias al uso de este tipo de reactores se puede disminuir la emisión de compuestos orgánicos volátiles y agua residual (Pessoa Jr, 2005).

Tanque Imhoff: se refiere al equipo de tratamiento primario cuya finalidad es remover los SST que se puedan encontrar en las aguas residuales. Su empleo es altamente efectivos para comunidades pequeñas ya que dicho método integra la sedimentación del agua y la digestión de lodos sedimentados en la misma unidad, a pesar de su utilidad cuentan con la desventaja de que necesitan forzosamente un pretratamiento de cribado y de remoción de arenas (CENTA, 2009).

Tanque séptico: son recipientes que funcionan bajo el principio de sedimentación bajo el funcionamiento de varias capas en el cual se separan sólidos, grasas y aceites, y algunos gases, cada capa almacena alguna de estas sustancias y se almacenan para darles un tratamiento secundario biológico para degradar la carga orgánica disuelta en el efluente del tanque (Rosales Escalante, 2003).

Humedal: se refiere a zonas cubiertas de agua de origen natural o artificial cuya finalidad es la fitodepuración de aguas residuales mediante el cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado, lo que permite que se lleven a cabo una serie de reacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual va siendo depurada de manera lenta y progresiva, se puede emplear tanto para aguas municipales como para industriales (Delgadillo et al., 2010).

Además de estos métodos se debe considerar que debido a la gran cantidad de sustancias y materiales que se pueden encontrar en las aguas residuales no se puede simplemente aplicar uno de los tratamientos previamente vistos, de ser así su eficiencia se

vería disminuida al no poder remover la gran carga contaminante. De este modo, se debe tener un proceso a seguir para obtener la mejor remoción de compuestos contaminantes y compuestos no solubles.

De acuerdo con (Rojas, 2002) la mejor manera de trabajar las aguas residuales es siguiendo este proceso de tratamiento: tratamiento preliminar, tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento avanzado terciario, desinfección y disposición de lodos. Es bastante simple la forma de operar de estos pasos; no obstante, se deben incluir porque podría generar algún problema en los equipos.

Para iniciar se encuentra el tratamiento preliminar que está destinado al acondicionamiento de las aguas residuales para de este modo proteger el equipo de las instalaciones y procurar su buen funcionamiento, además se procurará que con este pretratamiento no se dañe ni se afecten las condiciones estéticas de las plantas de tratamiento.

En el tratamiento primario se busca remover por medios físicos o mecánicos ya sea en su parcialidad o totalidad la parte sedimentable o flotante. Con esto, se elimina una fracción del material orgánico que se encuentra como sólidos suspendidos. Para apoyar este tratamiento se suelen emplear las técnicas de: flotación, precipitación química, filtros gruesos, oxidación química, coagulación-floculación, sedimentación y filtración.

Posteriormente en el tratamiento secundario se reducen los compuestos orgánicos que quedan en el agua residual, se suele realizar por medios biológicos y lo que se busca es poder sedimentar o flocular la materia orgánica en tanques de decantación. Generalmente se emplean lodos activados y filtros percoladores debido a su alta efectividad en la eliminación de la carga orgánica contaminante. En este proceso se contemplan las técnicas de lagunas de estabilización y aireadas, así como el tratamiento biológico utilizando O_2 puro y tratamiento anaeróbico. Son altamente útiles puesto que remueven aproximadamente el 95% de la DBO_5 .

Que por su tipo y propiedades se pueden subdividir los tratamientos en:

Filtración biológica: Filtros básicos que tienen baja capacidad; y filtros comunes, biofiltros y aerofiltros que son de alta capacidad

Lodos activados: Convencionales, de alta capacidad, de contacto estabilización y aeración prolongada.

Lagunas: Pueden ser de estabilización y son: aerobias, facultativas y de maduración; o aerada que son: mezcla completa, facultativa, facultativa con aeración mecánica y difusión de aire.

Otros métodos son: contacto anaeróbico, filtro anaerobio y reactor anaeróbico de flujo ascendente. De oxígeno puro se encuentran: Unox/linde y discos rotatorios.

Consiguiente se encuentra el tratamiento terciario que se encarga de complementar los procesos secundarios para lograr la obtención de un efluente más puro para que pueda ser empleado posteriormente para diferentes usos como recarga de acuíferos, recreación, agua industrial, entre otros. Se suelen remover fosfatos y nitratos, huevos y quistes de parásitos, sustancias tensoactivas, algas, bacterias y virus, radionúclidos, sólidos totales y disueltos.

Como refuerzo más adelante viene la desinfección cuyo objetivo es reducir el contenido bacteriológico y viral, junto con los posibles quistes amebianos en las aguas residuales tratadas previo a su disposición final. En este paso se destruirán de manera selectiva los organismos que puedan causar enfermedades y se lleva a cabo mediante agentes químicos, físicos, mecánicos o incluso radiación. Usualmente se emplea la desinfección con cloro.

2.4. Biogranulación

Es una tecnología que promete bastante debido a su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales. Según (Y. Q. Liu et al., 2004) los biogránulos exhiben una estructura microbiana de matriz, y una investigación intensiva ha demostrado que las sustancias poliméricas extracelulares (EPS) son un componente principal del material de la matriz del biogránulo.

Para comprender mejor sus funciones hay que entender cómo se estructuran. En palabras de (Y. Q. Liu & Tay, 2008) los biogránulos se generan por un proceso de auto inmovilización de microorganismos sin que intervenga algún medio fijo para su adherencia. Esto lo diferencia de otros métodos de cultivo en suspensión como los discos biológicos. En este método los biogránulos se caracterizan por una mejor capacidad de sedimentación de la biomasa y buena resistencia a compuestos tóxicos en su medio.

Asimismo, por sus características es preferible usar biogránulos que lodos activados. Investigaciones reportadas por (Y. Chen et al., 2008) informan que los gránulos aerobios tienen una estructura microbiana con características compactas y fuertes que permiten un arranque rápido y una buena capacidad de sedimentación, esto a su vez reflejado como una alta retención de biomasa y capacidad de soportar altas cargas orgánicas, estas características les dan una ventaja considerable como método para tratar aguas residuales. En adición, (Wagner & da Costa, 2013) afirman que debido al limitante gradiente de difusión de oxígeno es posible que existan zonas aeróbicas, anaeróbicas y anóxicas por la compleja forma de los biogránulos, estas son condiciones ideales para el crecimiento de bacterias aeróbicas y facultativas que permiten eliminar simultáneamente al carbono, fósforo y nitrógeno.

2.4.1. Crecimiento y adaptación de biogránulos

La formación de gránulos aerobios se puede entender como un proceso biológico y fisicoquímico complejo, donde para obtener una auto inmovilización microbiana se someten condiciones de estrés ambiental como cizallamiento físico, interacciones fisicoquímicas o bioquímicas y mecanismos de atracción microbiana (Franca et al., 2018). Para su crecimiento, mediante siembra de lodos se inicia con el crecimiento de una colonia a la que se le dará un crecimiento con colisiones entre gránulos lo que producirá gránulos estables y de mayor densidad, el resto dependerá de las condiciones operativas del reactor (Kent et al., 2018).

Para una adaptación adecuada de los biogránulos las condiciones de operación a establecerse deberían ser el tiempo de sedimentación (Dahalan et al., 2015), el esfuerzo hidráulico cortante o velocidades de aireación (Nancharaiah & Kiran Kumar Reddy, 2018),

tiempos de vaciado (Franca et al., 2018), tiempos de retención hidráulica (X. Liu et al., 2016), composición del sustrato (Dahalan et al., 2017), concentración de iones divalentes (Jiang et al., 2016), fluctuaciones de pH, temperatura (Cui et al., n.d.) y el lodo de siembra empleado (Franca et al., 2018).

2.4.2. Mecanismos de formación

Al estudiar los lodos granulares (LG) se dieron cuenta que los gránulos se forman por enlaces de Van de Waals y que las condiciones del sistema son las que permiten que se formen sustancias extracelulares que lleva a la formación de colonias bacterianas y todo esto es posible gracias a los pasos para llevar a cabo un proceso de granulación.

Se puede llevar a cabo mediante la interacción, donde por el movimiento se introduce una fuerza externa y genera que por difusión y rozamiento las células hidronímicas interactúen entre ellas lo que aumenta su biomasa, posteriormente se puede llevar a cabo un contacto estable entre fuerzas atrayentes como lo puede ser la hidrofobia, tensión superficial, fuerzas químicas, fuerzas bioquímicas, cargas electromagnéticas, etc.; posteriormente se encuentra la maduración de las fuerzas de los biogránulos donde los cambios metabólicos compactan a los gránulos y finalmente la estabilidad y forma, donde los polisacáridos presentes le dan forma al gránulo como bola compacta (Sharma et al., 2019).

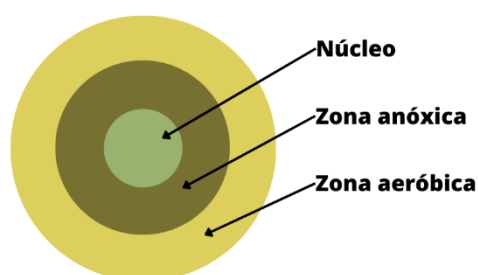


Figura 2. Estructura de un gránulo aerobio. Adaptada de: (Sharma et al., 2019).

Dichos pasos se deben tomar con mucha precaución ya que un mal manejo de las fuerzas externas pueden generar gránulos débiles con poca estabilidad (J. H. Tay et al., 2001), un incorrecto tiempo de ciclo puede generar desestabilidad celular en los gránulos

(Qin et al., 2004), variaciones en los polisacáridos puede generar afectaciones en las colonias de bacterias (Y. Q. Liu et al., 2004).

Entre mejor sea el LG en términos de compacidad, mayor será la remoción de contaminantes que es el objetivo final del cultivo de estos. Se sabe que los lodos activados tienen excelentes tasas de remoción de DQO, nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) (De Kreuk et al., 2005 & Schwarzenbeck et al., 2005), dichos compuestos son la principal carga de contaminación de aguas domésticas, es por ello que se le da un primer acercamiento a tratar con estas sustancias.

Sin mencionar que las colonias de bacterias tienen excelente tolerancia a sustancias tóxicas por su gran adaptabilidad, es así que los LG pueden remover compuestos prioritarios como el fenol (Wang et al., 2018), amoníaco (Cobos et al., 2011), colorantes (Pearce et al., 2003), entre otras sustancias de interés.

Al estar hablando de colonias de bacterias hay que contemplar un factor muy importante, la alimentación y oxigenación ya que al trabajar con gránulos se pueden usar dos enfoques, un cultivo aerobio o anaerobio, aunque se ha demostrado que la granulación anaerobia es considerablemente más lenta que una aerobia (Y. Q. Liu & Tay, 2008), es por ello que se opta por ciclos aerobios con condiciones de estrés anaerobias para así fomentar una mejor compactación de los gránulos.

En temas de alimentación las bacterias suelen encontrar fuentes de carbono en las aguas domésticas ya que al remover la carga orgánica es debido a que se generan procesos de nitrificación/desnitrificación (Schwarzenbeck et al., 2005) donde los microorganismos aprovechan esta materia como fuente de alimento a través de fases aeróbicas y anaeróbicas (Coma et al., 2012). A nivel laboratorio un reactor batch es lo más adecuado por el control de entradas y salidas que permite monitorear correctamente la granulación.

La cuestión en este caso es que a escala laboratorio se requiere un influente que contenga todas las propiedades necesarias para garantizar la vida celular y no generar efectos estresantes de modo que no se fomente la biogranulación (de Kreuk & van Loosdrecht, 2006), de modo que haya fuentes de carbono como principal componente y

elementos traza que puedan aprovechar los microorganismos para obtener los compuestos necesarios para un correcto desarrollo. En la Figura 3 se muestra como es la composición típica de una bacteria en aguas residuales.

Tabla 3. Composición de una bacteria. Adaptado de (Romero Zúñiga, 2001).

Constituyentes o elementos	% SST	Fórmula empírica de las células C ₅ H ₇ O ₂ N
Principales constituyentes celulares		
Proteína	55	-
Polisacáridos	5	-
Lípidos	9.1	-
DNA	3.1	-
RNA	20.5	-
Otros (azúcar, aminoácidos)	6.3	-
Iones inorgánicos	1	-
Como elementos en la célula		% SSV
Orgánico (SSV)	93	-
Carbón	50	53.1
Oxígeno	22	28.3
Nitrógeno	12	12.4
Hidrógeno	9	6.2
Inorgánico (SSF)	7	-
Fósforo	2	-
Azufre	1	-
Potasio	1	-
Sodio	1	-
Calcio	0.5	-
Magnesio	0.5	-
Cloro	0.5	-
Hierro	0.2	-
Otros elementos traza	0.3	-

2.4.3. Ciclos aerobios

Los ciclos aerobios se llevan a cabo mediante procesos metabólicos de bacterias heterótrofas en las cuales dichos microorganismos emplean el oxígeno como aceptor terminal de electrones de las moléculas de alimento, donde llevan procesos oxidativos de glucosa y ácidos grasos para obtener la energía necesaria que termina siendo mucho mayor que la energía producida en procesos fermentativos.

El proceso para realizar esto se lleva a cabo cuando los ácidos grasos y la glucosa se degradan para permitir la formación de acetilcoenzima. A, dicha molécula ingresará al ciclo del ácido cítrico lo que llevará a la donación de electrones para sintetizar ATP en una etapa llamada fosforilación oxidativa, de dicho proceso se producen moléculas de agua. (Aerobios et al., n.d.)

2.4.4. Ciclos anaerobios

Los ciclos anaerobios conllevan un proceso fermentativo donde las bacterias heterótrofas involucradas realizan una serie de procesos metabólicos complejos entre sí en ausencia de oxígeno, llevando parte importante de ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno y azufre. Estos ciclos se suelen subdividir en varias fases: hidrólisis y fermentación, acetogénesis y metanogénesis, en la primera etapa sólidos insolubles interactúan con la pared celular de las bacterias para ser hidrolizadas en alcoholes y ácidos grasos liberando hidrógeno y CO₂, en la segunda etapa se produce ácido acético a través de los previos ácidos grasos o alcoholes, también se puede producir mediante la reducción de CO₂, en la última fase las arqueas convierten los sustratos a metano (Corredor Vargas et al., 2015).

En otras palabras, es una serie de reacciones fermentativas microbianas en presencia de poco o nulo oxígeno para producir una serie de gases de los que destaca el metano y el CO₂, dichas bacterias también se ven restringidas por las mismas condiciones operativas vistas previamente para un correcto funcionamiento en la serie de etapas sucesivas para realizar sus procesos metabólicos.

2.5. Remoción de contaminantes

2.5.1. DQO

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) se refiere a la cantidad de oxígeno que se requiere para poder oxidar la totalidad de la materia orgánica presente en una muestra de agua residual. Para la realización de estas mediciones se emplea dicromato de potasio y el muestreo toma alrededor de 2 horas que el tiempo que le toma al vial hacer reaccionar la muestra para obtener CO₂ y agua como productos finales.

2.5.2. DBO

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) se refiere a la cantidad de oxígeno disuelto en el agua que es consumido durante la oxidación por la vía biológica de la materia orgánica presente en la muestra de agua residual. La realización estándar de la prueba dura 5 días y dependerá de condiciones estándar de operación donde el oxígeno, la temperatura y la duración jugarán un papel importante en el metabolismo de los microorganismos presentes.

2.5.3. Nitrógeno y Fósforo Total

La carga orgánica presente en aguas residuales si bien es algo natural, en descargas de efluentes puede ser contraproducente ya que dicha carga orgánica se aprovecha del oxígeno disuelto del agua para producir sus ciclos biológicos correspondientes, es por ello que se le debe dar un enfoque de remoción de NT y PT en las aguas residuales para garantizar que las aguas receptoras no sufrirán afecciones. Estos muestreos se realizan en 1 hora aproximadamente.

2.5.4. Fenol

En el caso de descargas industriales el fenol es un compuesto persistente que no se degrada por métodos naturales en el agua; no obstante, tenemos maneras de monitorear la degradación de este con tratamientos biológicos para determinar si el uso de ciertas tecnologías puede garantizar la remoción de este compuesto aromático. Para el muestreo se pueden emplear varias metodologías, pero sin duda alguna la más sencilla es mediante espectrofotometría

3. Metodología

La experimentación fue llevada a cabo en un laboratorio de la Universidad de las Américas Puebla a lo largo de 11 meses. En la Figura 4 se muestra un diagrama de flujo de cómo fue el proceso de trabajo.

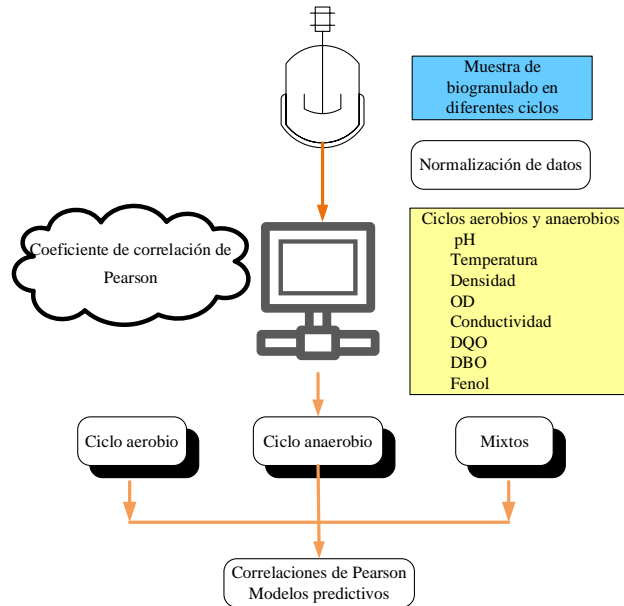


Figura 3. Metodología empleada. Elaborada por autor en Microsoft Visio

Las muestras de lodos se obtuvieron de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de las Américas Puebla, México. Las muestras se recolectaron antes del proceso de aireación convencional. Las muestras recolectadas se sedimentaron durante 5 min para eliminar el exceso de agua y permitir que el lodo que se inoculará en el biorreactor.

Las concentraciones del efluente de la industria textil se simularon considerando únicamente el proceso de hilado y tejido. El agua residual sintética se preparó con los componentes en la Tabla 4. Es importante mencionar que colorantes y tintes se omitieron en el agua residual sintética.

Tabla 4. Composición del sustrato sintético. Adaptada de información de: (Muda et.al, 2010); (Sánchez, 2022).

Compuesto	Fórmula química	Dosis (g/L)
Acetato de Sodio	CH ₃ COONa	1.50
Fenol	C ₆ H ₆ O	0.25
Cloruro de Amonio	NH ₄ Cl	0.08

Fosfato de Potasio	K ₂ HPO ₄	0.11
Sulfato de Magnesio	MgSO ₄	2.50
Cloruro de Calcio	CaCl ₂	1.00
Cloruro Férrico	FeCl ₃	0.05
Sulfato Cúprico	CuSO ₄	0.02
Cloruro de Potasio	KCl	0.05
Cloruro de Aluminio	AlCl ₃	0.04
Sulfato de Zinc	ZnSO ₄ • 7H ₂ O	0.06

En la Tabla 5 se muestra cómo se realizó la adición de fenol de acuerdo a los ciclos donde se llevó a cabo a la alimentación del sustrato para lograr un máximo estrés de los biogránulos y apreciar el comportamiento de la remoción del fenol por parte de los biogránulos de acuerdo a la concentración del mismo.

Tabla 5. Concentración de fenol de acuerdo con los ciclos. Elaborada por autor.

Compuesto:	Fenol (mg/L)
Ciclo	Masa
1	0.23
2	0.25
4	0.25
5	0.25
7	0.25
9	0.25
11	0.25
12	0.25
14	0.25
16	0.25
18	0.30
20	0.31
21	0.34
22	0.34
23	0.37
24	0.40
25	0.45
26	0.48
28	0.51
32	0.51
36	0.60

Se utilizó un reactor fotosecuencial Bach (SBR) modelo 2F-5000 (Figura 3) se utilizó para analizar la formación y crecimiento de los biogránulos. Las muestras se compusieron en una proporción 2:1, es decir, 2 L de sustrato sintético por 1 L de sólidos en suspensión (SS). El SBR se mantuvo a $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ utilizando el control de temperatura SEV FC10 y se mantuvo la agitación a 50 rpm con un agitador magnético F2-5000. El sistema de aire se controló con una bomba modelo BD-15 a 1 L/min.



Figura 4. Reactor fotosecuencial modelo 2F-5000 empleado en el proceso de biogranulación experimental.

Los datos obtenidos se recopilaron a lo largo de 38 semanas tomando mediciones de pH, temperatura, agitación, conductividad, densidad y OD. A su vez se muestreaba el nitrógeno total, fósforo total, DBO, DQO, fenol y los sólidos (ST, STV, SST, SSV).

Para poder cuantificar los gránulos, apreciar su geometría, tamaño, consorcio microbiano y estabilidad a lo largo de los ciclos se empleó un microscopio modelo Nikon Eclipse E200 mostrado en la Figura 4.



Figura 5. Microscopio modelo Nikon Eclipse E200 empleado para la visualización de los biogránulos. Obtenida de (Nikon Instruments, s.f).

