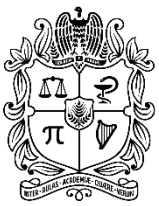


UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evaluación del desempeño de un reactor biológico aerobio de medio móvil con biomasa adherida para el tratamiento de aguas residuales provenientes de una estación de servicio.

YULY PAULIN ACEVEDO MORENO

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá D.C, Colombia
2021

Evaluación del desempeño de un reactor biológico aerobio de medio móvil con biomasa adherida para el tratamiento de aguas residuales provenientes de una estación de servicio.

YULY PAULIN ACEVEDO MORENO

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos

Director (a):
Ph.D., Néstor Alonso Mancipe Muñoz
Codirector (a):
MSc. Francy Janeth Méndez Casallas

Línea de Investigación:
Saneamiento Hídrico
Grupo de Investigación:
GIREH

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá D.C, Colombia
2021

(Dedicatoria o lema)

Dedico esta tesis inicialmente a Dios quien me ha brindado vida, salud y ha sido mi guía durante esta trayectoria.

A mi madre Ana Elsy quien me ha brindado su amor, cariño, paciencia y apoyo constante para alcanzar esta meta. Gracias por inculcar en mí el ejemplo de una mujer que no se rinde, que persevera y alcanza todo lo que se propone. Eres mi mayor ejemplo a seguir como mujer.

A mi padre Fermín Acevedo, quien, pese a que ya no está conmigo en este mundo terrenal, siempre llevo en mi corazón y mente. Su educación, amor y ejemplo me ha llevado a ser la mujer que soy ahora, y le agradezco por haberme inculcado grandes valores.

A mis hermanos Cristian Andrés y Oscar Alejandro por su cariño y apoyo incondicional. Por estar conmigo en los momentos difíciles brindándome consejos y palabras de aliento. Los quiero mucho. A toda mi familia por acompañarme durante este proceso.

A William Herrera por su amor, cariño y apoyo incondicional para continuar y alcanzar esta meta.

Finalmente quiero agradecer a todos mis compañeros y profesores, por brindarme su apoyo y conocimientos en esta etapa de mi vida.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento al director de esta tesis de maestría, Ph.D Nestor Alonso Mancipe Muñoz y a la codirectora MSc. Francy Janeth Méndez Casallas, por la dedicación, asesoría y apoyo que me brindaron durante la ejecución de este trabajo. Quiero agradecerles la confianza que me ofrecieron para desarrollar este proyecto.

Quiero agradecer a los profesionales del laboratorio de ambiental de la Universidad de la Salle por su apoyo, asesoría, colaboración y acompañamiento para llevar a cabo las pruebas microbiológicas del agua residual a tratar.

Así mismo, quiero agradecer a la profesora Martha Bustos y a los profesionales del laboratorio de ambiental de la Universidad Nacional por su apoyo, asesoría, colaboración y acompañamiento para llevar a cabo las pruebas fisicoquímicas del lodo y agua residual a tratar.

Por su ayuda en la automatización del reactor, mi agradecimiento a la Ingeniera Diana Beltrán de la Universidad de la Salle.

Por facilitarme la disponibilidad del medio móvil *MUTAG BIOCHIP*® para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto, mi agradecimiento a la Empresa R&R INGENIERIA, en especial al Ingeniero Mario Ruiz.

También quiero agradecer al grupo GIREH y a los profesionales del laboratorio de hidráulica de la Universidad Nacional quienes me brindaron el espacio para llevar a cabo la prueba física – experimental, la cual finalmente no se logró culminar debido a la emergencia sanitaria. Sin embargo, su ayuda fue valiosa para la puesta en marcha del reactor en el mes de junio de 2020.

Por último, quiero agradecer a mis compañeros y a mi familia, por su apoyo y sugerencias. En especial, quiero hacer mención de mis padres, hermanos y William Herrera, quienes siempre estuvieron ahí en los momentos difíciles, brindándome su apoyo, paciencia, comprensión y solidaridad con este proyecto.

Resumen

Las estaciones de servicio se caracterizan por generar residuos líquidos que contienen alta carga de grasas y aceites, hidrocarburos, sólidos suspendidos, solventes halogenados, detergentes, desengrasantes, restos de combustibles, ceras especiales y concentraciones variables de metales. De acuerdo a las caracterizaciones del efluente de trampa de grasas de estaciones de servicio realizadas por este estudio y por Gonzales y Giraldo (2019) se evidencia que el agua vertida no cumple totalmente con los valores máximos permisibles dados por el artículo 11 (Resolución 631 de 2015), por lo que no sólo se requiere la construcción de trampas de grasas tal y como lo estipula el Artículo 9 del Decreto 1521 de 1998, sino que requiere la instalación de procesos u operaciones de tratamiento adicionales que cuenten con la capacidad de tolerar las fluctuaciones en cambios de caudal y concentraciones de los efluentes que se presentan en este tipo de establecimientos.

De acuerdo con lo anterior el presente proyecto tiene como objetivo principal evaluar el comportamiento de un reactor biológico de biomasa suspendida y un reactor biológico de biomasa adherida de medio móvil para el tratamiento de aguas residuales provenientes de una estación de servicio.

Para realizar la evaluación inicialmente se llevó a cabo la caracterización del agua a tratar, posteriormente se elaboró el diseño hidráulico del reactor biológico de biomasa suspendida y de biomasa suspendida de medio móvil. Con estos resultados, se utilizó el simulador GPS-X (*General Purpose Simulator*) desarrollado por la empresa consultora canadiense hydromantis, Inc. donde se construyeron dos modelos: el primero corresponde a un reactor biológico de biomasa suspendida (SBR) y el segundo a un reactor biológico de biomasa adherida de medio móvil (MBRR).

De esta manera, se encontró que los reactores biológicos de biomasa adherida de medio móvil aparentemente tienen la capacidad de mejorar las características del agua a la salida del reactor, en comparación con un reactor biológico de biomasa adherida diseñado con las mismas condiciones y parámetros. Además, se evidencia que un parámetro de diseño importante en el reactor biológico de biomasa adherida de medio móvil y que ha sido muy poco evaluado corresponde a la densidad de la biopelícula. El valor de este parámetro depende del material del medio de soporte a utilizar y este puede llegar a determinar la acción degradadora diferencial de contaminantes en el agua residual.

Finalmente, y debido a que gran parte de la información introducida al simulador fue predeterminada por el modelo no fue posible comprobar que el reactor de biomasa adherida de medio móvil requiere menor volumen y área de tratamiento para tratar el mismo caudal de diseño que un reactor de biomasa suspendida. Al momento de correr la simulación se afectó negativamente la calidad del agua a la salida del reactor.

Palabras Clave: Calidad del agua, biotecnología ambiental, Medio Móvil, Reactor Biológico, Tratamiento de agua industrial.

Abstract

Typically, Gas stations generate wastewater that contain a high load of fats and oils, hydrocarbons, suspended solids, halogenated solvents, detergents, degreasers, fuel residues, special waxes and variable concentrations of metals. Studies have shown that the water quality of the wastewater produced by these gas stations do not fully comply with the maximum permissible values established by article 11 of resolution 631 of 2015. This circumstance imposed a Gas Station to implement not only a fat trap, as it is stipulated in Article 9 of Decree 1521 of 1998, but also to consider the construction of complex treatment systems that may have the capacity to cope with significant flow and pollutant concentration fluctuations.

Therefore, the main objective of this project is to evaluate the behavior of a suspended biomass biological reactor and a mobile medium attached biomass biological reactor for the treatment of a Gas Station wastewater.

To carry out the evaluation, first the waste water is characterized physically, chemically, and biologically. Second, the hydraulic design of the biological reactor of suspended biomass and of suspended biomass of mobile medium was elaborated. Third, a GPS-X (General Purpose Simulator, developed by the Canadian consulting company *Hydromantis, Inc)*. is used to build two mathematical *models*: [1] a suspended biomass biological reactor (SBR), and [2] a moving medium adhered biomass biological reactor (MBRR).

Simulation results indicate that the biological reactor of adhered biomass of mobile medium apparently have the ability to improve the characteristics of the water at the outlet of the reactor when it is compared to a biological reactor of adhered biomass designed with the same conditions and parameters. In addition, it is evident that an important design parameter in the biological reactor of biomass adhered to mobile medium is the density of the biofilm which has been very little studied. The value of this parameter depends on the support medium material type to be used and it may determine the degrading level of pollutants in the wastewater.

Finally, and due to the fact that a large part of the information entered into the simulator was predetermined by the model, it was not possible to verify that the mobile medium adhered biomass reactor requires less volume and treatment area to treat the same design

flow rate as a mobile medium reactor. suspended biomass. At the time of running the simulation, the quality of the water at the outlet of the reactor was negatively affected.

Keywords: Water Quality, Environmental Biotechnology, Mobile Bed, Biological Reactor, Industrial Water Treatment.

Contenido

Pág.

1. Objetivos 5
1.1 Objetivo General 5
1.2 Objetivos Específicos 5

2. Marco de Referencia.....6

3. Marco Metodológico 14
3.1 Comparación de medios móviles para un reactor biológico de medio móvil con biomasa adherida 14
3.1.1 Prueba Físicas y Microbiológica de los medios móviles.....14
3.1.2 Matriz Evaluación del Medio 16
3.2 Evaluar matemáticamente a través del modelo GPS-X el desempeño de un reactor biológico de biomasa suspendida y adherida para tratar las aguas residuales de una estación de servicio. 19
3.2.1 Caracterización fisicoquímica y microbiología del agua a tratar 20
3.2.2 Diseño hidráulico del reactor biológico aerobio de biomasa suspendida y biomasa adherida de medio móvil 21
3.2.3 Evaluación matemática del reactor Biológico de cargas secuenciales (SBR) con biomasa suspendida y biomasa adherida de medio móvil 24

4. Comparación de medios móviles para un rector biológico de medio móvil con biomasa adherida 31
4.1 Pruebas Físicas y Microbiológicas de los medios móviles..... 31
4.1.1 Prueba Física de los medios móviles.....31
4.1.2 Prueba Microbiológica de los medios móviles.....33
4.2 Matriz Evaluación del Medio..... 40
4.2.1 Aplicación de la metodología AHP para la valoración de cada parámetro y aspecto a evaluar 40
4.2.2 Matriz de Decisión Selección del medio.....43

5. Evaluación matemática a través del modelo GPS-X del desempeño de un reactor biológico de biomasa suspendida y adherida para tratar las aguas residuales de una estación de servicio 48
5.1 Caracterización Fisicoquímica y Microbiológica del agua a tratar..... 48
5.1.1 Caracterización Fisicoquímica del agua a tratar.....48
5.1.2 Caracterización Microbiológica 50

5.2 Diseño del reactor Biológico de cargas secuenciales (SBR) de biomasa suspendida y biomasa adherida de medio móvil 50
5.2.1 Diseño hidráulico del reactor Biológico tipo SBR con biomasa Suspendida. . 51
5.2.2 Diseño hidráulico del reactor Biológico tipo SBR con biomasa adherida de medio Móvil..... 53
5.3 Construcción del reactor Biológico de cargas secuenciales (SBR) 54
5.4 Evaluación matemática del reactor Biológico de cargas secuenciales (SBR) con biomasa suspendida y biomasa adherida de medio móvil 55
5.4.1 Construcción y Simulación del reactor Biológico tipo SBR con biomasa Suspendida. 62
5.4.2 Construcción y Simulación del reactor Biológico con biomasa adherida de lecho móvil. 66

6. Conclusiones 73

7. Recomendaciones 75

BIBLIOGRAFÍA 76

ANEXOS 81
Anexo A: Elaboración Alginato de Calcio 82
Anexo B: Encuesta para valoración de los criterios y aspectos a evaluar en la selección del medio 83
Anexo C: Procedimiento Preparación de la Escala de McFarland 86
Anexo D. Revisión Bibliográfica de Reactores Biológicos de Biomasa suspendida y Biomasa adherida de medio móvil 87
Anexo E. Diseño Reactor Biológico Tipo SBR con biomasa Suspendida y Biomasa adherida de medio móvil 98
Anexo F: Construcción del reactor biológico de biomasa suspendida 106
Anexo G: Construcción del Modelo matemático reactor biológico de biomasa suspendida y reactor biológico de biomasa adherida de medio móvil 109

Lista de ilustraciones

Pág.

Ilustración 1. *MUTAG BIOCHIP®* 11
Ilustración 2 Barra herramientas de simulación 28
Ilustración 3 Formulario con datos de entrada según caracterización del agua residual de la estación de servicio 59
Ilustración 4 Formulario con valores de entrada ajustados acorde a la caracterización .. 59
Ilustración 5 Formulario con datos de entrada ajustados para la simulación 61
Ilustración 6. Resultados del Software en la descarga del SBR para el escenario 1..... 64
Ilustración 7. Datos de remoción DQO y SST Reactor SBR Biomasa suspendida escenario 1..... 64
Ilustración 8. Datos de remoción DQO y SST Reactor SBR Biomasa suspendida escenario 3..... 65
Ilustración 9. Datos de remoción DQO y SST Reactor SBR Biomasa suspendida escenario 4..... 65
Ilustración 10. Resultados del Software en la descarga del MBRR para el escenario 1.. 68
Ilustración 11. Datos remoción DQO y SST Reactor Biomasa adherida de medio móvil escenario 1..... 68
Ilustración 12 Datos remoción DQO y SST Reactor Biomasa adherida de medio móvil escenario 2..... 69
Ilustración 13. Datos remoción DQO y SST Reactor Biomasa adherida de medio móvil escenario 3..... 69
Ilustración 14. Datos remoción DQO y SST Reactor Biomasa adherida de medio móvil escenario 4..... 70
Ilustración 15. Datos remoción DQO y SST Reactor Biomasa adherida de medio móvil escenario 5..... 71
Ilustración 16. Datos remoción DQO y SST Reactor Biomasa adherida de medio móvil escenario 6..... 71
Ilustración 17 Ventana Principal GPS-X 109
Ilustración 18 Barra iconos que representan procesos unitarios.....110
Ilustración 19 Creación objetos del modelo 1 y 2.....111
Ilustración 20 Conectividad objetos modelo 1 y 2 111
Ilustración 21 Formulario con datos de entrada modelo 1 y 2.....112
Ilustración 22 Ventana Simulador GPS-X.....115

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Caracterización del efluente de una trampa de grasas de estaciones de servicio1
Tabla 2. Fases Funcionamiento SBR 7
Tabla 3. Soportes Plástico de Biomasa 9
Tabla 4. Requisitos que debe tener un medio de soporte 9
Tabla 5. Características de los materiales de soporte a emplear 13
Tabla 6. Escala McFarland 15
Tabla 7. Criterios seleccionados para la matriz de evaluación 16
Tabla 8. Escala para comparaciones a Pares – Escala de Saaty 17
Tabla 9. Matriz de comparación 17
Tabla 10. Resumen Parámetros de diseño y control de los estudios 22
Tabla 11. Parámetros de diseño y operación de SBR 23
Tabla 12. Parámetros de diseño Procesos de Lodos Activados 23
Tabla 13. Simuladores existentes para diseño y simulación de PTAR 25
Tabla 14. Escenarios proyectados Reactor SBR 28
Tabla 15. Escenarios proyectados Reactor MBRR 29
Tabla 16. Datos de Absorbancia Tubos Escala McFarland 35
Tabla 17. Células (UFC/ml) obtenidas para el *MUTAG BIOCHIP*®. 37
Tabla 18. Células (UFC/ml) obtenidas para el alginato de calcio 37
Tabla 19. Células (UFC/ml) obtenidas para el *MUTAG BIOCHIP*®. 38
Tabla 20. Células (UFC/ml) obtenidas para el alginato de calcio 39
Tabla 21. Resultados Encuesta Nivel importancia Parámetros y Aspectos a Evaluar 41
Tabla 22. Resultados Peso de nivel importancia Parámetros 42
Tabla 23. Resultados Peso de nivel importancia Aspectos a evaluar 42
Tabla 24. Descripción de cada aspecto 43
Tabla 25. Matriz de evaluación del medio 45
Tabla 26. Caracterización del efluente de la trampa de grasas 49
Tabla 27. Diseño Lodos activados Convencional Reactor SBR con biomasa suspendida 52
Tabla 28. Cinética Reactor SBR aireación extendida con biomasa suspendida 52
Tabla 29. Diseño lodos activados completamente mezclado SBR biomasa adherida medio móvil 53
Tabla 30. Cinética Reactor SBR completamente mezclado con biomasa adherida de medio móvil 54

Tabla 31. Diseño a escala reactor SBR biomasa suspendida y biomasa adherida de medio móvil 56
Tabla 32. Parámetros a modificar en el formulario datos de entrada 57
Tabla 33. Parámetros a modificar fracciones orgánicas 58
Tabla 34. Parámetros de entrada utilizados en la simulación 61
Tabla 35. Tiempos de reacción SBR Biomasa suspendida 62
Tabla 36. Configuración del ciclo 63
Tabla 37. Resumen Resultados Rector Biológico SBR con biomasa suspendida 66
Tabla 38. Parámetros a modificar en las condiciones físicas del reactor MBRR 66
Tabla 39. Resumen Resultados Rector Biológico SBR con biomasa adherida de lecho móvil 71
Tabla 40. Encuesta para la evaluación del nivel de importancia de criterios y aspectos a evaluar en la selección del medio 83
Tabla 41. Información de los medios móvil a utilizar 84
Tabla 42. Patrones Escala McFarland 86
Tabla 43. Estudios de caso utilizando el Reactor SBR 87
Tabla 44. Estudios de caso utilizando Tecnología de medios de soporte fijo o móvil 92
Tabla 45. Diseño Reactor SBR aireación extendida con biomasa suspendida 98
Tabla 46. Cinética Reactor SBR aireación extendida con biomasa suspendida 101
Tabla 47. Diseño Reactor SBR completamente mezclado de biomasa adherida de medio móvil 102
Tabla 48. Cinética Reactor SBR completamente mezclado con biomasa adherida de medio móvil 105
Tabla 49. Características de los aireadores 106
Tabla 50. Parámetros a modificar en el formulario datos de entrada 112

Lista de Gráficas

Pág.

Gráfica 1. Curva de calibración Tubos Escala McFarland 35
Gráfica 2. Curva de calibración para calculo de concentración de células 36
Gráfica 3. Resultados Células UFC/ml para los dos medios 40
Gráfica 4. Densidad de la Biopelícula del medio Vs Concentración efluente 70

Lista de Fotografías

Pág.

Fotografía 1. Fabricación *Alginato de Calcio* 12
Fotografía 2. Sumergencia del medio 32
Fotografía 3. Tanques de 4.6 Litros Prueba Microbiológica 34
Fotografía 4. Equipos y materiales para el desprendimiento de biopelícula o biomasa adherida 37
Fotografía 5. Rector Biológico SBR 55
Fotografía 6. *Elaboración Alginato de Calcio* 82
Fotografía 7. Sistema de entrada de agua al reactor 106
Fotografía 8. Sistema Distribución de aire y mezcla 107
Fotografía 9. Sistema de salida de agua clarificada del reactor 108
Fotografía 10. Sistema de automatización 108

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolo	Término	Unidad SI
AT	Alcalinidad Total	mg/L
h	Altura	m
AS	Área superficial del tanque	m2
ASE	Área superficie especifica	m2/m3
Q	Caudal	L/hr, L/min, L/s, m3/d
Qaire	Caudal de aire	L/hr, L/min, L/s, m3/d
COD	Carbono orgánico disuelto	mg/L
COT	Carbono orgánico total	mg/L
COS	Carga orgánica Superficial	g DQO/m2-d g DBO/m2-d
COV	Carga orgánica volumétrica	Kg DQO/m3-d Kg DBO/m3-d
CV	Carga Volumétrica	Kg /m3-d
DQO	Demanda química de oxigeno	mg/L
DBO	Demanda Biológica de oxigeno	mg/L
P	Fósforo	mg/L
PT	Fósforo total	mg/L
N	Nitrógeno	mg/L
$N\text{-}NH_4^+$	Nitrógeno amoniacal	mg/L
NO_3^-	Nitratos	mg/L
NO_2^-	Nitritos	mg/L
NTK	Nitrógeno total Kjeldahl	mg/L
OD	Oxígeno disuelto	mg/L
pH	Potencial de hidrogeno	UpH
F/M	Relación alimento microorganismo	d^{-1}
DBO/N/P	Relación Demanda Biológica de oxígeno/ Nitrógeno y Fósforo	
SSV/SST	Relación Sólidos suspendidos volátiles / Sólidos suspendidos totales	
SSVLM/ SSTLM	Relación Sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado / Sólidos suspendidos totales en el licor mezclado	
SE	Superficie especifica	m2/m3

Símbolo	Término	Unidad SI
SS	Sólidos suspendidos	mg/L
SST	Sólidos suspendidos totales	mg/L
SSTLM	Sólidos suspendidos totales en el licor mezclado	mg/L
SSV	Sólidos suspendidos volátiles	mg/L
SSVi	Sólidos suspendidos volátiles inmovilizados	mg/L
SSVLM	Sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado	mg/L
T° C	Temperatura	ºC
TRH	Tiempo retención hidráulica	Seg – min -hrs- días
UFC	Unidades formadoras de colonias	UFC

Abreviaturas

Abreviatura	Término
Ae	Aeróbica
An	Anaeróbica
Ax	Anóxica
AX-An	Anóxica anaeróbica
HP	Caballos de potencia
c/u	Cada uno
CO	Carga orgánica
cm	Centímetros
cm2	Centímetros cuadrados
SPC	Estándar Plate Count
GPS-X	*General Purpose Simulator*
gr	gramos
hrs	Horas
L	Litro
nm	Longitud de onda
m	Metros
ml	Mililitro
mm	Milímetros
MO	Materia orgánica
min	Minuto
PET	Polientereftalato
ORP	Potencial oxido reducción
X SSLM	Sólidos suspendidos en el licor mezclado
rpm	Revoluciones por minuto
SBR	Reactor Discontinuo Secuencial
UFC/ml	Unidades formadoras de colonias / mililitro
NTU	Unidad nefelométrica de turbidez
º	Grados

Introducción

De acuerdo con el Artículo 2 (Decreto 1521 de 1998), las estaciones de servicio son establecimientos comerciales dedicados al almacenamiento, transporte y distribución de combustibles líquidos derivados del petróleo y/o gaseosos (combustibles diésel, gasolina y kerosene) para vehículos automotores. En estos lugares también se pueden prestar los servicios de lavado general y de motor, lubricación, alineación y balanceo, cambios y reparación de llantas, trabajos menores de reparación y mantenimiento, servicios de diagnóstico, venta de llantas y neumáticos, baterías, lubricantes y accesorios. De acuerdo con la comisión Nacional del medio Ambiente (1999) en la operación de una estación de servicio se generan residuos sólidos y líquidos, emisiones (compuestos orgánicos volátiles), olores y ruidos. Los residuos líquidos se caracterizan principalmente por ser de composición muy diversa y en algunos casos compleja. Su origen se da debido a la contaminación de aguas lluvias con derrames superficiales de combustible en áreas de distribución (llenado de vehículos), por fugas o fisuras en los tanques de almacenamiento, por el lavado de los pisos de las zonas de distribución y cambios de aceite, y el lavado de los vehículos (aguas de proceso) (Comisión Nacional del medio Ambiente,1999).

De acuerdo con las caracterizaciones fisicoquímicas realizadas en tres efluentes de trampas de grasas de estaciones de servicio se logró evidenciar que, primero las características del agua residual efluente de este tipo de establecimientos depende en gran medida de las actividades y servicios que se presten en ella. Y segundo que, pese a que todas presentan una composición diferente, ninguna cumple con lo estipulado en el Artículo 11 (Resolución 631 de 2015). Lo que indica que las aguas residuales provenientes de una estación de servicio no solo deben contar con un sistema de trampa de grasas tal y como lo estipula el Artículo 9 (Decreto 1521 de 1998), sino que requieren la instalación de procesos u operaciones de tratamiento adicionales que cuenten con la capacidad de tolerar las fluctuaciones en cambios de caudal y concentraciones de los efluentes. Esto puede hacer que el tratamiento se vuelva complejo y muy costoso, no solo por los requerimientos de área sino por los equipos y consumos de energía que se requieren (ver Tabla 1.)

Tabla 1. Caracterización del efluente de una trampa de grasas de estaciones de servicio

Parámetros	Unidades	EDS 1*	EDS 2**	EDS 3***	RES 631 2015
Grasas y aceites	mg/L	675	394	141	15
DBO_5	mg/L	640	200	486	60
DQO	mg/L	1280	400	1177	180

Parámetros	Unidades	EDS 1*	EDS 2**	EDS 3***	RES 631 2015
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	2450	92,31	-	50
Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/L	862,5	32,97	-	Análisis y reporte
pH		-	7.5	7.47	
Nitrógeno total	mg/L	-	-	17	
Fosforo	mg/L			1.79	

*La estación de servicio 1 corresponde a un establecimiento donde no solo se realizan actividades de almacenamiento, transporte y distribución de combustibles líquidos derivados del petróleo, sino que también se prestan los servicios de: lavado general y de motor, cambios de aceite y lubricación, venta de aceites y accesorios, y establecimientos de comidas.

** La estación de servicio 2 corresponde a un establecimiento donde solo se realizan actividades de almacenamiento, transporte y distribución de combustibles líquidos derivados del petróleo, cambios y reparación de llantas, establecimientos de comida y oficinas.

*** La estación de Servicio 3 corresponde a los resultados obtenidos por Giraldo y Gonzáles, 2019.

Fuente: Tomado de Giraldo y González (2019) y elaboración Propia

Nava et al (2014) mencionan que para remover los contaminantes presentes en este tipo de aguas residuales se han desarrollado y perfeccionado numerosas tecnologías que comprenden el uso de tratamientos biológicos y/o procesos fisicoquímicos. El tratamiento biológico de aguas residuales se lleva a cabo mediante una serie de procesos que utilizan una variedad de microorganismos (principalmente bacterias), para llevar a cabo la eliminación de compuestos con nutrientes (nitrógeno y fosforo), materia orgánica biodegradable tanto soluble como coloidal y la eliminación de patógenos y parásitos (Romero, 1999). Nava et al (2014) menciona que los sistemas biológicos han tenido mayor acogida en comparación con los tratamientos fisicoquímicos debido a su aplicación a gran escala, fácil operación, mejor control de variables, y mejores rendimientos asociados a menores costos de operación. Arnáiz et al. (2000) menciona que los costos de inversión y operación de los procesos biológicos son del orden de 5 a 20 veces y de 3 a 10 veces respectivamente menores que los tratamientos fisicoquímicos, lo que genera que el tratamiento biológico sea una solución atractiva.

Dentro de las técnicas de tratamiento biológico usadas para tratar las aguas residuales de estaciones de servicio se encuentran: sistemas aerobios de medio móvil, ozonización catalítica y fitorremediación. El primer sistema está conformado por un sistema de lodos activados del tipo MBRR en el cual se utiliza un medio móvil normalmente de plástico que se mantiene suspendido y en movimiento continuo a partir de sistemas de agitación y aireación favoreciendo la adición de microorganismos a la superficie de los soportes (González y Giraldo, 2019). González y Giraldo (2019) evaluaron el *MUTAG BIOCHIP*® como medio de soporte en un reactor biológico de mezcla completa tipo cochada (MBRR) para el tratamiento de aguas residuales provenientes del sector de hidrocarburos. Los autores identificaron que los microorganismos nativos presentes en el agua residual identificados como *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* y *Raoultella ornithinolytica* mostraron tolerancias y eficiencias en la remoción de fenoles, grasas y aceites. Así mismo, el estudio recomienda instalar un sistema de pretratamiento antes del proceso biológico debido a que el tratamiento propuesto no cumplió con los resultados esperados además de concluir que las grasas y aceites interfieren en la actividad y entorpecer el tratamiento biológico (Crites y Tchobanoglous, 2001).

El segundo sistema corresponde a la ozonización catalítica. Este es un proceso de oxidación avanzada que contribuye a la degradación de contaminantes orgánicos, sin embargo, también ha demostrado potencial para eliminar compuestos resistentes (Hernández et al., 2019). Hernández et al., (2019) desarrollaron un tratamiento de aguas residuales provenientes de estaciones de gasolina donde se logró una disminución importante en los parámetros de materia orgánica, turbiedad y tensoactivos y una leve reducción de grasas y aceites, e hidrocarburos.

El tercer y último sistema corresponde a la fitorremediación. Según Reyes (2016) este es un sistema basado en el uso de organismos vegetales que tienen capacidad de remover, transformar, secuestrar o degradar contaminantes de interés mediante la interacción con microorganismos localizados en la rizósfera. El proceso de fitorremediación comienza a partir del contacto del contaminante con la raíz de la especie vegetal, generando el proceso de absorción y mezcla con la estructura y pared celular de la especie. Reyes (2016) llevó a cabo la formulación y diseño de un humedal de flujo subsuperficial usando *Phragmites australis* como especie vegetal para el tratamiento de aguas hidrocarburadas en estaciones de servicio BIOMAX. Este sistema se diseñó considerando un material filtrante basado en gravas con granulométricas diferentes, y una capa de tapas de botellas de plástico generando mejoras en los resultados de remoción de la carga contaminante.

De acuerdo con Zalakain & Manterola (2011) los reactores biológicos de medio móvil (MBRR, por sus siglas en inglés) se han establecido como una solución interesante para tratar las aguas residuales provenientes de una estación de servicio. El sistema de medio móvil es un proceso simple, pero a la vez robusto, flexible y compacto que puede ser utilizada para la optimización de procesos de lodos activados donde se requiere aumentar la capacidad del tratamiento sin la necesidad de construir nuevos reactores biológicos. Su principio básico es la adherencia de la biomasa en suspensión, en un elemento de soporte normalmente de material de plástico que se mueve en el reactor mediante la agitación generada ya sea por los sistemas de aireación o mezcladores mecánicos. En los MBBR, una parte crítica es el medio móvil. Dentro de las múltiples opciones se cuenta con el medio conocido como *MUTAG BIOCHIP*® y el Alginato de Calcio.

El objetivo de esta investigación fue evaluar y comparar el desempeño de un reactor biológico aerobio de biomasa suspendida y biomasa adherida de medio móvil en la remoción de DQO y sólidos suspendidos de aguas residuales provenientes de estaciones de servicio pretendiendo además demostrar que son una solución atractiva para afrontar las características de las aguas residuales provenientes de estos establecimientos, permitiendo cumplir la norma y así evitar sanciones. Así mismo, disminuir el impacto generado por las cargas contaminantes a la red de drenaje urbano o cuerpos de agua superficial.

Inicialmente se proyectó la realización de una prueba física experimental que permitiera evaluar el desempeño de estos dos reactores, sin embargo, y debido a la emergencia sanitaria que se presenta a nivel mundial por el virus SAR-COVID-19 no fue posible

continuar con su ejecución. Por lo cual se reemplazó la evaluación física-experimental del reactor por una simulación matemática del reactor biológico de biomasa suspendida y del reactor biológico de medio móvil con biomasa adherida. Esta simulación se realizó con la ayuda del software GPS-X.

Una de las limitantes para desarrollar el estudio matemático fue la ausencia de información con respecto a algunas características del agua que ingresa al reactor, dada la limitación de datos, se adoptó una relación de DBO/DQO de 80%. Así mismo, se tomo por defecto los valores recomendados por el modelo en cuanto valores de la cinética y estequiometria del modelo y algunos parámetros relacionados con la biopelícula del medio. Este último para el reactor de biomasa adherida. Estos aspectos impidieron obtener los resultados deseados principalmente en el reactor de biomasa adherida de medio móvil donde no fue posible comprobar matemáticamente que este sistema puede tratar un mayor caudal en el mismo volumen en comparación con un reactor de lodos activados SBR de biomasa suspendida. Sin embargo, de los resultados de simulación se observa que estos reactores mejoran las características del agua a la salida del reactor.

El presente documento final de maestría está compuesto por 6 capítulos y 5 anexos. En el capítulo 1 se presentan los objetivos del trabajo , luego en capítulo 2 se presenta un marco de referencia en donde se induce al lector en el tema relacionado con sistemas de lodos activados y medios de soporte. En el tercer capítulo se presenta el marco metodológico que se utilizó. Posteriormente en el cuarto capítulo se desarrolla el primer objetivo que tiene como fin comparar dos tipos de medio a nivel de laboratorio para ser utilizados en un reactor biológico de medio móvil con biomasa adherida. Después en el capítulo cinco se desarrolla el segundo objetivo que tiene como fin evaluar matemáticamente a través del modelo GPS-X el desempeño de un reactor biológico de biomasa suspendida y adherida para tratar las aguas residuales de una estación de servicio. Por último, en el sexto capitulo se presentan las conclusiones y recomendaciones relacionadas con este proyecto.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño de un reactor biológico aerobio de medio móvil con biomasa adherida y un reactor biológico con biomasa suspendida en la remoción de DQO y sólidos suspendidos de aguas residuales provenientes de una estación de servicio

1.2 Objetivos Específicos

- Comparar dos tipos de medio móvil a nivel de laboratorio para ser utilizados en un rector biológico de medio móvil con biomasa adherida.
- Evaluar matemáticamente a través del modelo GPS-X el desempeño de un reactor biológico de biomasa suspendida y adherida para tratar las aguas residuales de una estación de servicio.

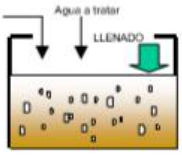
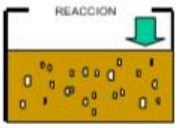
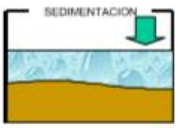
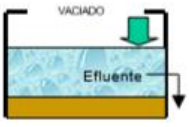
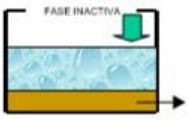
2. Marco de Referencia

El tratamiento biológico de las aguas residuales supone la remoción de contaminantes mediante la actividad biológica de microorganismos fundamentalmente bacterias. La actividad biológica se aprovecha principalmente para la remoción de nitrógeno, fósforo, y sustancias orgánicas biodegradables, disueltas y coloidales presentes en el agua residual, estas últimas son convertidas en gases que escapan a la atmósfera y biomasa que se extrae mediante el proceso de sedimentación (Romero, 1999). De acuerdo con Muñoz y Ramos (2014) el proceso biológico de lodos activados (reactor discontinuo secuencial - SBR) se ha convertido en la tecnología más apropiada para la industria farmacéutica, tenerías, entre otras. Debido no sólo a su capacidad de tolerar variaciones de carga y caudal de los afluentes, sino al poder tratar aguas residuales industriales que poseen altas cargas orgánicas, elevados niveles de nitrógeno orgánico y amoniacal, y compuestos inorgánicos específicos. Muñoz y Ramos (2014) mencionan que gracias a que el proceso se realiza en un solo tanque se disminuyen los costos de inversión y operación, al igual que se reduce la cantidad de subproductos generados en comparación con el sistema convencional de lodos activados, así como permite mantener un control final de cada reacción biológica y sobre la calidad del efluente. Los SBR ofrecen muchas ventajas para aplicaciones en investigación: permiten mantener un control sobre las condiciones de funcionamiento, facilita la recolección de datos por medio de sensores de toma de muestras, permite ajustar y modificar la duración de las diferentes etapas de tratamiento.

El proceso de un reactor SBR consiste en cinco etapas o ciclos secuenciales: llenado, aireación (reacción y mezcla), sedimentación, vaciado y fase inactiva tal y como se presenta en la Tabla 2 . La configuración de cada ciclo depende de las características del afluente y los requisitos legales a cumplir (Muñoz y Ramos, 2014). En la etapa de llenado el objetivo es adicionar el substrato (agua residual) al reactor. En la etapa de aireación se generan condiciones de mezcla, en la que se realiza el consumo del substrato en condiciones ambientalmente controladas, estas condiciones pueden ser aerobias, anaerobias o anóxicas y dependen del objetivo del tratamiento. En esta etapa se espera garantizar la suspensión de los microorganismos y una mezcla entre el lodo y el agua residual, para que se lleven a cabo los procesos de degradación de materia orgánica y nitrificación. En la tercera etapa se suspende la aireación para comenzar el proceso de sedimentación, cuyo objetivo es la separación de sólidos para obtener un sobrenadante clarificado como efluente y prevenir que el manto de lodos flote debido a la acumulación

de gases. El proceso de sedimentación puede durar entre 0.5 y 1.5 horas. En esta etapa también se espera regular la concentración de lodos en el reactor con el fin de no afectar el rendimiento del sistema. En la cuarta etapa se procede al vaciado del reactor mediante la extracción del agua clarificada, el sistema de descarga debe ser diseñado y operado para evitar que el material flotante sea arrastrado. En la quinta etapa se da paso a la fase inactiva y solo se lleva a cabo cuando se tiene un sistema de tanques múltiples, su función es permitir el llenado completo del reactor antes de conectar otra unidad, es importante considerar que en esta etapa se debe omitir cuando solo se cuenta con una unidad (Cante y Martínez, 2017).

Tabla 2. Fases Funcionamiento SBR

Fase de funcionamiento		% de: Volumen Máximo	Duración del ciclo		Objetivo/ Operación
Llenado	El objetivo de esta fase es la adición de substrato (agua residual bruta o efluente primario) al reactor. Esta fase permite que el nivel del líquido en el depósito ascienda desde cerca del 25 por 100 de la capacidad (al final de la fase inactiva hasta el 100 por 100 de su capacidad. Este proceso suele llevar aproximadamente el 25 por 100 de la duración total del ciclo.	25 a 100	25		Aire On/Off Adición de Sustrato
Reacción	El propósito de esta fase es que se completen las reacciones iniciadas durante la fase de llenado. El licor mezclado se airea por un tiempo específico hasta alcanzar el efluente de diseño. Suele ocupar el 35 por 100 de la duración total del ciclo.	100	35		Aire On/Ciclo Tiempo de Reacción
Sedimentación	Se detiene la aireación y los sólidos se sedimentan en el fondo del tanque. El objetivo de esta fase es permitir la separación de sólidos, para conseguir un sobrenadante clarificado como efluente. En un reactor de este tipo, este proceso suele ser mucho más eficiente que un reactor de flujo continuo debido a que el contenido del reactor está completamente en reposo.	100	20		Aire Off Clarificación
Vaciado	El propósito de esta fase es la extracción del agua clarificada del reactor. Actualmente se emplean muchos métodos de decantación siendo los más empleados los vertederos flotantes o ajustables. El tiempo que se dedica al vaciado del reactor puede durar entre el 20 y el 50 por 100 de la duración total del ciclo (entre 15 minutos y 2 horas), siendo 45 minutos una duración típica.	100 a 35	15		Aire Off Vaciado del Efluente
Fase Inactiva	El objetivo de esta fase en un sistema de múltiples tanques es permitir que un reactor termine su fase de llenado antes de conectar a otra unidad. Puesto que no es una fase necesaria, en algunos casos se omite	35 a 25	5		Aire On/Off Purga de Fangos

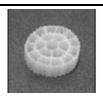
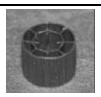
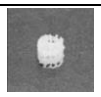
".

Fuente: Tomado de Dautan et al. (1988)

Muñoz y Ramos (2014) mencionan que, debido a la dificultad de tratar aguas residuales industriales, se han comenzado a emplear diversas configuraciones y secuencias en los sistemas de tratamiento, todas ellas dependen de la calidad del agua a tratar y las necesidades requeridas para cada caso. En la actualidad se viene empleando el sistema de biomasa adherida (biopelículas) en procesos de lodos activados modificados. Esta mejora tecnológica se presenta como una solución atractiva para el tratamiento de aguas residuales industriales, ya que no solo han demostrado un aumento en la eficiencia para la remoción de compuestos orgánicos y promover tasas de nitrificación, sino que también permiten obtener un sistema flexible, robusto y estable. La inclusión de un medio de soporte en los reactores SBR no solo favorece el crecimiento microbiano, debido a la retención de la biomasa nitrificante que reducen los tiempos de retención hidráulica y la edad de lodos, sino que mejora la eficiencia de remoción de materia orgánica y promueve las tasas de nitrificación, mejorando a su vez la sedimentabilidad del lodo. El sistema SBR con biopelícula adherida ofrecen ventajas como: aumento en cargas volumétricas, ahorro de espacio y energía, mayor concentración de biomasa, mayor resistencia a sustancias toxicas, operación flexible y de alto rendimiento, disminución de problemas de lodos voluminosos y menor producción de lodo. Inicialmente fueron empleados procesos de lecho fijo. Sin embargo, el atascamiento del lecho por crecimiento excesivo de biomasa comenzó a generar problemas operacionales, requiriendo aumentar la periodicidad de limpieza del medio. Estos inconvenientes llevaron a la necesidad de buscar procesos simples de biopelícula que mejoraran y facilitaran el proceso de tratamiento, tal como los procesos de **lecho móvil** (Zalakain & Manterola, 2011). De acuerdo con Tomaszek & Grabas (1998), el desarrollo e investigación original de reactores de lecho móvil con soporte de plástico se llevó a cabo a mediados de la década de 1980, en la Universidad de Ciencia y Tecnología de Trondheim, Noruega, con el objetivo de reducir las descargas puntuales de nitrógeno al norte del mar. Posteriormente gracias a esta investigación se desarrolló la tecnología de biopelícula de medio móvil. La cual fue patentada y comercializada en 1989 mediante un acuerdo con *Kaldnes* (Tønsberg, Noruega), creando la filial *Kaldnes Miljøteknolgias*. En 1994 la compañía británica *Anglian Water Services LTD* compro la filial e introdujo la tecnología en el mercado global.

El reactor biológico de medio móvil se basa en que dentro del reactor se promueve el desarrollo de una biopelícula especializada orientada hacia un objetivo de tratamiento basado en las condiciones del reactor. De acuerdo con Romero (2015), el medio móvil también conocido como portador de biomasas (*Biomass Carrier*) está constituido por materiales como piedras, plástico, bloques cerámicos, espumas, mejillones y conchas de ostras, granitos y bambú. Lewandowski & Boltz, (2011) menciona que esta tecnología se ha aplicado y probado con éxito a nivel mundial en varias plantas industriales y municipales, por lo que se han desarrollado diferentes medios de soporte utilizando diferentes geometrías, materiales y técnicas de fabricación (Ver Tabla 3), en su mayoría del tipo *Kaldnes*.

Tabla 3. Soportes Plástico de Biomasa

Fabricante	Nombre	Área Superficie Especifica* Peso, gravedad	Dimensión medio (Profundidad, Diámetro)	Fotografía Medio
Veolia, Inc.	*AnoxKaldnes™ K1*	500 m^2 /m^3 145 kg/m^3 0.96-0.98	7.2 mm; 9.1 mm	
	AnoxKaldnes™ K3	500 m^2 /m^3 95 kg/m^3 0.96-0.98	10 mm; 25 mm	
	AnoxKaldnes™ biofilm chip (M)	1200 m^2 /m^3 234 kg/m^3 0.96-1.02	2.2 mm; 45 mm	
	AnoxKaldnes™ biofilm chip (P)	900 m^2 /m^3 173 kg/m^3 0.96-1.02	3 mm; 45 mm	
Infilco Degremont, Inc.	*ActiveCell™ 450*	450 m^2 /m^3 134 kg/m^3 0.96	15 mm; 22mm	
	ActiveCell™ 515	515 m^2 /m^3 144 kg/m^3 0.96	15 mm; 22 mm	
Siemens Water Technologies Corp.	ABC4™	600 m^2 /m^3 150 kg/m^3 0.94-0.96	14 mm; 14 mm	
	ABC5™	660 m^2 /m^3 150 kg/m^3 0.94-0.02	12 mm; 12 mm	
Entex Technologies, Inc.	Bioportz™	589 m2 /m3	14 mm x 18 mm	

* Reportado por el fabricante

Fuente: Tomado de Lewandowski & Boltz, (2011)

De acuerdo con *Zenit Technologies* (2014) la eficacia del rendimiento de un portador depende del medio que brinde mayor superficie activa protegida y que garantice que los microorganismos puedan vivir y reproducirse en éste. Romero (2015) presenta los requisitos que debe tener un medio de soporte, los cuales se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Requisitos que debe tener un medio de soporte

Requisitos	Objetivos
Ser estructuralmente resistente	Soportar el propio peso, adicionado al peso de los sólidos biológicos adheridos a su superficie
Ser biológica y químicamente inerte	Evitar reacciones entre el lecho y los microorganismos.
Ser suficientemente liviano	Evitar la necesidad de estructuras complejas
Poseer superficie específica y porosidad elevada	Permitir la adherencia de microorganismos y reducir la posibilidad de colmatación
Permitir la rápida proliferación de microorganismo	Disminuir el tiempo de arranque del reactor

Requisitos	Objetivos
Precio Reducido	Viabilizar económicamente el proceso

Fuente: Tomado de Romero (2015)

Así mismo y de acuerdo con *Hydromantis (2019)* en un reactor de biomasa adherida de medio móvil un parámetro de gran importancia es la densidad de la biopelícula. De acuerdo con Manga et al (2001) la densidad de la biopelícula interviene en las ecuaciones de cálculo de las variables hidrodinámicas. Es una variable difícilmente manipulable y que para soportes inorgánicos naturales depende de la naturaleza del material. Eguia E., (1991) menciona que la densidad de la biopelícula depende del espesor del medio, del tipo de sustrato y al desarrollo selectivo o a las variaciones de población microbiana dentro de la biopelícula. Los valores extremos de las densidades oscilan entre los 10 a 130 kg/m^3 en biopelículas mixtas en estado estacionario. De acuerdo con Molina J., (2015) la densidad de la biopelícula en un soporte de polipropileno para aguas residuales sintéticas puede ser del orden de 80 a 105 kg/m^3.

Con base a lo anterior, y considerando la facilidad para acceder y contar con las cantidades requeridas para llevar a cabo la prueba piloto del presente estudio se cuenta con dos opciones de medios a utilizar: el primero conocido como ***MUTAG BIOCHIP®,*** un portador de biopelícula de alto rendimiento con una gran superficie porosa donde los microorganismos pueden asentarse y mantener un contacto directo y permanente con el agua residual (ver Ilustración 1). Este medio es desarrollado por la empresa alemana *Multi Unwwelttechnologies*, distribuido en España por *Zenit Technologies SL* y en Colombia por R&R Ingeniería, estos últimos facilitaron 1 kilogramo de dicho material para la parte experimental del presente estudio.

De acuerdo con las fichas técnicas de *Zenit Technologies*, el medio está fabricado en polietileno virgen, rellenos inorgánicos, pequeñas cantidades de monoéster de ácido glicérico, ácido cítrico y carbonato sódico, siendo totalmente respetuoso con el medio ambiente; proporciona una superficie activa de 3000 m^2/m^3 para la inmovilización de los microrganismos, lo que no solo ayuda a generar mayores tasas de biodegradación, sino que ha demostrado que puede reducir un 48% del volumen requerido en plantas convencionales.

De acuerdo con *APCO ATLANTIC S.L (*2014) las pruebas comparativas realizadas entre el *MUTAG BIOCHIP*® y otros medios portantes han demostrado que el primero requiere hasta un 90% menos de volumen de medio a utilizar para igualar las tasas de remoción, de esta manera indica que en el tratamiento es más importante el área de superficie activa especifica disponible y no la cantidad volumétrica del medio portante a utilizar.

Ilustración 1. *MUTAG BIOCHIP*®
Fuente: Tomado de *Zenit Technologies* (2014)

Zenit Technologies (2014) menciona que el *MUTAG BIOCHIP*® fue diseñado específicamente para la biodegradación de carbono y la eliminación de nitrógeno en sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas ya sea por sistema aerobio o anaerobio, demostrando tasas de rendimiento extremadamente altas, hasta 10 veces más que la conseguidas con soportes convencionales para la remoción de materia orgánica y nitrificación – desnitrificación y una estabilidad fiable del proceso.

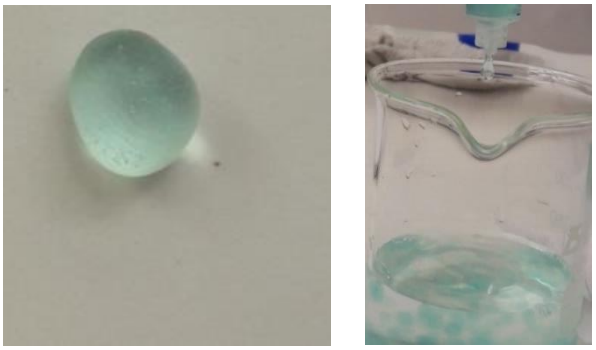
Gracias a su forma parabólica y a las turbulencias causadas por la aireación y/o mezcla, el medio se mueve con facilidad y por completo en toda la superficie del reactor. Así mismo y debido a su delgada capa de *biofilm* (espesor aprox 1 mm) garantiza una mayor transferencia de oxígeno y del substrato indispensable para el metabolismo de los microorganismos;El *MUTAG BIOCHIP*® ha demostrado una gran eficiencia en el tratamiento de aguas residuales industriales como la pulpa y papel, alimenticia, química, petrolera, etc.

Dentro de las ventajas de este soporte, *Zenit Technologies* (2014) se han considerado: los bajos costos en la construcción de los reactores, facilidad en la operación gracias a su sistema autolimpiante (Debido a que por su espesor y a la fina película de *biofilm* no se genera la obstrucción del medio), facilidad para los procesos de ampliación y optimización de sistemas de tratamiento, requerimiento de menores consumos de energía producidas por los procesos de agitación reduciendo a la vez los costos de operación.

El segundo es el **Alginato de Calcio**, su producción comercial comenzó en 1929 por la compañía Kelco en California, a través del uso de las algas marinas pardas de la familia de las “feofíceas” como materia prima. De acuerdo con Lupo Pasin et al. (2012) el alginato es un polisacárido natural insoluble en agua e hidrocoloide (capacidad de hidratarse o absorber agua) y conformado por dos monómeros en su estructura, el ácido α-L-gulurónico (G) y el ácido β-D-manurónico (M). Una de las principales características del alginato es su naturaleza aniónica (presenta numerosos grupos químicos cargados negativamente) que en concentraciones superiores a 0.5% permite formar geles de tipo químico en presencia de cationes divalentes como calcio, estroncio y bario. Estos geles son independientes de la temperatura lo que lleva a una mayor rigidez y porosidad, tienen la

habilidad de formar películas, ser agentes estabilizantes, gelificantes y espesantes que al ser disueltos en agua generan un aumento en la viscosidad de la solución en la que disuelven, además poseen la capacidad para absorber grandes cantidades de agua (Moreno y Prieto, 2018). De acuerdo con Pérez y Rifi (2011), el calcio es el ión divalente de mayor empleo para la formación de geles de alginato debido a que sus sales son de fácil disponibilidad, no tóxicas y económicas, demostrando que es un buen absorbente. Para obtener un gel de características apropiadas, los iones de calcio deben ser liberados lentamente en la solución de alginato.

La preparación de las perlas de alginato de calcio se realiza en laboratorio, para ello se requiere Alginato de Sodio y Cloruro de Calcio, es importante destacar que este último tiene restringida su venta en Colombia hasta 5 kilos al mes ya que actualmente es utilizado para el procesamiento de sustancias ilícitas o drogas alucinógenas (ver Fotografía 1). Para ver detalle de la preparación ver el anexo A.



Fotografía 1. Fabricación *Alginato de Calcio*
Fuente: Elaboración Propia

Moreno y Prieto (2018) mencionan que, en los últimos años, el alginato de calcio ha sido estudiado en diferentes campos de aplicación tales como: remoción de metales pesados, biomineralización de carbonato cálcico, sistemas para la liberación de fármacos, tratamiento de aguas, entre otros. Con el fin de evaluar la inmovilización de microorganismos para el tratamiento de aguas residuales en esferas de alginato de calcio, Hernández, S (2011) menciona que, con ayuda de un modelo hipotético, se logró observar la matriz de la perla mediante un microscopio electrónico. Después de 48 horas de iniciado el análisis, encontró que las paredes externas de las perlas comienzan a deteriorarse, dejando expuestas grandes cavidades en la periferia. En donde no solo se liberan gran cantidad de microorganismos, sino que se genera una afectación sobre la biomasa adherida.

Hernández, S (2011) menciona que el deterioro de la perla se debe al incremento de los microorganismos dentro de ésta, que comienzan a formar protuberancias u abultamientos en su superficie. Con el tiempo estos abultamientos llegan a fracturarse formando poros en forma de cráter. Este proceso de degradación gradual de la esfera es un proceso que

de acuerdo con Hernández(2001) ha sido reportado por varios autores y que puede originarse por dos factores: El primero es la sustitución de iones de calcio que componen la matriz de inmovilización en soluciones que contengan fósforo o sodio. Lo que puede ocasionar una disrupción y disolución de las esferas de alginato. El segundo factor depende del tipo de bacterias presentes en el agua residual a tratar, ya que existen bacterias con capacidad de degradar el alginato lo que contribuiría al deterioro de la esfera.

En la Tabla 5 se presentan las características de los dos medios a utilizar en el proyecto.

Tabla 5. Características de los materiales de soporte a emplear

Características	***MUTAG BIOCHIP*®**	**Alginato de Calcio**
Diámetro (mm)	22	5
Área Superficial especifica (m2/m3)	3000	SR*
Área superficial del medio cm^2	8.29	0.79
Espesor de la biopelícula m	0.001**	SR*
Densidad del medio	170 gr/L	0.838 gr/ml***
Peso promedio por unidad de cada medio gr	0.216***	0.13

*Sin registros

** Valor máximo espesor biopelícula de acuerdo con *Zenit Technologies* (2014)

*** Valor calculado en el laboratorio

Fuente: Adoptado de *Zenit Technologies* (2014) y Elaboración Propia

3. Marco Metodológico

Dentro de este capítulo se presentan las metodologías utilizadas para desarrollar cada uno de los objetivos planteados en este trabajo de grado, para ver resultados ir al numeral 4 y 5 respectivamente.

Para el desarrollo del objetivo 1 se explica la metodología utilizada para el desarrollo de las pruebas físicas y microbiológicas, así como para la matriz de evaluación.

Para el desarrollo del objetivo 2 se presenta la metodología para llevar a cabo la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua a tratar, el diseño hidráulico del reactor biológico de biomasa suspendida y biomasa adherida con medio móvil y por último la evaluación matemática de estos dos reactores.

3.1 Comparación de medios móviles para un reactor biológico de medio móvil con biomasa adherida

Como se indico en el marco de referencia los dos medios de soporte a utilizar son: *MUTAG BIOCHIP*® y el Alginato de Calcio. Para llevar a cabo la comparación de los dos medios móviles a utilizar inicialmente se realizaron pruebas físicas y microbiológicas que tuvieron como objetivo la evaluación de los dos medios de soporte : *MUTAG BIOCHIP*® y el Alginato de Calcio mediante una matriz de evaluación con los aspectos técnicos, económicos y ambientales. Para la determinación de la factibilidad se utilizó la metodología de procesos analíticos jerárquicos (AHP por sus siglas en inglés), y la metodología descrita por Noyola, Morgan- Sagastume y Güereca (2013).

3.1.1 Prueba Físicas y Microbiológica de los medios móviles

Dentro de las pruebas físicas se evaluaron dos aspectos: la sumergencia y la velocidad de agitación del medio. Es importante destacar que la velocidad deseable es aquella que por un lado no permite la sedimentación, y por otro lado no genera un movimiento brusco y la agitación fuerte del medio. Este último con el fin de evitar el desprendimiento de la biopelícula. Por su parte, la prueba microbiológica tenía como objetivo evaluar la capacidad de adherencia de microorganismos en cada uno de los dos medios.

- **3.1.1.1 Prueba Física de los medios móviles**

La sumergencia del medio se evaluó mediante inspección visual. Mientras que para la velocidad de agitación del medio se utilizó el equipo de jarras. De esta manera se identificó mediante inspección visual el rango de velocidad de agitación óptimo para cada uno de los medios. Para ver resultados ver numeral 4.1.1 del documento

- **3.1.1.2 Prueba microbiológica de los medios móviles**

De acuerdo con Dueñas y Valle (2013) para realizar la evaluación microbiológica existen dos tipos de métodos. El primero conocido como método directo se basa en la medida de la evolución de partículas o número de células vivas (por ejemplo, colonias) a través de contadores. Los segundos son los indirectos que se basan en la medida de algún parámetro del cultivo que permite deducir información sobre el crecimiento de los microorganismos.

Para este estudio, se utilizó el método indirecto conocido como la escala de McFarland. Este método es utilizado para estimar el número de unidades de colonias por mililitro basados en la turbidez mediante la ayuda de una curva estándar construida a partir de 11 patrones (desde 0.5 a 10) cada uno de los cuales tiene una turbidez comparable a la de una suspensión bacteriana con una densidad determinada. Su finalidad es establecer una relación entre una precipitación química y una suspensión bacteriana para posteriormente realizar un recuento indirecto de bacterias (Practica de laboratorio de Microbiología, 2017). Los patrones son creados al mezclar soluciones de cloruro de bario al 1% con ácido sulfúrico al 1% en volúmenes específicos (Wiley-Blackwell, 2004), para mayor detalle de cómo preparar la escala de McFarland Ver Anexo C.

Para el presente estudio se construyó una curva de calibración conformada por 3 patrones desde 0.5 a 2, tal y como se aprecia en la Tabla 7.

Tabla 6. Escala McFarland

No.	$BaCl_2$ (ml)	H_2SO_4 (ml)	Vf (ml)	No. Células
0.5	0.05	9.95	10	1.5×10^8
1	0.1	9.9	10	3×10^8
2	0.2	9.8	10	6×10^8

Fuente: Dueñas y Valle (2013)

Después, de contar con los 3 patrones utilizados en la escala de McFarland se procede a medir la absorbancia a 600 nm con ayuda de un espectrofotómetro. Posteriormente y con cada uno de estos datos, se calcula la curva de calibración que genera una ecuación lineal $Y = MX + B$, donde; M corresponde a la pendiente, X es la concentración desconocida (concentración de células por mililitro) y B es el valor del intercepto en el eje Y.

Adicionalmente, es importante que el valor de R^2 sea lo más cercano a 1, debido a la linealidad de los datos.

Luego, se procedió a tomar y depositar en un tubo falcón con solución salina al 0.85% cada uno de los medios a evaluar, *MUTAG BIOCHIP*® Y Alginato de Calcio. Es importante destacar que se utilizó la solución salina ya que es el blanco utilizado para medir los datos de absorbancia de los patrones preparados para la escala de Mc Farland. Posteriormente cada uno de los tubos Falcon fueron colocados en una centrifuga durante 20 minutos a 1800 RPM. De esta manera se genera el desprendimiento de la biopelícula o biomasa adherida a cada medio.

Luego de lograr el desprendimiento de la biopelícula adherida al medio se procedió a realizar la medición de la absorbancia a 600 nm de longitud de onda para cada uno de los tubos falcón. Es importante destacar que la medición se realiza a 600 nm de longitud de onda, ya que los valores de absorbancia para la escala de McFarland fueron medidas en esta misma longitud de onda. Finalmente, para estimar la densidad bacteriana de la suspensión se realizó una comparación de la medición de absorbancia de cada uno de los tubos falcón con la medición de absorbancia de los patrones de la escala de McFarland. Después de terminar este procedimiento de comparación, se procedió a calcular el número de células para cada uno de los medios. Para ver resultados ver numeral 4.1.2 del documento.

3.1.2 Matriz Evaluación del Medio

Después de realizar las pruebas físicas y microbiológicas se procedió a realizar una matriz de evaluación de los dos medios desde la parte técnica, económica y ambiental. En la Tabla 7 se presentan los parámetros y aspectos que se contemplaron en la evaluación

Tabla 7. Criterios seleccionados para la matriz de evaluación

PARÁMETRO	ASPECTO A EVALUAR
Factibilidad técnica	Requiere sistema de adaptación dentro del reactor para el medio
	Capacidad de adherencia microbiológica. Mayor relación área superficial / volumen y permeabilidad
	Resistencia del material
	Dificultad para la Fabricación y dosificación del medio
	Disponibilidad de materiales
Sostenibilidad económica	Costos Fabricación y suministro del medio
	Costos de Reposición de material
	Costos de Logística tratamiento y disposición final
Sostenibilidad ambiental	Generación de Residuos
	Biodegradabilidad del medio

Fuente: Elaboración propia

Para llevar a cabo la matriz de evaluación inicialmente se utilizó la metodología AHP. De acuerdo con Contreras, E. (2009) este es un método de descomposición de estructuras

complejas en sus componentes, ordenando los componentes en una estructura jerárquica, donde se obtienen valores numéricos para los juicios de preferencia, y finalmente determina que variable tiene la más alta prioridad. Para determinar la mejor decisión, Contreras, E. (2009) menciona que el método AHP requiere:

- Definir el problema, si existen al menos dos criterios en conflicto y dos alternativas de solución puede considerarse como un problema multicriterio.
- Estructura el problema de decisión en un modelo de Jerarquía (Jerarquizar)
- Comparación pareada de los objetivos y alternativas factibles (Priorizar)
- Evaluación de los elementos mediante la asignación de “pesos”
- Datos que sirvan para obtener el mejor rango de posibles soluciones (Analizar y Sintetizar)

Con base a lo anterior, después de definir y estructurar el problema de decisión, se realiza el cálculo de la prioridad mediante la comparación pareada. Para comparar los elementos inicialmente se construye una matriz en donde se analiza la importancia de cada uno de los parámetros y aspectos a evaluar respecto a los demás. Para ello de utiliza la Escala de comparaciones a pares – Escala de Satty (ver Tabla 8) donde 1 es de igual importancia y 5 de importancia extrema.

Tabla 8. Escala para comparaciones a Pares – Escala de Saaty

INTENSIDAD	**DEFINICION**	**EXPLICACIÓN**
1	De igual Importancia	Dos elementos contribuyen de igual manera al objetivo
2	Moderadamente más importante	El juicio y experiencia favorecen levemente más a un elemento sobre otro
3	Fuertemente más importante un elemento que el otro	El juicio y experiencia favorecen fuertemente más a un elemento sobre otro
4	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro	Un elemento predomina sobre otro, su predominancia se probó en la practica
5	Importancia extrema de un elemento frente al otro	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra es absoluta y clara

Fuente: Adaptado y modificado de Tabares et al, (2018)

A continuación, se presenta un ejemplo de cómo se realiza la matriz de comparación (ver Tabla 9).

Tabla 9. Matriz de comparación

CRITERIO	5	4	3	2	1	2	3	4	5	CRITERIO
Factibilidad Técnica	X									Factibilidad Económica
Factibilidad Técnica	X									Factibilidad Ambiental
Factibilidad Ambiental					X					Factibilidad Económica

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 9 se evidencia que la factibilidad técnica tiene una importancia extrema con respecto a la factibilidad económica y ambiental. Así mismo, se observa que la factibilidad ambiental y económica tiene la misma importancia.

Posteriormente y después de contar con esta matriz para cada uno de los criterios y aspectos a evaluar, se procede a realizar una matriz pareada, en donde la calificación se realiza horizontalmente. Para ello se tiene en cuenta que un elemento respecto a si mismo tiene igual importancia, por lo que se le asigna el valor de "1". Para las demás casillas se debe tener un orden coherente, tal y como se presenta a continuación:

	Matriz de comparaciones				Ponderaciones
	F. Técnica	F. Económica	F. Ambiental		
F. Técnica	1	5	5		0.71
F. Económica	1/5	1	1	⇒	0.14
F. Ambiental	1/5	1	1		0.14
Total	1.4	7	7		

Después de completar la matriz el problema se transforma en un problema de vectores y valores propios, con lo cual se obtienen los porcentajes de las prioridades globales o importancia de los criterios (designación de pesos). Luego de esto, se debe realizar un análisis de consistencia con el fin de garantizar que los porcentajes o importancia de los criterios no están sesgados. De acuerdo con Contreras, E. (2009) la proporción de consistencia no debe superar el 10%.