Para la interpretación de los datos se emplearon métodos estadísticos que se explicarán a continuación:

3.1. Análisis de varianza

El análisis de varianza (ANOVA) prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales. Los ANOVA evalúan la importancia de uno o más factores comparando las medias de una variable de respuesta en diferentes niveles factoriales. La hipótesis nula establece que todas las medias de población (medias a nivel de factor) son iguales, mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente (Minitab® 21, 2023).

Para ejecutar un ANOVA, debe tener una variable de respuesta continua y al menos un factor categórico con dos o más niveles. Los análisis ANOVA requieren datos de poblaciones que sigan una distribución aproximadamente normal y que las variaciones entre los niveles de los factores sean iguales. Sin embargo, los procedimientos ANOVA funcionan bastante bien incluso cuando se viola el supuesto de normalidad, si una o más distribuciones no están muy sesgadas o las varianzas son muy diferentes. Las transformaciones del conjunto de datos original pueden corregir estas violaciones (Minitab® 21, 2023).

3.2. Análisis de regresión

Un análisis de correlación se puede entender como aquel método en el cual se determina si dos variables están relacionadas o no, donde el resultado es un coeficiente de correlación el cual si toma valores positivos implica que la relación entre ambas variables es positiva, mientras que, por el otro lado, si adquiere valores negativos implica que la relación es negativa, en el caso de que las variables sean independiente dicho coeficiente equivale a 0 (Alquicira, 2017).

Dicho análisis adquiere utilidad puesto que, si se demuestra que dos variables están relacionadas entre sí, se puede emplear un análisis de correlación para que una característica prediga el comportamiento de la otra (Datatab, 2023).

En la Tabla 6 y 7 se muestran dos rangos de interpretación de las correlaciones de Pearson dependiendo del coeficiente de correlación que adquieran.

Tabla 6. Interpretación de la correlación. Adaptada de (Datatab, 2023).

Cantidad de r	Fuerza de la correlación
$0.0 < 0.1$	No hay correlación
$0.1 < 0.3$	Poca correlación
$0.3 < 0.5$	Correlación media
$0.5 < 0.7$	Correlación alta
$0.7 < 1$	Correlación muy alta

Entre los métodos para estudiar esta correlación se puede utilizar el coeficiente de correlación lineal de Pearson que resulta en el estudio de variables cuantitativas en el cual se mide el grado de covariación entre distintas variables que se relacionan linealmente (Morales, 2011). Dichos coeficientes también se pueden describir mediante la interpretación de la Tabla 7.

En la Figura 5 se muestra una representación del comportamiento de las variables en función de la fuerza de correlación de las variables.



Figura 6. Interpretación de la relación de las variables con el grado de la fuerza de correlación. Obtenido de (Morales, 2011).

Este método es bastante útil al momento de analizar datos estadísticos puesto que emplea la media, la varianza y por ende emplea valores normalizados para las variables

analizadas. Dicha tipificación del promedio del producto de las puntuaciones diferenciales de cada caso se puede representar con la ecuación 1 (Análisis de correlación lineal, s.f).

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i y_i}{n S_x S_y} \quad (1)$$

Donde:

x_i y y_i corresponden a las puntuaciones diferenciales de cada par.

n corresponde al número de casos.

S_x y S_y corresponden a las desviaciones típicas de cada variable.

Tabla 7. Interpretación de coeficientes de correlación de Pearson. Adaptada de: (Zou et.al, 2003).

Valor del coeficiente de correlación	Fuerza de la correlación
-1.0	Perfectamente negativo
-0.8	Fuertemente negativo
-0.5	Moderadamente negativo
-0.2	Débilmente negativo
0	Correlación nula
0.2	Débilmente positivo
0.5	Moderadamente positivo
0.8	Fuertemente positivo
1.0	Perfectamente positivo

Si el coeficiente de correlación de Pearson se eleva al cuadrado el significado de la variable cambia y puede tener cuatro interpretaciones (Ruiz, 2019).

1. Varianza asociada: Indica la proporción de varianza de la variable Y cuando se modifica la variable X.

2. Diferencias individuales: Al multiplicar el coeficiente de correlación de Pearson por 100 nos indicará el porcentaje de las diferencias individuales en Y que están asociadas.
3. Índice de reducción del error: indica la proporción del error cuadrático medio eliminado usando Y, en vez de la media de Y como pronóstico.
4. Índice de aproximación de puntos: Indica una aproximación de los puntos a la recta de regresión, cuando mayor sea el coeficiente mayor será la aproximación.

3.3. Análisis de regresión

Una vez obtenida la correlación entre las variables es posible crear modelos de regresión lineal cuya finalidad es identificar las relaciones potencialmente causales sobre 2 variables donde se emplea una para la predicción de la otra (Dagnino, 2014). En dicha regresión se puede relacionar la variable dependiente (Y) de la variable independiente (X) mediante la ecuación 2.

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \epsilon_i \quad (2)$$

Donde:

β corresponde a las estimaciones de parámetros lineales que se deben calcular.

ϵ_i corresponde al error.

Dicho modelo se puede ajustar para cumplir funciones multivariable (Mathworks, s.f) dependiendo del caso de estudio como se muestra en la ecuación 3.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \epsilon \quad (3)$$

Al estudiar variables estadísticas es común encontrar comportamientos no lineales o con desviaciones de un comportamiento normal, esto puede ser ocasionado por factores biológicos, operativos o de equipos. No obstante, se puede realizar un ajuste mediante la aproximación de ajuste por el método de Box-Cox.

3.4. Transformación de Box-Cox

La transformación de Box-Cox es una técnica que se enfoca en el estudio de transformaciones no lineales puesto que dichas transformaciones afectan la simetría y la curtosis de los datos a estudiar (De la Guía, s.f). Este modelo emplea exponentes para estabilizar la variabilidad en Y y permitir que las variaciones previas tomen un comportamiento normalmente distribuido (Statgraphics, 2006).

En la ecuación 4 se describe el modelo matemático de la transformación de Box-Cox.

$$y = x^\lambda \quad (4)$$

Donde:

Y es la variable independiente.

X es la variable dependiente.

λ corresponde al parámetro de ajuste que se podrá fijar entre [-5,5].

Naturalmente, Minitab recomienda el uso de λ de 0.5 puesto que es un valor óptimo para una buena aproximación de datos. Box y Cox originalmente propusieron dos métodos de estudio: el método de máxima verosimilitud y el método Bayesiano. En el primer método sugieren un manejo de λ de [-2, 2], con dicho método se busca disminuir la suma de cuadrados de los residuos (De la Guía, s.f). Por otra parte, el método Bayesiano es un poco más holgado en términos de los rangos puesto que se basa en la probabilidad de que suceda un evento; sin embargo, el modelo matemático llega a ser más riguroso como se puede apreciar en la ecuación 5

$$f(z|\beta, \Sigma) = \frac{\exp\{-\frac{1}{2}(z-\mu)'\Sigma^{-1}(z-\mu)\}}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}|\Sigma|^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

Donde:

$z = y^\lambda$.

Es posible que debido a la naturaleza de los datos no exista algún exponente de parámetro de ajuste existente que garantice la linealización y normalización de los datos.

Cabe mencionar que (Hyde, 1999) sugiere que de ser necesario se puede crear un intervalo de confianza para obtener un valor de λ que se ajuste a nuestros datos. Es por ello por lo que se eligió emplear el rango de [-5, 5] puesto que al analizar la naturaleza de los datos se obtuvo un ajuste adecuado en dicho rango, en adición a que (Minitab ® 20, 2021) nos sugiere esos valores como rango máximo permisible.

3.5. Análisis de Componentes Principales

Como un método adicional para el estudio de estos datos se empleará la técnica de Análisis de Componentes Principales (PCA por sus siglas en inglés) que consiste en un método estadístico que permite simplificar la complejidad de espacios muestrales que cuentan con muchas dimensiones para conservar su información (Amat, 2017).

Dicho método de análisis presenta sus ventajas contra métodos estadísticos como la regresión de datos puesto que al condensar la información aportada por múltiples variables en pocas componentes nos permite agrupar variables por su correlación (Amat, 2017).

3.6. Análisis gravimétrico para la medición de sólidos

Para la determinación de sólidos se realizaron pruebas establecidas en la norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015 que enlista las mediciones para sólidos totales (ST), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos totales volátiles (STV) y sólidos suspendidos volátiles (SSV).

Las ecuaciones empleadas para la cuantificación de dichas mediciones son las siguientes:

$$ST = \frac{m_3 - m_1}{V} \quad (6)$$

$$STV = \frac{m_4 - m_3}{V} \quad (7)$$

$$SST = \frac{m_5 - m_2}{V} \quad (8)$$

$$SSV = \frac{m_5 - m_6}{V} \quad (9)$$

Donde:

m_1 corresponde a la masa de la cápsula vacía en peso constante, en g.

m_2 corresponde a la masa del crisol con el filtro antes de la filtración, en g.

m_3 corresponde a la masa de la cápsula con el residuo después de la evaporación, en g.

m_4 corresponde a la masa de la cápsula con el residuo después de la calcinación, en g.

m_5 corresponde a la masa del crisol con el filtro después de la filtración, en g.

m_6 corresponde a la masa del crisol con el filtro después de la calcinación, en g.

V corresponde al volumen de la muestra en ml.

Para obtener una mayor exactitud con los resultados, las mediciones se realizaron por triplicado en cada caso procurando las mismas condiciones de muestreo.

3.7. Cuantificación de fenoles

Para realizar la cuantificación fenoles se midieron las absorbancias del fenol mediante espectrofotometría de masas en la cual se graficó el comportamiento de la concentración de sustrato de fenol contra la absorbancia para que con los datos se pudiera obtener una curva de calibración con la que se determinaría la tasa de absorción del fenol a lo largo de los ciclos.

El espectrofotómetro se calibró con un blanco de agua destilada en una celda espectrofotométrica de plástico para posteriormente medir la absorbancia del fenol en una celda con las mismas propiedades. La longitud de onda empleada fue de 460 nm como estipula la NMX-AA-050-SCFI-2001, que establece las condiciones para la lectura de fenol en presencia de otros compuestos ferrosos y compuestos orgánicos.

3.8. Análisis multivariable

En el caso de estudio para la elaboración de este trabajo se realizaron mediciones diarias sobre factores fisicoquímicos como lo es el pH, temperatura, agitación, conductividad, densidad, OD, DBO, DQO, PT, NT y fenol. Con dichas mediciones se elaboró una base de datos la cual se clasificó de dos maneras: por ciclo (aerobio, anaerobio) y por semana de medición.

Una vez obtenidas las mediciones, en el software Minitab[®] 21.2 en el cual se realizó un análisis de correlación para obtener los coeficientes de correlación entre las variables fisicoquímicas. Dicha correlación se presentó como una secuencia de datos en una matriz

triangular invertida en la cual se eligieron los datos que se consideró influyen moderada o fuertemente en las correlaciones ya sea de manera positiva o negativa.

Una vez identificados los coeficientes con correlaciones significativas se elaboró un análisis de normalidad para identificar el comportamiento de las variables de acuerdo con una tendencia, buscando seguir el comportamiento mostrado en la Figura 5 para variables con una correlación positiva máxima.

Con dicho análisis se obtuvieron modelos de regresión lineal asociando las variables independientes a aquellos factores que se identificaron con coeficientes de Pearson significativos para obtener un modelo predictivo del comportamiento de las condiciones operativas del reactor.

Después de obtener los modelos de regresión se realizó un ajuste a las variables atípicas o faltantes en las mediciones realizadas para obtener un análisis del mismo tamaño de columna y así tener un mejor estudio de los datos obtenidos.

Posteriormente, se realizó un ajuste con la transformación de Box-Cox para obtener un rango de valores más ajustados, para lo que se esperó obtener de una relación fuertemente positiva. Esto se puede realizar de dos maneras: la primera es de manera experimental empleando los valores del rango permitido para dicha transformación hasta obtener una serie de valores que tuvieran un comportamiento adecuado o la segunda opción es emplear un ANOVA en Minitab para la obtención dichos coeficientes de manera automática.

Al haber transformado los datos se realizó la repetición de la metodología desde el análisis de normalidad para apreciar el nuevo comportamiento de las variables y de este modo obtener modelos de regresión más exactos que servirán para controlar el proceso operativo del reactor de tratamiento de aguas.

A manera de corroborar esta información obtenida se realizó un análisis de PCA para afirmar o refutar correlaciones y en caso de tener que descartar alguna, analizar cuales aspectos de dicha correlación se deberán modificar en la elaboración de correlaciones para obtener información confiable.

4. Resultados y Discusión

4.1. Normalización de datos

En la Figura 6 se muestra el análisis de correlación elaborado en Minitab® 21.2.

Correlación												
	Ciclo	Día	pH	T (°C)	OD (mg/L)	cond (mS/cm)	agitación (rpm)	densidad (g/cm ³)	NT (mg/L)	PT (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)
Día	0.058											
pH	-0.052	0.178										
T (°C)	-0.386	0.047	0.214									
OD (mg/L)	-0.339	0.196	0.112	-0.072								
cond (mS/cm)	0.740	0.006	-0.035	-0.181	-0.229							
agitación (rpm)	0.088	0.387	0.103	-0.026	0.208	0.141						
densidad (g/cm ³)	0.320	-0.003	-0.109	-0.076	-0.294	0.033	0.005					
NT (mg/L)	0.084	-0.358	0.032	-0.164	-0.141	0.051	-0.382	-0.282				
PT (mg/L)	0.534	-0.069	-0.357	0.016	-0.007	0.149	0.062	0.192	0.304			
DBO (mg/L)	0.004	0.110	0.505	0.07	-0.126	0.109	-0.372	0.079	-0.011	-0.25		
DQO (mg/L)	0.604	-0.337	-0.418	0.393	-0.145	0.301	0.249	0.130	-0.044	0.441	0.026	
fenol	0.281	-0.167	0.145	0.534	-0.346	0.352	-0.173	-0.075	-0.205	-0.199	-0.129	0.074

Figura 7. Análisis de correlación para los datos sin modificar obtenido en Minitab® 21.2.

Elaborado por autor.

En esta matriz triangular invertida se consideró como correlación fuerte a los coeficientes entre ± 0.5 a ± 1 , se consideró como correlación media a los coeficientes entre ± 0.2 a ± 0.49 , las correlaciones débiles entre 0 a ± 0.19 no se consideraron para realizar los siguientes análisis puesto que se determinó que su influencia en los modelos era insignificante.

A continuación, se muestran los resultados de los análisis de normalidad de las variables.

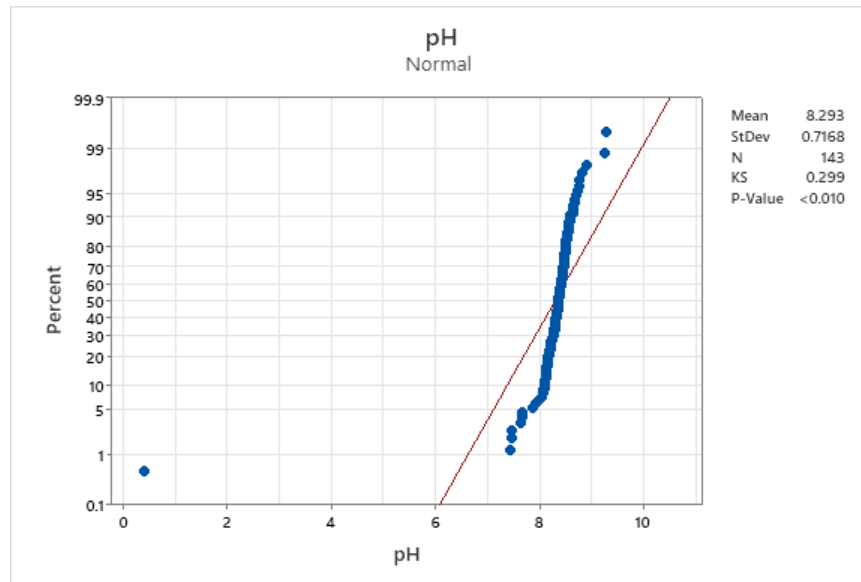


Figura 8. Normalización de valores de pH obtenido en Minitab[®] 21.2. Elaborado por autor.

Los valores de pH medidos en laboratorio como se puede apreciar están contenidos en un rango bastante cerrado; no obstante, debido a algunos valores atípicos por errores operacionales se obtuvo una recta de normalización un poco alejada al comportamiento visual esperado, aunque en términos de normalidad se encuentra bastante normalizado y esto se puede comprobar en la desviación estándar que reporta el gráfico. Para ajustar esto simplemente se eliminaron los valores de pH atípicos y se realizaron los ajustes correspondientes.

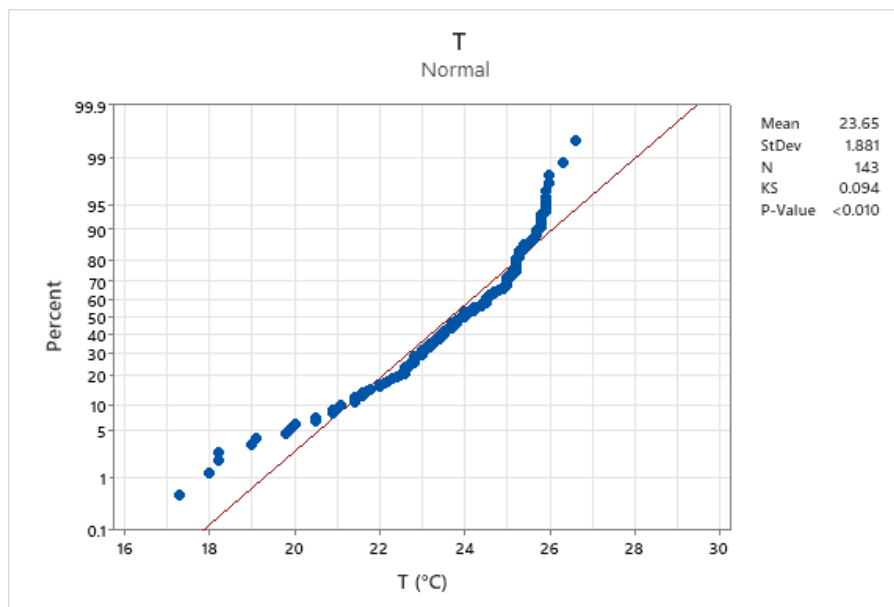


Figura 9. Normalización de valores de temperatura obtenido en Minitab® 21.2. Elaborado por autor.

De mismo modo que la normalización de pH, se obtuvo una normalización bastante adecuada para la temperatura. Así mismo, al analizar en qué mediciones se obtuvieron los valores más atípicos se pudo apreciar que las diferencias obtenidas fueron por errores del equipo que en su momento no se detectaron a tiempo, para eliminar ese error se realizó un promedio del resto de los valores y se ajustó ese valor de temperatura a las pocas mediciones atípicas. Esto es válido, ya que al trabajar en condiciones extremadamente controladas el promediar las demás mediciones no afecta la confiabilidad de los resultados.

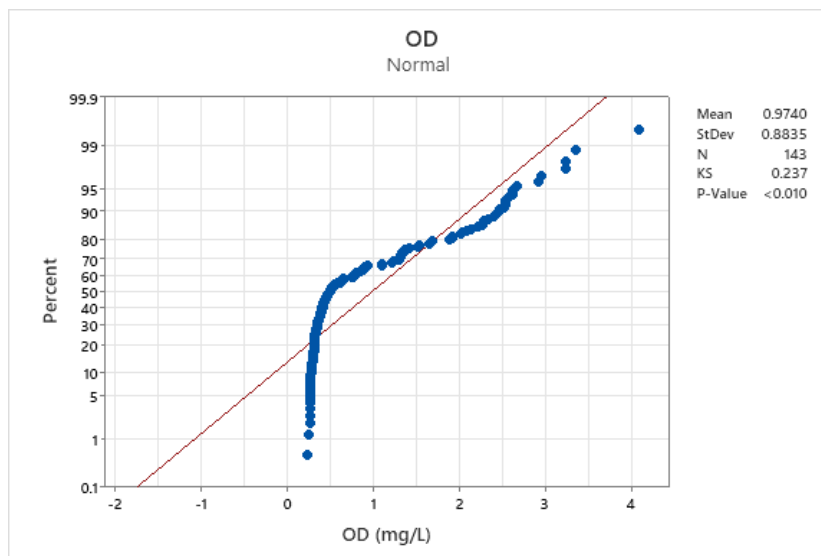


Figura 10. Normalización de valores de OD obtenido en Minitab[®] 21.2. Elaborado por autor.

El OD presenta un comportamiento algo inusual, la interpretación de estos resultados se puede atribuir a los ciclos aerobios y anaerobios donde se realizaron las mediciones, al trabajar con ciclos anaerobios donde se suspendía el oxígeno se obtenían mediciones de OD bajas mientras que al trabajar en condiciones aerobias se obtenían mediciones un poco más concentradas.