El índice de consistencia se calcula de la siguiente manera:

$$IC = \frac{\lambda Max - n}{n - 1}$$

Donde;
n: es el tamaño de la matriz
λ: Máximo valor propio que representa una medida de la consistencia de los juicios

De esta manera, y después de realizar esta metodología se calcula el peso que se le asignaría a cada uno de los parámetros y aspectos a evaluar, considerando el nivel de importancia definida para cada ítem.

Posteriormente y con el fin de desarrollar la matriz de decisión se siguió la metodología descrita en Noyola, Morgan- Sagastume y Güereca (2013), la cual tiene como objetivo

evaluar la matriz para llevar a cabo la selección del medio, evaluando los criterios presentados en la Tabla 7.

Para llevar a cabo esta evaluación se utilizó un rango de 0 a 5, siendo 0 “no aplica”, 1 “deficiente”, 3 “adecuado” y 5 “cuando el proceso cumpla con el aspecto evaluado en forma muy buena”. De esta manera si el aspecto es deficiente se le asigna un puntaje de 1. Es importante tener en cuenta, que, para definir el puntaje de cada uno de los aspectos a evaluar en los dos medios, fue necesario considerar que cualquiera de los ítems puede tener un puntaje máximo de 5 y se empleó la Ecuación 1.

$$Puntos = \frac{Puntaje\ recibido * Peso\ del\ aspecto\ a\ evaluar}{Puntaje\ máximo\ del\ aspecto}$$

Ecuación 1

Esta ecuación se empleó para cada uno de los parámetros y aspectos a evaluar. Al final de cada parámetro se localiza una fila donde se aprecia el puntaje total obtenido por medio para cada uno de los tres parámetros a evaluar y en la última fila el puntaje general obtenido considerando los tres parámetros. Finalmente, para llevar a cabo la selección del medio se eligió el medio que obtuvo el mayor puntaje general. Para ver resultados ver numeral 4.2 del documento

3.2 Evaluar matemáticamente a través del modelo GPS-X el desempeño de un reactor biológico de biomasa suspendida y adherida para tratar las aguas residuales de una estación de servicio.

Para llevar a cabo la evaluación matemática inicialmente se realizó la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua residual proveniente de la estación de servicio. Posteriormente y partiendo de estos resultados se llevó a cabo el diseño hidráulico del reactor, para después proceder con su construcción. Después de contar con la construcción del reactor, se realizó el proceso de arranque y puesta en marcha. Sin embargo, y debido a la emergencia sanitaria por la pandemia del COVID-19 no fue posible continuar con la ejecución de este experimento. Por lo que se reemplazó la evaluación física-experimental del reactor por una simulación matemática del reactor biológico de biomasa suspendida y del reactor biológico de medio móvil con biomasa adherida utilizando el software GPS-X.

3.2.1 Caracterización fisicoquímica y microbiología del agua a tratar

Dentro de la caracterización fisicoquímica del agua residual se evaluaron parámetros tales como grasas y aceites, DQO, SST, SSV y pH. Estos análisis se desarrollaron con la ayuda de la Guía de Laboratorio de la asignatura Calidad del agua (Bustos M., 2019). Es importante destacar que debido a la disponibilidad de materiales y tiempos requeridos para realizar los análisis de laboratorio solo fue posible analizar el parámetro de DBO_5 en la primera muestra, con la cual se calculó la relación entre DBO_5 y DQO. La relación obtenida se utilizó en los siguientes muestreos para obtener un valor de DBO_5 partiendo del valor medido de DQO.

Por su parte, con el fin de conocer los microorganismos presentes en el agua residual, se llevó a cabo una caracterización microbiológica inicial, utilizando el método de tinción de gram. La técnica es utilizada tanto para referirse a la morfología celular bacteriana como para realizar una primera aproximación a la diferenciación bacteriana. Para esto último se consideran dos tipos de bacterias: Bacterias Gram positivas con color morado y azul, y las Bacterias Gram negativas con color rojo o rosado (EcuRed, 2019).

Para realizar esta técnica inicialmente se requiere hacer la siembra de la muestra en placa de Agar Standard Plate Count (SPC) y llevarla a la incubadora a 37ºC por 24 horas. Después de 24 horas se toma una lámina portaobjetos y se coloca una parte de la bacteria sembrada sobre una gota de agua destilada, realizando una suspensión (mezcla entre el agua y la bacteria).

Después se realiza la técnica de coloración de gram. Para ello se aplica sobre la muestra previamente secada, la solución cristal violeta. Se deja actuar por un minuto y se lava con agua destilada, en principio la solución siempre va a tener un color morado. Luego se aplica Lugol, se deja actuar por un minuto y se lava con agua destilada. Posteriormente se aplica alcohol acetona, el cual se deja actuar por 30 segundos y se lava con agua destilada. Después, se aplica Fucsina básica, la cual se deja actuar por 15 segundos y se lava con agua destilada. Finalmente, se aplica una gota de aceite de inmersión y se observa en el microscopio a 100X (EcuRed, 2019).

Para ver resultados tanto de la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua residual a tratar, ver numeral 5.1 del documento

3.2.2 Diseño hidráulico del reactor biológico aerobio de biomasa suspendida y biomasa adherida de medio móvil

Con el fin de profundizar en los criterios de diseño y operación de reactores de sistemas biológicos de biomasa suspendida y biomasa adherida de medio móvil, se llevó a cabo una recopilación de estudios que pueden detallarse en el Anexo D. En la Tabla 10 se presenta un resumen de los criterios que fueron utilizados en algunos de estos estudios y que fueron base para realizar el diseño hidráulico del reactor de biomasa adherida de medio móvil.

Tabla 10. Resumen Parámetros de diseño y control de los estudios

		Estudio 1 Jahren et al, (2001).	**Estudio 2 Kim et al., (2003)**	**Estudio 3 Parra, (2006)**	**Estudio 4 Flores, (2007)**	**Estudio 6 Nava et al., (2014).**	**Estudio 7 Nava, (2014).**	**Estudio 9 Bassin et al (2016).**	**Estudio 10 Muñoz, et al., (2016).**	**Estudio 11 García y Gutiérrez, (2018).**	**Estudio 12 Gonzales y Giraldo, (2019).**	**Estudio 13 Sanabria. y Pacheco, (2019).**
Tipo medio		*Kaldnes*	Arcilla	Polietileno	*Kaldnes* y Espuma	*Kaldnes*	*Kaldnes*	*Kaldnes y MUTAG*	PET	Biopack	*MUTAG*	Small Boss
Volumen medio	%	58	27	25 -47	40 y 60	60	60	50 y 8.3	13.79	50	15	50
COS	g DBO/m2-d				4.8							Entre 7.5 y 25
COS	g DQO/m2-d					1.56 -1.8	1.56 -1.8	Entre 3.2 y 12.8				
COV	kg/m3-d								Entre 4.67 y 7.68			
COV	kg DQO/m3-d	2.3 a 3.8		29.9 - 30.6		0.44 - 0.52	0.47 - 0.54	Entre 0.8 y 3.2				
TRH	HR	30 a 14	24	21.6 - 48	12	24	24	Entre 3 y 12	Entre 5.14 y 8.01	20		
A SE	m2/m3	490	350 a 700	2300	82	300	300	500 y 3000	650	950	3000	1000
OD	mg/L	2 -3.		8 -9.	2-3.		3.4 -3.6	4 - 5.	2	4.51	2-3.	
SSV/SST		0.78-0.91				0.9 -1	0.8 -0.85					
X SSLM	mg/L					450 -560				4160 - 3590		1500
F/M									0.4-0.7	0.72		

Fuente: elaboración Propia

De acuerdo con la Tabla 10 se evidencia que todos los estudios utilizan como volumen de medio un valor máximo de 60% del volumen del reactor. Lo cual coincide con lo recomendado por Sanabria y Pacheco (2019), quienes indican que no se debe llenar el tanque con más del 70% de medio de soporte para garantizar el movimiento del mismo en el reactor. Así mismo, se identifica que no existe una correlación entre los parámetros de carga orgánica superficial y volumétrica entre los diferentes estudios, que establezcan un lineamiento claro a seguir para la etapa de diseño de este tipo de reactores. En cuanto a los tiempos de detención hidráulica (TRH), se evidencia que la mayoría de los estudios inicialmente optaron por tiempos de retención altos superiores a 20 horas. Sin embargo, después del periodo de climatización, se consideró oportuno reducir estos tiempos de retención hasta 3 horas. Lo anterior, debido a que, a pesar de reducir los TRH en el reactor se mantenían los porcentajes de remoción y adecuada operación del sistema. Los niveles de OD y la relación SSV/SST se mantuvieron entre el rango de 2 a 5 mg/L y entre 0.78-1.00 respectivamente. Las relaciones F/M para dos estudios se mantuvieron entre 0.4 - 0.72

Por último, con ayuda de literatura especializada en reactores biológicos aerobios y la normatividad vigente relacionada con el proceso de lodos activados. En la Tabla 11 se observan los parámetros de diseño establecidos:

Tabla 11. Parámetros de diseño y operación de SBR

PARAMETRO	REFERENCIA					
	Metcalf & Eddy (1995)	Romero, (1999)	Crites & Tchobanoglo us, (2000)	Marín y Osés (2013)	Titulo E, (RAS 2000)	Art 193 (Res 330 de 2017)
Tiempo detención Hidráulica (hr)	15-50		12-50.	5-15.	12-50.	15-40.
Relación F/M (kg DBO_5 / kg SSVLM-d)	0.05-0.3	0.04- 0.1	0.04-0.1	0.05-0.1	0.02-0.3	0.5-1
Carga volumétrica (kg DBO_5/m^3-día)	0.08 - 0.24	0.1 -0.3	0.08- 0.24		0.1-0.2	0.1-0.3
X SSLM (mg/L)	1500 -5000	2000 -5000	2000-8000	1500-5000	1500-5000	2000-5000.
Relación SSVLM /SSLM	0.8					
Periodo de aireación		2 - 4.				
Edad lodos (d)	NA	10-30.	10-30.		NA	10-30.
Tasa Recirculación	NA	NA	NA	NA	NA	

Fuente: Elaboración Propia

Así mismo, se consideraron los parámetros de diseño para los diferentes procesos de lodos activados (ver Tabla 12).

Tabla 12. Parámetros de diseño Procesos de Lodos Activados

PROCESO	Relación F/M	COV	TRH	Edad Lodo	X SSLM
	Kg DBO_5/Kg SSLM-d	Kg $DBO_5/m^3/d$	Hr	Días	Kg/m^3
Aireación Extendida	0.05 - 0.25	< 0.4	> 18	12 - 30.	3-6
Convencional	0.2-0.5	0.3- 1.0	4 - 10	5 - 12	1.5 - 3
Completamente Mezclado	0.2 - 0.6	0.8 – 2.0	> 4	5 - 12	2.5 - 6
Estabilización por contacto					
Contacto	0.2 – 0.6	0.5 1.2	0.5 - 3	5 - 15	1 - 3
Estabilización	-	-	3 - 6	-	4 -10

Fuente: Adaptado de Balda, (2019).

Con información presentada en la Tabla 11 y Tabla 12 se procedió a realizar el diseño hidráulico del reactor biológico aerobio SBR de biomasa suspendida y biomasa adherida de medio móvil. Para el reactor biológico aerobio SBR de biomasa suspendida se seleccionó un proceso de lodos activados del tipo aireación extendida y un volumen de 25 Litros. Posteriormente se utilizó la metodología de Metcalf & Eddy (1995) para realizar el diseño hidráulico del reactor.

Por su parte, para el diseño del reactor biológico aerobio SBR de biomasa adherida de medio móvil se seleccionó un proceso de lodos activados del tipo completamente mezclado y se consideró el mismo rango de DBO_5 y el mismo caudal de diseño utilizado en el reactor biológico SBR de biomasa suspendida. Así mismo, y de acuerdo con la revisión literaria, se evidenció que uno de los parámetros de mayor importancia para el diseño de estos reactores es el área superficial y el área de la superficie de contacto del medio.

De acuerdo con Arévalo, Ramón y Ramón (2015), en los tratamientos biológicos es necesario conocer las acciones metabólicas y los mecanismos con que operan las bacterias para la remoción de sustrato, el crecimiento de la biomasa y el consumo de oxígeno que se origina en el tratamiento. Estas acciones se vuelven fundamentales para el proceso ya que tratan de encontrar los parámetros que gobiernan o define las tasas de cambio que importan en el tratamiento, específicamente la tasa de incremento de la biomasa y la velocidad de remoción del sustrato. Por lo tanto, para realizar los cálculos teóricos de la cinética del reactor SBR tanto de biomasa suspendida como biomasa adherida de medio móvil se siguió la metodología establecida por Romero (1999), en la cual se utilizan algunos parámetros utilizados en el diseño del reactor tales como: caudal de diseño, concentración de solidos suspendidos en el licor de mezcla, volumen útil, relación F/M, coeficientes cinéticos y tiempo de retención hidráulica.

Para ver resultados del diseño hidráulico del reactor de biomasa suspendida y biomasa adherida de medio móvil, ver numeral 5.2 del documento

3.2.3 Evaluación matemática del reactor Biológico de cargas secuenciales (SBR) con biomasa suspendida y biomasa adherida de medio móvil

En la actualidad existen varios tipos de aplicaciones que van desde aplicaciones de formación académica hasta herramientas de modelación y simulación orientados a ambientes profesionales. La modelación los procesos de tratamiento tiene como objetivo realizar un análisis del funcionamiento del sistema y optimizar procesos. Metcalf y Eddy (1995) mencionan que los modelos de sistemas de tratamiento se expresan a través de balances de masa donde se tiene en cuenta la cinética de reacción y la hidrodinámica. En la Tabla 13 se presentan algunos de los simuladores más utilizados en la modelación de

sistemas biológicos para predecir el comportamiento del sistema y de algunos parámetros de calidad partiendo del afluente del sistema de tratamiento.

Tabla 13. Simuladores existentes para diseño y simulación de PTAR

Simulador	Creador	Origen
ASIM	EAWAG	Suiza
DESASS	Calagua group- UPV	España
BIOWIN	Envirosim Associates L.d	Canadá
EFOR	DHI.Inc	Dinamarca
GPS-X	Hydromantis Inc	Canadá
SIMBA	IFAK-System Gmbh	Alemania
STOAT	WRc Group	Reino Unido
WEST	Hemmin N.V	Bélgica
EDAR 1.0	CEIT-Cadagua	España
AQUASIM	EAWAG	Suiza

Fuente: Sánchez, Mejía Y Amorocho (2015)

Con base a la tabla anterior, y considerando la facilidad para acceder al software, se seleccionó el simulador GPS-X (*General Purpose Simulator*). Este software fue desarrollado por la empresa consultora canadiense *Hydromantis, Inc*. fundada en 1985, la primera versión data de 1991. De acuerdo con Sabri et al (2017), este software ha sido ampliamente utilizado en todo el mundo por empresas consultoras, municipios entre otros, y se considera como una herramienta importante en la gestión interactiva. En la actualidad se puede descargar de Internet la versión completa (que puede funcionar como demo) así como también se pueden encontrar en la página de YouTube de *Hydromantis*, tutoriales y webinars sobre la aplicación y uso del software.

De acuerdo con la guía tutorial de H*ydromantis* (2019), GPS-X es una herramienta de software que permite la modelación, simulación, optimización y gestión matemática de plantas de tratamiento de agua residual. El software utiliza una interfaz simple que permite arrastrar, soltar y realizar una selección completa de procesos unitarios para que el usuario desarrolle fácilmente un modelo de planta donde ingrese datos de caracterización del agua y parámetros físicos y operacionales, y ejecute simulaciones. Con el fin de conocer y familiarizarse con el software se tuvo en cuenta la guía paso a paso para aprender el software y la guía del usuario. Estas guías hacen parte del software y se pueden visualizar en la pestaña de ayuda.

Después de familiarizarse con la interfaz gráfica, revisar los tutoriales del modelo y detallar más su funcionamiento se realizó la construcción de las simulaciones de los dos modelos de sistemas de tratamiento. El primero corresponde al reactor biológico SBR con biomasa suspendida (Proceso de crecimiento suspendido – Reactor SBR), y el segundo corresponde al reactor biológico de biomasa adherida de medio móvil (Proceso de crecimiento adherido – Reactor hibrido película fija o biomasa suspendida). A continuación, se presenta el procedimiento utilizado para la construcción de los dos modelos, sin embargo, para mayor detalle ver anexo G.

Paso 1: Iniciar la aplicación, selección del modelo y ajuste de temperatura

Después de iniciar GPS-X, Se despliega la ventana principal donde se aprecian los elementos básicos del software tales como: barra de título, barra de menú, barra de herramientas, tablero de dibujo, objetos del modelo de proceso y botón de alternancia para modelado simulado. Luego se realiza la selección del modelo mantis 2 lib. De acuerdo con Hydromantis (2019), Mantis2 es un modelo completo de planta bioquímica integral que permite al usuario analizar y evaluar diferentes configuraciones de sistemas de tratamiento de agua residual para la eliminación de DBO_5, DQO, fósforo y nitrógeno, y otros como son la recuperación de recursos tales como biogás. Posteriormente se procede a realizar el ajuste de la temperatura del agua

Paso 2: Construcción del sistema de tratamiento a simular

Los dos modelos están conformados por tres objetos: El primer modelo está conformado por un afluente, un proceso de crecimiento suspendido – Reactor Secuencial de cochadas SBR y emisario final. El segundo modelo está conformado por un afluente, un proceso de crecimiento adherido – Reactor hibrido (película fija / biomasa suspendida MBBR) y emisario final. Posteriormente, se especifica la conectividad entre los objetos.

Paso 3: Cambio de los atributos y propiedades de cada objeto

De acuerdo con *Hydromantis* (2019), cada uno de los objetos del modelo tiene una serie de atributos o propiedades. Al momento que se ubica un objeto en la interfase gráfica, el objeto recibe unos atributos y un modelo predeterminado por el software. Estos atributos deben verificarse y cambiarse en caso de ser necesario. Es importante resaltar que uno de los atributos más importantes para GPS-X es el conjunto de ecuaciones (o modelo) que define el comportamiento dinámico de cada objeto. En total el software cuenta con 3 modelos de afluentes. El primero está basado en la DBO_5. El segundo está basado en la DQO, nitrógeno total, fósforo total, algunas variables de estado y varias fracciones estequiométricas. El tercer modelo funciona de manera similar al segundo, sin embargo, las fracciones de entrada de DQO se establecen como una fracción de la DQO total. Es importante anotar que cada uno de estos tres modelos calcula un conjunto completo de variables de estado y difieren solo en el tipo de información requerida en las entradas del modelo.

Con base a lo anterior, para realizar la simulación se adopta el modelo No.3 conocido como CODStates. Esta selección se realiza primero considerando que no se cuenta con valores de DBO_5 conocidos que permitan llevar a cabo la adecuada modelación del tratamiento. Segundo porque en la caracterización del agua residual realizada en este estudio y la recopilada por el estudio de Gonzales y Giraldo (2019) para estaciones de servicio no se cuenta con valores de fracciones estequiométricas y valores de estado tales como ortofosfatos. Por último, porque en la información presentada en los tutoriales del software

se evidencia que el modelo No.3 es el más utilizado para llevar a cabo estas simulaciones. Posteriormente, se procedió a realizar el cambio de los atributos o propiedades para cada uno de los objetos planteados en cada modelo.

Afluente
Inicialmente en el objeto de afluente seleccionamos el modelo a utilizar. Luego se realiza el cambio en la composición del afluente.

Reactor SBR
El reactor SBR cuenta con 8 tipos de parámetros, donde se encuentran: las condiciones físicas, configuración de los ciclos de cada cochada, configuración del aire, configuración de caudal, modelo estequiométrico, cinética del reactor, la configuración del sedimentador y una herramienta para costos operacionales. Se realiza el cambio de cada uno de estos parámetros

Reactor MBRR
El reactor MBRR cuenta con 7 tipos de parámetros de entrada: condiciones físicas, condiciones operacionales, transporte de masa, modelo estequiométrico, cinética del reactor, la consistencia y una herramienta para costos operacionales. Se realiza el cambio de cada uno de estos parámetros

Paso 4: Simulación del modelo
Después de creados los sistemas de tratamiento e indicados los parámetros del modelo se procedió a ejecutar la simulación. Para ello se cambia al modo de simulación. Una vez se cambia de modo se inicia el proceso de compilación y vinculación, creando un modelo ejecutable. El software despliega una nueva ventana que tiene controladores de entrada, tablero de dibujo, datos de salida, y barra de herramientas de simulación. El controlador de entrada es una herramienta interactiva que se utiliza para cambiar el valor de una variable durante la ejecución de la simulación. En ella no solo se pueden establecer los valores mínimos y máximos de control para una variable en particular. Sino que permite elegir entre varios tipos de controladores. Este tipo de controlador depende de la simulación a realizar, ya sea estado estacionario o fase dinámica

Por su parte en la ventana de salida del proceso se cuenta con una pestaña de salida para cada objeto, en donde se observa rápidamente la información importante sobre los parámetros operativos de cada objeto, los resultados de la simulación y los flujos másicos. Así como se pueden crear gráficas, tablas, esquemas, análisis de costos y consumos de energía y otros elementos que se puedan requerir para la evaluación de cada una de las salidas de agua de los procesos. Posteriormente, se cuenta con la barra de herramientas de simulación. Para iniciar la simulación solo es necesario presionar el botón iniciar localizado en la parte izquierda de la Ilustración 2.

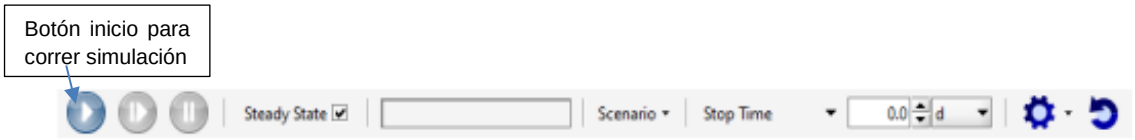


Ilustración 2 Barra herramientas de simulación
Fuente: Tomado de Hidromantis (2019)

Dentro de esta barra exactamente en el campo denominado *stop time* se puede especificar el tiempo que se desea dure la simulación.

Por otro lado, es importante mencionar que dentro de la barra de herramientas del módulo de simulación se cuenta con un módulo de análisis. De acuerdo con Hydromantis (2019), este módulo se utiliza para realizar un análisis de sensibilidad en los diseños y su objetivo es determinar la sensibilidad de las variables de salida del modelo de simulación con los cambios en la variables o parámetros de entrada. Proporcionando información sobre el comportamiento del modelo y ayudando a identificar los parámetros de mayor impacto para el modelo. Con el fin de llevar a cabo la simulación para este proyecto se utilizará el análisis en modo estacionario, en el cual se simula asumiendo que el cambio de concentración en el tiempo es cero. De esta manera tener un mejor control y entendimiento de los parámetros y variables a analizar en el modelo. De acuerdo con Hydromantis (2019), en el análisis en modo estacionario las respuestas de las salidas del modelo a valores de entrada pueden ser suficientes para propósitos de diseño, como para hacer predicciones útiles sobre el comportamiento de la planta.

Para efectos de evaluar los modelos se proponen los siguientes cuatro escenarios en el modelo 1 (Reactor SBR) que permitan evaluar los porcentajes de remoción de DQO y SST obtenidos en el tratamiento: [1] Escenario 1, se incluyen los parámetros de diseño del reactor SBR. [2] Escenario 2, se amplió la duración de este ciclo de 4.84 a 12 horas (19.26 horas tiempo de retención total de cada cochada), con el fin de evaluar la incidencia del tiempo de reacción en el comportamiento del reactor. [3] Escenario 3, un aumento en el caudal a tratar igual a 2 veces el caudal proyectado en el escenario 1 con el objetivo de evaluar la incidencia del caudal de entrada al reactor. [4] Escenario 4, variación en la concentración de DQO hasta 2 dos veces la concentración utilizada en el escenario 1 con el fin de evaluar el efecto de este incremento en el reactor. En la Tabla 14 se pueden apreciar las características utilizadas para cada escenario.

Tabla 14. Escenarios proyectados Reactor SBR

Parámetro		**Unidad**	**Escenario**			
			1**	**2**	**3**	**4**
Parámetros de entrada	Caudal de diseño	m3/d-	259.44	259.44	**520***	259.44
	Concentración DQO	mg/L	300	300	300	**600***
Volumen del tanque		m3	138.59	138.59	138.59	138.59
Área superficial		m2	46.5	46.5	46.5	46.5
Altura lámina de agua		m	3	3	3	3

Parámetro		Unidad	Escenario			
			1**	2	3	4
Tiempo retención total		hr	12.1	19.26	12.1	12.1
Tiempo de cada etapa del ciclo	Tiempo de llenado	hr	3.02	3.02	3.02	3.02
	Tiempo de aireación	hr	4.84	**12**	4.84	4.84
	Tiempo de Sedimentación	hr	2.42	2.42	2.42	2.42
	Tiempo de decantado	-hr	1.81	1.81	3.02	1.81

*Este valor se adoptó como el doble del parámetro inicial, con el fin de contar con un rango que facilite la evaluación del comportamiento del reactor

** El escenario 1 presenta los mismos parámetros y criterios de diseño establecidos para el reactor SBR (ver **Tabla 31**)
Los valores en gris son los parámetros que fueron modificados en cada escenario

Fuente: Elaboración Propia

Para el modelo 2 (reactor MBRR) se proponen los siguientes seis escenarios que permitan evaluar los porcentajes de remoción de DQO y SST obtenidos en el tratamiento: [1] Escenario 1, se incluyen los parámetros de diseño del reactor MBRR. [2] Escenario 2, se redujo el área de superficie específica del medio de 3000 a 1500 m2/m^3, con el fin de evaluar la incidencia de la superficie específica del medio en el comportamiento del reactor. [3] Escenario 3, un aumento en el caudal a tratar igual a 2 veces el caudal proyectado en el escenario 1 con el objetivo de evaluar la incidencia del caudal de entrada al reactor. [4] Escenario 4, variación de la densidad de la biopelícula desde ½ hasta dos veces el valor utilizado en el escenario 1 con el fin de evaluar la influencia de este parámetro en el comportamiento del reactor. 5] Escenario 5, variación del porcentaje de volumen del medio en el reactor de 70 a 8.3%, con el fin de evaluar la incidencia del volumen del medio en el reactor. 6] Escenario 6, se incluyen los parámetros de diseño del reactor SBR con medio móvil. En la Tabla 15 se pueden apreciar las características utilizadas para cada escenario.

Tabla 15. Escenarios proyectados Reactor MBRR

Parámetro		Unidad	Escenario					
			1**	2	3	4	5	6
Parámetros de entrada	Caudal de diseño	m3/d-	259.44	259.44	**520***	259.44	259.44	259.44
	Concentración DQO	mg/L	300	300	300	300	300	300
Volumen del tanque		m3	138.59	138.59	138.59	138.59	138.59	33.34
Área superficial		m2	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	11.11
Altura lámina de agua		m	3	3	3	3	3	3
Volumen llenado por el medio en el reactor		%	70	70	70	70	**8.3+**	**8.3**
Parámetros relacionados con la biopelícula	Superficie específica del medio	m2/m3	3000	**1500*****	3000	3000	3000	3000
	Densidad específica del medio	gr/L	170	170	170	170	170	170
	Espesor máximo de la biopelícula	m	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

Parámetro		Unidad	Escenario					
			1**	2	3	4	5	6
	Densidad de la biopelícula	Kg/m3	105	105	105	**53-210**	105	105
	Contenido de material seco de la biopelícula	-	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

*Este valor se adoptó como el doble del parámetro inicial, con el fin de contar con un rango que facilite la evaluación del comportamiento del reactor

** El escenario 1 presenta los mismos parámetros y criterios de diseño establecidos en la metodología para este reactor
Los valores en gris son los parámetros que fueron modificados en cada escenario

*** Este valor se adoptó como ½ del valor original, con el fin de contar con un rango que facilite la evaluación del comportamiento del reactor

+ Este valor fue utilizado por Bassin, et al (2016) para el *medio MUTAG BIOCHIP®*

Fuente: Elaboración Propia

Para mayor detalle del proceso de construcción del modelo ver anexo G. Mientras que para ver resultados de la evaluación, ver numeral 5.4 del documento

4. Comparación de medios móviles para un rector biológico de medio móvil con biomasa adherida

Dentro de este capítulo se muestran los resultados y discusión de resultados asociados al primer objetivo específico de este trabajo. En el cual inicialmente se llevaron a cabo pruebas físicas y microbiológicas que tuvieron como objetivo evaluar técnicamente los dos medios de soporte a utilizar: *MUTAG BIOCHIP*® y el Alginato de Calcio. Posteriormente se procedió a realizar una matriz de evaluación de los dos medios que incluyeron los aspectos de factibilidad técnica, económica y ambiental. De esta manera seleccionar uno de los dos medios para continuar con la siguiente etapa del estudio.

4.1 Pruebas Físicas y Microbiológicas de los medios móviles

Para la selección del medio móvil y tal como se mencionó anteriormente se realizaron pruebas físicas y microbiológicas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada una de ellas.

4.1.1 Prueba Física de los medios móviles

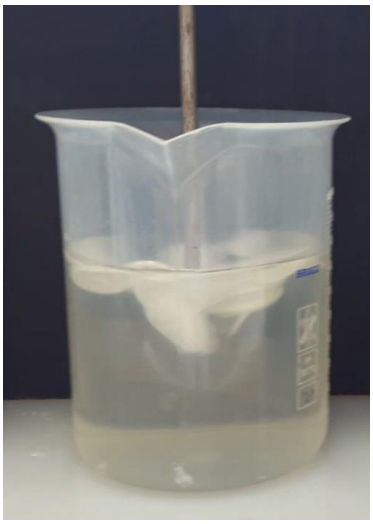
En la prueba física se evaluaron dos aspectos: El primero es la sumergencia del medio y el segundo es la velocidad de agitación del medio.

4.1.1.1 Sumergencia del Medio

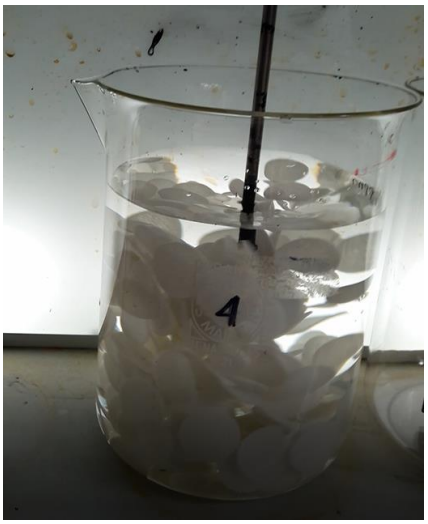
Para evaluar la sumergencia del medio se utilizaron dos recipientes de 1 Litro. En cada uno se agregaron 500 ml de agua residual proveniente de la estación de servicio y como volumen del medio móvil a utilizar se tomó el 5% del volumen total de agua. Se adopto este porcentaje debido a la dificultad de fabricación del alginato de calcio.

Considerando el porcentaje del 5% y los datos presentados en la Tabla 5, se agregó en el primer recipiente 20 discos de *MUTAG BIOCHIP*® y en el segundo 161 perlas de alginato de calcio. Luego de agregar el medio en los 500 ml de agua residual y pasados aproximadamente 5 minutos desde el comienzo de la prueba se procedió a realizar la inspección visual para cada recipiente.

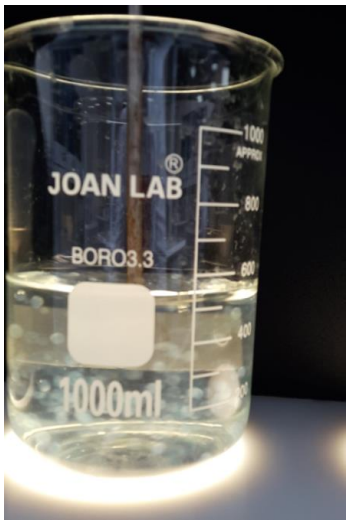
En esta inspección se evidenció que las perlas de alginato de calcio se sumergieron completamente, sin embargo, el *MUTAG BIOCHIP*® quedó flotando en la superficie. Esto debido a que el aire que hay en los poros demora en desplazarse y por tanto retrasa el proceso de sumergencia. Es importante destacar, que dependiendo de la cantidad de *MUTAG BIOCHIP*® a utilizar, el medio puede tardar entre 15 días y hasta 1 mes para sumergirse completamente. Transcurrido este lapso de tiempo, el medio comienza a sedimentarse y depositarse en el fondo del recipiente.



a. Medio *MUTAG BIOCHIP*® al inicio de la prueba



b. Medio *MUTAG BIOCHIP*® después de permanecer 15 días en agua



c. Perlas de alginato de calcio al comienzo de la prueba

Fotografía 2. Sumergencia del medio
Fuente: Elaboración Propia

En la Fotografía 2a y 5b se aprecia la sumergencia del medio *MUTAG BIOCHIP*® al comienzo de la prueba y 15 días después de haber permanecido en agua. De esta manera se observa que el *MUTAG BIOCHIP*® puede presentar problemas en la puesta en marcha de una PTAR, debido a la flotabilidad del mismo en el proceso de arranque y puesta en marcha. Sin embargo, con el tiempo este problema tiende a desaparecer. Por su parte, y de acuerdo con la Fotografía 2c, se aprecia que las perlas de alginato de calcio no presentan este problema, dado que desde el comienzo y hasta el final de la prueba se mantienen sumergidas.

4.1.1.2 Evaluación rango de gradientes

Considerando que durante la fase de reacción del reactor biológico tipo SBR se debe garantizar un nivel de oxígeno entre 2 y 4 mg/L (de esta manera evitar problemas operacionales que puedan afectar la eficiencia del tratamiento), es necesario proyectar equipos de aireación y mezcla. Para este último se hace indispensable conocer cuáles son las dimensiones requeridas por la paleta de agitación y la potencia requerida por el motor. Aquí la importancia de identificar cual es la velocidad de agitación requerida por el medio.

En este caso, considerando que se proyecta un reactor biológico de biomasa adherida de medio móvil, la velocidad de agitación debe garantizar tres aspectos: el primero es que no se genere la sedimentación del medio, el segundo es que la agitación no genere un choque fuerte entre el medio, dado que esto podría acarrear al desprendimiento de la biopelícula, reduciendo la eficiencia del proceso y afectando su funcionamiento y el tercero es garantizar una velocidad en el agua que no afecte la densidad de la biopelícula.

Con base en lo anterior, y después de lograr la sumergencia de los dos medios, se procedió a evaluar la velocidad de agitación para cada medio. Para ello se utilizó el equipo de jarras, donde después de haber dispuesto en dos vasos de 1 Litro cada uno, 500 mililitros de agua residual y como volumen del medio a utilizar el 5% del volumen total de agua, es decir, 20 discos de *MUTAG BIOCHIP*® en el primer vaso y en el segundo 161 perlas de alginato de calcio. Se procedió a encender el equipo y a variar la velocidad de agitación para cada uno de los frascos entre un rango de 10 a 130 RPM. Esta variación duro aproximadamente entre 15 y 20 minutos, tiempo que es comúnmente utilizado en el proceso de floculación.

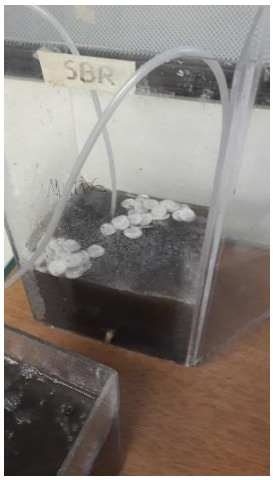
En esta prueba se logró evidenciar que en 500 ml de agua residual para el alginato de calcio la velocidad de agitación estaba entre 40 y 70 rpm. Mientras que para el medio *MUTAG BIOCHIP*® es de 80 a 110 rpm. Adicionalmente, se observó que el *MUTAG BIOCHIP*® es más pesado y tiende a depositarse en el fondo rápidamente en comparación con el alginato de calcio. Esto, justifica por qué se requiere mayor velocidad de agitación en este medio. Así mismo, es importante considerar que entre mayor cantidad o porcentaje de medio a utilizar se requerirá de una mayor potencia del motor.

4.1.2 Prueba Microbiológica de los medios móviles

Para el desarrollo de la prueba microbiológica, se realizó un montaje en la Universidad Nacional durante 8 días, donde se utilizaron dos tanques en acrílico de 4.6 Litros de volumen útil cada uno. Con el fin de garantizar una concentración de licor de mezcla de 1500 mg/L en cada uno de los tanques, se adicionaron 2.75 Litros de lodo y 1.85 Litros de agua residual proveniente de la estación de servicio. Es importante destacar que el lodo presentó una concentración de 2508.9 mg/L y fue extraído del cárcamo de bombeo de lodos de la PTAR de agua residual doméstica del casco urbano del Municipio de Funza.

Esta planta cuenta con un sistema de tratamiento del tipo rector biológico SBR con aireación extendida.

a. Tanque de 4.6 Litros con alginato de Calcio



b. Tanque de 4.6 Litros con *MUTAG BIOCHIP®*

Fotografía 3. Tanques de 4.6 Litros Prueba Microbiológica
Fuente: Elaboración Propia

En cada tanque se agregó como volumen del medio móvil a utilizar el 1.5% del volumen útil. Se adopto este porcentaje considerando nuevamente la dificultad de fabricación del alginato de calcio. Este porcentaje corresponde a 55 discos de *MUTAG BIOCHIP®* que fueron adicionados en el tanque 1 y 445 perlas de alginato de calcio que fueron adicionadas en el tanque 2. Así mismo, y con el fin de mantener las condiciones aerobias en cada tanque, se dispuso en cada uno dos piedras difusoras alimentadas con un aireador de pecera para garantizar una concentración de oxígeno entre 1 a 3 mg/L (Ver Fotografía 3).

Durante los 7 días siguientes al inicio del experimento, de cada uno de los tanques se extraían 2.76 litros de agua clarificada que equivalen al 60% del volumen útil del tanque. Para ser nuevamente alimentados con agua residual hasta alcanzar el volumen inicial de 4.6 Litros. De esta manera, promover el crecimiento de la biomasa presente en el reactor.

Finalmente, en el octavo día se detuvo el experimento y se extrajeron tres muestras aleatorias, cada una correspondiente al 5% del volumen total del medio móvil adicionado al inicio de la prueba en cada uno de los tanques. Esto corresponde a 9 discos de *MUTAG BIOCHIP®* y 33 perlas de alginato de Calcio. Para ello se dividió de manera imaginaria en cuatro cuadrantes el reactor y con ayuda de una coladera se extraían 2 perlas o discos según corresponda de cada cuadrante hasta completar el total de la muestra

Para estimar el número de unidades de colonias por mililitro basados en la turbidez, y tal como se indicó en el marco metodológico se utilizó el método indirecto conocido como la escala de McFarland, el cual para este ensayo consto de 3 tubos .

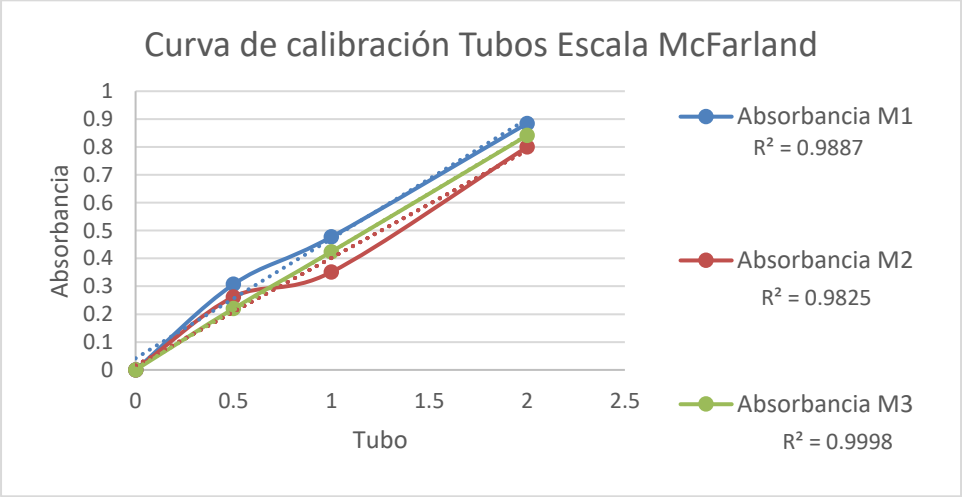
En la Tabla 16 se presentan los valores de absorbancia medidos en el laboratorio de ambiental de la Universidad de La Salle para los 3 tubos realizados de la escala de McFarland. Es importante resaltar que, con el fin de tener un mejor rango de lectura y precisión en los datos utilizados para calibrar la curva, se realizaron mediciones de absorbancia por triplicado para cada tubo.

Tabla 16. Datos de Absorbancia Tubos Escala McFarland

Medición Absorbancia	**Tubo**		
	0.5	**1**	**2**
Absorbancia 1	0.307	0.477	0.884
Absorbancia 2	0.262	0.351	0.8
Absorbancia 3	0.22	0.424	0.841

Fuente: Elaboración propia

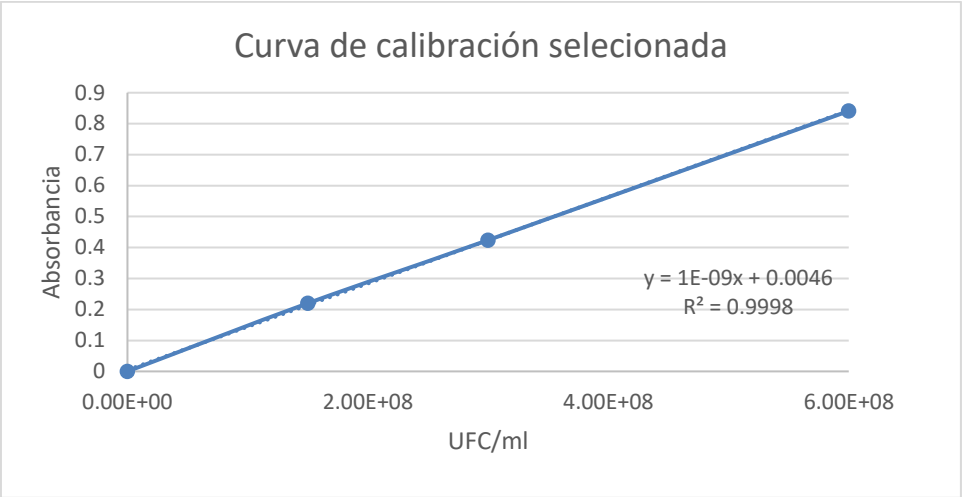
De esta manera, y con base a los resultados de la Tabla 16, en la Gráfica 1 se presenta la curva de calibración obtenida para los tubos de la escala de MacFarland, con ajuste lineal a la recta:



Gráfica 1. Curva de calibración Tubos Escala McFarland
Fuente: Elaboración propia

Considerando la importancia de que el valor de R^2 sea lo más cercano a 1 debido a la linealidad de los datos. Se utilizarán los valores de absorbancia medidos la tercera vez, ya que con estos se obtiene un valor R^2 de 0.9998, tal y como se aprecia en la Gráfica 1.

En la Gráfica 2 se presenta los datos de la curva de calibración que se utilizará para calcular la concentración de células.



Gráfica 2. Curva de calibración para cálculo de concentración de células
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con lo anterior, para el cálculo de la concentración de células se utilizará la Ecuación 2

$$Y = 1E^{09} * X + 0.0046$$

Ecuación 2

Con estos datos, se procedió a tomar uno a uno los discos y perlas de alginato de calcio extraídas de los dos tanques (Las perlas deben ser destruidas con la ayuda de un asa para continuar con el proceso). Para luego ser depositados cada uno en un tubo falcón con solución salina al 0.85%. Considerando la diferencia de los diámetros de los dos medios a utilizar. Para el *MUTAG BIOCHIP*® (diámetro de 2.2 cm) se utiliza 7.5 ml de solución salina para cada uno de los 9 discos. Mientras que para la perla de alginato de calcio (diámetro de 0.5 cm) se utiliza 2.5 ml de solución salina para cada una de las 33 perlas. Luego cada uno de los tubos Falcon con el medio y solución salina se colocan en una centrifuga para lograr generar el desprendimiento de la biopelícula o biomasa adherida al medio, tal y como se aprecia en la Fotografía 4.

Fotografía 4. Equipos y materiales para el desprendimiento de biopelícula o biomasa adherida
Fuente: Elaboración Propia

Luego de lograr el desprendimiento de la biopelícula se procedió a realizar la medición de la absorbancia a 600 nm de longitud de onda para cada uno de los tubos falcón. Para el caso particular de las perlas de alginato de calcio, fue necesario ajustar los valores de absorbancia medidos en laboratorio hasta igualar la misma área superficial del *MUTAG BIOCHIP*®. Puesto que este último cuenta un área superficial de 8.29 cm^2 mientras que las perlas tienen un área superficial 0.785 cm^2. En la Tabla 17 y Tabla 18 se presentan los resultados de absorbancia medidos en laboratorio y para las perlas (Tabla 18) se presenta de una vez la corrección del valor de absorbancia medido para igualar el área superficial del *MUTAG BIOCHIP*®.

Tabla 17. Células (UFC/ml) obtenidas para el *MUTAG BIOCHIP*®.

***MUTAG BIOCHIP*®.**	**Absorbancia**
Disco 1	0.619
Disco 2	0.585
Disco 3	0.501
Disco 4	0.683
Disco 5	0.484
Disco 6	0.471
Disco 7	0.518
Disco 8	0.480
Disco 9	0.500

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Células (UFC/ml) obtenidas para el alginato de calcio

Perlas	**Absorbancia**	**Absorbancia Ajustada al tamaño del MUTAG BIOCHIP®**
Perla 1	0.000	0.000
Perla 2	0.019	0.198
Perla 3	0.011	0.119
Perla 4	0.008	0.079

Perlas	Absorbancia	Absorbancia Ajustada al tamaño del MUTAG BIOCHIP®
Perla 5	0.004	0.040
Perla 6	0.019	0.198
Perla 7	0.004	0.040
Perla 8	0.008	0.079
Perla 9	0.003	0.026
Perla 10	0.006	0.066
Perla 11	0.010	0.106
Perla 12	0.006	0.066
Perla 13	0.000	0.000
Perla 14	0.000	0.000
Perla 15	0.006	0.066
Perla 16	0.001	0.013
Perla 17	0.003	0.026
Perla 18	0.014	0.145
Perla 19	0.001	0.013
Perla 20	0.003	0.026
Perla 21	0.001	0.013
Perla 22	0.009	0.092
Perla 23	0.010	0.106
Perla 24	0.007	0.079
Perla 25	0.004	0.040
Perla 26	0.010	0.106
Perla 27	0.006	0.066
Perla 28	0.001	0.013
Perla 29	0.008	0.079
Perla 30	0.003	0.026
Perla 31	0.004	0.040
Perla 32	0.008	0.079
Perla 33	0.006	0.066

Fuente: Elaboración propia

Con estos datos, posteriormente se calcula la cantidad de células por mililitro presentes en la muestra con ayuda de la Ecuación 2. En la Tabla 19 y Tabla 20 se presenta la cantidad de células por mililitro presente en cada medio

Tabla 19. Células (UFC/ml) obtenidas para el *MUTAG BIOCHIP*®.

***MUTAG BIOCHIP*®.**	**UFC/ml**
Disco 1	6.14E+08
Disco 2	5.80E+08
Disco 3	4.96E+08
Disco 4	6.78E+08
Disco 5	4.79E+08
Disco 6	4.67E+08
Disco 7	5.13E+08
Disco 8	4.75E+08
Disco 9	4.95E+08

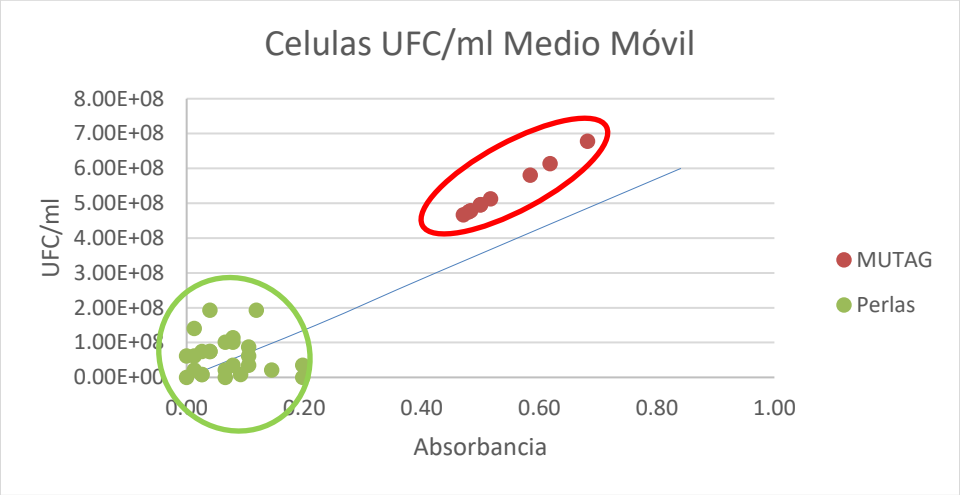
Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Células (UFC/ml) obtenidas para el alginato de calcio

Perlas	**UFC/ml**
Perla 1	0.0.E+00
Perla 2	1.9.E+08
Perla 3	1.1.E+08
Perla 4	7.5.E+07
Perla 5	3.5.E+07
Perla 6	1.9.E+08
Perla 7	3.5.E+07
Perla 8	7.5.E+07
Perla 9	2.2.E+07
Perla 10	6.1.E+07
Perla 11	1.0.E+08
Perla 12	6.1.E+07
Perla 13	0.0.E+00
Perla 14	0.0.E+00
Perla 15	6.1.E+07
Perla 16	8.6.E+06
Perla 17	2.2.E+07
Perla 18	1.4.E+08
Perla 19	8.6.E+06
Perla 20	2.2.E+07
Perla 21	8.6.E+06
Perla 22	8.8.E+07
Perla 23	1.0.E+08
Perla 24	7.5.E+07
Perla 25	3.5.E+07
Perla 26	1.0.E+08
Perla 27	6.1.E+07
Perla 28	8.6.E+06
Perla 29	7.5.E+07
Perla 30	2.2.E+07
Perla 31	3.5.E+07
Perla 32	7.5.E+07
Perla 33	6.1.E+07

Fuente: Elaboración propia

Con los datos presentados en la Tabla 19 y Tabla 20 se procedió a comparar los valores de células por mililitro en cada muestra con los valores de células por mililitro de la curva de calibración (ver Gráfica 3).



Gráfica 3. Resultados Células UFC/ml para los dos medios
Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 3 se presentan los resultados obtenidos para los dos medios, donde se evidencia que el *MUTAG BIOCHIP*® señalado en círculo rojo presenta un rango entre 3.4E+08 y 4.9 E+08 de UFC/ml, en comparación con las perlas de alginato de calcio, las cuales están señaladas en color verde que presentan un rango 7.7E+06 y 1.1 E+08 de UFC/ml. Lo que conduce a pensar que el *MUTAG BIOCHIP*® permite mayor formación de unidades de colonia a comparación de las perlas, lo que induce a mayor porcentaje de remoción. Es importante destacar que el *MUTAG BIOCHIP*® para esta prueba se sumergió totalmente en el agua después del cuarto día. Por lo que los resultados obtenidos son muy buenos en comparación con las perlas de alginato de calcio que desde el comienzo de la prueba estuvieron sumergidas.

Estos resultados indican que gracias a la forma y área superficial del *MUTAG BIOCHIP*® *se* genera una mayor biomasa adherida en comparación con el alginato de calcio. Este es otro de los aspectos que se consideraran para la selección del medio.

4.2 Matriz Evaluación del Medio

Para llevar a cabo la matriz de evaluación inicialmente se utilizó la metodología AHP y posteriormente se siguió la metodología descrita en Noyola, Morgan- Sagastume y Güereca (2013). A continuación, se describen los resultados obtenidos en esta evaluación.

4.2.1 Aplicación de la metodología AHP para la valoración de cada parámetro y aspecto a evaluar

Para realizar la valoración de cada uno de los parámetros y aspectos a evaluar, en el mes de diciembre de 2019 se diseñó y envió en formato digital una encuesta a un grupo de 15 profesionales e investigadores con experiencia en los sistemas de tratamiento de agua

residual, con el objetivo de identificar el nivel de importancia de cada uno de los parámetros y aspectos a evaluar presentados en la Tabla 7, de acuerdo con su experiencia en el campo. Para luego definir los valores de ponderación de cada uno de los criterios y aspectos a evaluar según una escala de valoración de nivel de importancia.

La encuesta se dividió en cuatro secciones: la primera sección es para obtener los datos del profesional o investigador. En la segunda y tercera sección se solicita al profesional o investigador que califique de 1 a 5 la importancia de los parámetros y aspectos a evaluar indicados en la Tabla 7 siendo 1 "sin importancia" y 5 "importancia máxima". Finalmente, se deja una cuarta sección donde el evaluador puede indicar alguna información que considere relevante, al igual que un espacio para que coloque observaciones, comentarios y sugerencias. Como documento adjunto a la encuesta se envió un archivo con las instrucciones para diligenciarla, así mismo, se anexo información para contextualizar al profesional o investigador sobre características de los dos medios a evaluar. Este archivo incluye una descripción rápida del medio, las ventajas y desventajas de cada uno, y los costos de fabricación o compra del mismo. El formato de la encuesta y la información enviada a los investigadores se puede ver en el Anexo B

De los 15 profesionales e investigadores, solo cinco respondieron la encuesta. De estos dos cuentan con maestría y tres son especialistas. Así mismo, cuatro han trabajado en docencia y consultoría e interventoría y uno ha trabajado solamente en interventoría y consultoría. En la Tabla 21 se presentan los resultados obtenidos en la encuesta.

Tabla 21. Resultados Encuesta Nivel importancia Parámetros y Aspectos a Evaluar

PARÁMETRO	**CALIFICACIÓN**					**Total**
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	
Factibilidad técnica			1	1	**3**	**5**
Factibilidad Económica	1			2	2	**5**
Factibilidad Ambiental	1			1	3	**5**
ASPECTO A EVALUAR	**CALIFICACIÓN**					**Total**
Factibilidad Técnica	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	
Requerimiento sistema de adaptación dentro del reactor para el medio	1			3	1	**5**
Capacidad de adherencia microbiológica, Mayor relación área superficial - volumen y permeabilidad				2	3	**5**
Resistencia del medio	1		1	2	1	**5**
Dificultad fabricación y dosificación del medio	1		2	2		**5**
Disponibilidad de materiales	1		1	2	1	**5**
Factibilidad Económica	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**Total**
Costos Fabricación y suministro del medio	1		1	1	2	**5**
Costos de Reposición de material	1			2	2	**5**
Costos de Logística tratamiento y disposición final	1			3	1	**5**
Factibilidad Ambiental	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**Total**
Generación de Residuos	1			1	3	**5**
Biodegradabilidad del medio	1		1		3	**5**

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 21 se identifica que, tres de los cinco profesionales e investigadores encuestados consideran con importancia máxima los parámetros técnicos y ambientales y tan solo uno considera que los parámetros económicos y ambientales no tienen importancia. Así mismo se identifica que en los aspectos de Factibilidad técnica tres de los cinco profesionales e investigadores encuestados consideran que el aspecto de concentración e inmovilización de microorganismo tiene importancia máxima y tan solo uno considera que los demás aspectos a evaluar en este parámetro no tienen importancia. Para la factibilidad económica dos profesionales e investigadores encuestados consideran que el aspecto de costos de fabricación del medio y reposición del material tiene importancia máxima. Por último, para la factibilidad ambiental tres profesionales e investigadores encuestados consideran que el aspecto de generación de residuos y biodegradabilidad del medio tiene importancia máxima.

Con los resultados de la encuesta y después de aplicar la metodología de procesos analíticos jerárquicos (AHP). En la Tabla 22 se presenta el peso que se le calculo a cada uno de los parámetros evaluados.

Tabla 22. Resultados Peso de nivel importancia Parámetros

PARÁMETRO	**EVALUADOR**					**Valor**
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**Promedio**
Factibilidad técnica	0.33	0.14	0.71	0.4	0.25	**0.37**
Factibilidad Económica	0.33	0.41	0.14	0.2	0.5	**0.32**
Factibilidad Ambiental	0.33	0.46	0.14	0.4	0.25	**0.32**
TOTAL						1.0

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Tabla 22 se observa que la factibilidad técnica contara con un peso de 37%, mientras que la factibilidad económica y ambiental con un peso de 32% cada una. Este mismo proceso se llevó a cabo para evaluar el peso de cada uno de los aspectos (ver Tabla 23).

Tabla 23. Resultados Peso de nivel importancia Aspectos a evaluar

ASPECTO A EVALUAR	**EVALUADOR**					**Valor**
Factibilidad Técnica	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**Promedio**
Requerimiento sistema de adaptación dentro del reactor para el medio	0.06	0.09	0.04	0.05	0.11	**0.07**
Capacidad de adherencia microbiológica, Mayor relación área superficial - volumen y permeabilidad	0.06	0.09	0.20	0.10	0.11	**0.12**
Resistencia del medio	0.06	0.05	0.04	0.10	0.06	**0.06**
Dificultad fabricación y dosificación del medio	0.06	0.05	0.04	0.05	0.04	**0.05**
Disponibilidad de materiales	0.11	0.09	0.04	0.05	0.04	**0.07**
Factibilidad Económica	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**Promedio**
Costos Fabricación y suministro del medio	0.11	0.11	0.11	0.06	0.13	**0.10**
Costos de Reposición de material	0.11	0.11	0.11	0.13	0.13	**0.11**
Costos de Logística tratamiento y disposición final	0.11	0.11	0.11	0.13	0.06	**0.10**
Factibilidad Ambiental	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**Promedio**
Generación de Residuos	0.16	0.16	0.16	0.16	0.21	**0.17**
Biodegradabilidad del medio	0.16	0.16	0.16	0.16	0.11	**0.15**

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Matriz de Decisión Selección del medio

Con los resultados indicados en el numeral 4.2.1 del presente documento se realizó una matriz de decisión siguiendo la metodología descrita en Noyola, Morgan- Sagastume y Güereca (2013). La matriz de decisión está conformada por 9 columnas. En la primera columna se presenta el parámetro que se está evaluando. En la segunda columna se presenta el aspecto a evaluar. En la tercera columna se presenta el peso del aspecto a evaluar, el cual fue calculado con la metodología AHP. En la cuarta y séptima columna se presenta una breve descripción de cada aspecto para cada uno de los medios a evaluar (Ver Tabla 24). Esta descripción se realiza basada en los resultados de las pruebas físicas y microbiológicas, y la información de cada medio presentada al final del capítulo del marco de referencia.

Tabla 24. Descripción de cada aspecto

PARÁMETRO	INDICADORES	RESULTADO INDICADOR MUTAG	RESULTADO INDICADOR PERLAS
Factibilidad técnica	Requiere sistema de adaptación dentro del reactor para el medio	Si requiere, debido a que el medio inicialmente flota y cuando ya está sumergido se asienta rápidamente en el fondo	No requiere ninguna adecuación. El medio se manteniente en contacto directo con el agua 100% del tiempo.
	Capacidad de adherencia microbiológica. Mayor relación área superficial volumen y permeabilidad	Concentración UFC/ml promedio 3.8*10^8. Genera mayor capacidad microbiana. Cuenta con una mayor relación de área superficial vs Volumen.	Concentración UFC/ml promedio 4.1*10^7. Debido a su continuo intercambio de nutrientes con el agua, se reduce su capacidad microbiana
	Resistencia del material	El medio no mostro deformación dentro de las pruebas realizadas. Los estudios demuestran que el medio nunca se satura, lo que asegura la eficiencia del proceso	El medio no mostro deformación dentro de las pruebas realizadas. Sin embargo, debido a la alta absorción de nutrientes, el medio puede bloquearse. Afectando la eficiencia del proceso
	Dificultad para la Fabricación y dosificación del medio	El medio puede ser fácilmente suministrado al reactor, sin requerir equipos especiales	El alginato de calcio se fabrica en laboratorio, los químicos y equipos deben ser esterilizados y refrigerados a 4°C. Así mismo se requiere de un sistema para la fabricación de las perlas
	Disponibilidad de materiales	El medio se exporta desde Alemania mediante la firma RYR Ingeniería, por lo que, si no se cuenta con stock en Colombia, podría tardar hasta un mes para contar con el material. Asimiento un 10% de medio móvil en un reactor de 30 Litros, se requerirían 2364 discos de *MUTAG BIOCHIP*® aproximadamente	Las perlas requieren el químico cloruro de calcio, el cual en Colombia se restringe su venta hasta 5 kilos al mes. Asumiendo un 10% de medio móvil en un reactor de 30 Litros, se requerirían 18872 perlas de alginato aproximadamente. Lo que podría convertirse en un problema para sistemas de tratamiento grandes, aproximadamente con 1.5 gr se obtienen 250 perlas
Sostenibilidad económica	Costos fabricación o suministro del medio móvil	Aproximadamente 2500 discos de *MUTAG BIOCHIP*® cuestan $1.000.000	Los insumos químicos para la fabricación de 2500 Perlas de alginato cuestan menos de $20.000
	Costos de Reposición de material	La vida útil del medio puede ser mayor de 20 años. Lo que reduce los costos de operación	El deterioro es un proceso gradual de la esfera debido al crecimiento de los microorganismos dentro de la misma;

PARÁMETRO	INDICADORES	RESULTADO INDICADOR MUTAG	RESULTADO INDICADOR PERLAS
			algunos estudios reportan formaciones sobre la superficie tipo protuberancia o abultamiento.
	Costos de Logística tratamiento y disposición final	Asumiendo un 10% de medio móvil en un reactor de 30 Litros, se requerirían 2364 discos de *MUTAG BIOCHIP*® aproximadamente, lo cual generaría un peso de material a disponer de 510 gr	Asumiendo un 10% de medio móvil en un reactor de 30 Litros, se requerirían 18872 perlas de alginato aproximadamente. Considerando que el medio tiende a deshidratarse cuando no se deja en una solución con nutrientes, generaría un peso de material a disponer de 37.74 gr, adoptando que, en un periodo de 20 años, el medio se cambiara cada 3 años. Generaría un peso total de 252 gr, el cual es evidentemente menor al generado por el *MUTAG BIOCHIP*®
Sostenibilidad ambiental	Generación de Residuos	El *MUTAG BIOCHIP*® genera mayor cantidad de residuo en comparación con el alginato de calcio	Evidentemente y a pesar de que el medio requiere reemplazarse con mayor frecuencia, la cantidad del residuo generado es menor al *MUTAG BIOCHIP*®
	Biodegradabilidad del medio	Estudios demuestran que la vida útil del medio puede ser más de 20 años	El deterioro es un proceso gradual de la esfera debido al crecimiento de los microorganismos dentro de la misma; algunos estudios reportan formaciones sobre la superficie tipo protuberancia o abultamiento.

Fuente: Elaboración Propia

En la quinta y octava columna se establece el puntaje que recibe el aspecto a evaluar para cada uno de los medios. Para esta evaluación se utiliza un rango de 0 a 5, siendo 0 “no aplica”, 1 “deficiente”, 3 “adecuado” y 5 “cuando el proceso cumpla con el aspecto evaluado en forma muy buena”. Por ejemplo, para el aspecto de resistencia del material, el medio *MUTAG BIOCHIP*® no mostro ningún tipo de deformación dentro de las pruebas realizadas por lo que se le asigna un puntaje de 5 generando un puntaje máximo de 6%. Pese a que en la realización de las pruebas el alginato de calcio no presento ningún tipo de deformación, Hernández, S (2011) menciona que el proceso de degradación de la esfera es un proceso que ha sido reportado por varios autores, por lo que se le asigna un puntaje de 3 generando un puntaje de 4%. En la Tabla 25 se presentan los resultados obtenidos en la matriz de evaluación de los dos medios.