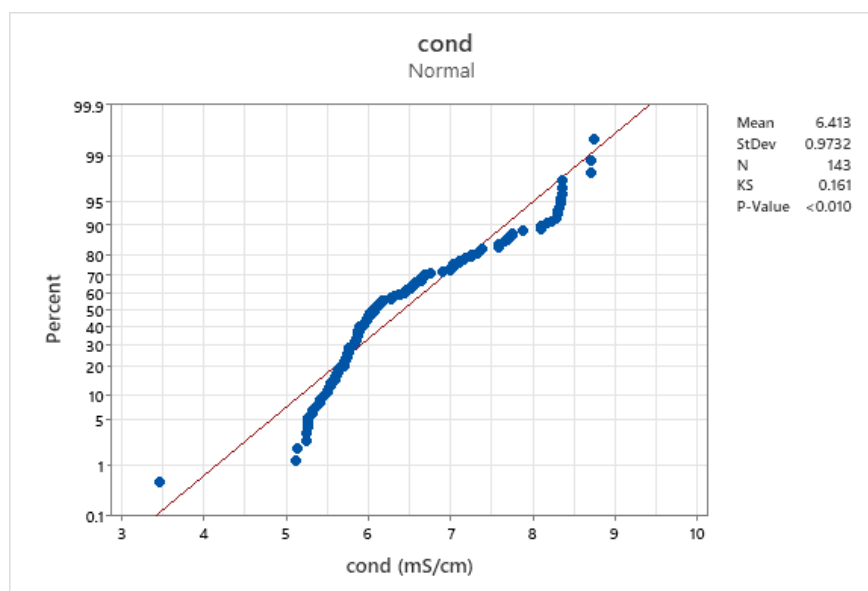


Figura 11. Normalización de valores de conductividad obtenido en Minitab[®] 21.2. Elaborado por autor.

La conductividad presenta un comportamiento bastante normalizado, debido a que las mediciones fueron realizadas con un conductímetro bastante confiable no se descartarán datos. Simplemente se realizaron ajustes correspondientes para ajustar más la recta de normalización.

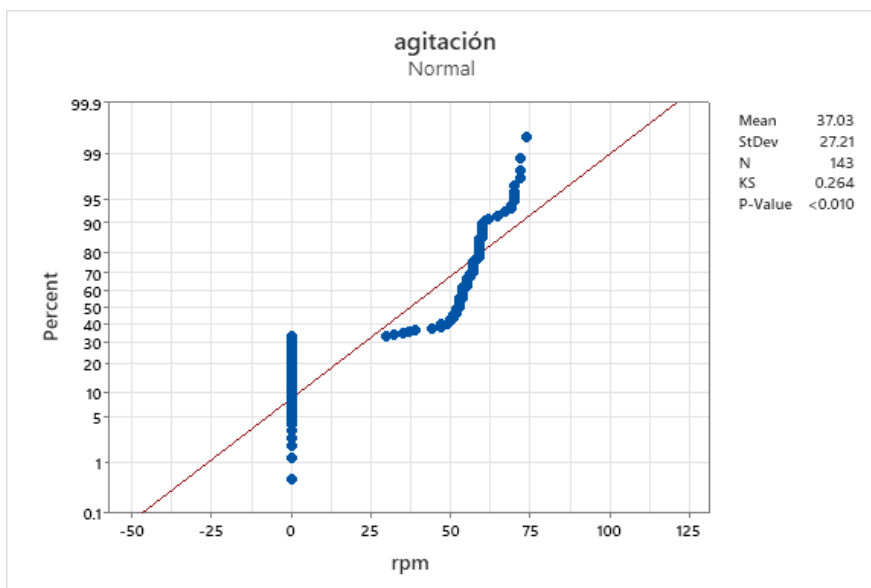


Figura 12. Normalización de valores de la agitación obtenido en Minitab® 21.2. Elaborado por autor.

La normalización de la curva visualmente es muy alarmante debido a su comportamiento tan atípico y no normalizado; no obstante, esto tiene una explicación y solución muy simple. Al realizar esta normalización se estudiaron los datos por día de medición en vez de por ciclo, es por ello que aparentemente tenemos dos estudios en uno, puesto que todos los valores ajustados al 0 corresponden al periodo anaerobio donde no existe la agitación, y los otros valores corresponden al ciclo aerobio en condiciones de agitación controladas.

Para eliminar este comportamiento no normalizado se realizará otra corrida de datos separando los ciclos de modo que se pueda visualizar el impacto de la agitación sobre las otras variables fisicoquímicas.

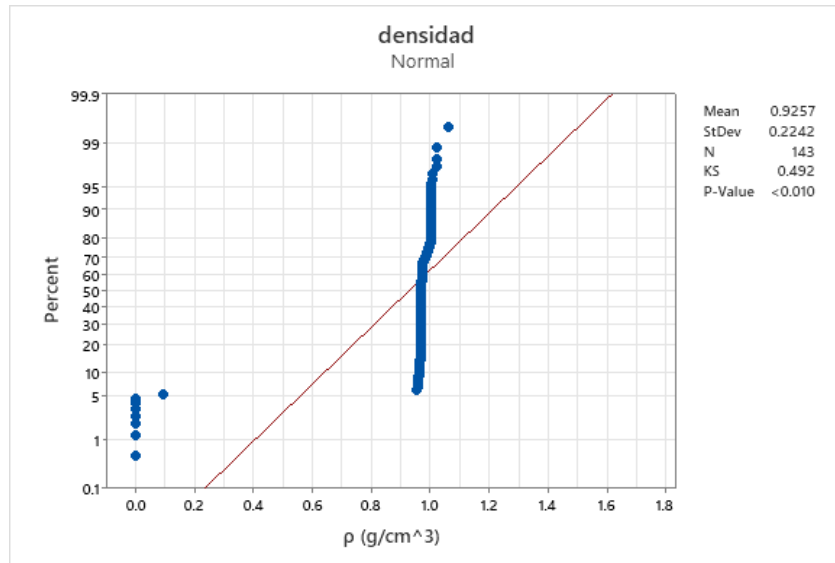


Figura 13. Normalización de valores de la densidad obtenido en Minitab® 21.2. Elaborado por autor.

Los valores de la densidad fueron bastante anormales en términos de visualización; no obstante, si apreciamos el comportamiento entre el rango [0.9, 1.1] podemos apreciar que realmente la tendencia es de un comportamiento normal. Al no haber realizado algunas mediciones iniciales al momento de arrancar el reactor, se sustituyeron dichos valores faltantes con ceros para que Minitab reconociera las variables como valores y no como texto, esto se corrigió con la metodología del análisis de regresión para tener un mejor ajuste.

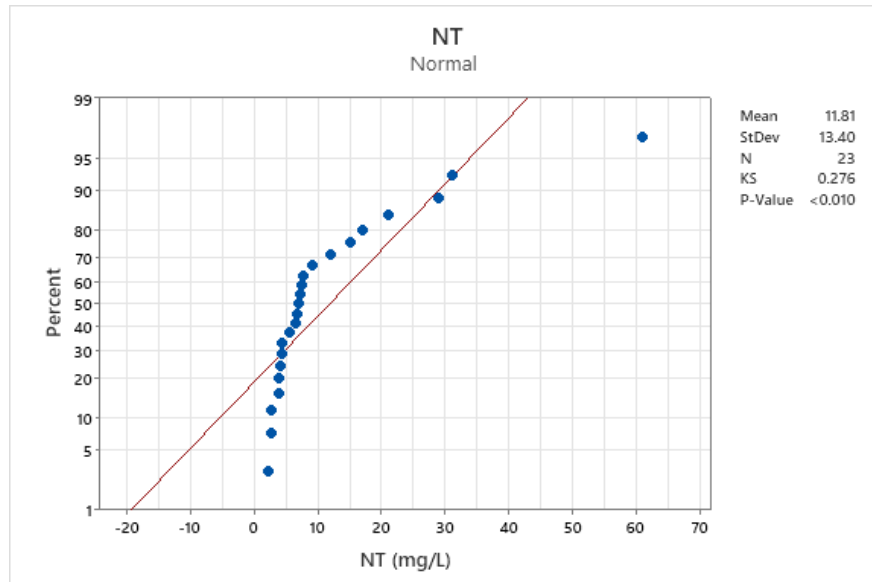


Figura 14. Normalización de valores de NT obtenido en Minitab[®] 21.2. Elaborado por autor.

En el caso del nitrógeno total se tienen pocas mediciones ya que no se contaba con gran número de viales para la realización de experimentos diarios, pero de los datos obtenidos se tiene un comportamiento no ideal que se fue ajustando al arranque del reactor, a la estabilización y a la saturación de contaminantes de este. Es por ello que, se aprecia un comportamiento de este tipo.

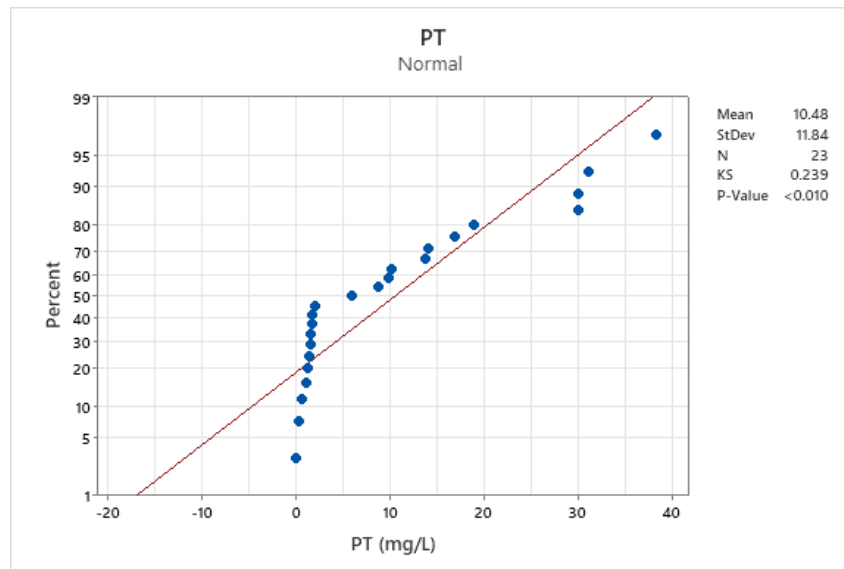


Figura 15. Normalización de valores de PT obtenido en Minitab[®] 21.2. Elaborado por autor.

Para las mediciones de fósforo total se tomaron las mismas observaciones que para el NT. Mismo comportamiento, misma interpretación. Para poder normalizar los valores tanto de NT y PT se realizó un análisis de regresión riguroso tomando en cuenta la transformación lineal de Box-Cox.

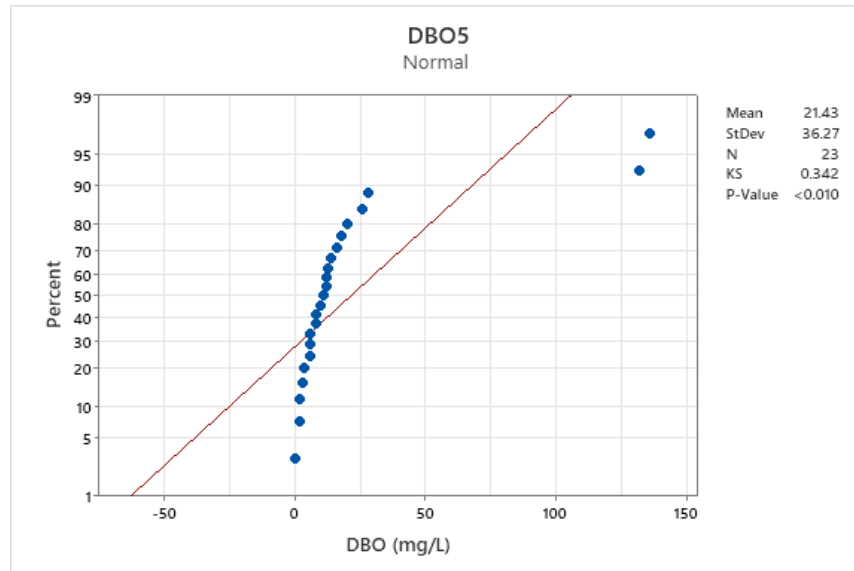


Figura 16. Normalización de valores de DBO₅ obtenido en Minitab[®] 21.2. Elaborado por autor.

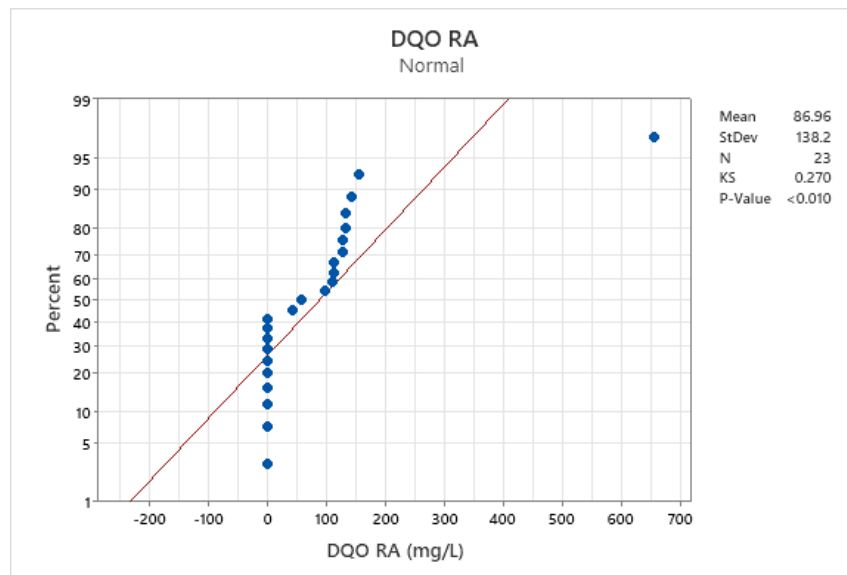


Figura 17. Normalización de valores de DQO obtenido en Minitab[®] 21.2. Elaborado por autor. (Las siglas RA corresponden a que el vial fue de rango alto; no obstante, esto no influye en la interpretación de resultados).

El comportamiento del DQO tiene el comportamiento menos ideal por lo que se realizaron severos ajustes a los datos hasta obtener un comportamiento normalizado.

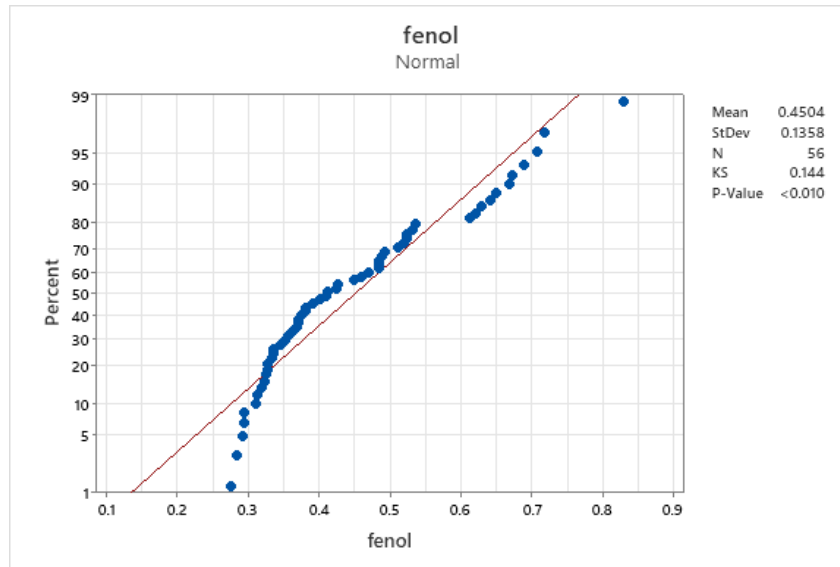


Figura 18. Normalización de valores de fenol obtenido en Minitab[®] 21.2. Elaborado por autor.

El fenol tiene un comportamiento bastante ideal sin mencionar que se notó una disminución significativa en los valores obtenidos por el espectrofotómetro lo que a priori indica una remoción de fenol a lo largo de las semanas. Se realizaron ajustes de los datos para generar un modelo de regresión aún más riguroso, aunque por el comportamiento de los datos no fue necesario, pero sí recomendable.

Se procedió a realizar los modelos de regresión de cada variable, dichos modelos no se presentan en este reporte ya que al no ser los modelos de regresión definitivos no se quiere crear confusiones al lector o mala praxis de dichos modelos. Por ende, solo se presentarán los modelos de regresión de las variables ya ajustadas a los modelos de regresión preliminares y a la transformación de Box-Cox.

En la Figura 18 se puede apreciar el análisis de regresión obtenido a partir de las correcciones realizadas a los datos con las observaciones de las figuras anteriores y con los modelos de regresión estimados para obtener columnas de datos del mismo tamaño.

Correlación										
	pH	T (°C)	OD (mg/L)	cond (mS/cm)	agitación (rpm)	densidad (g/cm ³)	NT (mg/L)	PT (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)
T (°C)	0.034									
OD (mg/L)	0.153	0.111								
cond (mS/cm)	0.010	-0.378	-0.165							
agitación (rpm)	-0.078	-0.059	0.163	0.255						
densidad (g/cm ³)	-0.091	-0.075	-0.257	-0.192	0.004					
NT (mg/L)	-0.190	-0.223	-0.155	0.059	-0.402	0.012				
PT (mg/L)	0.192	-0.019	0.912	-0.132	0.307	-0.105	-0.343			
DBO (mg/L)	-0.134	0.002	0.771	-0.213	-0.025	-0.097	-0.133	0.790		
DQO (mg/L)	0.070	-0.270	0.090	-0.007	0.149	-0.056	-0.270	0.256	0.175	
fenol	-0.200	0.057	-0.384	0.490	0.094	-0.159	-0.052	-0.390	-0.366	-0.133

Figura 19. Análisis de correlación para los datos modificados con regresión lineal obtenido en Minitab[®] 21.2. Elaborado por autor.

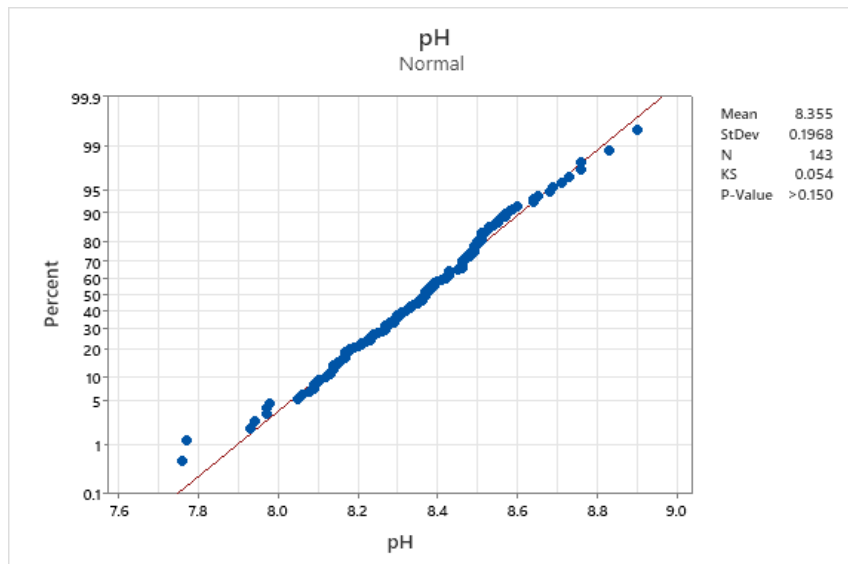


Figura 20. Normalización de valores del pH ajustados con regresión lineal obtenido en Minitab[®] 21.2. Elaborado por autor.

Como se puede apreciar en comparación con la Figura 7 el comportamiento del pH se pudo normalizar de manera adecuada con la regresión lineal, aunque hay algunos datos atípicos la desviación estándar es mínima por lo cual podemos aceptar este comportamiento como normal sin la necesidad de ajustarlo con la transformación de Box-Cox.

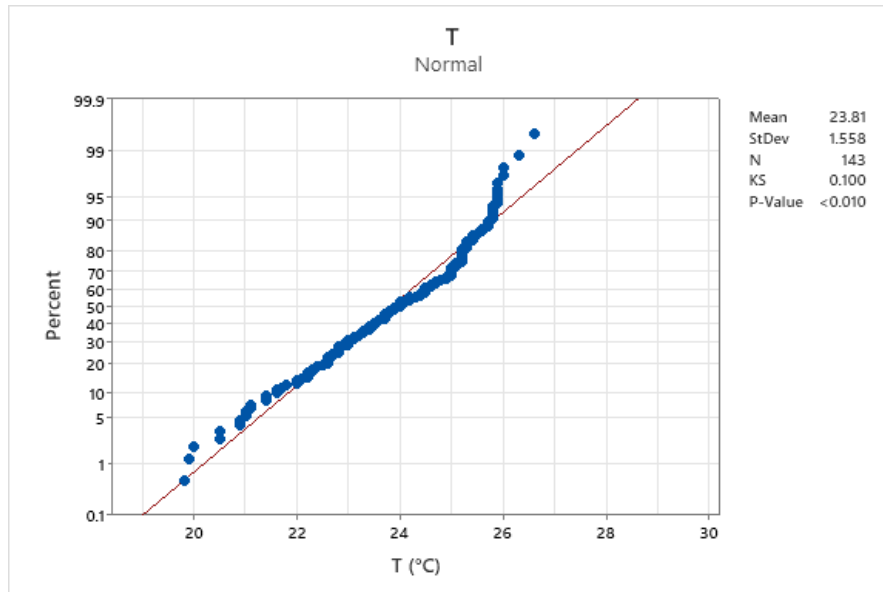


Figura 21. Normalización de valores de temperatura ajustado con promedio obtenido en Minitab® 21.2. Elaborado por autor.