Tabla 25. Matriz de evaluación del medio

PARÁMETRO	ASPECTO	PESO	DESCRIPCIÓN	*MUTAG*	PUNTOS	DESCRIPCIÓN	PERLAS	PUNTOS
Factibilidad técnica	Requiere sistema de adaptación dentro del reactor para el medio	7%	Si requiere, debido a que el medio inicialmente flota y cuando ya está sumergido se asienta rápidamente en el fondo	1	1%	No requiere ninguna adecuación. El medio se manteniente en contacto directo con el agua 100% del tiempo.	5	7%
	Capacidad de adherencia microbiológica. Mayor relación área superficial volumen y permeabilidad	12%	Concentración UFC/ml promedio 3.8*10^8. Genera mayor capacidad microbiana y Cuenta con una mayor relación de área superficial/Volumen.	5	12%	Concentración UFC/ml promedio 4.1*10^7. Debido a su continuo intercambio de nutrientes con el agua, se reduce su capacidad microbiana	1	2%
	Resistencia del material	6%	El medio no mostro deformación dentro de las pruebas realizadas. Los estudios demuestras que el medio nunca se satura, lo que asegura la eficiencia del proceso	5	6%	El medio no mostro deformación dentro de las pruebas realizadas. Sin embargo, debido a la alta absorción de nutrientes, el medio puede bloquearse. Afectando la eficiencia del proceso	3	4%
	Dificultad para la Fabricación y dosificación del medio	5%	El medio puede ser fácilmente suministrado al reactor, sin requerir equipos especiales	5	5%	El alginato de calcio se fabrica en laboratorio, los químicos y equipos deben ser esterilizados y refrigerados a 4°. Así mismo se requiere de un sistema para la fabricación de las perlas	1	1%
	Disponibilidad de materiales	7%	El medio se exporta desde Alemania mediante la firma RYR Ingeniería, por lo que, si no se cuenta con stock en Colombia, podría tardar hasta un mes para contar con el material. Asimiento un 10% de medio móvil en un reactor de 30 Litros, se requerirían 2364 discos de *MUTAG BIOCHIP*® aproximadamente	3	4%	Las perlas requieren el químico cloruro de calcio, el cual en Colombia se restringe su venta hasta 5 kilos al mes. Asumiendo un 10% de medio móvil en un reactor de 30 Litros, se requerirían 18872 perlas de alginato aproximadamente. Lo que podría convertirse en un problema para sistemas de tratamiento grandes, aproximadamente con 1.5 gr se obtienen 250 perlas	1	1%
TOTAL		**37%**			**28%**			**16%**
Donde; 0 no aplica, 1. deficiente, 3. adecuado, 5. muy bueno								
Sostenibilidad económica	Costos fabricación o suministro del medio móvil	10%	Aproximadamente 2500 discos de *MUTAG BIOCHIP*® cuestan $1.000.000	1	2.0%	Los insumos químicos para la fabricación de 2500 Perlas de alginato cuestan menos de $20.000	5	10.1%
	Costos de Reposición de material	11%	La vida útil del medio puede ser mayor de 20 años. Lo que reduce los costos de operación	5	11.4%	El deterioro es un proceso gradual de la esfera debido al crecimiento de los microorganismos dentro de la misma; algunos estudios reportan formaciones sobre la superficie tipo protuberancia o abultamiento.	1	2.3%
	Costos de Logística tratamiento y disposición final	10%	Asumiendo un 10% de medio móvil en un reactor de 30 Litros, se requerirían 2364 discos de *MUTAG BIOCHIP*® aproximadamente, lo cual generaría un peso de material a disponer de 510 gr	1	2.0%	Asumiendo un 10% de medio móvil en un reactor de 30 Litros, se requerirían 18872 perlas de alginato aproximadamente. Considerando que el medio tiende a deshidratarse cuando no se deja en una solución con nutrientes, generaría un peso de material a disponer de 37.74 gr,	3	6.1%

PARÁMETRO	ASPECTO	PESO	DESCRIPCIÓN	*MUTAG*	PUNTOS	DESCRIPCIÓN	PERLAS	PUNTOS
						adoptando que, en un periodo de 20 años, el medio se cambiara cada 3 años. Generaría un peso total de 252 gr, el cual es evidentemente menor al generado por el *MUTAG BIOCHIP*®		
TOTAL		**32%**	**35%**		**15%**			**18%**
Donde; 0 no aplica, 1. deficiente, 3. adecuado, 5. muy bueno								
PARÁMETRO	**ASPECTO**	**PESO**	**DESCRIPCIÓN**	**MUTAG**	**PUNTOS**	**DESCRIPCIÓN**	**PERLAS**	**PUNTOS**
Sostenibilidad ambiental	Generación de Residuos	17%	El *MUTAG BIOCHIP*® genera mayor cantidad de residuo a comparación del alginato de calcio	1	3.4%	Evidentemente y a pesar de que el medio requiere reemplazarse con mayor frecuencia, la cantidad del residuo generado es menor al *MUTAG BIOCHIP*®	3	10.1%
	Biodegradabilidad del medio	15%	Estudios demuestran que la vida útil del medio puede ser más de 20 años	5	14.8%	El deterioro es un proceso gradual de la esfera debido al crecimiento de los microorganismos dentro de la misma; algunos estudios reportan formaciones sobre la superficie tipo protuberancia o abultamiento.	3	8.9%
TOTAL		**32%**			**18.2%**			**19.0%**
Donde; 0 no aplica, 1. deficiente, 3. adecuado, 5. muy bueno								
TOTAL		**100%**			**62%**			**53%**

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con la Tabla 25,se evidencia que el MUTAG BIOCHIP® desde el punto de vista de factibilidad técnica con un puntaje de 28% presenta mayor ventaja sobre el alginato de calcio con un puntaje de 16%. Esto se debe principalmente a que el MUTAG BIOCHIP® presenta mayor capacidad de adherencia microbiológica, mayor relación área superficial volumen y permeabilidad, así como tiene menor dificultad para la fabricación y dosificación del medio, y es más sencillo y fácil de contar y disponer del material.

Desde el Punto de vista ambiental los dos medios dieron resultados similares con 18% para el *MUTAG BIOCHIP*® y 19% para el alginato de calcio. Estos valores se obtienen ya que, si bien el *MUTAG BIOCHIP*® a futuro puede generar mayor cantidad de residuos, al ser su vida útil superior de 20 años (*Zenit Tecnologies,* 2014), solo requerirá reponerse 1 vez en un periodo de 25 años. Mientras que el alginato de calcio requerirá ser repuesto con mayor frecuencia. Lo anterior, considerando lo indicado por Hernández, S (2011) donde menciona que algunos estudios confirman que el deterioro gradual de la esfera es un proceso normal con el paso del tiempo. Debido no solo al crecimiento de microorganismos dentro de su interior que crean protuberancias y cráteres en la superficie de la perla, sino porque se ha demostrado que las esferas al no estar en una solución con nutrientes tienden a deshidratarse, reduciendo drásticamente su volumen.

Desde el punto de vista de factibilidad económica se ha demostrado que el *MUTAG BIOCHIP*® es más costoso que la fabricación del alginato de calcio. Sin embargo, al contar con una mayor vida útil a comparación del alginato de calcio el precio de la inversión se reduce en el tiempo. Pese a esto el alginato de calcio para este parámetro presenta un mayor porcentaje de favorabilidad.

Con base en lo anterior y los resultados presentados en la Tabla 25, se obtuvo un puntaje total para el *MUTAG BIOCHIP*® de 62% y para el alginato de calcio un puntaje de 53%. Por esta razón el *MUTAG BIOCHIP*® se seleccionó para continuar la siguiente etapa del estudio. Es importante resaltar que, si bien las perlas no alcanzaron a obtener el mayor puntaje, este es un medio que promete grandes resultados. Sin embargo, la ausencia de información llevó a asumir algunos de los aspectos a evaluar. Por lo tanto, se recomienda que en otros proyectos este medio sea utilizado en reactores biológicos de medio móvil para evaluar principalmente su desempeño y la vida útil del medio.

5. Evaluación matemática a través del modelo GPS-X del desempeño de un reactor biológico de biomasa suspendida y adherida para tratar las aguas residuales de una estación de servicio

Dentro de este capítulo se muestran los resultados y discusión de resultados asociados al segundo objetivo específico de este trabajo. Para la evaluación matemática inicialmente se realizó la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua residual proveniente de la estación de servicio. Posteriormente y partiendo de estos resultados se llevó a cabo la simulación matemática del reactor biológico de biomasa suspendida y del reactor biológico de medio móvil con biomasa adherida utilizando el software GPS-X.

5.1 Caracterización Fisicoquímica y Microbiológica del agua a tratar

Como se indicó en el marco metodológico, se realizó la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua residual a tratar. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada una de estas caracterizaciones.

5.1.1 Caracterización Fisicoquímica del agua a tratar

Se realizó la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales provenientes del efluente de una trampa de grasas de una estación de servicio, con el fin de evaluar la viabilidad de implementar un tratamiento biológico para tratar las aguas residuales de una estación de servicio (ver Tabla 26).

Con el objetivo de conocer la relación entre los parámetros de DBO_5 y DQO para una muestra de agua residual, en la Tabla 26 se presenta el análisis de estos dos parámetros, lo cual arrojo una relación del 80%. Se planteo una cuarta toma que tenía como objetivo corroborar la relación DBO5/DQO inicialmente encontrada. Sin embargo, y debido a la emergencia sanitaria no fue posible llevarla a cabo, por lo que se proyectó continuar con este valor en todas las etapas del proceso. Es importante resaltar que esta decisión genera una gran incertidumbre en los valores de DBO_5 presentados para el análisis 2 y 3.

Tabla 26. Caracterización del efluente de la trampa de grasas

Parámetros	Unidades	Análisis 1*	Análisis 2**	Análisis 3***	RES 631 2015
Grasas y aceites	mg/L	100	31	51.6	15
DBO_5	mg/L	320	245****	492****	60
DQO	mg/L	400	305	615	180
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	92	81	96	50
Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/L	33	26	46	Análisis y reporte
pH		7.2	7.5	7.5	
Relación SST/SSV	%	36	32	48	

*La muestra fue tomada en una estación de servicio localizada en Bogotá a comienzos de la semana, febrero 17 de 2020

** La muestra fue tomada en la misma estación de servicio que la muestra 1, entre semana día soleado, junio 16 de 2020

*** La muestra fue tomada en la misma estación de servicio que la muestra 1, entre semana día de lluvia, junio 24 de 2020

**** Valor estimado para las muestras 2 y 3 como 80% de la relación DBO/DQO obtenida en el análisis de la muestra 1, debido a la falta de disponibilidad del material de laboratorio y al tipo de agua residual, la cual corresponde a aguas industrial.

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con la Tabla 26 se evidenció que en un día de sol las características del agua residual de la estación de servicio presentan concentraciones de DQO de 305 mg/L, grasas y aceites de 31 mg/L y en días con eventos de lluvias se evidencia un incremento en los parámetros de DQO 615 mg/L y un leve incremento de grasas y aceites de 52 mg/L. En días con alto flujo vehicular como son los días después de festivos o fines de semana, donde se restringe la circulación de vehículos de transporte de carga con año modelo superior a 10 años entre las 5 y las 21 horas en las vías Públicas del distrito Capital según el Artículo 4 (Decreto 078 de 2020), se evidencia un leve incremento en los parámetros de DQO de 400 mg/L y grasas y aceites de 100 mg/L.

A pesar de que solo se logró realizar 3 caracterizaciones de agua residual a tratar. De manera general se evidencia que, la calidad del agua de una estación de servicio es muy variable y puede depender en gran medida de las condiciones climáticas del lugar y de los

tiempos de limpieza de la trampa de grasas. Razón por la cual, se requieren de sistemas robustos y con alta capacidad para afrontar cargas de choque tanto de caudal como de calidad del agua para este tipo de establecimientos. Es importante resaltar, que debido a las bajas concentraciones de sólidos suspendidos en el agua si es posible implementar un sistema biológico de tal forma que se garantice su tratabilidad.

5.1.2 Caracterización Microbiológica

Después de haber utilizado el método de tinción de Gram para la caracterización microbiológica se logró identificar que el agua residual proveniente de la estación de servicio tiene la presencia de bacilos gram negativos. Esto confirma los resultados encontrados por González y Giraldo (2019) donde se evidenció que el agua de estaciones de servicio tiene presencia de células gram negativas - Bacterias *Pseudomonas Aeruginosa*, dado que esta hace parte del grupo de bacilos gram negativos.

A pesar de que la *Pseudomona SP* se considera un patógeno oportunista que puede causar infecciones intrahospitalarias, especialmente en personas con asistencia respiratoria mecánica, pacientes quemados y aquellos con debilidades crónicas (Bush y Pérez, 2018). Braibant (2004) indica que, estas también pueden consumir todo tipo de sustratos orgánicos tales como: alcoholes, hidrocarburos, azucares y aminoácidos, ácidos húmicos e inclusive algunos plaguicidas sintéticos. Con base a lo anterior, y teniendo en cuenta que estas bacterias son aerobias y que existen estudios donde se ha demostrado su presencia en aguas residuales de estaciones de servicio. En este estudio se evaluó la presencia de esta bacteria en el agua residual a tratar, previendo que su existencia en el pul microbiano puede aumentar la eficiencia en la degradación de hidrocarburos, grasas y aceites en el sistema a analizar.

5.2 Diseño del reactor Biológico de cargas secuenciales (SBR) de biomasa suspendida y biomasa adherida de medio móvil

Después de contar la caracterización inicial del agua residual a tratar se llevó a cabo el diseño hidráulico del reactor biológico tanto de biomasa suspendida como biomasa adherida de medio móvil. A continuación, se presenta el resumen del diseño para cada uno de estos reactores, sin embargo, para mayor detalle ver Anexo E.

5.2.1 Diseño hidráulico del reactor Biológico tipo SBR con biomasa Suspendida.

En el presente capítulo se presenta el diseño hidráulico del reactor biológico tipo SBR con biomasa suspendida. Es importante resaltar que la tecnología de SBR ha sido ampliamente utilizada en proyectos de investigación a escala piloto, debido a que permite mantener un control sobre las condiciones de funcionamiento, facilita la recolección de datos por medio de sensores de toma de muestras, permite ajustar y modificar la duración de las diferentes etapas de tratamiento.

Para el diseño del reactor biológico aerobio SBR de biomasa suspendida se seleccionó un proceso de lodos activados del tipo aireación extendida y un volumen de 25 Litros. Se adoptó este volumen considerando la facilidad de efectuar las cochadas y contar con la suficiente disponibilidad de agua residual. Posteriormente se utilizó la metodología de Metcalf & Eddy (1995) para realizar el diseño hidráulico del reactor, en el cual se consideró un rango de DBO_5 a la entrada del reactor entre 100 y 530 mg/L. Este rango se utilizó considerando que el agua residual proveniente de estaciones de servicio es muy variable, tal y como se puede apreciar en la Tabla 1 y Tabla 26 de este documento. Lo que puede influir en el comportamiento hidráulico del reactor. Obligando a modificar en cada cochada algunos parámetros de diseño tales como: relación F/M, Concentración del licor de mezcla, tiempos de retención hidráulica, caudal de aire, producción de lodos y caudales de entrada al sistema. Basados en este rango se proyectaron tres escenarios, el primero denominado como DBO baja por proyectar una DBO_5 de 120 mg/L, el segundo denominado como DBO media por proyectar una DBO_5 de 240 mg/L y el tercero como DBO alta por proyectar una DBO_5 de 528 mg/L. Posteriormente y previendo la dificultad de controlar varios parámetros en la simulación del reactor, se asumieron los parámetros de volumen útil (25 Litros), Caudal de diseño (1.95 L/hora), concentración de solidos en el licor de mezcla en el reactor (4492.8 mg/L) como valores constantes para los tres escenarios. Es importante resaltar que estos parámetros se adoptaron con estos valores con el fin de garantizar que el diseño del reactor correspondiera a un proceso de lodos activados del tipo de aireación extendida. Dentro del cual se recomiendan valores de relación F/M de 0.05-0.25 Kg DBO5/Kg SSLM-d, COV mayores a 0.4 Kg DBO5/m^3/d tiempos de retención menores a 18 horas, y concentración de solidos en el licor de mezcla entre 3-6 Kg/m^3

A partir de estos valores y condiciones de diseño se procedió a realizar el cálculo hidráulico del reactor. Para lo cual se calculó la carga orgánica volumétrica, la relación F/M, el tiempo de retención hidráulica, la producción de lodos y el cálculo del consumo de oxígeno requerido por el reactor para cada uno de los tres escenarios. A continuación, en la Tabla 27 se presenta la información más relevante del diseño, en la cual se observan COV entre 0.22-0.99 kg DBO_5/ m^3-día, Relación F/M entre 0.05 y 0.22 kgDBO_5/kgSSVLM-d, X SSLM de 4493 mg/L, y TRH de 12 horas. Estos parámetros se encuentran dentro del rango de

un proceso de lodos activados del tipo aireación extendida, para mayor detalle ver Anexo E.

Tabla 27. Diseño Lodos activados Convencional Reactor SBR con biomasa suspendida

DESCRIPCIÓN	**UNIDAD**	**SIN MEDIO**		
		Lodos activados de aireación extendida		
CARACTERIZACIÓN		**DBO_5 BAJA**	**DBO_5 MEDIA**	**DBO_5 ALTA**
DBO_5 Entrada	mg/L	120	240	528
SST Entrada	mg/L	80	93	100
DQO Entrada	mg/L	150	300	660
DISEÑO HIDRÁULICO REACTOR				
Volumen Útil	L	25	25	25
Carga orgánica volumétrica	kg DBO_5/ m^3-día	0.22	0.45	0.99
Relación Alimento /Microorganismo	kg DBO_5 / kg SSVLM-d	0.05	0.1	0.22
Concentración Sólidos Suspendidos en el reactor	mg/L	4493	4493	4493
Tiempo retención hidráulica	d	0.50	0.50	0.50
	Horas	12.03	12.10	12.08
Edad de lodos	horas	12.03	12.10	12.08
	días	0.50	0.50	0.50
PRODUCCIÓN DE LODO				
Caudal lodos desecho	m^3/d	2.56E-04	5.14E-04	1.13E-03
Cantidad lodo seco	kg/d	2.94E-04	5.92E-04	1.30E-03
CONSUMO OXIGENO				
Caudal de aire real requerido	m^3/d	1.20	1.51	2.39

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 28 se presenta un resumen de los cálculos de la cinética para este reactor, sin embargo, para mayor detalle ver Anexo E.

Tabla 28. Cinética Reactor SBR aireación extendida con biomasa suspendida

Variable	**Descripción**	**Unidad**	**Valor**
U	Tasa especifica utilización sustrato	d-1	2.3054
μ'	Tasa de crecimiento especifica neta	d-1	1.872
μ	Tasa especifica de crecimiento	d-1	1.913
So	Concentración sustrato del afluente	mg/L	226.49
S	Concentración sustrato del Efluente	mg/L	23.054
μm	Tasa máxima especifica de crecimiento	d-1	1.00E-05
K	Tasa máxima remoción de sustrato por unidad de masa de microorganismos	d-1	1.6667E-05

Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Diseño hidráulico del reactor Biológico tipo SBR con biomasa adherida de medio Móvil

Tal y como se mencionó en el capítulo de marco metodológico para el diseño del reactor de biomasa adherida de medio móvil, uno de los parámetros de mayor importancia es el área superficial y el área de la superficie de contacto del medio. En la Tabla 29 se presenta la información más relevante del diseño, en la cual se observan COV de 1.87 kg DBO_5 / m3-día, Relación F/M entre 0.31 kg DBO_5 /kg SSVLM-d, X SSLM de 6000 mg/L, y tiempos de retención hidráulica entre 1.45 y 6.39 horas. Estos parámetros se encuentran dentro del rango de un proceso de lodos activados del tipo completamente mezclado, para mayor detalle ver Anexo E.

Tabla 29. Diseño lodos activados completamente mezclado SBR biomasa adherida medio móvil

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CON MEDIO		
		Lodos activados Completamente mezclado		
CARACTERIZACION		**DBO_5 BAJA**	**DBO_5 MEDIA**	**DBO_5 ALTA**
DBO_5 Entrada	mg/L	120	240	528
SST Entrada	mg/L	80	93	100
DQO Entrada	mg/L	150	300	660
DISEÑO HIDRÁULICO REACTOR				
Volumen Útil	L	3.01	6.01	13.23
Carga orgánica volumétrica	kg DBO_5/ m^3-día	1.87	1.87	1.87
Relación Alimento /Microorganismo	kg DBO_5 / kg SSVLM-d	0.31	0.31	0.31
Concentración Sólidos Suspendidos en el reactor	mg/L	6000	6000	6000
Tiempo retención hidráulica	d	0.06	0.12	0.27
	Horas	1.45	2.91	6.39
Edad de lodos	horas	1.45	2.91	6.39
	días	0.06	0.12	0.27
PRODUCCIÓN DE LODO				
Caudal lodos desecho	m^3/d	2.63E-04	5.26E-04	1.15E-03
Cantidad lodo seco	kg/d	3.02E-04	6.05E-04	1.32E-03
CONSUMO OXIGENO				
Caudal de aire real requerido	m^3/d	0.74	1.17	2.20

Fuente: Elaboración propia

Al comparar los diseños presentados en la Tabla 27 y Tabla 29 se puede apreciar que efectivamente el diseño del reactor de biomasa adherida de medio móvil genera para la condición más crítica (DBO5 de 528 mg/l) una reducción de más del 50% en los volúmenes requeridos por el sistema, lo que confirma que el sistema si tiene capacidad de tratar un caudal mayor al proyectado conservando el mismo volumen y las mismas dimensiones. Así mismo se evidencia que el reactor de biomasa suspendida de medio móvil genera una reducción del 8% en el consumo de oxígeno, lo que implica una reducción de los costos

de operación y ratifica lo indicado por la literatura especializada. Por otra parte, en la Tabla 30 se presenta un resumen de los cálculos de la cinética para este reactor, sin embargo, para mayor detalle ver Anexo E.

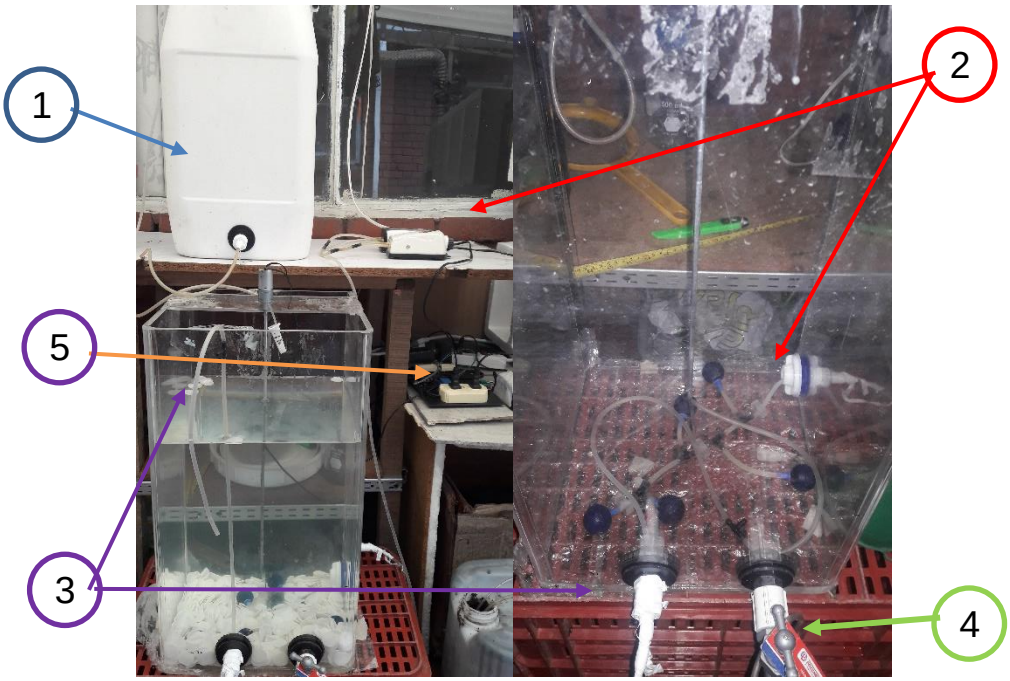
Tabla 30. Cinética Reactor SBR completamente mezclado con biomasa adherida de medio móvil

Variable	Descripción	Unidad	Valor
U	Tasa especifica utilización sustrato	d-1	9.37
μ'	Tasa de crecimiento especifica neta	d-1	7.781
μ	Tasa especifica de crecimiento	d-1	7.822
So	Concentración sustrato del afluente	mg/L	226.49
S	Concentración sustrato del Efluente	mg/L	30.10
μm	Tasa máxima especifica de crecimiento	d-1	1.00E-05
K	Tasa máxima remoción de sustrato por unidad de masa de microorganismos	d-1	1.6667E-05

Fuente: Elaboración propia

5.3 Construcción del reactor Biológico de cargas secuenciales (SBR)

Después de realizar el diseño hidráulico del reactor biológico de biomasa suspendida, se inició su construcción. El reactor biológico fue construido en acrílico de 10 mm de espesor, cuenta con 29 cm de lado y una altura total de 55 cm. Para generar un volumen útil de 25 L. En la Fotografía 5 se presenta el sistema de reactor biológico tipo SBR. Para mayor detalle de cada una de las partes que conforman el reactor Ver Anexo F.



Fotografía 5. Rector Biológico SBR
Fuente: Elaboración Propia

Donde:
1. Sistema de entrada de agua al reactor
2. Sistema de aireación y Mezcla
3. Sistema de Decantación
4. Salida y purga de lodos
5. Equipo de automatización

Para controlar el ingreso de agua al reactor se instaló un tanque de plástico de 30 litros. Desde el cual se controlaba el caudal de ingreso al reactor. Para suministrar aire al reactor se utilizaron dos aireadores de pecera de doble salida, las cuales estaban conectadas a un sistema de mangueras en forma de espina de pescado en el fondo del reactor con cinco salidas. Así mismo, se diseñó un sistema de mezcla conformado por una paleta y un motorreductor de 12 voltios, con el fin de garantizar una adecuada concentración de oxígeno durante la fase de reacción. Para controlar la salida de agua decantada del reactor se instaló una te, un flotador y una válvula de control. Para controlar la salida y purga de lodos se instaló una válvula de plástico de ½".

Finalmente, para llevar a cabo la fase de reacción dentro del reactor, se opta por un sistema de automatización básico controlado por un módulo Arduino® Mega. El módulo Arduino fue programado, de la siguiente forma:
1. Encendido de las bombas de aireación por 20 minutos.
2. Apagar las Bombas después de este tiempo y encender el sistema de mezcla durante 30 minutos.
3. Este ciclo se repitió durante el tiempo proyectado para la reacción.
4. Después del tiempo de reacción se apaga totalmente el sistema de aireación y mezcla, hasta el tiempo de reacción de la siguiente cochada.

Es importante resaltar que, pese a que el reactor no se pudo operar debido a la emergencia sanitaria que se vive actualmente, queda disponible para futuras investigaciones.

5.4 Evaluación matemática del reactor Biológico de cargas secuenciales (SBR) con biomasa suspendida y biomasa adherida de medio móvil

Después de contar con la construcción del reactor, en el mes de junio del año 2020 se realizó el proceso de arranque y puesta en marcha. Inicialmente el reactor se inoculo con lodo proveniente de un reactor biológico aerobio de la PTAR de agua residual doméstica del casco urbano del Municipio de Funza y fueron alimentados con agua residual

proveniente de una estación de servicio hasta alcanzar una concentración de sólidos suspendidos en el reactor de 4500 mg/L. Sin embargo, y debido a la emergencia sanitaria por la pandemia del COVID-19 no fue posible continuar con la ejecución de este experimento, por lo que se reemplazó la evaluación física-experimental del reactor por una simulación matemática del reactor biológico de biomasa suspendida y del reactor biológico de medio móvil con biomasa adherida. Para ello después de tener la caracterización del agua residual y el diseño hidráulico del reactor se procedió a realizar la simulación matemática del reactor biológico de biomasa suspendida y del reactor biológico con biomasa adherida de medio móvil utilizando el software GPS-X.

Después de familiarizarse con la interfaz gráfica, revisar los tutoriales del modelo y detallar más su funcionamiento se realizó la construcción y ejecución de las simulaciones de los dos modelos de sistemas de tratamiento. El primero corresponde al reactor biológico SBR con biomasa suspendida (Proceso de crecimiento suspendido – Reactor SBR), y el segundo corresponde al reactor biológico de biomasa adherida de medio móvil (Proceso de crecimiento adherido – Reactor hibrido película fija o biomasa suspendida). Este último busca evaluar si el reactor de biomasa adherida puede tratar el mismo caudal de diseño que el reactor SBR de biomasa suspendida, pero en un volumen de tanque menor, sin sacrificar la eficiencia de tratamiento. De esta manera corroborar lo indicado por la literatura, donde se mencionan que los reactores de biomasa adherida pueden ampliar la capacidad del tratamiento sin requerir volúmenes adicionales de tratamiento. Es importante destacar que debido a que los bajos volúmenes y caudal a tratar del prototipo diseñado en el numeral 5.2 eran casi imperceptibles para el modelo, fue necesario escalar a tamaño real este prototipo. En la Tabla 31 se presentan los datos a escala obtenidos para los dos tipos de reactores, la metodología de cálculo es la misma que se presenta como anexo E.

Tabla 31. Diseño a escala reactor SBR biomasa suspendida y biomasa adherida de medio móvil

ID	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	SIN MEDIO	CON MEDIO
	CARACTERIZACION		**Lodos activados de aireación extendida**	**Lodos activados Completamente mezclado**
1	DBO_5 Entrada	mg/L	240	240
2	SST Entrada	mg/L	93	93
3	DQO Entrada	mg/L	300	300
	DISEÑO HIDRÁULICO REACTOR			
4	Caudal de entrada	m^3/d	259.44	259.44
5	Volumen Útil	m^3	138.59	33.34
6	Área Superficial	m^2	46.2	11.11
7	Altura del agua	M	3	3
8	Carga orgánica volumétrica	kg DBO_5/ m^3-día	0.45	1.87
9	Relación Alimento /Microorganismo	kg DBO_5/ kg SSVLM-d	0.1	0.31
10	Concentración Sólidos Suspendidos en el reactor	mg/L	4493	6000
11	Tiempo retención hidráulica	D	0.50	0.12

ID	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	SIN MEDIO	CON MEDIO
	CARACTERIZACION		**Lodos activados de aireación extendida**	**Lodos activados Completamente mezclado**
12		Horas	12.10	2.91
13	Edad de lodos	Horas	12.10	2.91
14		Días	0.50	0.12
15	Porcentaje de llenado de medio en el reactor	%	-	8.3
	PRODUCCIÓN DE LODO			
16	Caudal lodos desecho	m^3/d	2.85E+00	2.92E+00
17	Cantidad lodo seco	kg/d	3.28E+00	3.35E+00
	CONSUMO OXIGENO			
18	Caudal de aire real requerido	m^3/d	8384.08	6478.16

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, es importante resaltar que los dos modelos contaran con las mismas características del afluente, por lo cual en la primera columna de la ventana denominada *Influent advisor* se cambiaron los datos de entrada predeterminados por el modelo por los datos que se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32. Parámetros a modificar en el formulario datos de entrada

Parámetro	Unidad	Valor
DQO	g/m3	300
Nitrógeno Total*	g/m3	17
Fosforo*	g/m3	1.79
pH		7.5
Relación SSV/SST		32%

*Valor tomado de Gonzales y Giraldo (2019) para aguas de estaciones de servicio

Fuente: Elaboración Propia

Los datos presentados en la Tabla 32 corresponden “en primera instancia” al valor de DQO adoptado en el diseño del reactor para el escenario denominado como DBO_5 media, “en segunda instancia” a los resultados medidos en la muestra No.2 para el agua residual y que se presentan en el numeral 5.1.1 de este documento. Se trabajó con esta muestra porque sus mediciones de DQO son similares a las proyectadas en el diseño. Por último y debido a la ausencia de datos experimentales de este trabajo final, se trabajó con los valores de nitrógeno y fosforo total obtenidos por Gonzales y Giraldo (2019) para aguas residuales de una estación de servicio. Es importante destacar que dentro de ese formulario y con ayuda de las fracciones orgánicas es posible obtener los valores medidos en campo para los parámetros de sólidos suspendidos totales y volátiles. Las fracciones orgánicas fueron modificadas con los valores que se presentan en la Tabla 33 hasta lograr una concentración de sólidos suspendidos totales de 81 mg/L y 26 mg/L para sólidos suspendidos volátiles. Tal y como se aprecia en la Ilustración 3 y Ilustración 4.

Tabla 33. Parámetros a modificar fracciones orgánicas

Parámetro	Unidad	Valor
Fracción soluble inerte total de DQO*	-	0.05
Fracción biodegradable real total de DQO	-	0.8
Fracción total de partículas inerte de DQO	-	0.02
Fracción coloidal lentamente biodegradable de DQO	-	0.9

*Valor predeterminado por el modelo

Fuente: Adaptado de Hidromantis (2019)

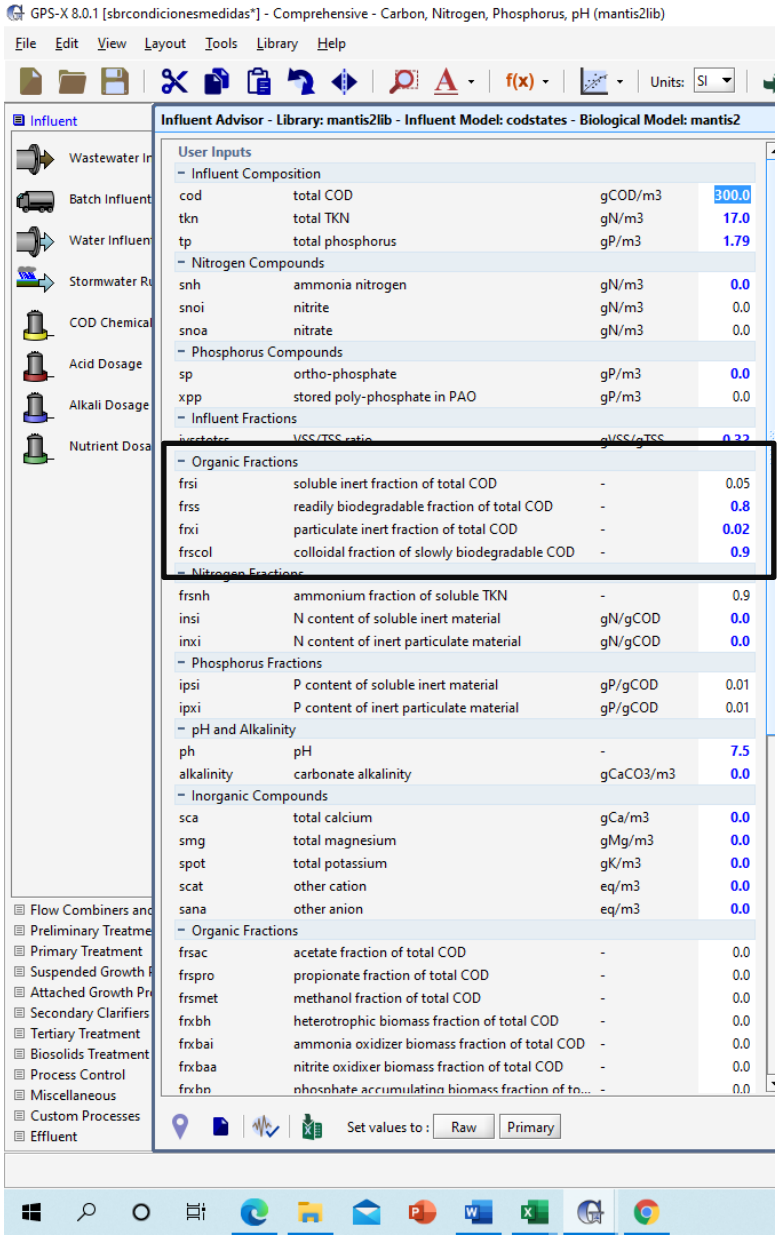


Ilustración 3 Formulario con datos de entrada según caracterización del agua residual de la estación de servicio
Fuente: Adaptado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

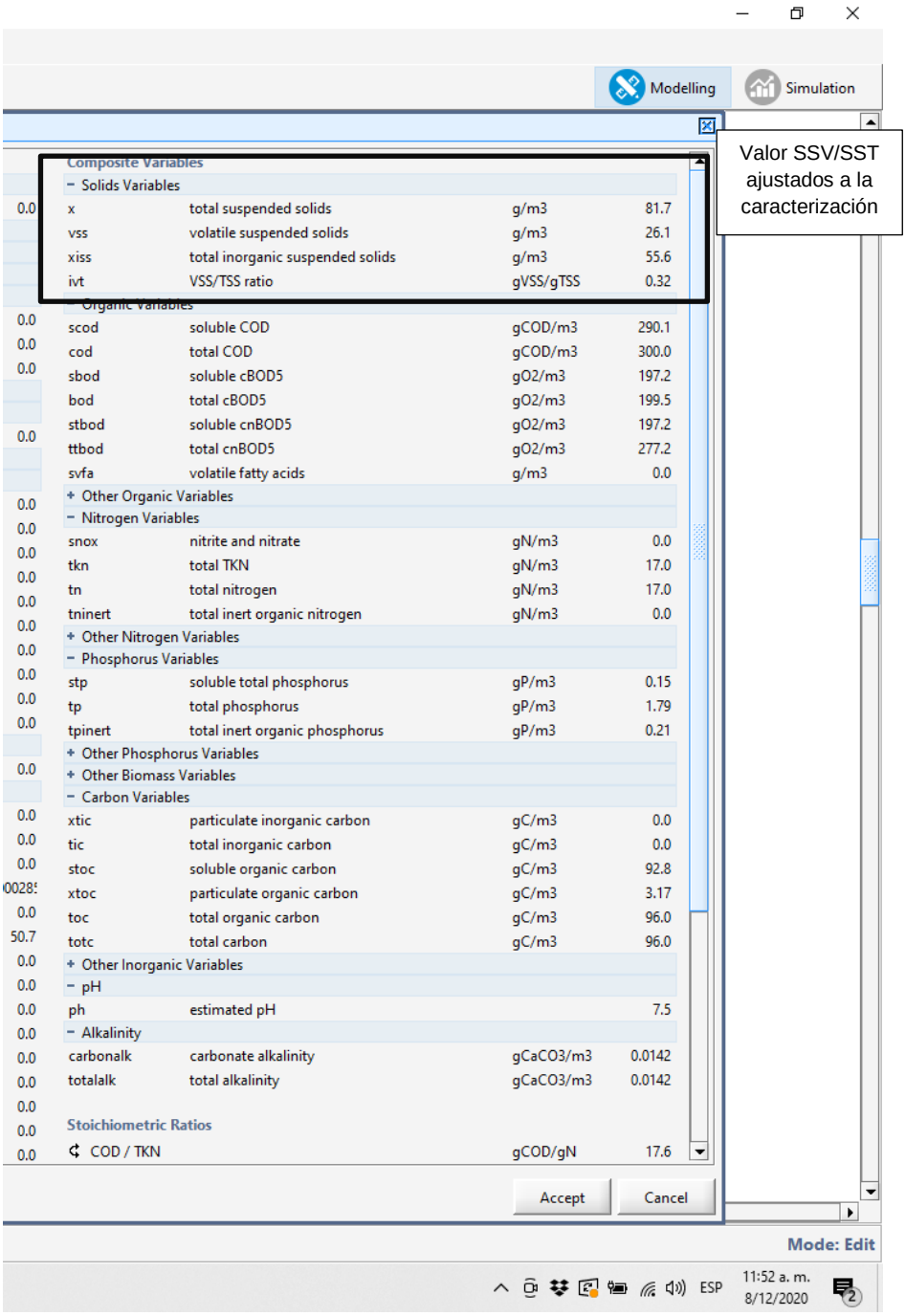


Ilustración 4 Formulario con valores de entrada ajustados acorde a la caracterización
Fuente: Adaptado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

Es necesario destacar que, con el uso de estos parámetros y la relación de SSV/SST al momento de correr la simulación, no se lograba una reducción significativa en las concentraciones de DBO_5 y DQO, generando reducciones del 10%, lo que implicaba el incumplimiento de la norma de vertimientos. Ese resultado se debe principalmente a que los valores de fracción biodegradable real total y a la fracción coloidal lentamente biodegradable de DQO están por encima del 80% y a la baja relación de SSV/SST de 32%.

Por esta razón, y con el objetivo de evaluar el rendimiento de los reactores garantizando el cumplimiento de la norma de vertimientos para estaciones de servicio, se optó por no incluir dentro del modelo los valores de SST y SSV obtenidos en la caracterización del agua residual y trabajar con la relación SSV/SST y las fracciones orgánicas predeterminadas por el modelo, con la cual se obtienen valores de SST y SSV de 173,5 mg/L SST y 130,1 mg/L de SSV, respectivamente. Ver Ilustración 5. Así mismo, y debido a la gran cantidad de datos de entrada que maneja el modelo, muchos de los cuales no se cuenta con información, en su mayoría se colocaron en cero (0). Sin embargo, no fue posible conservar este valor en todos, ya que automáticamente se generaba un error en el modelo. Por tal motivo, los parámetros tales como fracción soluble de amonio, contenido de material inerte soluble y contenido de material particulado inerte de fosforo se dejaron con los valores dados por defecto en el modelo. Ver Ilustración 5.

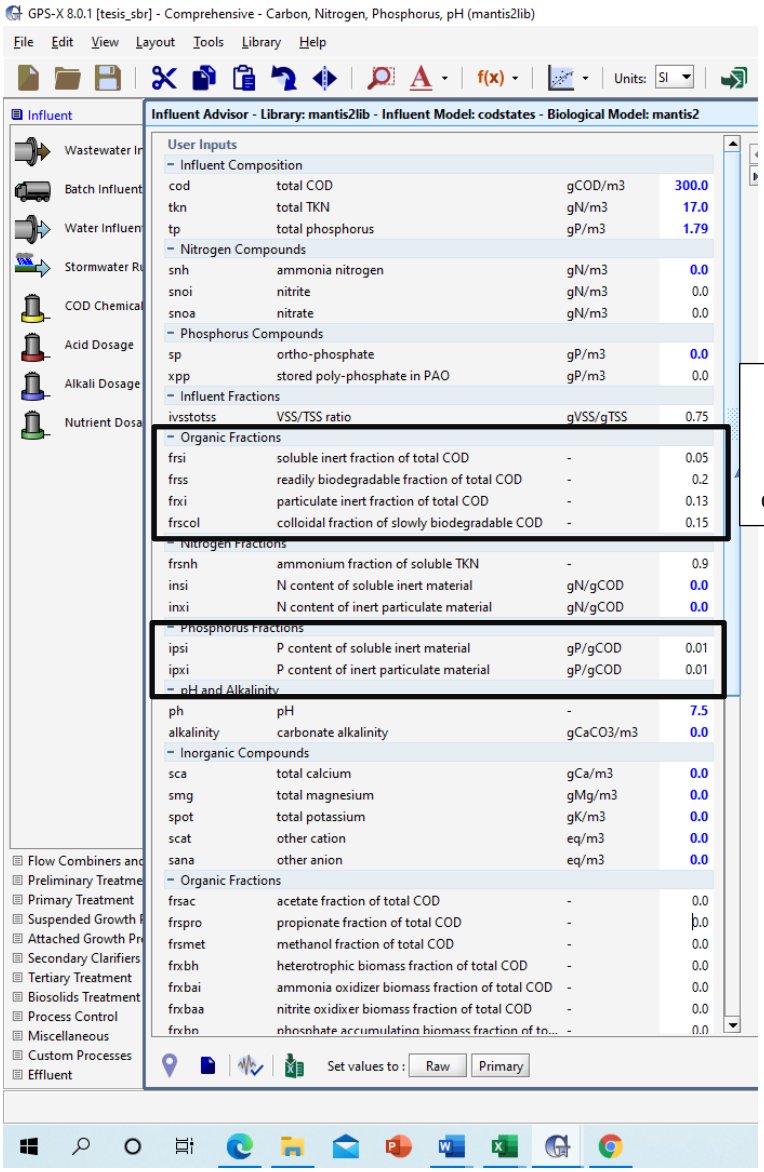


Ilustración 5 Formulario con datos de entrada ajustados para la simulación
Fuente: Adaptado de Hidromantis (2019) y elaboración propia.

Es importante aclarar que los datos resaltados en azul tanto en la Ilustración 3 como en la Ilustración 5, corresponden a los valores que fueron modificados y que ya no conservan los valores predeterminados por el modelo. En la Tabla 34 se presenta los datos de entrada incluidos en el formulario para llevar a cabo la simulación de los dos modelos.

Tabla 34. Parámetros de entrada utilizados en la simulación

Parámetro	Unidad	Valor
DQO	g/m3	300
Nitrógeno Total	g/m3	17

Parámetro	Unidad	Valor
Fosforo	g/m3	1.79
Relación SSV/SST	gSSV/ gSST	0.75
Fracción soluble inerte total de DQO*		0.05
Fracción biodegradable real total de DQO		0.2
Fracción total de partículas inerte de DQO		0.13
Fracción coloidal lentamente biodegradable de DQO		0.15
Fracción soluble de amonio		0.9
Contenido de material inerte soluble de fosforo	gP/gDQO	0.01
Contenido de material particulado inerte de fosforo	gP/gDQO	0.01
pH		7.5

Fuente: Adaptado de Hidromantis (2019) y elaboración propia.

Posteriormente se sube la información de caudal, en la cual se incluye un valor de caudal de 259,44 m^3/d, valor tomado de la Tabla 31 ID 4. Considerando lo anterior y los datos presentados en la Tabla 31, se procedió a culminar la construcción de los dos modelos matemáticos.

5.4.1 Construcción y Simulación del reactor Biológico tipo SBR con biomasa Suspendida.

Para la construcción y simulación del reactor SBR se procedió a cambiar los parámetros de entrada. El reactor SBR cuenta con 8 tipos de parámetros, donde se encuentran: las condiciones físicas, configuración de los ciclos de cada cochada, configuración del aire, configuración de caudal, modelo estequiométrico, cinética del reactor, la configuración del sedimentador y una herramienta para costos operacionales.

En las condiciones físicas del reactor se establece un área de 46.5 m^2, un nivel máximo de agua y de punto de alimentación de 3 m. Estos datos fueron tomados de la Tabla 31 ID 6 y 7. Para la configuración del ciclo se debe indicar el tiempo requerido para cada una de las etapas del proceso. Para ello y considerando los tiempos establecidos en la Tabla 2, se procedió a calcular los tiempos requeridos para cada una de las fases del proyecto (ver Tabla 35).

Tabla 35. Tiempos de reacción SBR Biomasa suspendida

Tiempos de Reacción			
Llenado 20%	25%	3.02	Horas
Reacción 55%	40%	4.84	Horas
Sedimentación 15%	20%	2.42	Horas
Vaciado 10%	15%	1.81	Horas
TOTAL	**100%**	**12.10***	**Horas**

*Este valor es el obtenido en el diseño hidráulico del reactor

Fuente: Elaboración Propia

Con los valores presentados en la Tabla 35, se procedió a subir la información al modelo. Dicha información queda configurada como se observa en la Tabla 36. Es importante destacar que las otras opciones de configuración que se muestran en el modelo y que no se incluyen dentro de esta tabla se dejan con un valor de 0.

Tabla 36. Configuración del ciclo

Configuración del ciclo reactor SBR		
Tiempo total del ciclo*	12.1	horas
Tiempo de llenado	3.02	horas
Tiempo de aireación	4.84	horas
Tiempo de Sedimentación	2.42	horas
Tiempo de decantado	1.81	horas

*Este valor es el obtenido en el diseño hidráulico del reactor

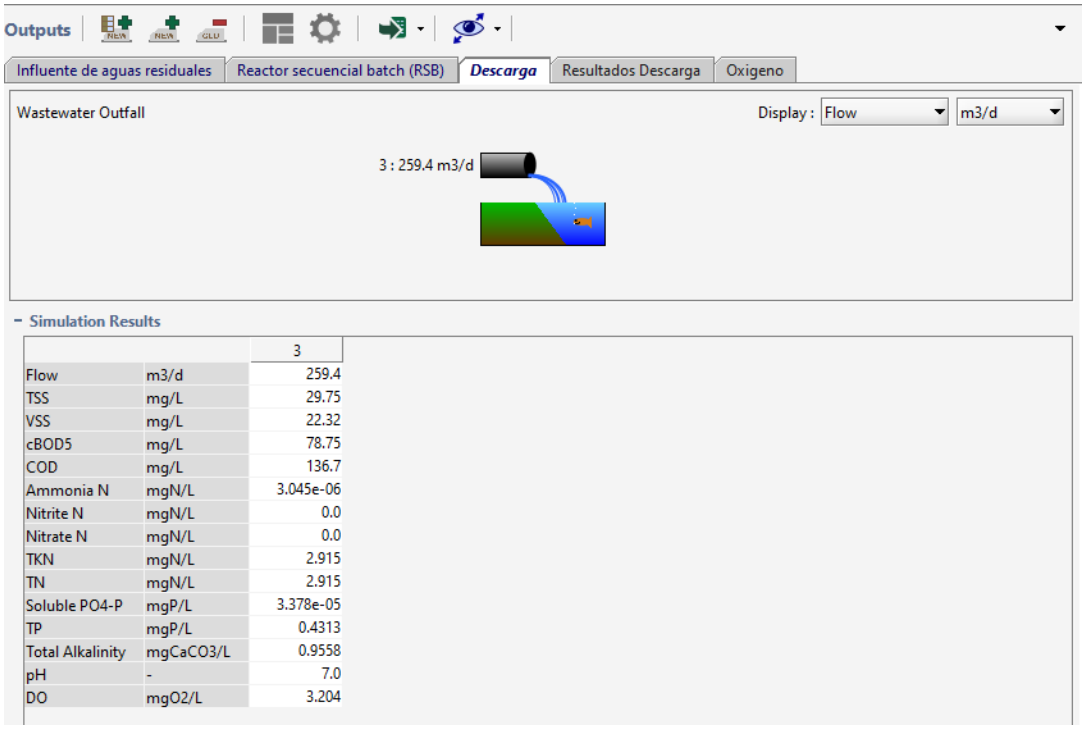
Fuente: Elaboración Propia

Por defecto, para la configuración del aire el reactor usa un controlador de oxígeno disuelto. En la casilla se especifica una transferencia de oxígeno de 3.3 mg/L O_2. Es importante destacar que se utiliza este valor para garantizar un nivel de oxígeno en el reactor entre 2 y 4 mg/L. De esta manera evitar el crecimiento de bacterias aerobias filamentosas.

Para la configuración del caudal, se coloca como caudal de vaciado el mismo valor del caudal de ingreso al reactor, es decir, 259,44 m^3/d. Valor tomado de la Tabla 31 ID 4. Así mismo y considerando que en un reactor SBR no se requiere caudal de recirculación, ya que todo el proceso se realiza en el mismo tanque se establece un valor de 0.

Para cambiar la cinética del reactor en la casilla de tasa máxima especifica de crecimiento de sustrato se coloca un valor de 1.87 d^{-1} (tomado Tabla 46 fila 9). Los demás valores se dejan con los valores predeterminados por el modelo, debido a la ausencia de información. Es importante destacar, que dentro de este proceso no se realizó ninguna modificación en las ventanas de estequiometria del modelo, configuración de la sedimentación y costos operacionales, dejando los valores predeterminados por el modelo. Finalmente se cambiaron las condiciones iniciales en el reactor, para ello se indica un volumen del reactor de 138,59 m^3. Valor tomado de la Tabla 31 ID 5.

Después de realizar la configuración del sistema y pasar al modo de simulación. Se procedió a ejecutar la simulación para un tiempo de simulación de siete días (168 horas). Este tiempo se adoptó considerando el estudio realizado por Gonzales y Giraldo (2019) donde se realizó el monitoreo de un reactor SBR durante siete días y en ese último fue cuando se alcanzaron las máximas eficiencias de tratamiento. En esta simulación y tal como se indicó en el marco metodológico se contemplaron 4 escenarios (ver Tabla 14). En el primer escenario donde se incluyó los parámetros y criterios de diseño establecidos en el reactor SBR (ver Tabla 31) se logro apreciar que el sistema en la descarga presento una concentración de DQO de 136.7 mg/L y 29.75 mg/L de SST (ver Ilustración 6)



		3
Flow	m3/d	259.4
TSS	mg/L	29.75
VSS	mg/L	22.32
cBOD5	mg/L	78.75
COD	mg/L	136.7
Ammonia N	mgN/L	3.045e-06
Nitrite N	mgN/L	0.0
Nitrate N	mgN/L	0.0
TKN	mgN/L	2.915
TN	mgN/L	2.915
Soluble PO4-P	mgP/L	3.378e-05
TP	mgP/L	0.4313
Total Alkalinity	mgCaCO3/L	0.9558
pH	-	7.0
DO	mgO2/L	3.204

Ilustración 6. Resultados del Software en la descarga del SBR para el escenario 1
Fuente: Adaptado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

Considerando los parámetros de entrada al modelo presentados en la Tabla 34 y los resultados del modelo presentados en la Ilustración 6 se procedió a calcular el porcentaje de remoción obtenido durante el proceso (ver Ilustración 7).

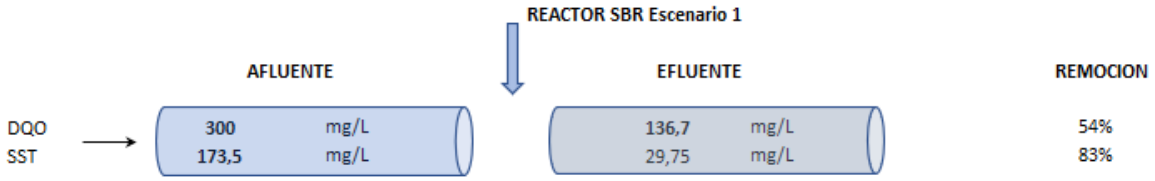


Ilustración 7. Datos de remoción DQO y SST Reactor SBR Biomasa suspendida escenario 1
Fuente: Tomado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

Con base en la Ilustración 7 se estima una remoción de 54% DQO y 83% SST. Los porcentajes tan bajos de remoción DQO obtenidos obedecen a los valores incluidos en las fracciones orgánicas que se tomaron con los valores predeterminados por el modelo.

En cuanto al requerimiento de oxígeno, se identifica que después del sexto día se estabiliza su consumo y se mantiene dentro del rango de 2 a 3.5 mg/L. Este es un rango óptimo para el sistema, considerando que en ausencia de oxígeno se inhiben las bacterias aerobias y se generan las condiciones de desarrollo para bacterias anóxicas o anaerobias, y en condiciones de oxígeno por encima de 4 mg/L, se pueden favorecer las condiciones para el origen de *bulking* y espumas de origen filamentoso.

Partiendo de estos resultados y con el fin de evaluar la incidencia del tiempo de reacción en el comportamiento del reactor para el escenario 2 se amplió la duración de este ciclo de 4.84 a 12 horas. Después de correr la simulación para este nuevo valor se logró observar una mínima mejoría en las condiciones del efluente, generando concentraciones de DQO y SST de 135.5 mg/L y 28.66 mg/L respectivamente. Lo que representa un aumento de remoción de, apenas, el 1% en la DQO con respecto al escenario 1. Se permite pensar que estos resultados pueden darse debido a que los valores de cinética y estequiometria del modelo en su gran mayoría son predeterminados por el mismo, lo que no permite generar un grupo de organismos específicos que ayuden a la eliminación de materia orgánica en el sistema.

Con el objetivo de evaluar la incidencia del caudal de entrada al reactor se proyectó un escenario 3. En el cual se varió el caudal de entrada al reactor de 259 m^3/d a 520 m^3/d. Después de correr la simulación para este caudal se observó un incremento en los valores de DQO y SST a la salida del reactor (ver Ilustración 8). Esto representa una reducción en la remoción de 5% para DQO y 8% para SST. Esta reducción se da porque el volumen del tanque no es suficiente para tratar el caudal de diseño. Un dato curioso es que al incrementar el tiempo de reacción en la estructura no se generó una mejora en el efluente.

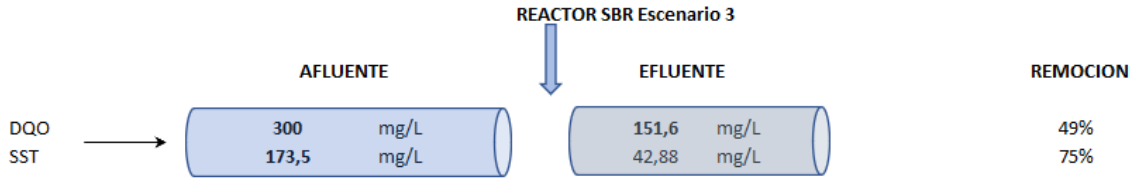


Ilustración 8. Datos de remoción DQO y SST Reactor SBR Biomasa suspendida escenario 3
Fuente: Tomado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

Por último, y con el fin de observar la incidencia de la DQO en el reactor se proyectó un escenario 4. En el cual se varió la concentración de DQO a la entrada del reactor de 300 mg/L a 600 mg/L. Después de correr la simulación con esta concentración se observó una remoción de DQO de 59% y del 81%. Si se comparan estos porcentajes con los valores de remoción obtenidos en el escenario 1 se observa un leve incremento en el porcentaje de remoción de DQO del 4%. Probablemente esto ocurra por que el reactor cuenta con mayor cantidad de materia orgánica que puede ser fácilmente digerida (ver Ilustración 9).

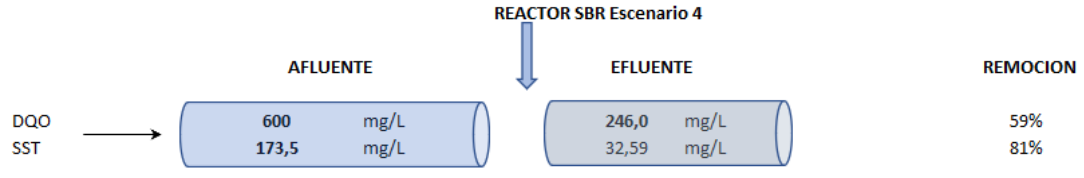


Ilustración 9. Datos de remoción DQO y SST Reactor SBR Biomasa suspendida escenario 4
Fuente: Tomado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

Con base en los resultados anteriores se puede pensar que el caudal que ingresa al reactor influye en las características del agua residual que sale del reactor. Por lo que a mayor caudal en el mismo volumen y con los mismos tiempos de reacción se denota una reducción en la eficiencia del reactor. En síntesis, hay una reducción en el tiempo efectivo de la reacción.

A continuación, en la Tabla 37 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en los cuatro escenarios

Tabla 37. Resumen Resultados Rector Biológico SBR con biomasa suspendida

	Escenario 1	**Escenario 2**	**Escenario 3**	**Escenario 4**
DQO Entrada (mg/L)	300	300	300	600
DQO Salida (mg/L)	136.7	135.5	151.6	246
Remoción (%)	54	55	49	59
SST Entrada (mg/L)	173.5	173.5	173.5	173.5
SST Salida (mg/L)	29.75	28.66	42.88	32.59
% Remoción	83	83	75	81

Fuente: Tomado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

5.4.2 Construcción y Simulación del reactor Biológico con biomasa adherida de lecho móvil.

Con el fin de llevar a cabo la comparación entre los dos tipos de reactores a utilizar, inicialmente se proyecta subir a este modelo los mismos datos de volumen, altura y tiempos de retención que el reactor SBR y que fueron plasmados en la Tabla 31 – Sin Medio. El reactor MBRR cuenta con 7 tipos de parámetros de entrada: condiciones físicas, condiciones operacionales, transporte de masa, modelo estequiométrico, cinética del reactor, la consistencia y una herramienta para costos operacionales.

Para las condiciones físicas del reactor en la Tabla 38 se presentan los datos ingresados al modelo. Es importante destacar que los parámetros tales como: contenido de material seco de la biopelícula, agua desplazada por el medio, espesor de película liquida adjunta, periodo de integración soluble y longitud de integración soluble se dejaron los valores predeterminados por el modelo los cuales corresponden a 18%, $5x10^{-5}$m, 0.05d y 0.005d respectivamente.

Tabla 38. Parámetros a modificar en las condiciones físicas del reactor MBRR

Aspecto	**Parámetro**	**Unidad**	**Valor**	**Observación**
Dimensiones	Tanques en serie	-	1	Se proyecta un solo tanque
Volumen	Altura del agua	m	3	Valor tomado Tabla 31 ID 7

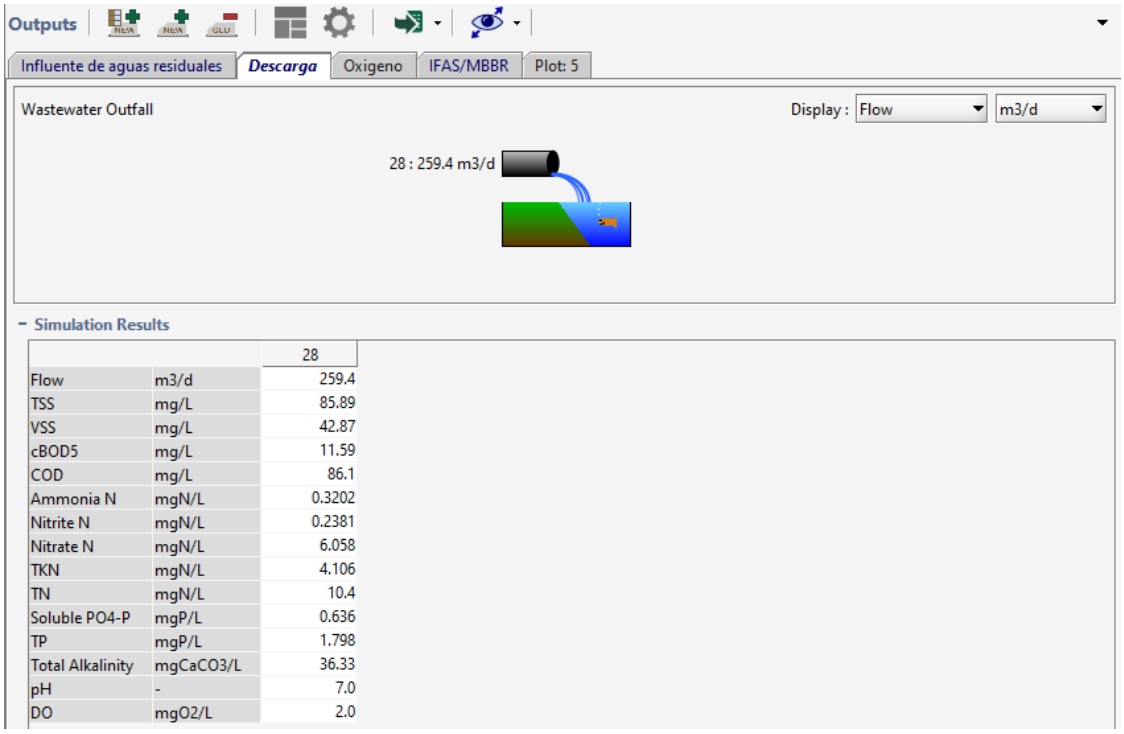
Aspecto	Parámetro	Unidad	Valor	Observación
	Volumen máximo	m3	138,59	Valor tomado Tabla 31 ID 5. Reactor sin medio
Volumen inicial medio	Volumen llenado por el medio en el reactor	%	70	Valor máximo establecido por Sanabria y Pacheco (2019)
Parámetros relacionados con la biopelícula	Superficie específica del medio	m2/m3	3000	Valor tomado Tabla 5. Fuente Zenit Technologies
	Densidad específica del medio	gr/L	170	Valor tomado Tabla 5. Fuente Zenit Technologies
	Espesor máximo de la biopelícula	m	0.001	Valor tomado Tabla 5. Fuente Zenit Technologies
	Densidad de la biopelícula	Kg/m3	105	Valor máximo mencionado por Molina J., (2015).
	Contenido de material seco de la biopelícula	-	0.1	Valor predeterminado por el modelo

Fuente: Elaboración Propia

Luego se procedió a cambiar las condiciones operacionales en el reactor. Para ello se especifica en la casilla transferencia de oxígeno un valor de 3.3 mg/L $O_{2.}$ Es importante destacar que se utiliza este valor ya que fue el mismo valor utilizado para el modelo de SBR. Para la cinética del reactor en la casilla de tasa máxima especifica de crecimiento de sustrato se coloca un valor de 7.78 d^{-1}. Tomado de la Tabla 48 fila 9. Los demás valores se dejan con los valores predeterminados, debido a la ausencia de información.