Al comparar estos datos de temperatura con los obtenidos en la Figura 8 podemos concluir que se normalizó el comportamiento de los datos al disminuir considerablemente la desviación estándar y tener una normalización perfectamente positiva.

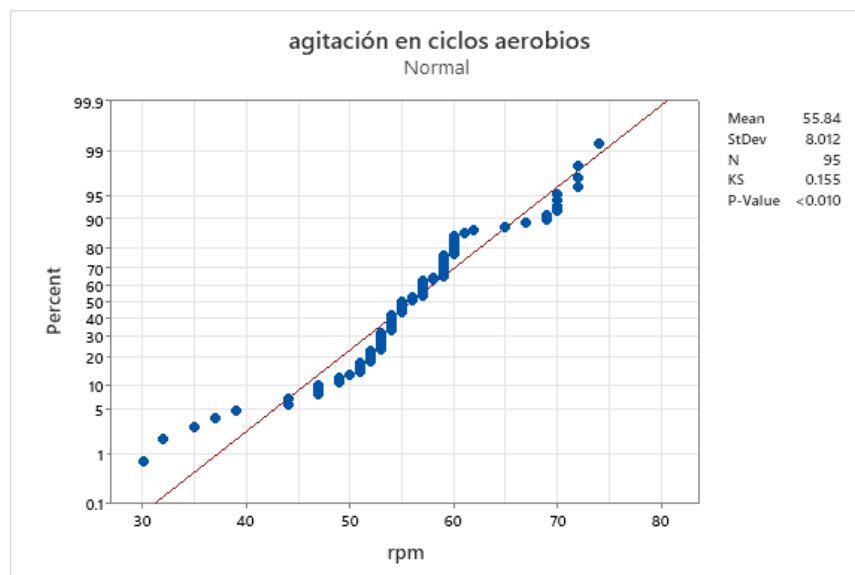


Figura 22. Normalización de valores de agitación ajustados con regresión lineal considerando únicamente los valores correspondientes a ciclos aerobios obtenido en Minitab® 21.2. Elaborado por autor.

Las Figuras 9 y 10 correspondientes a la normalización del OD y la conductividad respectivamente no se ajustaron con modelos de regresión lineal puesto que se contaban con todos los valores necesarios y puesto que los valores medidos. No obstante, se realizó una transformación de Box-Cox para reducir la desviación estándar de los datos y así obtener una mejor normalización de datos.

A diferencia de la Figura 11 donde se estudió la agitación con ambos ciclos, al examinar únicamente los datos de los ciclos aerobios se puede apreciar que se generó un comportamiento normalizado. En esta variable en específico no valía la pena estudiar la normalidad de los valores de los ciclos anaerobios puesto que todos los valores obtenidos al no haber agitación fueron 0. Al tener una desviación estándar ligeramente mayor a las otras Figuras se realizó una transformación de Box-Cox con la finalidad de determinar si se pueden ajustar mejor los datos.

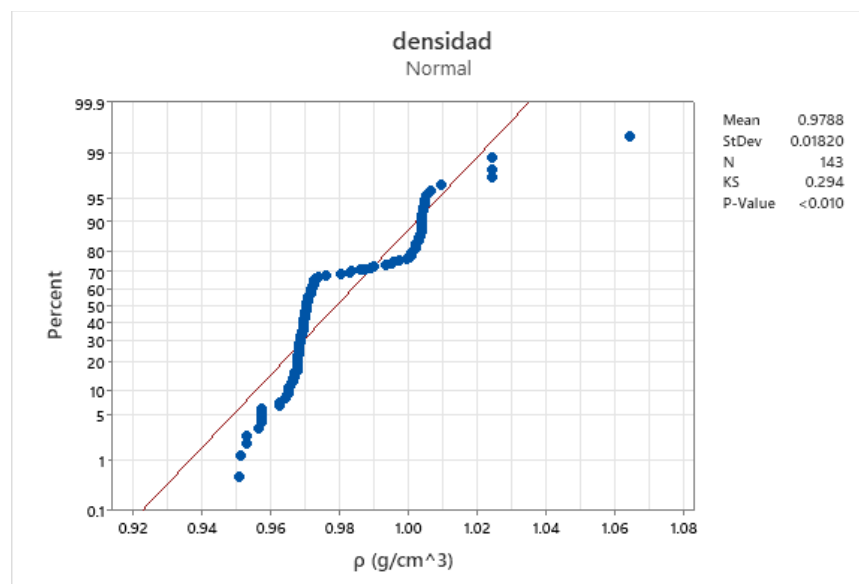


Figura 23. Normalización de valores de densidad ajustados con regresión lineal obtenido en Minitab[®] 21.2. Elaborado por autor.

Al eliminar los datos atípicos sustituyéndolos con valores predictivos del modelo de regresión correspondiente a la densidad, se eliminaron los errores de la Figura 12 obteniendo un comportamiento perfectamente normalizado.

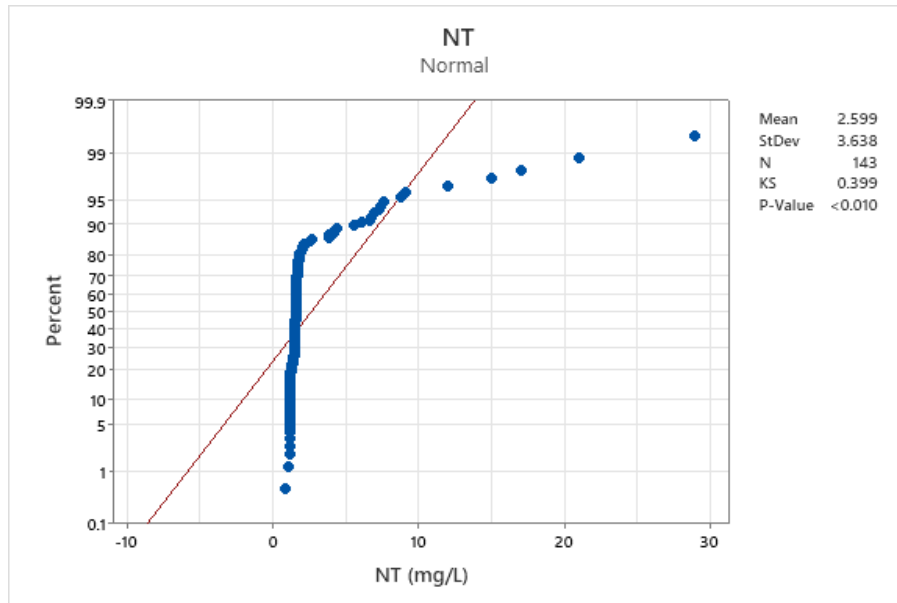


Figura 24. Normalización de valores de NT ajustados con regresión lineal obtenido en Minitab® 21.2. Elaborado por autor.

En el caso de la regresión del NT se pudo obtener una desviación estándar menor al aumentar el muestreo de datos, pero el comportamiento de gráfico no se modificó significativamente. A pesar de esto, se contrastó el comportamiento del gráfico con los ciclos de nitrificación y desnitrificación para demostrar que este comportamiento no es atípico en estudios de tratamiento de aguas residuales.

Comparando con la teoría se apreciaron relaciones que al aumentar el contenido de OD en el reactor batch se obtenían mayores índices de nitrificación, congruente con lo que reporta (Wang et al., 2018). Además, Wang también reporta la relación entre la remoción de NT y PT y el contenido de OD, relación que posteriormente se representará con los modelos de regresión obtenidos.

Como podemos apreciar en la Figura 24 a menores concentraciones de oxígeno se obtiene mejor remoción de nitrógeno por parte de lodos granulares y por lodos granulares con aguas sintéticas tipo industrial.

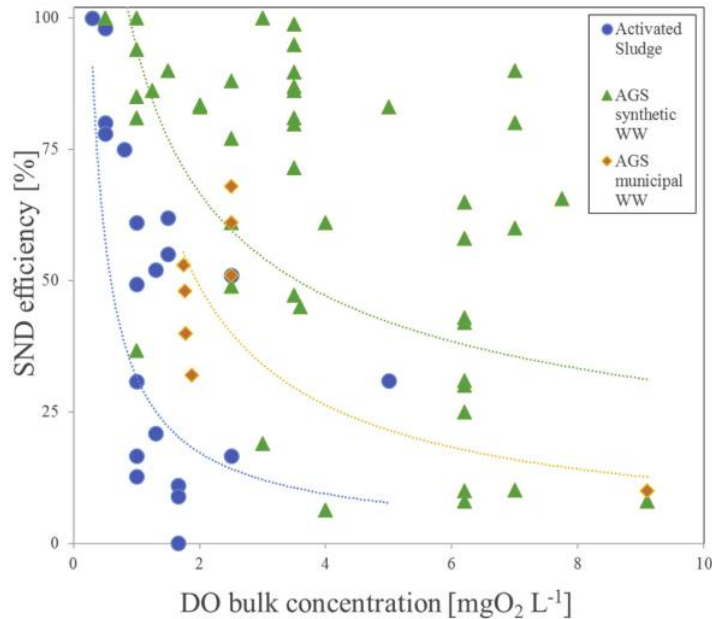
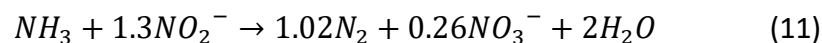
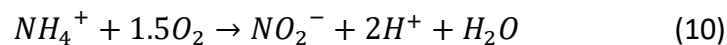


Figura 25. Relación entre la nitrificación- desnitrificación simultánea con el OD. Obtenida de (Layer et al., 2020).

Analizando la Figura 24 con el comportamiento de nuestro modelo de NT podemos concluir que se obtuvieron bajas concentraciones de OD debido a la alta remoción de nitrógeno en los ciclos de nitrificación- desnitrificación de los ciclos, además de la remoción de PT. Estos ciclos se pueden interpretar debido al comportamiento normalizado del OD y PT en contraste con el del NT.

El hecho de que no se presentaran mediciones altas de nitrógeno total fue gracias a los procesos Anammox (*Anaerobic oxidation of ammonia*) en los cuales en procesos de desnitrificación se presentan las siguientes reacciones como lo reporta (Hongwei et al., 2009)



Pero los responsables de estas reacciones son las bacterias amonioxidantes y bacterias anammox, las bacterias anammox requieren un tiempo de adaptación de al menos 18 meses (Manterola et al., 2014); no obstante, al trabajar con aguas residuales de la PTAR

de la Universidad de las Américas Puebla que lleva en operación varios años este tiempo de adaptación se dio por asegurado.

Además, el comportamiento no normalizado que se presenta anteriormente se puede atribuir a aspectos biológicos operacionales como al abultamiento de los lodos activados en consecuencia de la proliferación de microorganismos filamentosos, estos problemas se suelen presentar en reactores piloto debido al espacio reducido para llevar a cabo el proceso de nitrificación-desnitrificación (Cobos, 2009).

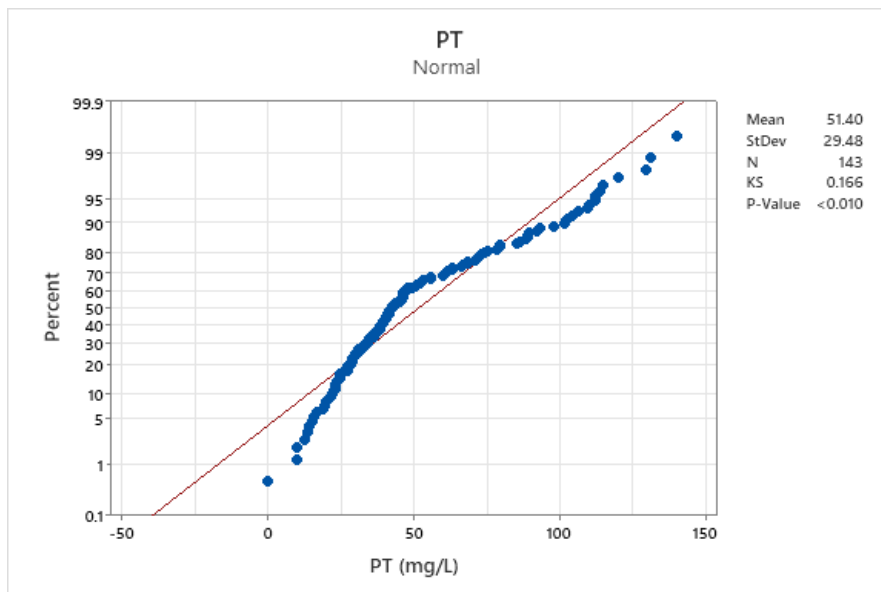


Figura 26. Normalización de valores de PT ajustados con regresión lineal obtenido en Minitab[®] 21.2. Elaborado por autor.

El PT tuvo una mejoría significativa puesto que comparando las Figuras 14 y 25 podemos ver que al aumentar el muestreo se ajustó correctamente el comportamiento de los datos y se obtuvo una normalización fuertemente positiva.

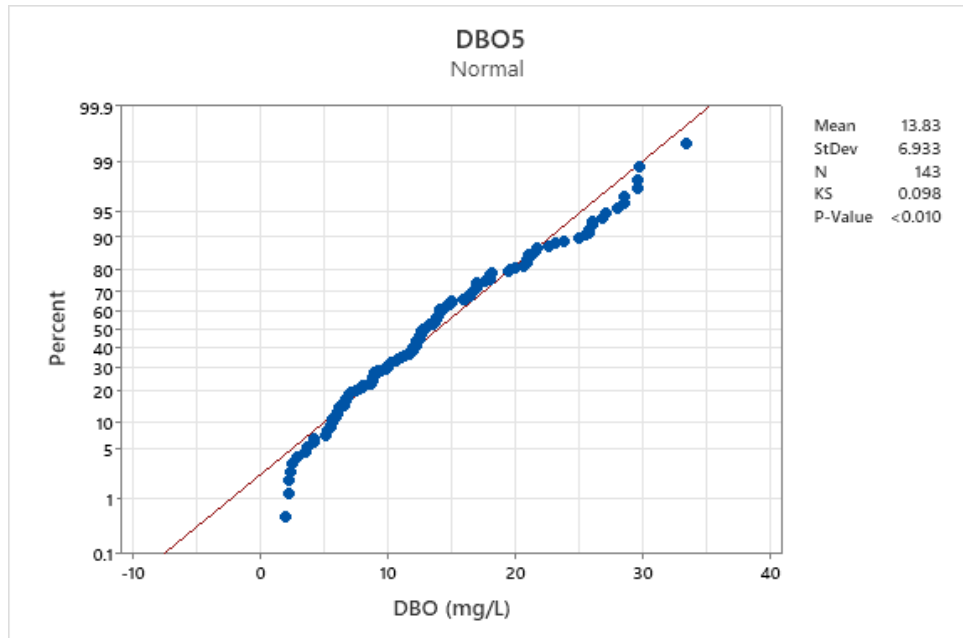


Figura 27. Normalización de valores de DBO₅ ajustados con regresión lineal obtenido en Minitab® 21.2. Elaborado por autor.

Al aumentar el muestreo de datos con regresión lineal se pudo obtener una mejoría en la normalización de datos comparando con la Figura 15. Se podría decir que casi cumple las características de una normalización perfectamente positiva.

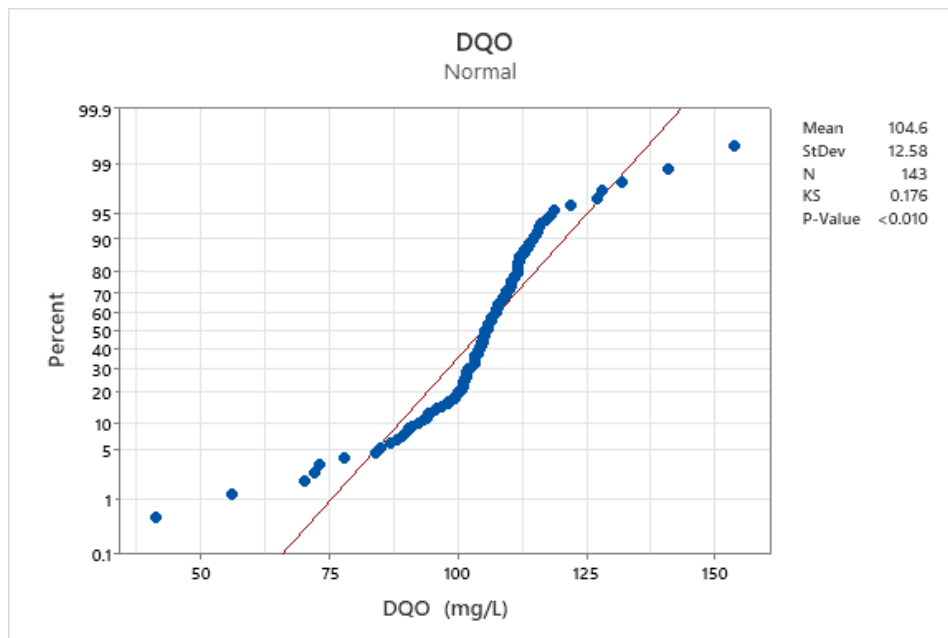


Figura 28. Normalización de valores de DQO ajustados con regresión lineal obtenido en Minitab® 21.2. Elaborado por autor.

En el caso del DQO comparando la Figura 27 con los otros datos ajustados con modelos de regresión lineal parecería que no se ajustó correctamente; no obstante, si comparamos con la Figura 16 la cual tenía una desviación estándar mayor en un 1098.6% podemos concluir que en efecto se normalizaron correctamente los datos.

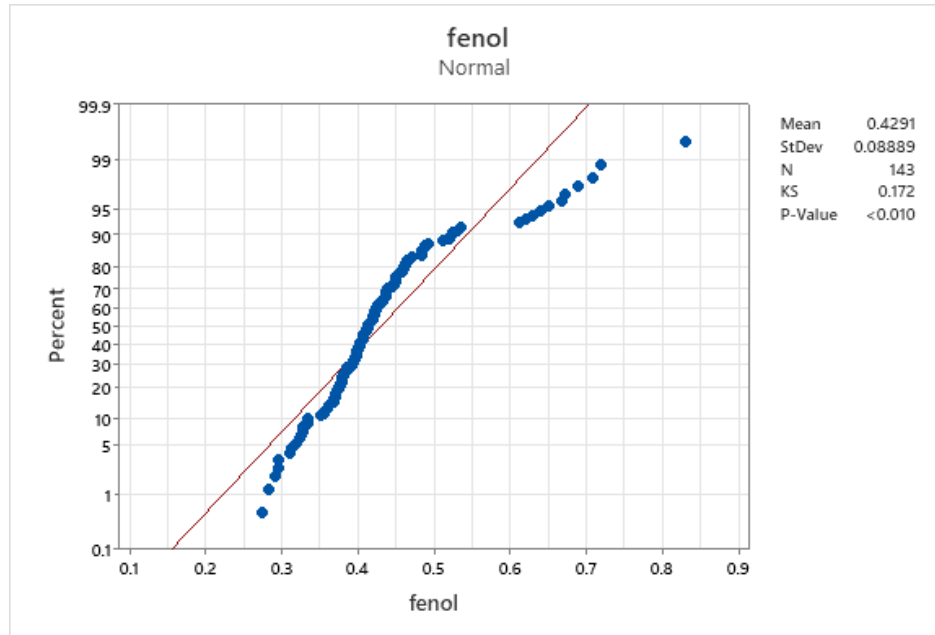


Figura 29. Normalización de valores de fenol ajustados con regresión lineal obtenido en Minitab® 21.2. Elaborado por autor.

Finalmente, con el fenol se obtuvo una ligera mejoría en comparación con la Figura 17, al tener una desviación estándar prácticamente despreciable se puede conservar el gráfico generado sin la necesidad de ajustarlo con la transformación de Box-Cox.

Y dicho comportamiento es tan ideal puesto que se ha encontrado que al trabajar con ciclos aerobio y anaerobios se tiene una relación de remoción en los periodos de adaptación de los biogránulos (Díaz et al., 2010). Respecto a la remoción del fenol, se encontró en los datos obtenidos que los ciclos aerobios disminuyen el contenido de fenol mientras que aumentan la biomasa, esto lo afirma (Valera, 2006).

Como último ajuste a los valores previamente ajustados a los modelos de regresión se les hizo un ajuste con la transformación de Box-Cox, cabe mencionar que, aunque los modelos de regresión hicieron sugerencias sobre posibles λ , no todos los exponentes

fueron de utilidad al ser exponentes 1, o puesto que no dieron resultados favorables a los modelos previamente obtenidos, por lo que solamente se presentarán los ajustes que mejoraron la normalidad de las variables.

En la Figura 29 se muestra el análisis de regresión obtenido a partir de las correcciones realizadas a partir de los modelos de regresión estimados y de las transformaciones de Box-Cox en la totalidad de los datos.

Correlación										
	pH	T (°C)	OD (mg/L)	cond (mS/cm)	agitación (rpm)	densidad (g/cm ³)	fenol	NT (mg/L)	PT (mg/L)	DBO (mg/L)
T (°C)	0.010									
OD (mg/L)	0.038	-0.078								
cond (mS/cm)	-0.075	0.157	-0.376							
agitación (rpm)	-0.084	-0.051	-0.197	-0.208						
densidad (g/cm ³)	0.079	0.116	-0.106	-0.302	0.004					
fenol	0.025	-0.294	-0.542	0.505	-0.028	-0.240				
NT (mg/L)	-0.203	-0.205	0.136	-0.022	-0.360	-0.013	0.102			
PT (mg/L)	0.105	-0.119	-0.819	0.225	0.307	-0.003	0.555	-0.331		
DBO (mg/L)	-0.222	-0.064	-0.659	0.268	0.031	-0.006	0.454	-0.114	0.764	
DQO (mg/L)	0.025	-0.375	-0.126	0.155	0.094	-0.032	0.258	-0.177	0.296	0.233

Figura 30. Análisis de correlación para los datos modificados con regresión lineal y transformación de Box-Cox obtenido en Minitab[®] 21.2. Elaborado por autor.

Antes de mostrar las Figuras obtenidas con transformación de Box-Cox en la Tabla 8 se mostrarán los exponentes λ sugeridos por Minitab para la transformación de los datos. Cabe aclarar que debido a las conclusiones de los gráficos previos se realizaron algunas consideraciones por el autor para la elaboración de los gráficos por lo que no se presentarán todas las transformaciones a pesar de contar con los exponentes de ajuste.

Tabla 8. Exponentes λ óptimos para realizar la transformación de Box-Cox sugeridos por Minitab[®] 21.2. Elaborada por autor.

Variable	λ óptimo
pH	2.0
T (°C)	5.0
OD (mg/L)	-0.5

Conductividad (mS/cm)	-0.1
Agitación (rpm)	2.0
Densidad (g/cm₃)	-5.0
NT (mg/L)	1.0
PT (mg/L)	1.0*
DBO (mg/L)	1.0
DQO (mg/L)	2

*Valores que Minitab no brindó por lo que se asumió su comportamiento para la transformación de Box-Cox

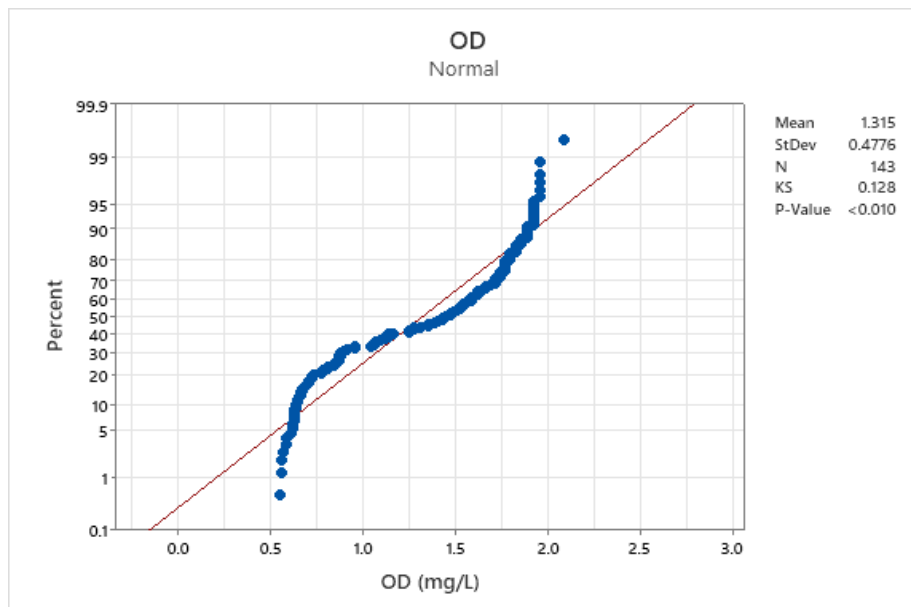


Figura 31. Normalización de valores de OD ajustados con regresión lineal y transformación de Box-Cox obtenido en Minitab[®] 21.2. Elaborado por autor.

En la Figura 30 se muestra que se obtuvo una normalización más ajustada reduciendo la desviación estándar considerablemente, dicho comportamiento es más útil para la obtención de modelos de regresión para el control de plantas.

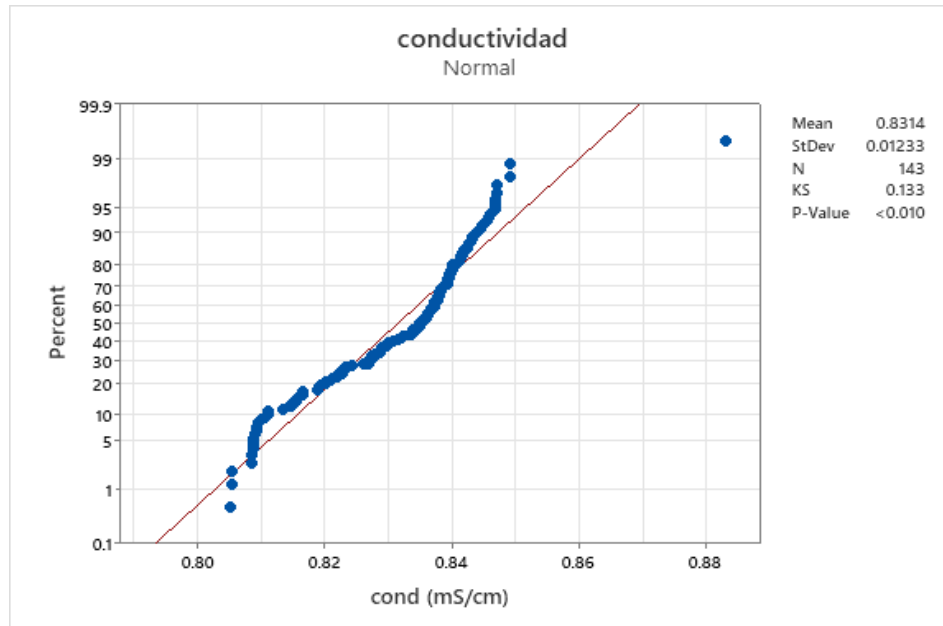


Figura 32. Normalización de valores de conductividad ajustados con regresión lineal y transformación de Box-Cox obtenido en Minitab[®] 21.2. Elaborado por autor.

En el caso de la Figura 31 se redujo la desviación estándar al punto de ser casi despreciable, el comportamiento es fuertemente positivo por lo que ya podemos emplear dicha Figura para la obtención de un modelo de regresión para reportar como antecedente de monitoreo y/o control de plantas.

4.2. PCA

A manera de corroborar las correlaciones previamente elaboradas, se realizó el PCA donde cómo se puede apreciar en las Figuras 32 y 33 se relacionaron por dos componentes todas las variables examinadas en el experimento.

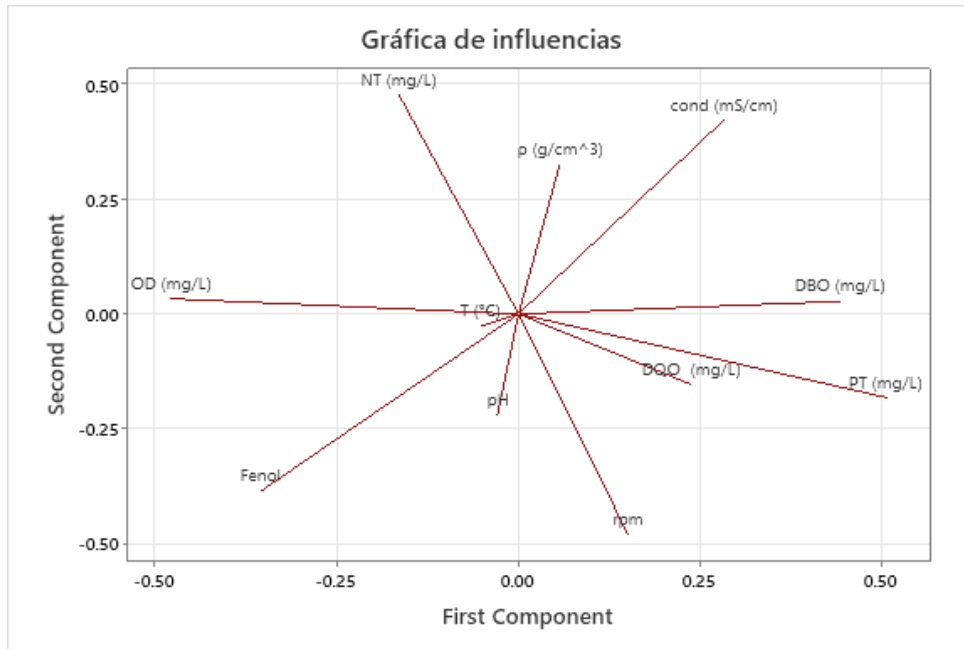


Figura 33. Gráfico de influencias de componentes principales obtenido en Minitab® 21.2. Elaborado por autor.

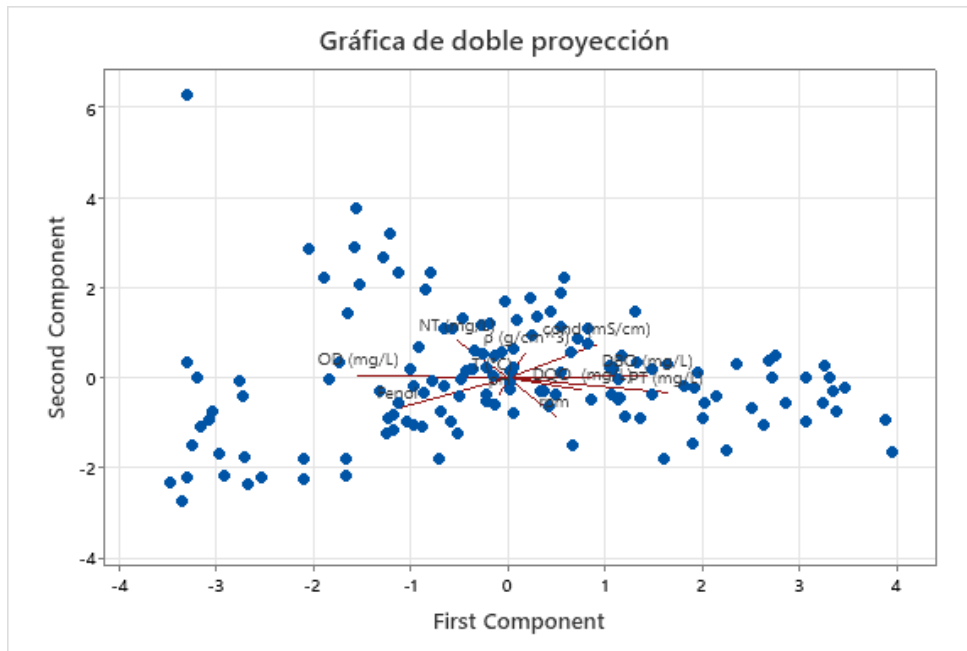


Figura 34. Gráfica de doble proyección de componentes principales obtenido en Minitab® 21.2. Elaborado por autor.

Para la interpretación de los datos se tomó como referencia el gráfico de influencias y se contrastó con el análisis de correlaciones de la Figura 29 a manera de corroborar si los

modelos de regresión obtenidos son confiables o no. En la Tabla 9 se muestra la correlación de las variables en relación con el análisis realizado.

Tabla 9. Comparación de las correlaciones de las variables. Elaborado por autor.

Variable	Variables con correlaciones moderadas o fuertes	
	Análisis de regresión	PCA
T (°C)	pH	pH
OD (mg/L)	pH, -T	pH, T
Conductividad (mS/cm)	-OD	-OD
Agitación (rpm)	-OD	-OD
Densidad (g/cm ₃)	conductividad	conductividad
NT (mg/L)	-pH, -T, -agitación	-pH, -T, -agitación
PT (mg/L)	-OD, conductividad, agitación, -NT	-OD, conductividad, agitación, -NT
DBO (mg/L)	-OD, conductividad, PT	-OD, conductividad, PT
DQO (mg/L)	-T, -NT, PT, DBO	-T, -NT, PT, DBO
Fenol	OD, -conductividad, -densidad, -PT, -DBO, -DQO	OD, -conductividad, -densidad, -PT, -DBO, -DQO

*Los valores positivos corresponden a una correlación positiva mientras que los negativos a una correlación negativa.

Como se puede apreciar en la Tabla 9, los valores de correlación son idénticos en la mayoría de los casos lo que demuestra la confiabilidad de los datos y de los modelos de regresión obtenidos.

4.3. Modelos de regresión definitivos

A continuación, en la Tabla 10 se muestran los modelos sugeridos para el control de las condiciones operativas del reactor.

Tabla 10. Modelos de regresión lineal definitivos para el control de las condiciones operativas del reactor. Elaborada por autor.

Variable	Modelo de regresión
T (°C)	$21.73 + 0.251 * pH$
OD (mg/L)	$1.045 + 0.0056 * pH$
Cond (mS/cm)	$(1.02825 + 0.00650 * OD)^{0.5}$
Agitación (rpm)	$81.3 - 15.2 * pH + 0.62 * T + 6.59 * OD + 9.74 * cond$

ρ (g/cm₃)	$1.0923 - 0.00219 * pH - 0.00193 * T - 0.00628 * OD - 0.00740 * cond + 0.00009 * rpm$
NT (mg/L)	$47.2 - 3.86 * pH - 0.488 * T - 0.042 * OD + 0.419 * cond - 0.062 * rpm - \rho$
PT (mg/L)	$-122.8 + 5.69 * pH - 3.242 * T + 29.855 * OD - 1.16 * cond + 0.0926 * rpm + 188 * \rho - 1.655 * NT$
DBO (mg/L)	$112.5 - 11.84 * pH + 0.065 * T - 0.215 * OD + 0.051 * cond - 0.092 * rpm - 10.9 * \rho - 0.0075 * NT + 0.2261 * PT$
DQO (mg/L)	$306.1 - 1.03 * pH - 2.188 * T - 10.06 * OD - 2.06 * cond - 0.0159 * rpm - 136.6 * \rho - 0.539 * NT + 0.342 * PT + 0.022 * DBO$
Fenol	$0.250 + 0.0235 * pH + 0.01214 * T - 0.0223 * OD + 0.0511 * cond + 0.00026 * rpm - 0.599 * \rho - 0.00307 * NT - 0.000871 * PT + 0.00179 * DBO - 0.00042 * DQO$

Algunos autores han realizado estudios sobre correlaciones en variables fisicoquímicas en tratamiento de aguas coherentes con las correlaciones obtenidas (Cañate & Barrios, n.d.); (Saltos, 2017); no obstante, no se han creado modelos de correlación como los elaborados en este documento que demuestren comportamientos predictivos de remoción de contaminantes.

4.4. Determinación de sólidos

Para visualizar el comportamiento de los sólidos presentes en el reactor a lo largo de los ciclos se crearon Figuras correspondientes a cada medición.



Figura 35. Contenido de sólidos totales presentes en el reactor. Elaborado por autor.

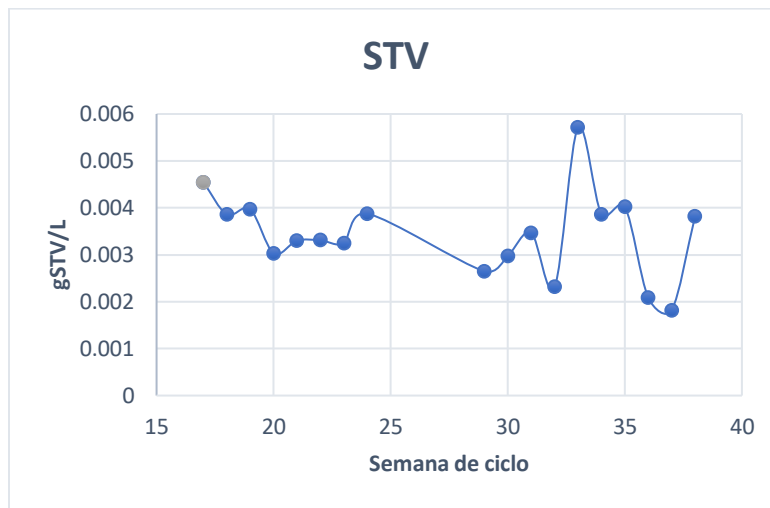


Figura 36. Contenido de sólidos totales volátiles. Elaborado por autor.



Figura 37. Contenido de sólidos suspendidos totales presentes en el reactor. Elaborado por autor.



Figura 38. Contenido de sólidos suspendidos volátiles. Elaborado por autor.

Analizando el comportamiento de las 4 Figuras podemos apreciar que el comportamiento de sólidos fue bastante estable, esto debido a que los niveles de DQO se mantuvieron controlados (Melida Rojas, 2013). El DQO al depender de la carga orgánica como se pudo apreciar en los modelos de correlación se encarga de eliminar algunos sólidos suspendidos y disueltos del agua.

4.5. Estabilización de los biogránulos

Como método para determinar la estabilidad de los gránulos usaremos dos métodos. El primero consiste en comparar nuestras condiciones operativas con otros autores para determinar si nuestras condiciones de operaciones se aproximan sus condiciones de estabilidad. La segunda será mediante la geometría y tamaño de los biogránulos a lo largo de los ciclos.

En la Tabla 11 se muestran las condiciones de operación promedio de varios autores para sus respectivos reactores piloto.

Tabla 11. Condiciones preferidas promedio de operación de reactores biológicos. Adaptada de: (Boelee et al., 2014); (Huang et al., 2015); (Cobos et al., 2011); (Jiang et al., 2016); (Wang et al., 2018); (J.-H. Tay et al., 2004); (Qin et al., 2004); (De Kreuk et al.,

2005); (de Kreuk & van Loosdrecht, 2006); (Yong Li et al., 2008); (Coma et al., 2012); (Dahalan et al., 2015); (Dahalan et al., 2017); (Zou et al., 2019).

Condición operativa	Valor promedio
pH	7.8
T (°C)	22
Volumen (L)	2.7
OD (mg/L)	7
Aireación (L/min)	2.29

Por su parte, en la Tabla 12 se muestra el promedio de los valores de las condiciones preferidas establecidas por el autor.

Tabla 12. Condiciones preferidas promedio de la operación del reactor SBR. Elaborada por el autor.

Condición operativa	Valor promedio
pH	8.1
T (°C)	23.8
Volumen (L)	3
OD (mg/L)	0.97
Aireación (L/min)	1.0

Se puede apreciar que las condiciones de pH fueron bastante cercanas a las condiciones preferidas de otros autores, se optó por emplear un pH más alto debido a que como lo mencionan otros autores como (Schwarzenbeck et al., 2005); (Coma et al., 2012); (Soliman & Eldyasti, 2018); (Yin et al., 2019), al tener niveles de pH altos se favorece la remoción de nitrógeno y la estabilidad del gránulo debido a que estas condiciones favorecen el crecimiento de microorganismos encargados de la remoción de dichos contaminantes.