En la consistencia del reactor se establece un tiempo mínimo de 1 hora y un tiempo máximo de 12.1 horas. Este último valor es el tiempo de retención hidráulica calculado para el reactor SBR y presentado en la Tabla 31. Es importante destacar, que dentro de este proceso no se realizó ninguna modificación en las ventanas de transporte de masa, estequiometria del modelo y costos operacionales, dejando los valores predeterminados.

Después de realizar la configuración del sistema y pasar al modo de simulación. Se procedió a ejecutar la simulación para un tiempo de simulación de siete días (168 horas). Este tiempo se adoptó considerando el estudio realizado por Gonzales y Giraldo (2019) donde se realizó el monitoreo de un reactor SBR durante siete días y en ese último fue cuando se alcanzaron las máximas eficiencias de tratamiento. En esta simulación y tal como se indicó en el marco metodológico se contemplaron 6 escenarios (ver Tabla 15). En el primer escenario donde se incluyó los parámetros y criterios de diseño establecidos en la metodología (ver Tabla 38.) se corrió la simulación en estado estacionario. En esta simulación se logró apreciar que el sistema en la descarga presentó una concentración de DQO de 86.1 mg/L y 85.99 mg/L de SST (ver Ilustración 10).



		28
Flow	m3/d	259.4
TSS	mg/L	85.89
VSS	mg/L	42.87
cBOD5	mg/L	11.59
COD	mg/L	86.1
Ammonia N	mgN/L	0.3202
Nitrite N	mgN/L	0.2381
Nitrate N	mgN/L	6.058
TKN	mgN/L	4.106
TN	mgN/L	10.4
Soluble PO4-P	mgP/L	0.636
TP	mgP/L	1.798
Total Alkalinity	mgCaCO3/L	36.33
pH	-	7.0
DO	mgO2/L	2.0

Ilustración 10. Resultados del Software en la descarga del MBRR para el escenario 1
Fuente: Adaptado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

Considerando los parámetros de entrada al modelo presentados en la Tabla 34 y los resultados del modelo presentados en la Ilustración 10, se procedió a calcular el porcentaje de remoción obtenido durante el proceso (ver Ilustración 11).

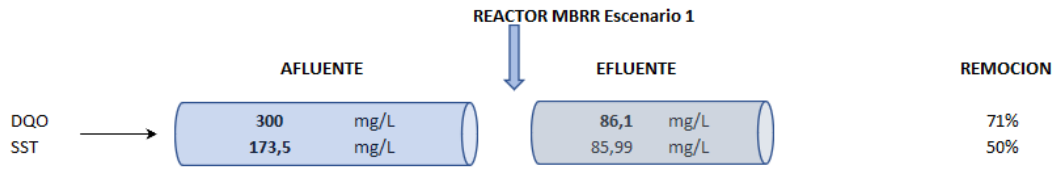


Ilustración 11. Datos remoción DQO y SST Reactor Biomasa adherida de medio móvil escenario 1
Fuente: Tomado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

De acuerdo con la Ilustración 11 el sistema generó una remoción de DQO de 71% y SST de 50%. Al realizar la comparación con el escenario 1 del modelo de reactor SBR de biomasa suspendida (el cual genero una remoción de DQO de 54%). Se permite pensar que los reactores de biomasa adherida de medio móvil generan una mayor eficiencia de remoción de DQO, con un incremento de 17%. Posiblemente estos resultados se deban al uso de un medio de soporte que permite generar una mayor concentración de microorganismos en el reactor, facilitando la degradación de materia orgánica. Es importante resaltar que para este escenario no se alcanzó el porcentaje de remoción de SST deseado. Posiblemente por los valores de fracciones orgánicas predeterminados por el modelo.

Partiendo de estos resultados y con el fin de evaluar la incidencia de la superficie específica del medio, en el comportamiento del reactor para el escenario 2, se redujo este valor pasando de 3000 a 1500 m^2/m^3. Después de correr la simulación para este nuevo valor se logró identificar un incremento en los valores de DQO y SST del orden de 107,7 y 99.62 mg/L respectivamente. Esto representa una reducción de los porcentajes de remoción de 6% para DQO y 7% para SST. Así mismo, permite pensar que entre mayor área superficial del medio mayor será el porcentaje de remoción obtenido en el tratamiento (ver Ilustración 12)

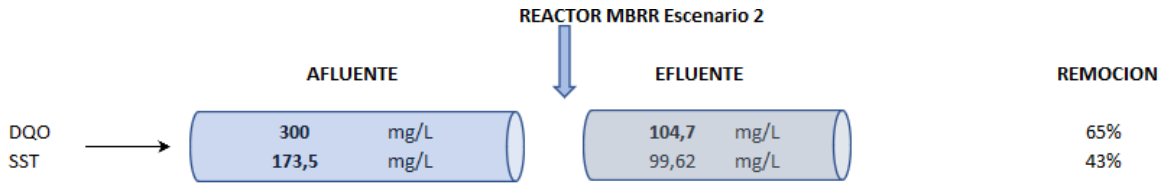


Ilustración 12 Datos remoción DQO y SST Reactor Biomasa adherida de medio móvil escenario 2
Fuente: Tomado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

Con el objetivo de evaluar la incidencia del caudal de entrada al reactor se proyectó un escenario 3. En el cual se varió el caudal de entrada al reactor de 259 m^3/d a 520 m^3/d. Después de correr la simulación para este caudal se observó un incremento en los valores de DQO y SST a la salida del reactor (ver Ilustración 13) a comparación del escenario 1, generando valores de remoción similares al escenario 2, es decir, una reducción de los porcentajes de remoción de 6% para DQO y 8% para SST. Esta reducción aparentemente se da porque el volumen del tanque no es suficiente para tratar el caudal de diseño. En síntesis, hay una reducción en el tiempo efectivo de la reacción.

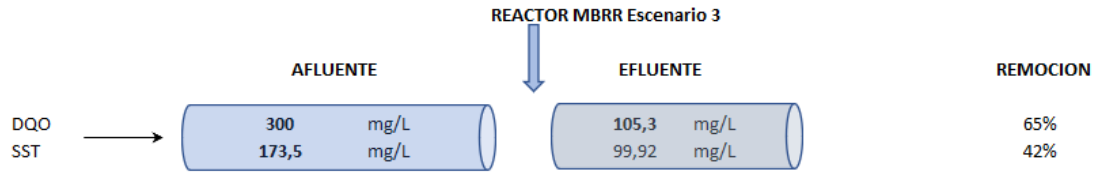


Ilustración 13. Datos remoción DQO y SST Reactor Biomasa adherida de medio móvil escenario 3
Fuente: Tomado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

Con el fin de observar la incidencia de la densidad de la biopelícula del medio en el reactor se proyectó un escenario 4. Inicialmente se utilizó un valor de 52.5 Kg/m^3 y posteriormente un valor de 210 $Kg/m^{3.}$ Después de ejecutar el modelo y como era de esperarse para una densidad de biopelícula de 52.5 Kg/m^3 se observó un incremento en la concentración de DQO y SST a la salida del reactor, generando una reducción de los porcentajes de remoción de 5% para DQO y 7% para SST a comparación del escenario 1. Mientras que para una densidad de biopelícula de 210 Kg/m^3 se obtuvo una mejor calidad del efluente, generando un incremento en los porcentajes de remoción de 4% para DQO y 6% para SST

(ver Ilustración 14). Aparentemente, estos resultados obedecen a que entre mayor es la densidad de la biopelícula se puede mejorar el desarrollo de la población microbiana en ella. Es importante resaltar que estos resultados dependerán de 3 parámetros: espesor del medio, tipo de sustrato y del material de soporte a utilizar.

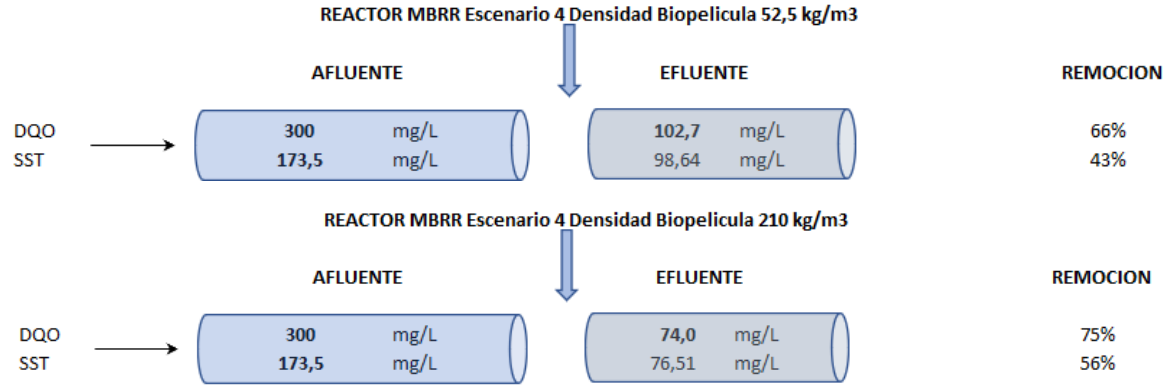
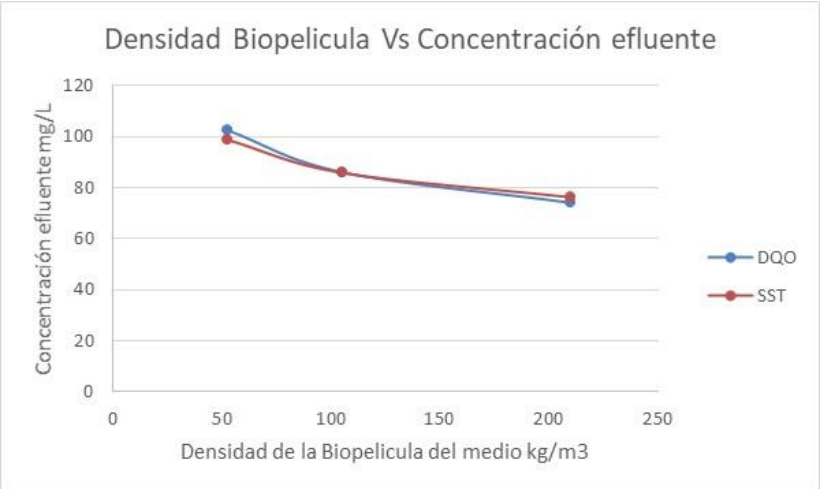


Ilustración 14. Datos remoción DQO y SST Reactor Biomasa adherida de medio móvil escenario 4
Fuente: Tomado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

Con el fin de apreciar mejor la influencia de este parámetro en la calidad del efluente en la Gráfica 4, se observa que entre mayor sea el valor de la densidad de la biopelícula en el medio mejor será la calidad del efluente. Es importante resaltar que de acuerdo con Manga et al (2001) la densidad de la biopelícula es una variable difícilmente manipulable y dependerá de las condiciones del reactor.



Gráfica 4. Densidad de la Biopelícula del medio Vs Concentración efluente
Fuente: Tomado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

Considerando la importancia del volumen del medio a utilizar en el reactor se proyectó un escenario 5. En el cual se varió el volumen del medio del 70 al 8.3%. Después de correr la simulación para este valor se observó un gran incremento en los valores de DQO y SST a

la salida del reactor (ver Ilustración 15), generando una reducción en los porcentajes de remoción de 35% para DQO y 22% para SST en comparación con el escenario 1. Estos valores están por debajo de los resultados esperados para estos sistemas. Estos resultados probablemente sean: primero, porque el software no considera la porosidad del medio, el cual puede influir en el número de colonias de microorganismos que se pueden adherir al medio de soporte; y segundo, porque no se cuenta con información real de la densidad de la biopelícula, del espesor máximo de la capa de *biofilm* o el contenido de material seco en el medio *MUTAG BIOCHIP®.* Por ello se trabajó con valores de estos parámetros predeterminados por el modelo

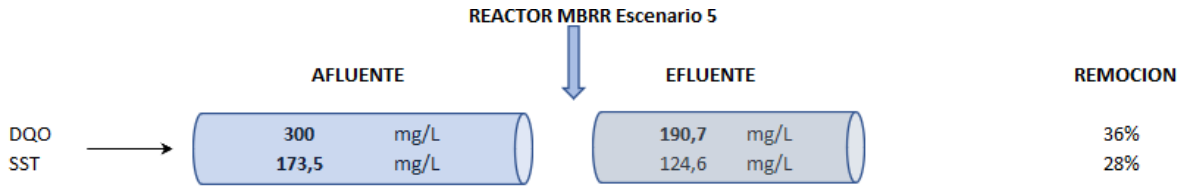


Ilustración 15. Datos remoción DQO y SST Reactor Biomasa adherida de medio móvil escenario 5
Fuente: Tomado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

Por último, y con el fin de comparar el diseño hidráulico del reactor SBR con y sin medio, Se proyecta un escenario 6, en el cual se consideraron los parámetros de diseño del reactor con medio presentados en la Tabla 31 y los parámetros relacionados con la biopelícula en la Tabla 38. Después de correr la simulación con estos cambios se observó una mínima remoción de DQO y SST en el reactor (ver Ilustración 16), generando los mismos resultados que el escenario 5. Este resultado permite pensar que el volumen proyectado en el diseño para el tanque de 33.34 m^3 y el volumen de llenado del medio es insuficiente para generar un porcentaje de remoción deseado en el efluente y para tratar el caudal de ingreso a la PTAR.

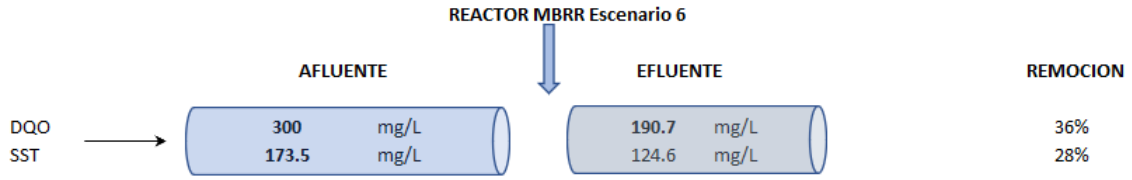


Ilustración 16. Datos remoción DQO y SST Reactor Biomasa adherida de medio móvil escenario 6
Fuente: Tomado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

A continuación, en la Tabla 39 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en los seis escenarios para este tipo de reactor

Tabla 39. Resumen Resultados Rector Biológico SBR con biomasa adherida de lecho móvil

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
DQO Entrada (mg/L)	300	300	300	300	300	300
DQO Salida (mg/L)	86.1	104.7	105.3	102.7 -74	190.7	190.7

Remoción (%)	71	65	65	66 -75	36	36
SST Entrada (mg/L)	173.5	173.5	173.5	173.5	173.5	173.5
SST Salida (mg/L)	85.99	99.62	99.92	98.6–76.5	124.6	124.6
% Remoción	50	43	42	43-56	28	28

Fuente: Tomado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

Finalmente, y con los resultados obtenidos en los dos modelos se logró apreciar (Para los dos Escenarios 1) que aparentemente un reactor de biomasa adherida de medio móvil puede generar mayores eficiencias y porcentajes de remoción en comparación con un reactor de biomasa suspendida, para valores de 71 y 54% respectivamente. Sin embargo, es importante resaltar que la remoción en el reactor de medio móvil de biomasa adherida dependerá de las características y del comportamiento del medio a utilizar. Adicionalmente, se observa la necesidad de evaluar en un futuro proyecto, en la prueba física-experimental la densidad, espesor y el contenido de material seco en la biopelícula. De esta manera, se podrá contar con datos suficientes para evaluar matemáticamente el tratamiento sin tener que tomar valores por defecto o dar valores aleatorios y tener mayor certeza en que el reactor de biomasa adherida si genera una mayor remoción de DQO y SST en comparación con el reactor de biomasa suspendida.

6. Conclusiones

- La evaluación matemática de los dos tipos de reactores permite pensar que los reactores de biomasa suspendida de medio móvil generan mayores porcentajes de remoción de DQO y SST. Sin embargo, estos resultados estarán sujetos al tipo de medio a utilizar.

- Se encontró dificultades para probar que el reactor de biomasa adherida de medio móvil puede tratar el mismo caudal de diseño que un reactor de biomasa suspendida, debido a que cuando se usa un tanque de menor volumen los resultados de la simulación muestran deterioro en la calidad del agua efluente del reactor, lo cual no corresponde a lo esperado en la realidad

- En las pruebas físicas realizadas para la evaluación de los medios de soporte a utilizar se evidencio que el *MUTAG BIOCHIP*® puede generar problemas operacionales en el arranque de la planta debido a la flotabilidad del mismo. Este, dependiendo de la cantidad a utilizar puede tardar hasta 1 mes para sumergirse completamente. Así mismo se logró evidenciar que el *MUTAG BIOCHIP*® requiere una mayor potencia para el sistema de mezcla, incrementando los costos de operación.

- En las pruebas microbiológicas realizadas para la evaluación de los medios a utilizar se comprueba que el parámetro de área superficial influye en la cantidad de células que se pueden adherir al mismo, situación que resulta lógica y que era de esperarse. Para el caso del *MUTAG BIOCHIP*® se calculó una concentración de células entre un rango de 3.4E+08 y 4.9E+08 de UFC/ml, mientras que para las perlas de alginato de calcio un rango de 7.7E+06 y 1.1 E+08 de UFC/ml.

- Con la ayuda de la técnica de coloración de Gram se identificó la presencia de bacilos Gram negativos en el agua residual proveniente de estaciones de servicio. Dentro de este grupo y en este tipo de agua es muy común encontrar la bacteria Gram negativa - *Pseudomonas Aeruginosa*. Esta se destaca por ser una bacteria degradadora de hidrocarburos. Su presencia favorece y ayuda al proceso de tratamiento de este tipo de agua residual mediante la degradación de hidrocarburos, fenoles, grasas y aceites.

- Debido a que el medio *MUTAG BIOCHIP*® desde el punto de vista técnico presento mayores rendimientos y ventajas en comparación con el alginato de calcio, para el desarrollo de este estudio se realizó la selección de este medio. Sin embargo, el Alginato de Calcio arrojo resultados prometedores, por lo cual se concluye que este el medio podría ser eventualmente utilizados en otros estudios.

- Se observa que el software GPS-X es un software muy completo, amigable con el usuario y de fácil manejo. Cuenta con una biblioteca que permite correr simulaciones hasta cuando la información de entrada es escasa, como es el caso de este proyecto. Sin embargo, se encontró una dificultad dado que los resultados obtenidos en las simulaciones no coinciden con lo esperado frente a eficiencias de remoción y tiempos de reacción.

- Se comprobó matemáticamente que el reactor de biomasa adherida de medio móvil cuenta con mayor capacidad de remoción de DQO en comparación con el reactor de biomasa suspendida.

7. Recomendaciones

- Se recomienda sumergir primero en agua el medio *MUTAG BIOCHIP*®, para evitar problemas operacionales ocasionados por la flotabilidad del medio. Con ello, es posible mejorar los rendimientos del medio desde el comienzo de la prueba.

- Resulta conveniente realizar la prueba física – experimental planteada inicialmente por este estudio, con el fin de definir los parámetros de diseño para un reactor de medio móvil, tal como cantidad de medio a utilizar y tiempos de retención óptimos.

- Se sugiere realizar una prueba física – experimental utilizando un reactor SBR de biomasa adherida utilizando como medio móvil el alginato de calcio. Este, según los datos obtenidos por el presente estudio, promete buenos resultados a bajos costos de operación.

- En las caracterizaciones fisicoquímicas realizadas a un agua residual se recomienda calcular las diferentes fracciones orgánicas de la misma en función de la DQO y la DBO.

- Para ensayos similares, se sugiere evaluar en las pruebas físicas – experimentales de reactores de biomasa adherida de medio fijo o medio móvil la densidad de la biopelícula, el espesor y contenido de material seco de la misma. De esta manera es posible evaluar eficientemente el comportamiento del sistema de tratamiento con el medio de soporte a utilizar.

BIBLIOGRAFÍA

Alcaldía Mayor de Bogotá. (6 de Marzo de 2000). Por medio del cual se toman medidas transitorias y preventivas en materia de tránsito en las vías públicas en el Distrito Capital y se dictan otras disposiciones. (Decreto 078 de 2000).

APCO ATLANTIC S.L (2014). Nuevos medios portantes para tecnología MBBR, más rendimiento y respeto medioambiental. (Reportaje) Recuperado de https://www.aguasresiduales.info/revista/reportajes/nuevos-medios-portantes-para-tecnologia-mbbr-mas-rendimiento-y-respeto-medioambiental

Arévalo. A., Ramón. J., & Ramón. J., (2015). Estimación cinética de los procesos biológico de lixiviados, a partir de un sistema experimental con humedales artificiales utilizando especies nativas. (Articulo). Revista de Tecnología ISSN 1692-1399, Vol. 14, N. 2, 2015, pg 37-48.

Arnáiz, C., & Lsac Y Juman Lebrato, L. (2000). Tratamiento biológico de aguas residuales (Revista Tecnología del Agua, marzo de 2000) 1. Eliminación de carbono orgánico. 7. Recuperado de http://cidta.usal.es/residuales/libros/logo/pdf/Tratamiento_biologico_edar.pdf

Balda, R., (2019). Apuntes de clase Recurso agua. Universidad de la Salle

Bassin et al. (2016). Effect of increasing organic loading rates on the performance of moving -bed *biofilm* reactors filled with different support media: Assessing the activity of suspended and attached biomass fractions. Artículo. Science Direct Process Safety and Environmental Protection 100 (2016) 131-141

Braibant. C., (2004). Estudio del potencial de degradación de los hidrocarburos por Acinetobacter sp. y Pseudomonas putida para su aplicación en la biorremediación de suelos contaminados. Informe de práctica de especialidad. Instituto tecnológico de Costa Rica, Cartago.

Bush. L., & Pérez. M., (2018). Infecciones por Pseudomonas y patógenos relacionados. Recuperado de https://www.msdmanuals.com/es-pe/professional/enfermedades-infecciosas/bacilos-gramnegativos/infecciones-por-pseudomonas-y-pat%C3%B3genos-relacionados#

Bustos, M. C. (2019). Asignatura Calidad del agua – Universidad Nacional

Cante, R. y Martínez, M (2017). Documento de clase asignatura simulación de procesos de tratamiento. Universidad Nacional de Colombia

Comisión Nacional del medio ambiente – Región Metropolitana. (1999). Guía para el control y prevención de la contaminación industrial. Estaciones de servicio.

Contreras, E. (2009) Diapositivas Evaluación Multicriterio. Clase Evaluación social de proyectos

Dautan. R., Pérez. M., Contreras. A., Marzana. A., Rincones. B., (1988). Diseño Y Construcción De Un Reactor discontinuo Secuencial Para Remociones DBO. XXVI Congreso Interamericano de AIDIS, Lima, Perú. Venezuela

Delgado. L. (2017). Preparación de la escala de McFarland. (block). Recuperado de http://microlydiadt.blogspot.com/2017/02/preparacion-de-la-escala-de-mcfarland.html

Kimberley A. Whitman et al "Finfish and shellfish bacteriology manual: techniques and procedures" First Edition. United States. Wiley-Blackwell, 2004.

Dueñas. C., & Valle. R., (2013). Microbiología Oral (Diapositivas de clase). Septiembre 5 de 2013

EcuRed, (2019). Tinción de gram. Block. recuperado de https://www.ecured.cu/Tinci%C3%B3n_de_Gram).

Eguia Emilio. (1991). Desarrollo de la biopelícula en medio soporte permeable (Trabajo de grado). Universidad de Cantabria, Santander, Colombia

González, H., Giraldo, J. (2019). Prueba piloto para la evaluación de MUTAG en el tratamiento de aguas residuales provenientes del sector de hidrocarburos (Trabajo de grado). Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia

Hernández Covarrubias, S. A., (2011). Inmovilización de microorganismo en esferas de alginato como protección contra condiciones adversas en un tratamiento de agua residual. (Trabajo de grado). Centro de Investigaciones biológicas del Noroeste, S.C., La paz Baja California Sur, México.

Hernández et al., 2019. Tratamiento de aguas residuales provenientes de estaciones de Gasolina mediante ozonización catalítica. Artículo. Revista Ingeniería y Competitividad. Volumen 21(1): 23-34. (2019).

Hydromantis (2019). Guía tutorial GPS-X. Paso a paso para aprender y conseguir familiarizarse con el Software

Hydromantis (2019). Guía de usuario GPS-X.

Jahren, Rintala, Odegaard, (2002). Aerobic Moving bed *biofilm* reactor treating thermomechanical pulping whitewater under thermophilic conditions. Artículo. Revista Water Research 36 (2002) 1067-1075

Lupo Pasin, B. (2012). Microencapsulación con alginato en alimentos. Técnicas y aplicaciones. Artículo. Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos. Vol 3(1): 130-151. Enero- junio, (2012)

Lewandowski, Z., & Boltz, J. P. (2011). *Biofilms* in Water and Wastewater Treatment. In Treatise on Water Science (Vol. 4, Issue October 2017). https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00095-6

Manga, H., Valencia, A., & Ospino, A. (2011). Diseño de un reactor de lecho fluidizado para el tratamiento de las aguas residuales industriales en el centro de investigación de tecnologías ambientales “cita” de la corporación universitaria de la costa. (Trabajo de grado). Corporación Universitaria de la Costa, Barranquilla, Colombia.

Metcalf & Eddy. (1995). Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización. 3ra edición Volumen I y II: Mc Graw Hill.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible (18 de abril de 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. (Resolución 631 de 2015). DO: 49.486

Ministerio de Minas y Energía - MINMINAS. (4 de agosto de 1998). Por la cual se reglamenta el almacenamiento, manejo, transporte y distribución de combustibles líquidos derivados del petróleo, para estaciones de servicio. (Decreto 1521 de 1998). DO: 43.357

Molina Judith., (2015). Evaluación de la eliminación de materia orgánica y nitrógeno de las aguas residuales en un reactor biopelícula de membrana tubular aireada. (Trabajo de grado). Universidad da Coruña, A coruña.

Moreno, C. A., & Prieto, E. V. (2018). Desarrollo de pellets de alginato de calcio que permitan la liberación de un aceite esencial. (Trabajo de grado). Universidad de América, Bogotá, Colombia

Moreno, J., (2002). El proceso analítico jerárquico (AHP). fundamentos, metodología y aplicaciones. Universidad de Zaragoza

Muñoz, J. F., & Ramos, M. R. (2014). Sequential Batch Reactors: Universidad Militar Nueva Granada - Ciencia E Ingeniería Neogranadina, 5 mayo 2014, 49–66

Nava Urrego, L. M., Gasperín Sanchéz, R., & Durán Moreno, A. (2014). Comparación de un reactor de biomasa suspendida y un reactor de biomasa adherida para la biodegradación de compuestos tóxicos presentes en aguas residuales de refinerías de petróleo. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 30(1), 101–112

Noyola. A., Morgan- Sagastume. J., & Güereca. L., (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas. Universidad Nacional Autónoma de México. México

Pedroza A., Quevedo B y Matiz A., (2007). Manual de laboratorio de procesos biotecnológicos. Departamento de microbiología, Pontificia Universidad Javeriana. Pg 82-83

Pérez Madueño, M., & Rifi Zaitouni, I., (2011). Detección y eliminación de fumonisinas en alimentos. (Trabajo de grado). Universidad politécnica de Cataluña. España

Practica 23 de Microbiología, (2017). Escala McFarland. Recuperado de (https://fiestadelosmicroorganismos.wordpress.com/2017/03/02/practica-23-escala-mcfarland/).

Practica de Laboratorio: Microbiología, (2017). Escala McFarland. Laboratorio clínico y biomédico. Curso 2017-2018. Recuperado de http://microbiologiabohio.blogspot.com/2018/01/escala-de-mcfarland.html

Reyes. J., (2016). Formulación y diseño de un sistema de fitorremediación para tratamientos de aguas hidrocarburadas en estaciones de servicio biomax. (Trabajo de grado). Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia

Sánchez. J., Mejía. A., & Amorocho, (2015). Software de ingeniería especializado en el diseño y simulación de plantas de tratamiento de agua residual: revisión. Revista Ingeniería y Región. 2015; 13 (1): 57-71

Romero Granda, P.A. (2015). Utilización de materiales de reciclaje como medio de soporte en reactores aerobios de biopelícula para tratamiento de agua residual doméstica (Trabajo de grado). Universidad Técnica de Machala, El Oro, Ecuador

Romero Rojas, J.A. (2004). Tratamiento de aguas residuales. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería. p. 650-1197.

Sabri et al, (2017). Dynamic simulation for wastewater treatment plants management: Case of Souk-Ahras region, north-eastern Algeria. (Artículo). Journal of Water and Land Development 34(1). DOI: 10.1515/jwld-2017-0057

Sanabria Cubillos, A., & Pacheco Ojeda, J. D. (2019). Diseño y evaluación de un reactor biológico de lecho móvil de cargas secuenciales como alternativa de tratamiento para un vertimiento procedente de una industria farmacéutica. (Trabajo de grado). Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia

Tabares. J., Gallo. L., & Mancipe. N., (2018). Selección de un modelo matemático mediante la metodología ahp para modelar de techos verdes en Colombia. Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo. ISSN 1900-771X/E-ISSN 2422-4324

Tomaszek, J. A., & Grabas, M. (1998). B*iofilm* Reactors. In Chemistry for the Protection of the Environment 3. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9664-3_13

Vargas Andrea. (2004). Factores que favorecen el desarrollo y el crecimiento de biopelículas en las tuberías de dos los sistemas de distribución de agua potable. Estado del ate. (Trabajo de grado). Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Wiley-Blackwell, (2004). Kimberley A. Whitman et al "Finfish and shellfish bacteriology manual: techniques and procedures" First Edition. United States.

Zalakain, G., & Manterola, G. (2011). Tratamiento de Aguas: Procesos avanzados de biomasa fija sobre el lecho móvil para el tratamiento de aguas residuales en la Industria Farmacéutica. Farmespaña Industrial, 98–101.

Zenit Technologies. (2014). Rellenos para lechos móviles (MBBR) Rellenos para lechos móviles (MBBR).

ANEXOS

Anexo A: Elaboración Alginato de Calcio

Para la elaboración del Alginato de Calcio se tuvo en cuenta la metodología expuesta por Pedroza A., Quevedo B y Matiz A., (2007). El procedimiento para la elaboración se relaciona a continuación:

MATERIALES REQUERIDOS:

Los materiales a utilizar son los siguientes:

- Alginato de Sodio 0.5 gr
- 25 ml de muestra de agua residual proveniente de la estación de gasolina
- Cloruro de Calcio ($CaCl_2$) * 1.5 gr.
- Agua destilada 100 ml y Autoclave

Nota: *En Colombia se encuentra restringida la venta del cloruro de calcio hasta 5 kilos al mes.