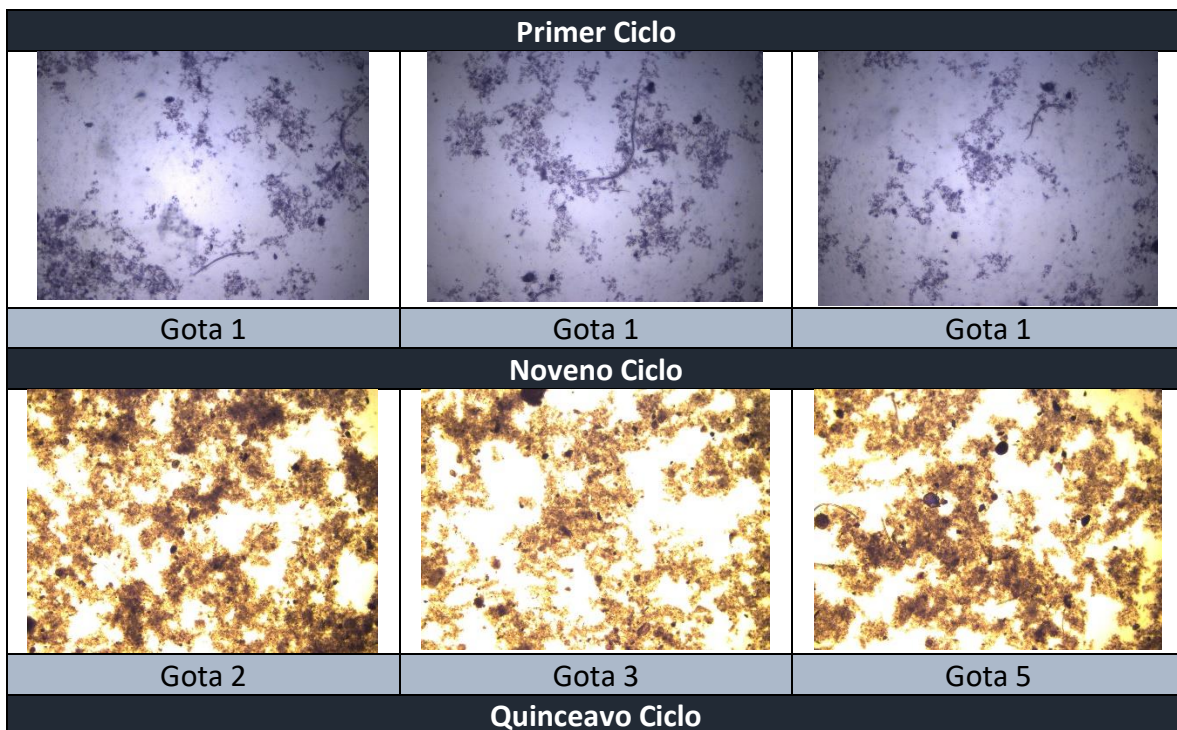
En términos de temperatura muchos autores trabajan con temperaturas menores a 20° C; no obstante, se realizó el ajuste de temperatura en un rango de $\pm 25^{\circ}\text{C}$ debido que (J.-H. Tay et al., 2004); (Gao et al., 2011); (Yongmei Li et al., 2014); (Meng et al., 2020); (Yin et al., 2019); (Zou et al., 2019) demostraron condiciones de estabilidad y remoción de DBO, DQO, NT y PT más eficientes, a su vez (Soliman & Eldyasti, 2018) encontró una relación de

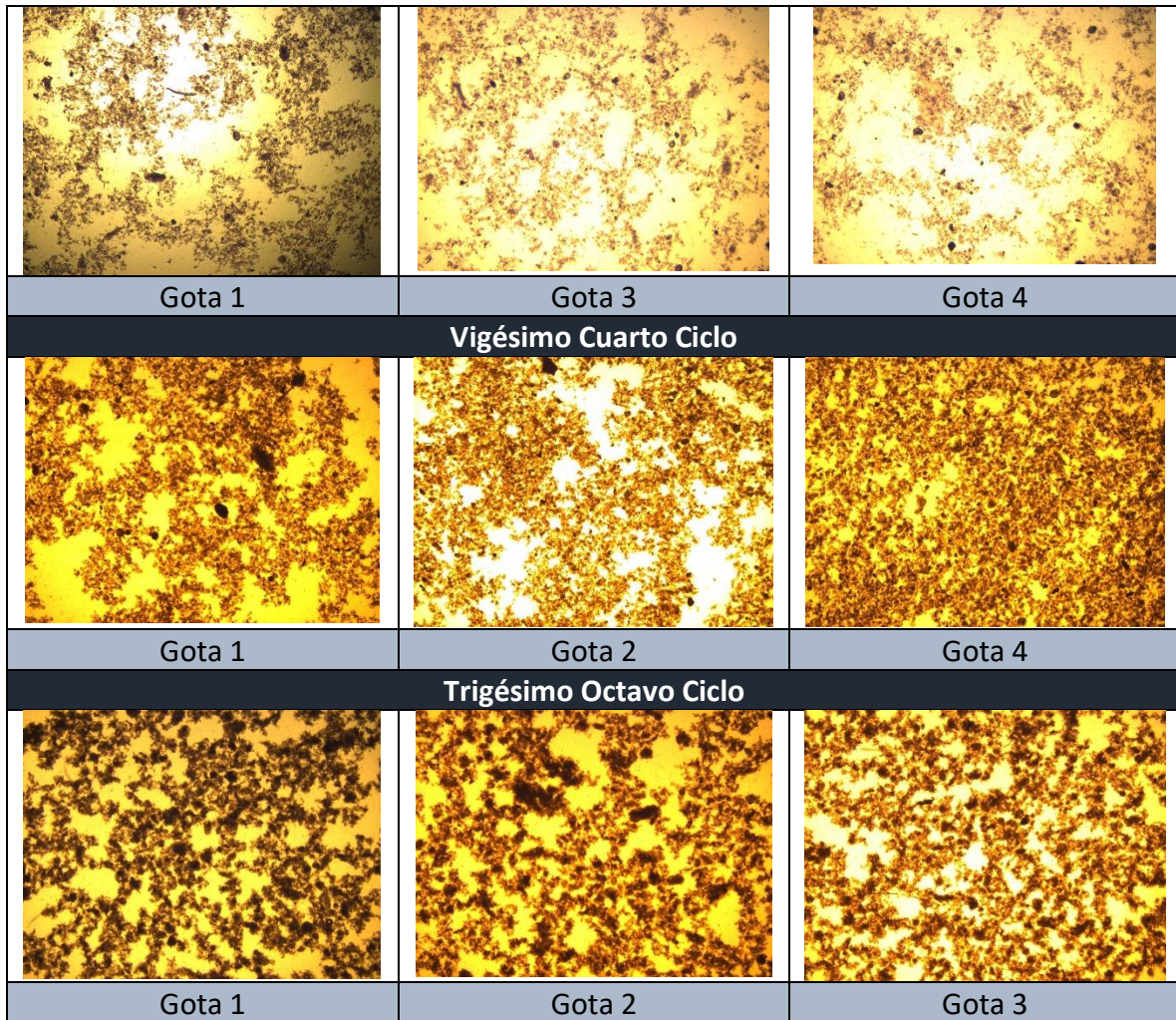
mayor eficiencia de remoción de amonía como parte de los procesos de nitrificación-desnitrificación a mayor temperatura.

Las condiciones elegidas para administrar aire no fueron las más óptimas por problemas con el reactor en cuestión ; no obstante, (D. Li et al., 2016); (Zou et al., 2018) ; (Yin et al., 2019) obtuvieron buenas tasas de remoción de contaminantes con una estabilidad de gránulo aceptable a un flujo de aire idéntico al elegido por el autor. Asimismo (D. Li et al., 2016) procuró un OD similar al del autor lo que demuestra la esperada eficiencia de estabilización y remoción de contaminantes en el experimento.

En la Tabla 13 se muestra la estabilidad de los biogránulos a lo largo de los ciclos, para tener un panorama mejor de los biogránulos se mostrarán fotos por triplicado por cada ciclo.

Tabla 13. Crecimiento y estabilidad visual de los gránulos. Elaborada por autor.





Como se puede apreciar en el comportamiento de los biogránulos al iniciar la toma de fotografías se puede apreciar una masa floculenta disgregada lo que indica una mala estabilidad de los biogránulos. No obstante, al pasar las semanas la masa y tamaño de los biogránulos se empieza a hacer notablemente más grande y estable llegando a tomar formas casi esféricas lo que demuestra la buena estabilidad de los biogránulos.

En el último ciclo se aprecia una masa granular algo estresada al límite de estabilidad lo que se puede apreciar en la capa límite de cada gránulo, lo que demuestra que, a pesar de saturar el reactor con concentraciones agresivas de fenol, los lodos granulares son capaces de soportar y remover dicho contaminante; no obstante, se cree que de haber aumento más la concentración de fenol se habría perdido la estabilidad de los biogránulos.

4.6. Remoción de fenol

Con los datos muestreados se obtuvieron las absorbancias correspondientes a las concentraciones de fenol añadidas en la Tabla 5. La curva de calibración correspondiente a estos datos se muestra en la Figura 38.

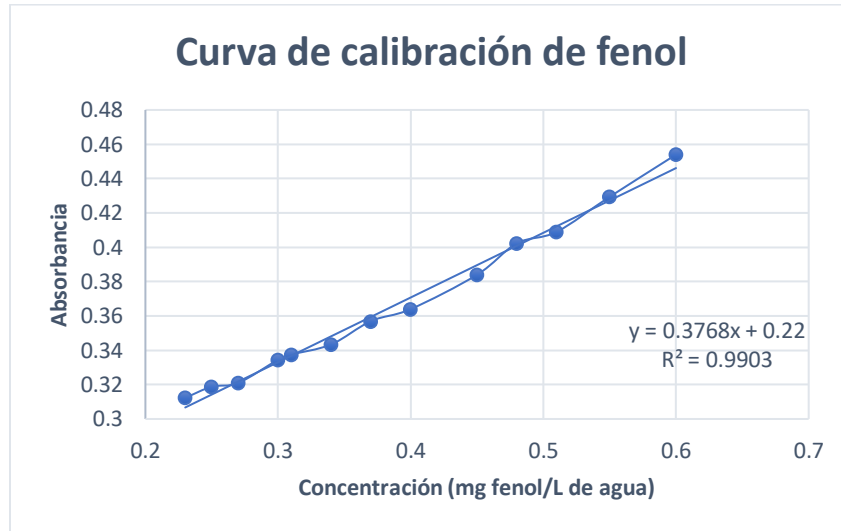


Figura 39. Curva de calibración del fenol. Elaborada por autor.

Al estudiar la relación de la curva de calibración con las absorbancias medidas a lo largo de los ciclos se pudo identificar una remoción de fenol increíblemente alta teniendo una remoción de 16 mg/L cada día en ciclos aerobios. Algunas interferencias se presentaron en los ciclos donde no se realizó alimentación ya que las mediciones se empezaron a entorpecer por otros compuestos; no obstante, se pudo identificar en los ciclos donde se realizó una alimentación constante la tasa de remoción.

5. Conclusiones

Se pudieron establecer modelos de correlación lineal que describen el comportamiento de las variables fisicoquímicas elementales en la operación de un reactor biológico para tratamiento de aguas residuales. Dichas variables tienen fuertes correlaciones positivas que son congruentes con la estabilidad de los biogránulos y el consorcio microbiano presente.

Indirectamente dichos modelos nos ayudan a describir la velocidad de remoción de contaminantes a partir de los parámetros fisicoquímicos lo que es bastante útil para

obtener mayores eficiencias de algún contaminante en particular ya sea a escala laboratorio o industrial.

A pesar de operar el reactor en condiciones estresantes en términos de OD y fenol se alcanzó una estabilidad adecuada en el decimoséptimo ciclo al obtener una geometría esférica en los gránulos con diámetros que oscilaban entre 750 y 1250 μm , donde se presentó una resistencia mecánica favorable al obtener valores de densidad aparente bastante constantes con excelentes tasas de remoción del fenol. Por lo que se puede considerar este estudio como base para establecer límites extremos permisibles para operar reactores biológicos en condiciones estables.

En términos de fenol a pesar de estresar el reactor al doble del máximo permitido por las Normas Mexicanas, los biogránulos demostraron excelentes tasas de remoción del mismo, obteniendo una eliminación de 16 mg/L en las etapas avanzadas de estabilización del reactor, esto debido al alto consorcio microbiano presente en el reactor que contó con un amplio tiempo de adaptación a condiciones toxicológicas.

Debido a la geometría cilíndrica del reactor y su volumen tan reducido, para los tiempos prolongados de operación se presentaron problemas operativos con los lodos por abultamiento; no obstante, se pudo solucionar al realizar un lavado de lodos.

Este abultamiento a su vez influyó en el comportamiento de los sólidos, al controlar los parámetros de DQO se logró una disminución de sólidos semanal; no obstante, el consorcio microbiano que generaba mayor biomasa con los nutrientes fue la encargada de estar constantemente regenerando los sólidos del reactor.

Sobre la remoción de NT se tuvo una remoción eficiente ya que se obtuvieron niveles de remoción de 96.11%, todo gracias a los procesos favorables para las bacterias en las que pudieron realizar sus ciclos de nitrificación-desnitrificación de manera adecuada eliminando compuestos nitrogenados convirtiéndolos en agua.

Se pudo apreciar que en las condiciones donde hubo mayor cantidad de OD en el reactor se alcanzaban remociones de PT mayores al 84.6% mientras que a concentraciones

muy bajas la remoción oscilaba entre 3 a 54%, lo que indica la fuerte relación entre estas dos variables, relación que se puede apreciar en el modelo de regresión.

En términos de remoción de DQO se obtuvieron porcentajes de remoción bajos debido a que no hubo una concentración favorable de OD, la remoción más alta fue de 25.4%; no obstante, a pesar de tener una remoción baja al ser estable se pudieron tener condiciones estables en relación a los sólidos como se menciona anteriormente.

5.1. Recomendaciones

Se recomienda que en futuros estudios para obtener una estabilidad en menor tiempo se trabaje con flujos de aireación mayores para contar con un mayor nivel de OD y a su vez con mayor consorcio microbiano que se verá reflejado como una biomasa de mayor volumen y mejor retención de contaminantes.

El estrés de los biogránulos se inició en una etapa algo avanzada lo cual no afecta la estabilidad de los gránulos pero no permitió estresar de una manera más homogénea y prolongada los biogránulos. De acuerdo con la literatura consultada, para las condiciones de operación empleadas a partir de la semana 9 se podría iniciar el proceso de estresamiento de los biogránulos con la adición de fenol hasta llegar al límite máximo.

Vale la pena realizar un estudio más especializado sobre las especies microbianas presentes en las aguas residuales a estudiar puesto que se puede hallar información útil sobre las características biológicas de los microorganismos encargados de la remoción de dichos contaminantes que nos puedan permitir establecer parámetros de operación aún más ajustados en relación a dichos microorganismos, como tal los autores mencionados en la literatura de este documento mencionan que no es recomendable crear modelos de correlación en procesos biológicos por lo que posiblemente no se puedan alcanzar los objetivos de este documento contemplando seres vivos.

No se recomienda trabajar en reactores de volumen reducido a tiempos de operación largos. En el caso del autor hasta la semana 20 de operación el reactor tuvo un comportamiento de LG estables, posteriormente debido a la gran cantidad de biomasa y de

microorganismos se empezó a crear una red filamentosa que impidió una adecuada granulación durante 3 semanas.

6. Referencias

- Abril Saltos, R. V., Rodríguez Badillo, L. M., Sucoshañay Villalba, D. J., & Bucaram Visuma, E. M. (2017). Caracterización preliminar de calidad de aguas en subcuenca media del río Puyo. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 38(2), 59-72.
- Alquicira, J. (2017). *Análisis de correlación*. Conogasi. <https://conogasi.org/articulos/analisis-de-correlacion-2/>
- Amat, R. (2017). Análisis de Componentes Principales: (Principal Component Analysis, PCA) y t-SNE. https://www.cienciadedatos.net/documentos/35_principal_component_analysis
- Análisis de correlación lineal: Los procedimientos correlaciones bivariadas y correlaciones parciales. (s.f). <https://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/GuiaSPSS/17corlin.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (2021). Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/759492/Inventario_2021.pdf
- Comisión Nacional del Agua. (2020). Diagnóstico de la Calidad del Agua del Río Atoyac y sus Afluentes. https://files.conagua.gob.mx/lca20/Contenido/Documentos/2._RIO_ATOYAC-_Diagn_stico_2012-2019.pdf
- Dagnino, J. (2014). Regresión lineal. *Revista Chilena de Anestesia*. <https://revistachilenadeanestesia.cl/regresion-lineal/>
- DATAtab Team (2023). DATAtab: Online Statistics Calculator. DATAtab e.U. Graz, Austria. URL <https://datatab.es>
- De la Guía, AV. (s.f). *La transformación Box-Cox*. Universidad Complutense de Madrid. Tesis. https://eprints.ucm.es/id/eprint/47245/1/TFG16-17_ADE_de%20la%20Guia.pdf
- Hyde S. (1999). Likelihood based inference on the Box-Cox family of transformations: SAS and MATLAB programs.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2018). *El desafío de los contaminantes*

emergentes. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/imta/articulos/el-desafio-de-los-contaminantes-emergentes#:~:text=de%20la%20misma.-,Entre%20los%20contaminantes%20emergentes%20presentes%20en%20el%20agua%20cabe%20destacar,encuentran%20cantidades%20altas%20de%20n>

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2021). *Una mirada a la calidad del agua*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/imta/articulos/una-mirada-a-la-calidad-del-agua?idiom=es>

Jiménez, B. (n.d). Tratamiento Primario Avanzado. <http://www2.iingen.unam.mx/es-mx/difusion/IIAMICA2015/Series/Tratamiento%20primario%20avanzado.pdf>

MathWorks. (s.f). ¿Qué es la regresión lineal? <https://la.mathworks.com/discovery/linear-regression.html>

Minitab[®] 20. (2021). *Especificar una transformación de Box-Cox para identificación de distribución individual*. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/20/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/quality-tools/how-to/individual-distribution-identification/perform-the-analysis/specify-a-box-cox-transformation/>

Minitab[®] 21. (2023). *¿Qué es ANOVA?* <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/supporting-topics/basics/what-is-anova/>

Morales, P. (2011). *El Coeficiente de Correlación*. Universidad Rafael Landívar. https://ice.unizar.es/sites/ice.unizar.es/files/users/leteo/materiales/01._documento_1_correlaciones.pdf

Muda, K., Aris, A., Salim, M. R., Ibrahim, Z., Yahya, A., Van Loosdrecht, M. C. M., Ahmad, A., & Nawahwi, M. Z. (2010). Development of granular sludge for textile wastewater treatment. *Water Research*, 44(15), 4341–4350. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.05.023>

Nikon Instruments. (s.f). *Eclipse E200 Microscopio educativo*. https://www.microscope.healthcare.nikon.com/es_AMS/products/upright-microscopes/eclipse-e200

Norma Oficial Mexicana NMX-AA-050-SCFI-2001. (2001). Secretaría de Gobernación.
<http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa050-01.pdf>

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021. (2021). Secretaría de Gobernación.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0

Rolim, S. (1999). Lagunas aireadas mecánicamente. Organización Panamérica de la Salud.
<http://www.ingenieroambiental.com/4014/lagunameca.pdf>

Ruíz, L. (2019). *Coefficiente de correlación de Pearson: qué es y cómo se usa*. Psicología y mente. <https://psicologiaymente.com/miscelanea/coeficiente-correlacion-pearson>

Sánchez, C. (2022). Desarrollo de biogranulación simbiótica microalgas/bacterias para la remoción de contaminantes prioritarios en agua residual textil. Universidad de las Américas Puebla.

Statgraphics. (2006). *Transformaciones de Box-Cox*. <https://www.statgraphics.net/wp-content/uploads/2011/12/tutoriales/Transformaciones%20de%20Box-Cox.pdf>

Torres Zapata, M. Á., & Padilla Castro, L. A. (1999). Evaluación experimental de la eliminación de formadores de trihalometanos de las aguas residuales de Carapongo por carbón activado.

Valdivielso, A. (n.d). ¿Qué es un sistema de lodos activados?
<https://www.iagua.es/respuestas/que-es-sistema-lodos-activados#:~:text=El%20sistema%20de%20lodos%20activados%20es%20un%20proceso%20de%20tratamiento,como%20nuevas%20bacterias%2C%20di%3%B3xido%20de>
e

Zou, K. H., Tuncali, K., & Silverman, S. G. (2003). Correlation and simple linear regression. *Radiology*, 277(3), 617--628. https://doi.org/10.1007/978-3-319-89993-0_6

Aerobios, L. O. S. O., Trasladañ, M., Energ, L. A., Qu, D. E. L. O. S. E., En, M., Mol, L. A. S., Alimento, C. D. E. L., Energ, L. A., Enlace, D. E. L., Ros, L., Ip, Y., Hill, M., Reserved, A.

- R., & Policy, P. (n.d.). *CAPÍTULO 9: Metabolismo aerobio I: ciclo del ácido cítrico*. 60, 1–35.
- Alicia, M., Gallegos, G., Alicia, M., & Gallegos, G. (2020). *UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS-PUEBLA Escuela de Ingeniería Procesos fisicoquímicos y biológicos para el tratamiento de aguas residuales UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS-PUEBLA Escuela de Ingeniería*.
- Boelee, N. C., Temmink, H., Janssen, M., Buisman, C. J. N., & Wijffels, R. H. (2014). Balancing the organic load and light supply in symbiotic microalgal-bacterial biofilm reactors treating synthetic municipal wastewater. *Ecological Engineering*, 64, 213–221. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.035>
- Bonilla, M., Silva, S., Toxtle, J., & Santamaría, J. (2014). Concentraciones de metales pesados totales en aguas residuales vertidas a ecosistemas acuáticos por dos parques industriales en Puebla, México. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*, 2011.
- Cañate, Y. C., & Barrios, J. S. (n.d.). *Nivel de Contaminación de los Arroyos Cañafístula y Pica Pica en el Municipio de Polonuevo Atlántico*. 181–183.
- Caviedes Rubio, D. I., Muñoz Calderón, R. A., Perdomo Gualtero, A., Rodríguez Acosta, D., & Sandoval Rojas, I. J. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Ingeniería y Región*, 13(1), 73. <https://doi.org/10.25054/22161325.710>
- CENTA. (2009). Tanque Imhoff. *Universidad Autónoma de México*, 46–65. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/19117/capitulo4.pdf>
- Chen, C., Ming, J., Yoza, B. A., Liang, J., Li, Q. X., Guo, H., Liu, Z., Deng, J., & Wang, Q. (2019). Characterization of aerobic granular sludge used for the treatment of petroleum wastewater. *Bioresource Technology*, 271(September 2018), 353–359. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.132>
- Chen, Y., Jiang, W., Liang, D. T., & Tay, J. H. (2008). Aerobic granulation under the combined hydraulic and loading selection pressures. *Bioresource Technology*, 99(16),

7444–7449. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.028>

Claudio, S., & Manuel, S. (2010). Utilización de quitosana para la remoción de arsénico (As) del agua. *Superficies y Vacío*, 23, 136–139.

Cobos, Y. L. (2009). *Eliminación de nitrógeno amoniacal y nitratos usando gránulos aerobios* (p. 127).

Cobos, Y. L., Gonzáles, S., & Gonzáles, O. (2011). Gránulos aerobios para la eliminación de nitrógeno amoniacal y nitratos en aguas residuales. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica*, 4(1), 1–11.

Coma, M., Verawaty, M., Pijuan, M., Yuan, Z., & Bond, P. L. (2012). Enhancing aerobic granulation for biological nutrient removal from domestic wastewater. *Bioresource Technology*, 103(1), 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.014>

CONAGUA. (2019). Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente. 28. In *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. www.conagua.gob.mx

Corredor Vargas, A. M., Corrales, L. C., Antolinez Romero, D. M., & Bohórquez Macías, J. A. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 13(1794–2470), 55–81.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-24702015000200007

Covarrubias, S. A., & Peña Cabriales, J. J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 33, 7–21.
<https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01>

Cruz Carrillo, M. de J. (2019). *Evaluación y Tratamiento de Contaminantes Emergentes (Fármacos Ácidos) en aguas residuales mediante un Reactor SBRLF acoplado a Fotocatálisis*. 1–238.

- Cui, F., Park, S., & Kim, M. (n.d.). *Author 's personal copy Bioresource Technology Characteristics of aerobic granulation at mesophilic temperatures in wastewater treatment.*
- Dahalan, F. A., Abdullah, N., Yuzir, A., Olsson, G., Salmiati, Hamdzah, M., Din, M. F. M., Ahmad, S. A., Khalil, K. A., Anuar, A. N., Noor, Z. Z., & Ujang, Z. (2015). A proposed aerobic granules size development scheme for aerobic granulation process. *Bioresource Technology*, *181*(January), 291–296. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.062>
- Dahalan, F. A., Ibrahim, N., & Yusuf, S. Y. (2017). Development of Aerobic Granules Using Sequencing Batch Reactor (Sbr): a Proposed Workflow. *E-Academia*, *6*(1), 142–152. <http://journale-academiauitmt.edu.my/>
- De Kreuk, M. K., Heijnen, J. J., & Van Loosdrecht, M. C. M. (2005). Simultaneous COD, nitrogen, and phosphate removal by aerobic granular sludge. *Biotechnology and Bioengineering*, *90*(6), 761–769. <https://doi.org/10.1002/bit.20470>
- de Kreuk, M. K., & van Loosdrecht, M. C. (2006). Formation of Aerobic Granules with Domestic Sewage. *Journal of Environmental Engineering*, *132*(6), 694–697. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(2006\)132:6\(694\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(2006)132:6(694))
- Delgadillo, O., Camacho, A., Andrade, M., & Pérez, L. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales - Universidad Mayor de San Simón.* <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>
- Deloya Martínez, A. (2001). Biodiscos: una alternativa de tratamiento biológico para aguas residuales cuando no se dispone de grandes extensiones de terreno. *Tecnología En Marcha*, *13*(4), 57–59.
- Díaz, A., Ferrer, P., Mazzolo, E., Ferrer, M., Rincón, N., & Colina, G. (2010). *Biological nitrogen , COD and phenol removal in a sequencing batch reactor in synthetic chemical effluent Remoción simultánea de nitrógeno , DQO y fenol en un efluente sintético utilizando reactores SBR.* *33*(3), 205–212.

- Dionisi, D. (2017). Biological Wastewater Treatment Processes. In *Biological Wastewater Treatment Processes*. <https://doi.org/10.1201/9781315163345-2>
- E. & Vázquez, A. V. (2003). *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas potable*. 341.
- Efrain, G., & Granda, A. (2017). *Escuela politécnica nacional*.
- Ferrera-Cerrato, R., Rojas-Avelizapa, N. G., Poggi-Varaldo, H. M., Alarcón, A., & Cañizares-Villanueva, R. O. (2006). Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, *48*(2), 179–187.
- Franca, R. D. G., Pinheiro, H. M., van Loosdrecht, M. C. M., & Lourenço, N. D. (2018). Stability of aerobic granules during long-term bioreactor operation. *Biotechnology Advances*, *36*(1), 228–246. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.11.005>
- Gao, D., Liu, L., liang, H., & Wu, W. M. (2011). Comparison of four enhancement strategies for aerobic granulation in sequencing batch reactors. *Journal of Hazardous Materials*, *186*(1), 320–327. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.11.006>
- Germán, B., Gloria, M., & Moreno-Andrade, I. (2009). Eliminación biológica de altas concentraciones de fenol presente en aguas residuales. *Aidis*, *1*, 1–7.
- Hongwei, Z., Xuehua, Z., & Bao'an, Z. (2009). System Dynamics Approach to Urban Water Demand Forecasting. *Transactions of Tianjin University*, *15*(1), 70–74. <https://doi.org/10.1007/s12209>
- Huang, W., Li, B., Zhang, C., Zhang, Z., Lei, Z., Lu, B., & Zhou, B. (2015). Effect of algae growth on aerobic granulation and nutrients removal from synthetic wastewater by using sequencing batch reactors. *Bioresource Technology*, *179*(March), 187–192. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.024>
- Huaranga, M. C. (2011). Tratamiento del agua residual. *Revista de Ingenieria Del Agua*, *3*(1), 203–223.

- Jiang, Y., Shang, Y., Wang, H., & Yang, K. (2016). Rapid formation and pollutant removal ability of aerobic granules in a sequencing batch airlift reactor at low temperature. *Environmental Technology (United Kingdom)*, *37*(23), 3078–3085.
<https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1176075>
- Kent, T. R., Bott, C. B., & Wang, Z. W. (2018). State of the art of aerobic granulation in continuous flow bioreactors. *Biotechnology Advances*, *36*(4), 1139–1166.
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.03.015>
- Kiran Kumar Reddy, G., Sarvajith, M., Nancharaiah, Y. V., & Venugopalan, V. P. (2017). 2,4-Dinitrotoluene removal in aerobic granular biomass sequencing batch reactors. *International Biodeterioration and Biodegradation*, *119*, 56–65.
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.10.045>
- Layer, M., Villodres, M. G., Hernandez, A., Reynaert, E., Morgenroth, E., & Derlon, N. (2020). Limited simultaneous nitrification-denitrification (SND) in aerobic granular sludge systems treating municipal wastewater: Mechanisms and practical implications. *Water Research X*, *7*, 100048.
<https://doi.org/10.1016/j.wroa.2020.100048>
- Li, D., Lv, Y., Zeng, H., & Zhang, J. (2016). Enhanced biological phosphorus removal using granules in continuous-flow reactor. *Chemical Engineering Journal*, *298*(March), 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.152>
- Li, Yong, Liu, Y., & Xu, H. (2008). Is sludge retention time a decisive factor for aerobic granulation in SBR? *Bioresource Technology*, *99*(16), 7672–7677.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.01.073>
- Li, Yongmei, Zou, J., Zhang, L., & Sun, J. (2014). Aerobic granular sludge for simultaneous accumulation of mineral phosphorus and removal of nitrogen via nitrite in wastewater. *Bioresource Technology*, *154*, 178–184.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.033>
- Lima, V. C., Prata, T. S., Landa, G., Yannuzzi, L. A., & Rosen, R. B. (2010). Intravitreal

- triamcinolone and bevacizumab therapy for combined papillophlebitis and central retinal artery occlusion. *Retinal Cases and Brief Reports*, 4(2), 125–128.
<https://doi.org/10.1097/ICB.0b013e3181ad3957>
- Liu, X., Sun, S., Ma, B., Zhang, C., Wan, C., & Lee, D. J. (2016). Understanding of aerobic granulation enhanced by starvation in the perspective of quorum sensing. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(8), 3747–3755.
<https://doi.org/10.1007/s00253-015-7246-1>
- Liu, Y. Q., Liu, Y., & Tay, J. H. (2004). The effects of extracellular polymeric substances on the formation and stability of biogranules. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 65(2), 143–148. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1657-8>
- Liu, Y. Q., & Tay, J. H. (2008). Influence of starvation time on formation and stability of aerobic granules in sequencing batch reactors. *Bioresource Technology*, 99(5), 980–985. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.03.011>
- Manterola, G., Otegi, L., Albizuri, J., & Zalakain, G. (2014). *Procesos avanzados de eliminación de nitrógeno : soluciones ANITA™ MOX de AnoxKaldnes. 1*, 1–13.
<http://www.veoliawatertechnologies.es/news/articulos/38121.htm>
- Maszenan, A. M., Liu, Y., & Ng, W. J. (2011). Bioremediation of wastewaters with recalcitrant organic compounds and metals by aerobic granules. *Biotechnology Advances*, 29(1), 111–123. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.09.004>
- Melida Rojas, A. O. (2013). *Capítulo 7 Tratamiento Biológico Del Agua Residual 7.1 Primer Período De Estudio. 7*.
<https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/5909/12Mjkm12de18.pdf?sequence=12>
- Meng, F., Huang, W., Liu, D., Zhao, Y., Huang, W., Lei, Z., & Zhang, Z. (2020). Application of aerobic granules-continuous flow reactor for saline wastewater treatment: Granular stability, lipid production and symbiotic relationship between bacteria and algae. *Bioresource Technology*, 295(September 2019), 122291.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122291>

Muñoz, R., & Guieysse, B. (2006). Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review. *Water Research*, 40(15), 2799–2815.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.06.011>

Musteret, C. P., & Teodosiu, C. (2007). Removal of persistent organic pollutants from textile wastewater by membrane processes. *Environmental Engineering and Management Journal*, 6(3), 175–187. <https://doi.org/10.30638/eemj.2007.022>

Nancharaiah, Y. V., & Kiran Kumar Reddy, G. (2018). Aerobic granular sludge technology: Mechanisms of granulation and biotechnological applications. *Bioresource Technology*, 247(September), 1128–1143.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.131>

Navarrete, L. F., Giraldo, L., & Moreno, J. C. (2006). Influencia De La Química Superficial En La Entalpía De Inmersión De Carbones Activados En Soluciones Acuosas De Fenol Y 4-Nitro Fenol. *Revista Colombiana De Química*, 35(2), 215–224.

Pabón, S., Benítez, R., Sarria, R., & Gallo, J. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9–18. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672020000100009&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Paździor, K., Klepacz-Smółka, A., Ledakowicz, S., Sójka-Ledakowicz, J., Mrozińska, Z., & Zylła, R. (2009). Integration of nanofiltration and biological degradation of textile wastewater containing azo dye. *Chemosphere*, 75(2), 250–255.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.12.016>

Pearce, C. I., Lloyd, J. R., & Guthrie, J. T. (2003). The removal of colour from textile wastewater using whole bacterial cells: A review. *Dyes and Pigments*, 58(3), 179–196.

[https://doi.org/10.1016/S0143-7208\(03\)00064-0](https://doi.org/10.1016/S0143-7208(03)00064-0)

Pessoa Jr, A. (2005). Reactores enzimáticos. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas*, 41(1). <https://doi.org/10.1590/s1516-93322005000100015>

- Plantas, I. N. De. (2021). *Inventariode ETAP y PTAR en México_2021*.
- Qin, L., Liu, Q.-S., Yang, S.-F., Tay, J. H., & Liu, Y. (2004). Stressful Conditions-Induced Production of Extracellular Polysaccharides in Aerobic Granulation Process. *Civi Engineering Research*, 1, 49–51.
- Reinoso Carrasco, J. del C., Serrano Delgado, C. Y., & Orellana Cobos, D. F. (2017). Contaminantes emergentes y su impacto en la salud. *Revista de La Facultad de Ciencias Médicas de La Universidad de Cuenca*, 35(2), 55–59.
<https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/medicina/article/view/1723/1325>
- Robles Molina, J. (2014). *Desarrollo de metodologías analíticas mediante cromatografía/espectrometría de masas para el control de contaminantes orgánicos prioritarios y emergentes en aguas residuales y superficiales*.
- Rojas, I. R. (2002). Conferencia Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. *Gestion Integrada De Tratamiento De Aguas Residuales*.
dateca.unad.edu.co/.../ARESIDUAL2012.../fundamentoaguasresiduales...
- Romero Zúñiga, L. E. (2001). Control de procesos. In *Ingeniería Química* (Vol. 33, Issue 377). <https://doi.org/10.17345/9788484241027>
- Rosales Escalante, E. (2003). Tanque sépticos. Conceptos teóricos base y aplicaciones. *Tecnología En Marcha*, 18(2), 26–33.
- Schwarzenbeck, N., Borges, J. M., & Wilderer, P. A. (2005). Treatment of dairy effluents in an aerobic granular sludge sequencing batch reactor. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 66(6), 711–718. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1748-6>
- Sharma, S., Sarma, S. J., & Tay, J. H. (2019). Aerobic granulation in wastewater treatment: A general overview. In *Microbial Wastewater Treatment*. Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816809-7.00004-X>
- Soliman, M., & Eldyasti, A. (2018). Ammonia-Oxidizing Bacteria (AOB): opportunities and

- applications—a review. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 17, Issue 2). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9463-4>
- Tay, J.-H., Pan, S., He, Y., & Tay, S. T. L. (2004). Effect of Organic Loading Rate on Aerobic Granulation. II: Characteristics of Aerobic Granules. *Journal of Environmental Engineering*, 130(10), 1102–1109. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(2004\)130:10\(1102\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(2004)130:10(1102))
- Tay, J. H., Liu, Q. S., & Liu, Y. (2001). The effects of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 57(1–2), 227–233. <https://doi.org/10.1007/s002530100766>
- Thamaria, N., & Unigarro et al. (2005). No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析Title. In *Journal of Chemical Information and Modeling: Vol. 12 Suppl 1* (Issue 9). <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/810049><http://doi.wiley.com/10.1002/anie.197505391><http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857090409500205><http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21918515><http://www.cabi.org/cabebooks/ebook/20083217094>
- Jiménez, B. (n.d). Tratamiento Primario Avanzado. <http://www2.iingen.unam.mx/es-mx/difusion/IIAMICA2015/Series/Tratamiento%20primario%20avanzado.pdf>
- Universidad autonoma de nuevo leon. (2001).
- Valera, D. V. (2006). *Obtención de un consorcio microbiano granular para la biodegradación de fenol en un reactor discontinuo de alimentación secuenciada.*
- Varila, J., & Diaz, F. (2008). *Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala laboratorio.* 2, 21–28. http://www.uelbosque.edu.co/sites/default/files/publicaciones/revistas/revista_tecnologia/volumen7_numero2/tratamiento_aguas_residuales7-2.pdf
- Vera Rodríguez, J. A. (2016). Remoción de mercurio en aguas contaminadas mediante microorganismos tolerantes, una aproximación a la biorremediación microbiana.

- Universidad Santo Tomás, 64.
http://repository.usta.edu.co/handle/11634/2952#.Wn-uQl_uxic.mendeley
- Virginia Lahera Ramón. (2010). Disponible en:
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40115676004>. *Quivera*, 12, 68.
- Wagner, J., & da Costa, R. H. R. (2013). Aerobic Granulation in a Sequencing Batch Reactor Using Real Domestic Wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, 139(11), 1391–1396. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0000760](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0000760)
- Wang, H., Song, Q., Wang, J., Zhang, H., He, Q., Zhang, W., Song, J., Zhou, J., & Li, H. (2018). Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in an aerobic granular sludge sequencing batch reactor with high dissolved oxygen: Effects of carbon to nitrogen ratios. *Science of the Total Environment*, 642, 1145–1152. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.081>
- Xiong, J. Q., Kurade, M. B., & Jeon, B. H. (2018). Can Microalgae Remove Pharmaceutical Contaminants from Water? *Trends in Biotechnology*, 36(1), 30–44. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2017.09.003>
- Yi, S., Zhuang, W. Q., Wu, B., Tay, S. T. L., & Tay, J. H. (2006). Biodegradation of p-nitrophenol by aerobic granules in a sequencing batch reactor. *Environmental Science and Technology*, 40(7), 2396–2401. <https://doi.org/10.1021/es0517771>
- Yin, Y., Sun, J., Liu, F., & Wang, L. (2019). Effect of nitrogen deficiency on the stability of aerobic granular sludge. *Bioresource Technology*, 275(October 2018), 307–313. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.069>
- Zárate, V. H. L. (2015). *Hidrocarburos Solubles En Agua Mediante Fracciones La Cáscara Coco*.
<https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/1547/1/TMIPICYTL8B52015.pdf>
- Zou, J., Pan, J., Wu, S., Qian, M., He, Z., Wang, B., & Li, J. (2019). Rapid control of activated sludge bulking and simultaneous acceleration of aerobic granulation by adding intact

aerobic granular sludge. *Science of the Total Environment*, 674(April), 105–113.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.006>

Zou, J., Tao, Y., Li, J., Wu, S., & Ni, Y. (2018). Cultivating aerobic granular sludge in a developed continuous-flow reactor with two-zone sedimentation tank treating real and low-strength wastewater. *Bioresource Technology*, 247(July 2017), 776–783.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.088>

7. ANEXOS

A1 Modelos de regresión obtenidos en Minitab® 21.2 para obtener columnas simétricas

a) Densidad

Regression Equation

$$\rho \text{ (g/cm}^3\text{)} = 1.208 - 0.0340 \text{ pH}$$

b) NT

Regression Equation

$$\text{NT (mg/L)} = 41.6 + 0.53 \text{ OD (mg/L)} - 0.1951 \text{ rpm} - 25.8 \rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

c) PT

Regression Equation

$$\text{PT (mg/L)} = -40.3 + 1.08 \text{ T (}^\circ\text{C)} + 21.7 \rho \text{ (g/cm}^3\text{)} + 0.373 \text{ NT (mg/L)}$$

d) DBO

Regression Equation

$$\text{DBO (mg/L)} = -795 + 97.6 \text{ pH} - 0.251 \text{ rpm} - 0.308 \text{ PT (mg/L)}$$

e) DQO

Regression Equation

$$\text{DQO RA (mg/L)} = -751 + 28.3 \text{ T (}^\circ\text{C)} + 19.3 \text{ cond (mS/cm)}$$

f) Fenol

Regression Equation

$$\text{fenol} = -0.219 + 0.02728 \text{ T (}^\circ\text{C)} - 0.0219 \text{ OD (mg/L)} + 0.0098 \text{ cond (mS/cm)}$$

A2 Modelos de regresión ajustados obtenidos en Minitab® 21.2.

a) Temperatura

Regression Equation

$$T (^{\circ}\text{C}) = 21.73 + 0.251 \text{ pH}$$

b) OD

Regression Equation

$$\text{OD (mg/L)} = -5.98 + 0.669 \text{ pH} + 0.0634 \text{ T (^{\circ}\text{C})}$$

c) Conductividad

Regression Equation

$$\text{cond (mS/cm)} = 9.69 + 0.173 \text{ pH} - 0.2007 \text{ T (^{\circ}\text{C})} - 0.1199 \text{ OD (mg/L)}$$

d) Agitación

Regression Equation

$$\text{rpm} = 81.3 - 15.2 \text{ pH} + 0.62 \text{ T (^{\circ}\text{C})} + 6.59 \text{ OD (mg/L)} + 9.74 \text{ cond (mS/cm)}$$

e) Densidad

Regression Equation

$$\rho (\text{g/cm}^3) = 1.0923 - 0.00219 \text{ pH} - 0.00193 \text{ T (^{\circ}\text{C})} - 0.00628 \text{ OD (mg/L)} - 0.00740 \text{ cond (mS/cm)} \\ + 0.000090 \text{ rpm}$$

f) NT

Regression Equation

$$\text{NT (mg/L)} = 47.2 - 3.86 \text{ pH} - 0.488 \text{ T (^{\circ}\text{C})} - 0.042 \text{ OD (mg/L)} + 0.419 \text{ cond (mS/cm)} - 0.0620 \text{ rpm} \\ - 1.0 \rho (\text{g/cm}^3)$$

g) PT

Regression Equation

$$\text{PT (mg/L)} = -122.8 + 5.69 \text{ pH} - 3.242 \text{ T (}^\circ\text{C)} + 29.855 \text{ OD (mg/L)} - 1.16 \text{ cond (mS/cm)} \\ + 0.0926 \text{ rpm} + 188.0 \rho \text{ (g/cm}^3\text{)} - 1.655 \text{ NT (mg/L)}$$

h) DBO₅

Regression Equation

$$\text{DBO (mg/L)} = 112.5 - 11.84 \text{ pH} + 0.065 \text{ T (}^\circ\text{C)} - 0.215 \text{ OD (mg/L)} + 0.051 \text{ cond (mS/cm)} \\ - 0.0920 \text{ rpm} - 10.9 \rho \text{ (g/cm}^3\text{)} - 0.0075 \text{ NT (mg/L)} + 0.2261 \text{ PT (mg/L)}$$

i) DQO

Regression Equation

$$\text{DQO (mg/L)} = 306.1 - 1.03 \text{ pH} - 2.188 \text{ T (}^\circ\text{C)} - 10.06 \text{ OD (mg/L)} - 2.06 \text{ cond (mS/cm)} \\ - 0.0159 \text{ rpm} - 136.6 \rho \text{ (g/cm}^3\text{)} - 0.539 \text{ NT (mg/L)} + 0.342 \text{ PT (mg/L)} \\ + 0.022 \text{ DBO (mg/L)}$$

j) Fenol

Regression Equation

$$\text{Fenol} = 0.250 + 0.0235 \text{ pH} + 0.01214 \text{ T (}^\circ\text{C)} - 0.0223 \text{ OD (mg/L)} + 0.05110 \text{ cond (mS/cm)} \\ + 0.000260 \text{ rpm} - 0.599 \rho \text{ (g/cm}^3\text{)} - 0.00307 \text{ NT (mg/L)} - 0.000871 \text{ PT (mg/L)} \\ + 0.00179 \text{ DBO (mg/L)} - 0.000420 \text{ DQO (mg/L)}$$

A3 Modelos de regresión ajustados con la transformación de Box-Cox obtenidos en Minitab® 21.2.

a) OD

Regression Equation

$$\text{OD (mg/L)} = 1.045 + 0.0056 \text{ pH} - 0.000000 \text{ T (}^\circ\text{C)}$$

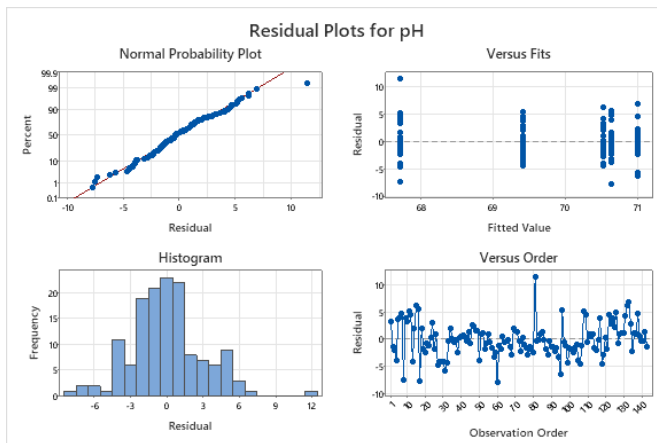
b) Conductividad

Regression Equation

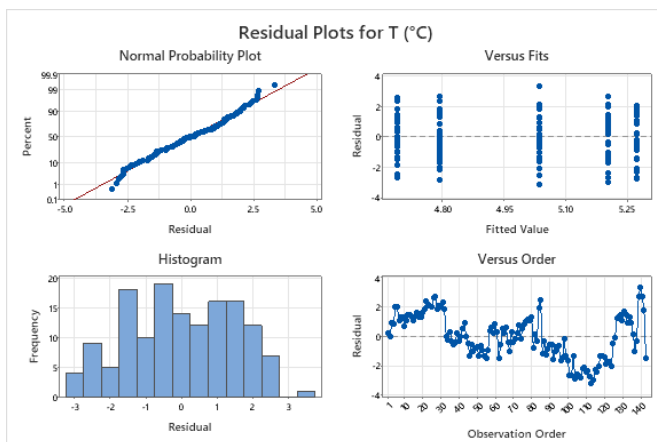
$$-\text{cond (mS/cm)}^{-0.5} = -1.08825 - 0.00650 \text{ OD (mg/L)}$$

A4 Gráficos residuales 4 en 1 para variables ajustadas obtenidos en Minitab ® 21.2.

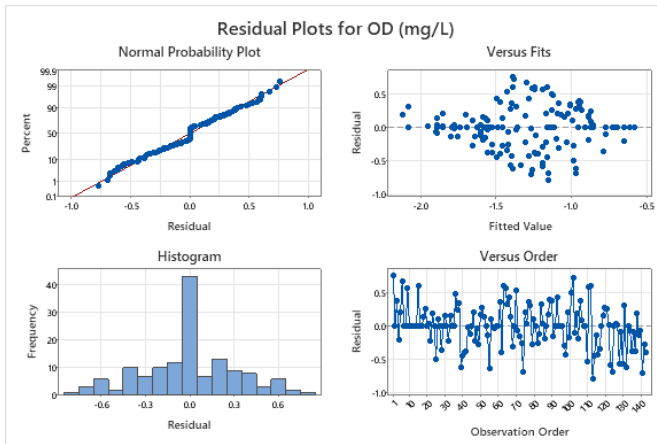
a) pH



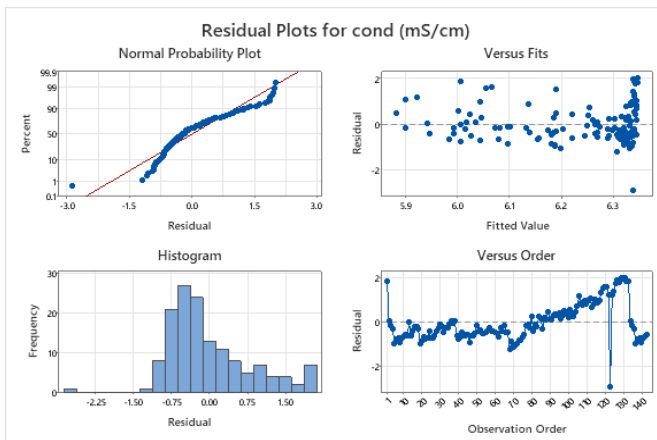
b) Temperatura



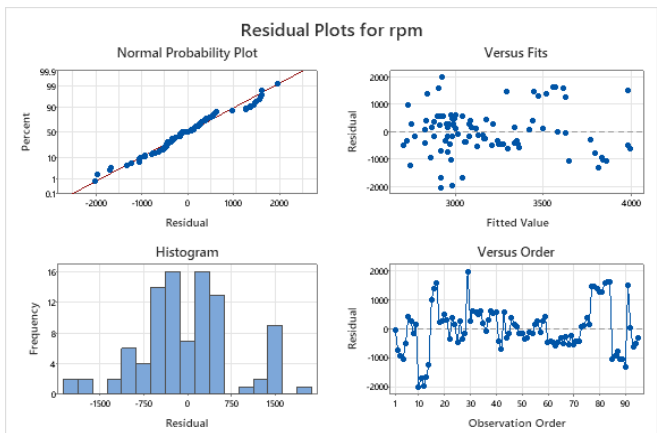
c) OD



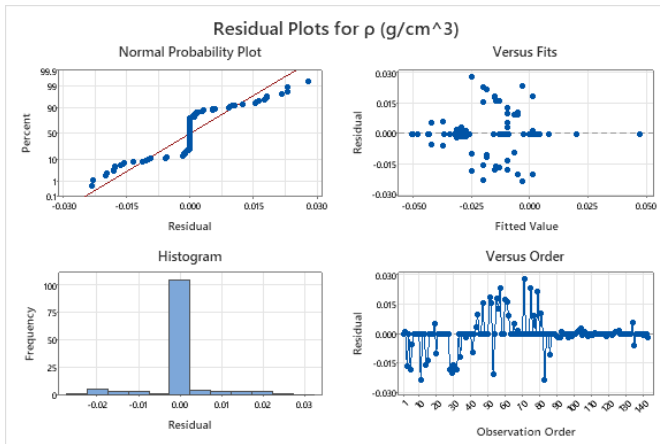
d) Conductividad



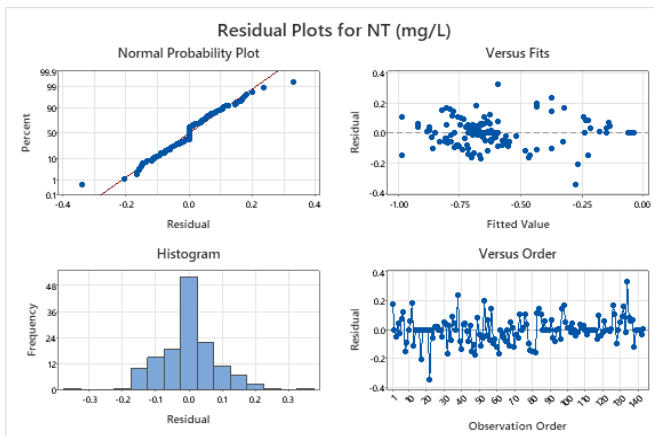
e) Agitación



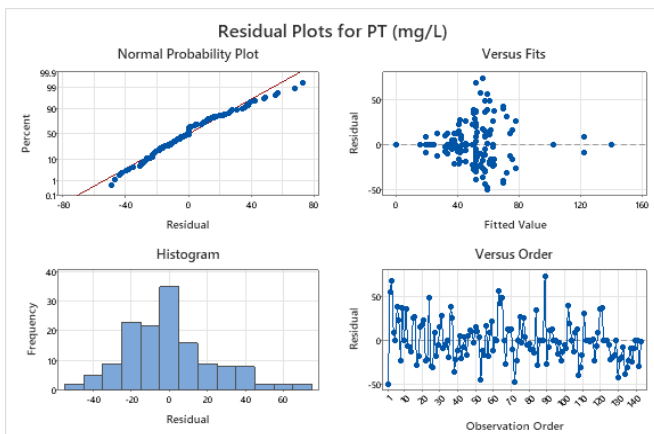
f) Densidad



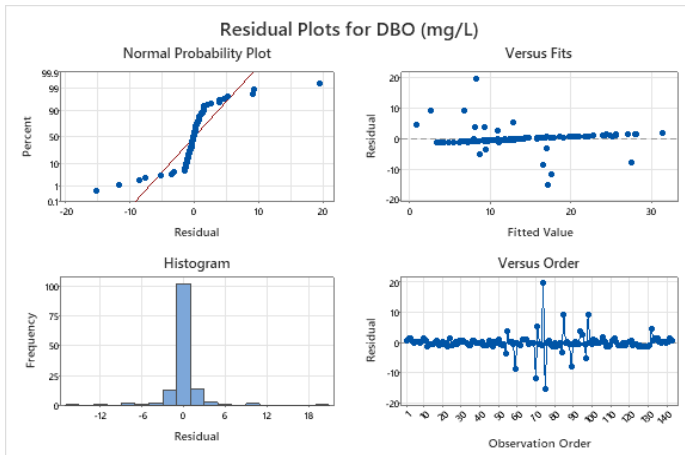
g) NT



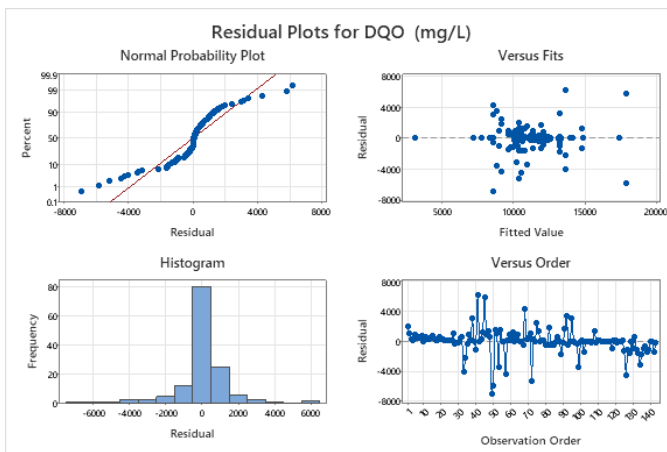
h) PT



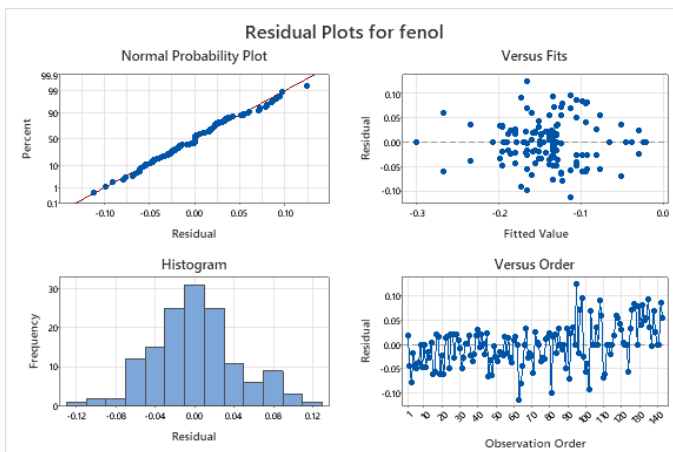
i) DBO



j) DQO



k) Fenol



A5 Interpretación de análisis de correlaciones.

a) Interpretación de análisis de correlaciones simple

Variable	Correlaciones										
T	pH										
OD	pH	-T									
cond	-pH	T	-OD								
rpm	-pH	-T	-OD	-cond							
densidad	-pH	-T	OD	cond	rpm						
NT	-pH	-T	OD	-cond	-rpm	densidad					
PT	pH	-T	-OD	cond	rpm	densidad	-NT				
DBO	-pH	-T	-OD	cond	rpm	densidad	-NT	PT			
DQO	pH	-T	-OD	cond	rpm	-densidad	-NT	PT	DBO		
fenol	pH	T	OD	-cond	rpm	-densidad	-NT	-PT	-DBO	-DQO	

b) Análisis de correlaciones por PCA

Variable	Correlación PCA										
T	pH										
OD	pH	T									
cond	-pH	-T	-OD								
rpm	pH	-T	-OD	-cond							
densidad	-pH	-T	OD	cond	-rpm						
NT	-pH	-T	OD	-cond	-rpm	densidad					
PT	pH	-T	-OD	cond	rpm	densidad	-NT				
DBO	-pH	-T	-OD	cond	-rpm	densidad	NT	PT			
DQO	pH	-T	-OD	-cond	rpm	-densidad	-NT	PT	DBO		
fenol	pH	T	OD	-cond	rpm	-densidad	-NT	-PT	-DBO	-DQO	

Donde las correlaciones se pueden interpretar como:

	Fuerte
	Moderada
	Débil
	Nula


A6 Productos del Trabajo de Investigación

1. Paper en Congreso

Título: Growth and formation of aerobic granular sludge from a textile type synthetic influent

Fecha: 21/07/2022

Concurso: Twitter Latin American Conference EnvChemPSE





GROWTH AND FORMATION OF AEROBIC GRANULAR SLUDGE FROM A TEXTILE TYPE SYNTHETIC INFLUENT

G. Miranda Flores¹, E. Moreno-Rodríguez^{1*}

¹Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y Alimentos, Universidad de las Américas Puebla, Sta. Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, México, german.mirandaf@udlap.mx

^{1*} Ph.D. in Chemical Engineering, Universidad de las Américas Puebla, San Andrés Cholula, Puebla, México, erestina.moreno@udlap.mx

Abstract

In this project, granule formation and growth are studied in a well-controlled laboratory using a synthetic textile as influent. The average operating conditions were 25.25°C, stirring speed of 100 rpm and pH of 8.33. The system was exposed to seven cycles with different latency conditions (anaerobic, anoxic, aerobic). The most stable condition in terms of granule size and shape was reached in cycles 4 and 5 with a substrate ratio of 1:2 and 1.5 mg/L DO.

Keywords: biological treatment, granules, aerobic biogranular sludge, textile wastewater.

Introduction

In Mexico, the textile industry represents one of the main sectors in the generation of employment and production (Truett & Truett, 2010). Textile wastewater is one of the most polluted industrial effluents, and generally contains a substantial amount of chemicals that cause an increase in COD and toxicity of receiving water bodies if not treated properly (Trahim et al., 2010). Aerobic Biogranular Sludge (ABS) treatment is considered one of the best technologies available to purify wastewater that consists on stable aggregates of biomass that have well settlement and which can be able to convert organic substrates, nitrogen compounds and phosphate simultaneously Dulekgurgen et al. 2003).

Methodology

The growth of the biogranules will be carried out under aerobic conditions, using activated sludge samples taken from a WWTP, to be taken to the laboratory where they will be allowed to settle for at least 5 minutes. Subsequently, the supernatant will be removed to obtain the residual sludge that will be inoculated in the Photo-SBR 2F-5000 (Figure 1), the sample will be composed in a 2:1 ratio, that is, 2L of synthetic substrate (Figure 2) per 1 L of Suspended Solids (SS). The estimated time will be monitored until the formation of biogranules is achieved with aerobic, anoxic and anaerobic conditions, as well as the stable state of the system. The shape and size of the biogranules will be monitored with a Nikon E-200 optical microscope.




Figure 1. Experimental set of the project: Photo-SBR 2F-5000

Component	Formula	Concentration	Unit
Glucose	C ₆ H ₁₂ O ₆	1	g/L
Glucose	C ₆ H ₁₂ O ₆	1	g/L
Glucose	C ₆ H ₁₂ O ₆	1	g/L
Glucose	C ₆ H ₁₂ O ₆	1	g/L
Glucose	C ₆ H ₁₂ O ₆	1	g/L
Glucose	C ₆ H ₁₂ O ₆	1	g/L
Glucose	C ₆ H ₁₂ O ₆	1	g/L
Glucose	C ₆ H ₁₂ O ₆	1	g/L
Glucose	C ₆ H ₁₂ O ₆	1	g/L
Glucose	C ₆ H ₁₂ O ₆	1	g/L

Figure 2. Composition of Synthetic Influent (Muda et al., 2010; Ye et al., 2015)

Results

Cycles 4 and 5 presented better shape and average size in the AGS. During these cycles, the amount of dissolved oxygen during the aerobic phase fluctuated around 1.5 mg/L, pH 8.48 and a density of 24.15 g/cm³. While the reduction of the diameter of the granule or the disintegration of the granule was due to the decrease in oxygen during certain aerobic phases.

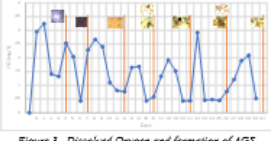


Figure 3. Dissolved Oxygen and formation of AGS (The Authors, 2020)

Conclusion

Reaching the most stable state in the formation of biogranules in the aerobic, anoxic and anaerobic phases depends on the substrate ratio and the times of each phases. Finding so far, the most stable condition with a substrate ratio of 1:2 and 1.5 mg/L DO in a synthetic textile wastewater.

References

Truett, L. J. & Truett, D. B. (2010). Globalization challenges for the Mexican textile industry. *International Journal of Economics and Finance*, 2(9), 733–741. <https://doi.org/10.1080/201308800>

Bracka, Z., Anis, M. F. M., Yildiz, A., Anis, A., & Mada, K. (2019). Characteristics of developed granules containing selected *Acetivibrio* bacteria for the degradation of textile wastewater. *Water Science and Technology*, 81(7), 1279–1286. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.023>

Dulekgurgen, B., Ozay, S., Arica, N., & Oztuna, D. (2003). Enhanced biological phosphate removal by granular sludge in a sequencing batch reactor. *Biochemistry Letters*, 35(9), 487–491.

Mada, K., Anis, A., Yildiz, M. F., Bracka, Z., Yildiz, A., Van Landuyt, M., Alamed, A., Nour, M. Z. (2019). Development of granular sludge for textile wastewater treatment. *Water Research*, 161, 115415. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.021>, pp. 4181–4190.

Ye, J., Liang, J., Wang, L., Mulla, G., & Qi, J. (2015). Operation optimization of a photo-sequencing batch reactor for wastewater treatment: Study on influencing factors and impact on *Acetivibrio* population. *Water Science and Technology*, 73(10), 1915–1921. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.023>

The concentrations of the effluent from the textile industry were established considering textile samples that simulate the residual water of the spinning and weaving process. Figure 2 shows the concentrations of contaminants used in this study.



Figure 2. Composition of Synthetic Influent (Muda et al., 2010; Ye et al., 2015)

Seven cycles (anaerobic, anoxic, aerobic) were considered in order to identify the best conditions in which the ABS are obtained. The monitoring variable were shape and average size, pH, density, sedimentation time and dissolved oxygen.

3. Ponencia magistral

Título: Analysis of correlations in growth of biogranules from synthetic wastewater of industrial origin

Fecha: 13/12/2022

Congreso: ECORFAN 2022



CDMX, December - 2022

MIRANDA-FLORES, German
SANCHEZ-SANCHEZ, Celina
MORENO-RODRIGUEZ, Ernestina

Universidad de las Américas Puebla

PRESENT:

We have the pleasure to announce presented at **19th ECORFAN® International Conference - Science, Technology and Innovation** with the title **"Analysis of correlations in the growth of biogranules from synthetic wastewater of industrial origin"**. On line -ECORFAN-Peru, on 13 December, 2022.

The Conference is Arbitrated by peer review and deposited in Databases:

RESEARCH GATE (Germany)
MENDELEY (Bibliographic References Manager)
GOOGLE SCHOLAR (Citation indices-Google)
RNA (National Registry of Copyright)
DOI (Digital Object Identifier)

Regards.

SERRUDO-GONZALES, Javier, BSc.
CBDO-ECORFAN-México, S.C.
CONACYT-RENIECYT: 1702902

<p>ECORFAN-México, S.C. 143 – 50 Itzopan Street La Florida, Ecatepec Municipality Mexico State, 55120 Zipcode Phone: +52 55 6159 2296 Skype: ecorfan-mexico.s.c. E-mail: comisio@ecorfan.org Facebook: ECORFAN-Mexico S.C. Twitter: @EcorfanC</p>	<p>www.ecorfan.org</p>	<p>Holdings</p> <table border="0"><tr><td>Mexico</td><td>Colombia</td><td>Guatemala</td></tr><tr><td>Bolivia</td><td>Cameroon</td><td>Democratic Republic of Congo</td></tr><tr><td>Spain</td><td>El Salvador</td><td></td></tr><tr><td>Ecuador</td><td>Taiwan</td><td></td></tr><tr><td>Peru</td><td>Nicaragua</td><td>Burkina Faso</td></tr></table>	Mexico	Colombia	Guatemala	Bolivia	Cameroon	Democratic Republic of Congo	Spain	El Salvador		Ecuador	Taiwan		Peru	Nicaragua	Burkina Faso
Mexico	Colombia	Guatemala															
Bolivia	Cameroon	Democratic Republic of Congo															
Spain	El Salvador																
Ecuador	Taiwan																
Peru	Nicaragua	Burkina Faso															