PREPARACIÓN ALGINATO DE SODIO 2%:

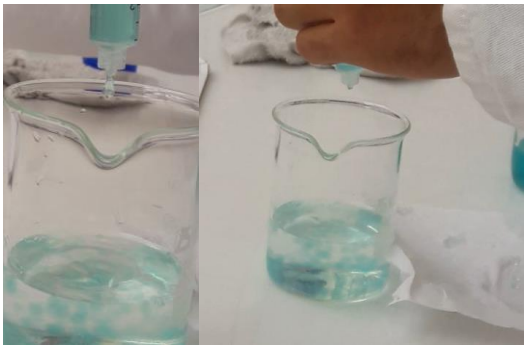
Bajo condiciones de esterilidad, pesar 0.5 gr de alginato de sodio y adicionarlos en 25 ml de muestra de agua residual proveniente de la estación de servicio. Proceder a mezclar y homogenizar con pipeta de vidrio estéril hasta que no se observen aglutinaciones.

PREPARACIÓN CLORURO DE CALCIO 1.5%:

Pesar 1.5 gr de Cloruro de Calcio y disolverlos en 100 ml de agua destilada. Esterilizar en autoclave por 15 min a 15 libras de presión. Posteriormente guardar la mezcla a 4ºC, debidamente rotulado.

PREPARACIÓN DE LAS PERLAS DE ALGINATO DE CALCIO:

Con una jeringa tomar la solución de Alginato de Sodio y adicionar gota a gota sobre la solución de cloruro de calcio previamente refrigerada. De esta manera, al momento de que la gota caiga sobre el cloruro de calcio se forma la perla. Es importante destacar, que este proceso debe ser lento y cuidadoso pues en caso de adicionar varias gotas a la vez, la perla pierde su forma cilíndrica y comienza a formar una estructura alargada y aplanada (ver Fotografía 6).



Fotografía 6. *Elaboración Alginato de Calcio*
Fuente: Elaboración Propia

Anexo B: Encuesta para valoración de los criterios y aspectos a evaluar en la selección del medio

La encuesta enviada a los profesionales e investigadores se observa en la Tabla 40.

Tabla 40. Encuesta para la evaluación del nivel de importancia de criterios y aspectos a evaluar en la selección del medio

SISTEMAS AEROBIOS CON LECHO MÓVIL	
OBJETIVO:	El objetivo de este ejercicio es seleccionar un medio de soporte biológico para posteriormente evaluar su desempeño en un reactor biológico con el fin de tratar las aguas residuales provenientes de una estación de servicio. Dentro de las múltiples opciones de lecho móvil se proyecta primero el uso del medio conocido como *MUTAG BIOCHIP*® desarrollado por la empresa alemana *Multi Unwwelttechnologies*, distribuido en España por *Zenit technologies SL* y en Colombia por R&R Ingeniería. Segundo el alginato de calcio el cual puede ser preparado fácilmente en el laboratorio con alginato de sodio y cloruro de calcio.

1. Indique sus datos personales en el campo correspondiente, los campos con asterisco (*) son obligatorios	
Nombre completo*:	
Formación profesional*:	
Actividad que desempeña actualmente*:	

2. Marque con una X de 1 a 5 la importancia de los parámetros de evaluación presentados en la pestaña CRITERIOS ". Siendo 1 "Sin importancia" y 5 "Importancia máxima", califique una única vez cada criterio.					
PARÁMETRO	**CALIFICACIÓN**				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
Factibilidad técnica					
Factibilidad Económica					
Factibilidad Ambiental					

3. Marque con una X de 1 a 5 la importancia de cada uno de los aspectos presentados en la pestaña CRITERIOS, de acuerdo con su experiencia y/u otras fuentes de preferencia. Si considera que el aspecto a evaluar no es importante y prefiera no calificar, puede hacerlo. Siendo 1 "Sin importancia" y 5 "Importancia máxima", califique una única vez cada aspecto.					
ASPECTO A EVALUAR	**CALIFICACIÓN**				
Factibilidad Técnica	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Requerimiento sistema de adaptación dentro del reactor para el medio					
Capacidad de adherencia microbiológica, Mayor relación área superficial - volumen y permeabilidad					
Resistencia del medio					
Dificultad fabricación y dosificación del medio					
Disponibilidad de materiales					
Factibilidad Económica	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Costos Fabricación y suministro del medio					
Costos de Reposición de material					
Costos de Logística tratamiento y disposición final					

Factibilidad Ambiental	1	2	3	4	5
Generación de Residuos					
Biodegradabilidad del medio					

4. Considera que debe evaluarse algún Criterio y/o Aspecto Adicional, sí es así indiqué Cuál y el Por qué lo considera relevante? ¿Y qué nivel de Importancia tendría?

OBSERVACIONES, COMENTARIOS Y SUGERENCIAS

Tesis de Maestría Ingeniería - Recursos Hidráulicos - Universidad Nacional

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 41 se presenta la información anexada a la encuesta y que tenía como objetivo contextualizar al profesional o investigador sobre características de los dos medios a evaluar. Este archivo incluye una descripción rápida del medio, las ventajas y desventajas de cada uno, y los costos de fabricación o compra del mismo

Tabla 41. Información de los medios móvil a utilizar

Medio	Descripción	Ventajas	Desventajas	Costos
MUTAG BIOCHIP®	Es un soporte de alta capacidad con una gran superficie porosa. Es desarrollado por la Empresa Alemana *Multi Unwelttechnologies*, distribuido en España por *Zenit technologies SL* y en Colombia por R&R Ingeniería. Cuenta con una densidad 170 gr/L	Superficie activa mayor a 3000 m^2/m^3	Inicialmente y debido al aire en sus poros, el medio se mantiene flotando sobre la superficie por un tiempo alrededor de 7 días, por lo que es necesario adecuar el reactor	Aproximadamente 2500 discos cuestan $1.000.000
		Genera una mayor concentración e inmovilización de microorganismos		
		No se deforman con la aireación ni agitación en el reactor	El medio se exporta desde Alemania mediante la firma RYR Ingeniería, por lo que, si no se cuenta con stock en Colombia, podría tardar hasta un mes para contar con el material	
		El medio puede ser fácilmente suministrado al reactor, sin requerir equipos especiales		
Alginato De Calcio	El alginato de calcio tiene la capacidad de actuar como agente estabilizante, gelificantes, espesantes y formadores de películas. Los alginatos se transforman rápida y suavemente por	El medio mantiene un contacto directo con el agua todo el tiempo.	Pueden bloquearse por la alta absorción de nutrientes, lo que disminuye su capacidad y velocidad de absorción de nutrientes	Aproximadamente los insumos químicos para la fabricación de 2500 Perlas de alginato cuestan menos de $20.000
			Genera una menor concentración e inmovilización de microorganismos	

Medio	Descripción	Ventajas	Desventajas	Costos
	reacciones de intercambio iónico. La producción de alginato de sodio, se lleva a cabo con una solución de cloruro de calcio para obtener un precipitado de alginato de sodio.		El deterioro es un proceso gradual de la esfera debido al crecimiento de los microorganismos dentro de la misma; algunos estudios reportan formaciones sobre la superficie tipo protuberancia o abultamiento	
			El alginato de calcio requiere de químicos y equipos esterilizados y refrigerados a 4°. Se requiere de una bomba peristáltica para decantar gota a gota la solución de alginato en la solución estéril y refrigerada de cloruro de calcio	
			La fabricación de las perlas requiere el químico cloruro de calcio, el cual en Colombia se restringe su venta hasta 5 kilos al mes, lo que podría convertirse en un problema.	

Fuente: Elaboración propia

Anexo C: Procedimiento Preparación de la Escala de McFarland

La escala de McFarland se utiliza como patrones de turbidez en la preparación de suspensiones de sulfato de bario de microorganismos. Es una curva estándar construida con una suspensión testigo de concentración celular conocida. Consta de 11 patrones (desde 0.5 a 10) cada uno de los cuales tiene una turbidez comparable a la de una suspensión bacteriana con una densidad determinada (Practica de Laboratorio: Microbiología, 2017). Estos patrones son creados al mezclar soluciones de cloruro de bario al 1% con ácido sulfúrico al 1% en volúmenes específicos (Wiley-Blackwell, 2004).

MATERIALES REQUERIDOS: Los materiales a utilizar son los siguientes:

- 5 tubos de ensayo
- Balanza electrónica
- Espátula
- Cloruro de Bario 1%
- Ácido sulfúrico 1%
- Agua destilada
- Papel de Filtro
- Pipeta Pasteur
- Micropipeta
- Espectrofotómetro

PREPARACIÓN ESCALA MCFARLAND

Se deben rotular los tubos en ensayo de 0.5 a 4. Luego a cada uno de los tubos se deben agregar ácido sulfúrico y cloruro de bario, tal y como se aprecia en la Tabla 42.

Tabla 42. Patrones Escala McFarland

No.	$BaCl_2$ (ml)	H_2SO_4 (ml)	Vf (ml)	No. Células
0.5	0.05	9.95	10	1.5×10^8
1	0.1	9.9	10	3×10^8
2	0.2	9.8	10	6×10^8

Fuente: Fuente: Dueñas y Valle (2013)

Luego se deben sellar los tubos y taparlos con papel de filtro para evitar que los rayos de luz reaccionen con la solución y afecten la medición. Después, con ayuda de un espectrofotómetro se procede a medir en tres ocasiones la densidad óptica, también conocida como absorbancia a 600 nm de longitud de onda. La absorbancia mide la luz transmitida a través de una suspensión de cada uno de los patrones y está en unidades formadoras de colonias por mililitros (UFC/ml) (Practica de Laboratorio: Microbiología, 2017). Es importante resaltar, que para llevar a cabo esta medición el blanco será solución salina fisiológica al 0.85%, este valor debe ser restado en el valor obtenido en cada una de las muestras a analizar. Posteriormente y con esos datos se procede a realizar la curva estándar que tiene como objetivo relacionar los valores de la absorbancia con la masa bacteriana a estudiar. Finalmente, para estimar la densidad bacteriana de una suspensión se compara visualmente su turbidez con la de los patrones realizados a la escala de McFarland.

Anexo D. Revisión Bibliográfica de Reactores Biológicos de Biomasa suspendida y Biomasa adherida de medio móvil

Con el fin de realizar el diseño hidráulico del reactor, se requirió conocer más acerca de los parámetros de diseño y condiciones de operación de los reactores biológicos tipo SBR con biomasa suspendida y biomasa adherida de medios de soporte fijo y móvil, con lo cual inicialmente se encontraron 9 estudios, investigaciones, proyectos o artículos relacionados con el uso de la tecnología SBR con biomasa suspendida para el tratamiento de aguas residuales provenientes de diferentes sectores industriales. Esta información se presenta en la Tabla 43

Tabla 43. Estudios de caso utilizando el Reactor SBR

ID	Título y Autor/es	Formato y Referencia	Objetivo de la Investigación	Parámetros de diseño	Parámetros de control	Conclusiones
1	Diseño y construcción de un reactor discontinuo secuencial para remoción de DBO Dautan, F., Pérez, M., Contreras, A., Marzana, A. y Rincones, B., (1988)	Dautan et al., (1988). Memorias del XXVI Congreso Interamericano de AIDIS, LIMA, PERU.	Ampliar el espectro de información que se tiene en cuanto a la eficiencia de los reactores SBR, mediante el tratamiento de un agua residual sintética standard (agua residual domestica)	El reactor tipo SBR de aireación extendida tiene un volumen de 50 L. Cuenta con tres bombas de pecera y cinco salidas de aire. Un sistema de agitación con una velocidad de 7 rpm y 0.016 HP, conformado por dos paletas cruzadas a 90°, una paleta de encuentra a una altura de 1/3 h y la otra a 2/3 h. **Criterios Diseño**: Edad de lodos 30 días, TRH: entre 24 y 48 hrs. Tiempo llenado y vaciado: 2 min. Volumen de llenado y/o extraído en cada cochada 60% y 40% de biomasa. Se realizaron dos procesos con cargas de 15 Litros c/u.	El primer proceso estudia la remoción de DBO con una SSTLM entre 1800 – 2200 mg/L y una F/M entre 0.11 y 0.07 d^{-1}. En el segundo se estudia la remoción de DBO y nitrificación con una SSTLM entre 3175 y 3945 mg/L y una F/M entre 0.08 y 0.055 d^{-1}, incluyendo una fase anóxica en el proceso de reacción. El proceso de aclimatación duro dos semanas y su operación se llevó a cabo en tres semanas. Dentro de este tiempo se realizó la medición de SST, SSV, DBO, pH y OD tanto a la entrada como a la salida del reactor.	El estudio logro identificar que el sistema de aireación utilizado es tres veces mayor al requerido. Así mismo, se identificó que en el primer proceso la eficiencia de DBO es de 96 y 97%. Mientras en el segundo se obtuvieron eficiencias entre 92 y 98%. Finalmente concluye que los SBR presentan mejores rendimientos de remoción de DBO y SS en comparación con un sistema de lodos activados con aireación extendida.
2	Biodegradación de fenol en un reactor discontinuo de alimentación secuenciada. García, J., (2007)	García, J., (2007) Tesis de grado. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca de Soto	Aplicar la tecnología del reactor SBR a la biodegradación de fenol y optimizar el proceso mediante el modelado y automatización del mismo	El reactor tiene un volumen de 2.5 L. Se utilizó un lodo activado con una concentración de fenol de 1g/L. El sistema tiene una velocidad de agitación 300 rpm y un Q aire de 3 L/min. El reactor está provisto de agitación mecánica y control de nivel e inyección de aire. **Criterios Diseño:** Tiempo Llenado 3 hrs, Reacción 24 hrs, Sedimentación 45 min, Descarga 5 min, Lapso entre ciclos de 2 min.	El tratamiento fue evaluado por tres meses. En donde se obtuvieron poblaciones microbianas para eliminar diariamente 700 mg/L de Fenol. Se utilizaron diferentes perfiles de alimentación para aumentar la velocidad de degradación y para incrementar la	El estudio indica que la degradación del fenol fue del 100%. Recomienda que después de cada 3 ciclos se realice una purga de la biomasa, con el fin de mantener una población microbiana joven y volver a las condiciones iniciales del proceso.

ID	Título y Autor/es	Formato y Referencia	Objetivo de la Investigación	Parámetros de diseño	Parámetros de control	Conclusiones
					concentración de la molécula contaminante a estudiar.	
3	Monitoreo de la remoción biológica de nitrógeno en efluentes de tenerías usando un reactor por carga secuencial. Carrasquero, S., Pire, M., Rincón, N., y Díaz, A., (2014)	Carrasquero et al., (2014). Articulo arbitrado Revista Ingeniería Investigación y Tecnología, Volumen XV (número 2), ISSN 1405-7743 FI-UNAM	Relacionar el proceso de remoción de nitrógeno a escala de laboratorio en un SBR para aguas residuales provenientes de tenerías con los perfiles de OD, pH, ORD y AT	El reactor tiene un volumen de 2 L. Trabajo con dos secuencias operaciones 1. Ax- Ae-aAx y 2. Ae – Ax. El sistema esta automatizado para carga y descarga del agua, tiene dispositivos de control de tiempo y sistemas de aireación (suministro aire por un compresor) y agitación mecánica (potencia 15 W y 1300 rpm). **Criterios Diseño:** Edad lodos: 15 y 25 días. TRH: 15.6 hrs. Volumen de llenado y/o extraído en cada cochada 70% y 30% de biomasa. Tiempo llenado 0.25 hrs, Reacción 11 hrs, Sedimentación 0.5 hrs, Descarga 0.25 hrs.	El tratamiento fue evaluado durante un mes, la primera semana se utilizó para estabilizar el reactor y en las siguientes tres semanas se realizaron tres repeticiones de tratamiento por semana. Durante el ciclo de reacción cada 15 min se midieron parámetros como pH, OD, ORP. Y cada hora se midieron parámetros como AT, DQO, NTK, NO_2^-, NO_3^- y NH_4^+.	El tratamiento permitió la remoción de N y MO. El estudio demostró que la AT y el ORP pueden utilizarse como parámetros de control en el proceso de remoción biológica del N, sin embargo, el pH no puede utilizarse como un parámetro de control y operación debido a su capacidad de amortiguación
4	Evaluación de la eficiencia de un reactor por carga secuencial tratando aguas residuales provenientes de un Matadero de reses. Carrasquero, S., Matos, E., Saras, F., Pire, M., Colina, G., y Díaz, A., (2014)	Carrasquero et al., (2014). Articulo Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V, Volumen 29 (número 3), pp.7-16	Evaluar la eficiencia de un reactor SBR para el tratamiento de aguas residuales provenientes de un matadero de redes, aplicando dos tiempos de retención hidráulica, para lograr la remoción de MO, N y PT	El reactor tiene un volumen de 2 L. Trabajo con una secuencia operacional AN/ Ae / Ax. El sistema esta automatizado para la carga y descarga del agua, tiene dispositivos de control de tiempo y sistemas de aireación (suministro de aire por un compresor) y agitación mecánica (revoluciones del motor 300 rpm). **Criterios Diseño:** Edad de lodos: 25 días. Volumen de llenado y extraído en cada cochada 70%, 30% de biomasa. Tiempo llenado 15 min, Reacción de 10 y 12 hrs. Sedimentación 30 min y descarga 15 min.	El proceso de aclimatación se realizó con aireación continua durante ciclos de 24 horas durante dos semanas, hasta alcanzar valores de remoción de DQO por encima del 50% y buenas características de sedimentabilidad en el lodo. La operación se llevó a cabo en el siguiente mes, evaluando su eficiencia a través de la medición de parámetros de DQO, DBO, NTK, NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-, pH, AT, SST, SSV y PT tanto a la entrada como a la salida del reactor después de cada ciclo.	Los análisis se realizaron tres veces por semana, de tal manera que se realizaron mínimo nueve repeticiones por tratamiento Para los dos tiempos de reacción se lograron remociones de DQO superiores al 89%. Sin embargo, el tratamiento de 12 hrs genero mayores rendimientos en la remoción de NTK, NH_4^+, NT en comparación con el tratamiento de 10 hrs.
5	Reactores discontinuos secuenciales: una tecnología versátil en el tratamiento de aguas residuales. Muñoz, J., y Ramos, M., (2014)	Muñoz, J., y Ramos, M., (2014). Articulo Revista Ciencia E Ingeniería Neogranadina. Universidad Militar Nueva Granada. Volumen 14 (número 1), pp.49-66. ISSN 0124-8170	El articulo permite un mayor acercamiento a los reactores SBR, mediante un mejor conocimiento del funcionamiento y de los principales parámetros de operación.	Los reactores SBR tienen 4 etapas: llenado, reacción (mediante procesos aerobios y anaerobios), sedimentación y vaciado. La configuración de cada ciclo depende de las características del agua residual y los requisitos del vertimiento a cumplir. Estudios han demostrado que los reactores con biopelícula tienen mayor porcentaje de remoción.	El sistema inicialmente se utilizó para la remoción de DQO y Fosfatos, sin embargo, ha sido ampliamente usado para la remoción de N, el cual ocurre gracias a la combinación en el ciclo de la reacción (proceso aerobio y anaerobio). En los últimos años, se ha venido utilizando los SBR con biopelícula, el cual tiene la ventaja de remover N y PT en un solo reactor.	El estudio concluye que los SBR son de gran utilidad y ofrecen grandes ventajas en la eliminación de nutrientes y MO, en comparación con los sistemas convencionales. Los SBR se caracterizan por tratar gran cantidad y diversidad de aguas residuales tanto domesticas como industriales

ID	Título y Autor/es	Formato y Referencia	Objetivo de la Investigación	Parámetros de diseño	Parámetros de control	Conclusiones
6	Evaluación de los Parámetros Fisicoquímicos en un Reactor Discontinuo de Lodos Activados para el Tratamiento de Aguas con Metanol Caravali, M., Lote, M. y Echeverry, L., (2016)	Caravali et al., (2016) Articulo Investigación Revista Ingeniería, Volumen 22 (No. 1), ISSN 0121-750X. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia	Utilizar un SBR para tratar las aguas residuales industriales con metanol, con el fin de establecer si hay diferencias en los parámetros de DBO, DQO y SS durante el tratamiento del compuesto químico	Se realizó el montaje de cinco sistemas de tratamiento conformado cada uno por dos compartimientos; uno de mezcla de 10 L y otro para sedimentación de 2.5 L. **Criterios Diseño:** Cada sistema contaba con diferentes concentraciones de metanol. TRH: 48 hrs. OD por encima de 3 mg/L. T° C entre 16-17°C. pH entre 6 y 7.5 unidades	Se realizaron mediciones diarias de pH, OD, T° C, DQO, SST y de pérdida de metanol a las 0, 24 y 48 hrs.	Se demostró que la biodegradación de metanol en aguas residuales es posible, ya que la prueba arrojo una reducción de metanol en el tiempo, lo que confirma su propiedad de volatilización. En algunas pruebas se identificó una baja sedimentabilidad de lodo lo que genero un incremento en la DBO
7	Eficiencia de un reactor biológico secuencial en el tratamiento de efluentes de una planta procesadora de productos cárnicos. Carrasquero, S., Rodríguez, M., Bernal, J., y Díaz, A., (2017)	Carrasquero et al., (2017). Articulo Revista Facultad de Ciencias Básicas Universidad de Zulia, Venezuela, Volumen 14 (1) 2018, 23-33, ISSN 1900-4699. Recuperado https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb	Evaluar la eficiencia de un SBR utilizando diferentes estrategias operacionales para la remoción de MO y nutrientes de aguas residuales provenientes de plantas procesadoras de productos cárnicos.	El reactor tiene un volumen de 2 L. Trabajo con una secuencia operacional Ax – An, Ae/ Ax. El sistema esta automatizado para la carga y descarga del agua, tiene dispositivos de control de tiempo, sistemas de agitación mecánica (300 rpm) y suministro de aire a través de un compresor. **Criterios Diseño:** Edad lodos: 25 días. TRH: 10, 14,3 y 17,1 hrs. COV entre 2.42 y 3.7 kg DQO/m^3-d. SSTLM: entre 3850 y 4010 mg/L. SSVLM: 2400 – 2750 mg/L. Relación SSVLM/SSTLM es de 0.65. La reacción: operó con tres ciclos: 7, 10 y 12 hrs, Sedimentación 0.5 hrs. Volumen de llenado y extraído en cada cochada 70%, 30% de biomasa	El tratamiento fue evaluado durante 4 meses. La estabilización duro 12 días hasta alcanzar una remoción superior al 80% de DQO y una buena sedimentabilidad de la biomasa. Los parámetros medidos al inicio, durante y al final de cada ciclo fueron: DQO, DBO, NTK, NH_4^{+}, NO_2^{-}, NO_3-, pH, AT, PT, color y turbidez. La T° C oscilo entre 28.1 y 28.7°C y el pH entre 6.5-8.5 unidades	El tratamiento permitió obtener porcentajes máximos de remoción de DBO: 98% y DQO 92.6%. La mayor remoción de NT 61.3%, NTK 81.3% y PT 52.6% se obtuvieron en los ciclos de reacción de 10 y 12 horas. El estudio resalta que pese al cambio en las concentraciones de DQO a la entrada del reactor, siempre se logró una remoción superior al 90%
8	Variables de diseño y criterios de operación de un reactor biológico tipo SBR “Secuencial Bach Reactor”. Cante, R. y Martínez, P., (2017)	Cante, R. y Martínez, P., (2017). Articulo Revista Ingeniería e Investigación, Vol. XX No. X, mayo-2017.	Analizar las variables de diseño, operación y control inmersas en el proceso de remoción de cargas contaminantes de un agua residual utilizada para el riego, proveniente del Centro Agropecuario Marengo, mediante la operación de un sistema biológico a escala tipo SBR.	El estudio se delimito a cinco parámetros de mayor criticidad para rectores tipo SBR: SSTLM, índice volumétrico de lodos, Relación F/M, CV y el TRH. El rector tiene un volumen de 15 L. **Criterios Diseño:** Se proyecta OD para la fase Ae superior a 2 mg/L y para la fase An entre 0.5 y 1 mg/L de O_2. TRH: 28 hrs. Tiempo llenado 1.4 hrs, Reacción: 24.5 hrs (Se realizaron dos ciclos de aireación). Sedimentación. 2 hrs. Descarga y toma de muestras 0.2 hrs cada una.	El sistema fue evaluado durante un mes, las dos primeras semanas el reactor fue acondicionado. En el estudio se definieron 5 parámetros de control del proceso que son SST, DQO, DBO, NT y PT y dos condiciones generales de operación OD y pH. El seguimiento se realizó semanalmente. El parámetro de control fue el sustrato, ya que debido a sus bajas cargas no garantizo las condiciones para el desarrollo de los microorganismos	El reactor SBR promueve la remoción de Materia orgánica e inorgánica. Alcanzo una remoción de 80%. La mayor eficiencia de remoción se produjo cuando la relación DBO: N:P es cercana a 100:5:1, sin embargo, no se generaron los porcentajes de remoción esperados. Finalmente concluye que las aguas con altos compuestos inorgánicos no deben ser tratadas en tratamientos biológicos.
9	Diseño, construcción y evaluación del desempeño de un	Freytez et al., (2019). Artículos Científicos Revista Ingeniería UC	Presentar el diseño, construcción y evaluación del desempeño de un	Se cuenta con dos reactores de 2 L c/u. Trabajo con secuencias an/ae y solo ae. El primero opera con biomasa granular y el segundo con biomasa suspendida. La biomasa granular se obtuvo de un	En la fase an se burbujeó nitrógeno gaseoso. Los tratamientos se espaciaron durante una semana para las nuevas operaciones.	La remoción de DQO en un SBR con biomasa granular para duraciones de ciclo de 6, 12 y 24 hrs, resulto 2 veces superior a la

ID	Título y Autor/es	Formato y Referencia	Objetivo de la Investigación	Parámetros de diseño	Parámetros de control	Conclusiones
	reactor de carga secuencial para tratamiento de aguas residuales de tenerías Freytez, E., Márquez, A., Pire, M., Guevara, E., y Pérez, S., (2019)	Universidad de Carabobo, Venezuela, Volumen 26 (núm. 1) 2019. Recuperado https://www.redalyc.org/jatsRepo/707/70758484006/html/index.html	reactor SBR para tratar aguas residuales de Tenerías	reactor que procesaba efluentes sintéticos similares a las características del agua a tratar, mientras que la biomasa suspendida se encontraba aclimatada a las características del efluente que mostro un mejor tratamiento. El sistema esta automatizado mediante el uso de temporizadores digitales. **Criterios Diseño:** Tiempo llenado 3 min. Reacción entre 6 y 24 hrs. Sedimentación 2 min y descarga 5 min. OD: 2 mg/L.	Se realizaron muestreos dos veces por semana con un total de ocho repeticiones para cada tratamiento.	tasa de remoción obtenida en un reactor de biomasa suspendida. Se demostró que un SBR con biomasa granular mejora el proceso de sedimentación tanto para la fase solida como para la fase liquida.

Fuente: elaboración Propia

Con base a la información presentada en la Tabla 43 se extrae la siguiente información que es de interés para el proyecto. **Criterios de diseño**: Se evidencia que la edad de lodos en los estudios varía entre 15 y 30 días. El tiempo de retención Hidráulica varía entre 10 y 48 hrs. En cuanto a los tiempos de cada ciclo, se tiene que el tiempo de llenado esta entre 2 min y 3 hrs. El tiempo de reacción puede variar entre 6 y 24.5 hrs, trabajando con diferentes secuencias aerobio – anaerobio dependiendo de los parámetros que se quieren remover en el agua residual. En esta fase es necesario contar no solo con un sistema de aireación sino también de agitación mecánica para promover la mezcla entre el agua y el lodo durante la fase anaerobia, este sistema normalmente está conformado por un motor de 300 rpm hasta 1300 rpm. El tiempo de sedimentación varía entre 2 min y 2 hrs. El tiempo de vaciado entre 2 y 15 min.

Así mismo, se encontraron 14 estudios, investigaciones, proyectos o artículos relacionados con el uso de la tecnología de reactor biológico aerobio de biomasa adherida de medio móvil para el tratamiento de aguas residuales provenientes de diferentes sectores industriales. En la Tabla 44 se presenta un resumen de la información recopilada.

Tabla 44. Estudios de caso utilizando Tecnología de medios de soporte fijo o móvil

ID	Título y Autor/es	Formato y Referencia	Objetivo de la Investigación	Parámetros de diseño	Parámetros de control	Conclusiones
1	Aerobic moving bed *biofilm* reactor treating thermomechanical pulping whitewater under thermophilic conditions. Jahren, S., Rintala, J., Φdegaard, H., (2001)	Jahren, S., Rintala, J., Φdegaard, H., (2001). Artículo Revista Water Research 36 pp. 1067-1075. Recuperado www.elservier.com /locate/watres	Evaluar a escala de laboratorio la factibilidad del uso de medio móvil tipo *Kaldne*s en un reactor MBRR para el tratamiento de agua residuales de industrias de pulpa y papel bajo condiciones termofílicas.	Volumen del reactor de 8.55 L. Se contempla el uso de medio móvil tipo *Kaldnes,* un volumen de medio de 58% de volumen del reactor. **Criterios Diseño:** COV: 2.3-3.8 kg DQO/m3-d. TRH: Fue decreciente de 30 a 14 hr. Área de crecimiento potencial para una biopelícula de 490 m2/m3. OD entre 2 y 3 mg/L. Relación SSV/SST de 0.78 -0.91. Relación DBO: N: P es de 100:2.2:0.5. Biomas adherida al medio 1200-1600 mg/L SSV. SSVLM 1400-1900 mg/L	El experimento se realizó durante 107 días. Se realizó la medición de parámetros de pH, OD, DQO, DBO, P, NT, SST, SSV	Alcanzando remoción de DQO entre 60 y 65%. El estudio concluyo que el sistema puede ser operado bajo condiciones termofílicas. Así mismo se logró identificar que el 25% de la DQO no es biodegradable
2	Performance of a hybrid SBR with fixed bed and suspended growth. Kim, H., Rhu, D., Hwang, H., y Choi. E., (2003)	Kim, H., Rhu, D., Hwang, H., y Choi. E., (2003). ArtÍculo Revista Water Science and Technology, Vol 47 (No. 11-12) pp. 309-317.	Desarrollo de un sistema SBR combinado con lecho móvil y biomasa suspendida para mejorar la eliminación de N y PT.	Volumen útil del reactor de 40 L, altura de 1.62 m. El volumen de medio (arcilla) se tomó como 27% del volumen del reactor. La arcilla tiene un diámetro de 8 a 16 mm con una SE de 350 a 700 m^2/m^3. **Criterios Diseño:** TRH 24 hrs para 3 ciclos La etapa de reacción es de 4 hrs y trabajo con una secuencia ae y an. Sedimentación 1.5 hr. El vaciado corresponde al 62.5% del volumen total del reactor.	El estudio Trabajo con 3 ciclos. El primero pre-operación llevando dos ciclos al día, el segundo la ejecución donde se llevaron tres ciclos al día y el tercero el almacenamiento de lodos para ser enviados al reactor.	El sistema hibrido podría eliminar el requisito de retrolavado para el SBR. El estudio identifico que en el medio fijo se tenían actividades microbianas más altas para desarrollar procesos de nitrificación y desnitrificación. Mientras que en la biomasa suspendida se tenía más actividad para la remoción de fosforo.
3	Optimización de un biorreactor de lecho móvil (MBBR) para la biodegradación de un efluente proveniente de la industria de celulosa Kraft. Parra, C., (2006)	Parra, C. (2006) Tesis de grado Universidad de Concepción. Facultad de ciencias naturales y oceanográficas. Concepción	Optimizar la eficiencia de eliminación de MO y compuestos fenólicos de un efluente de celulosa Kraft tratada por un reactor MBBR, evaluando la formación de la biopelícula	Reactor con un volumen de 0.92 L. Se contempla como medio móvil un biocarrier de polietileno de 2300 m^2/m^3 de SE. **Criterios Diseño:** TRH entre 21.6 y 48 días. COV entre 29.9 y 30.6 kg DQO/m3-día. OD 8.9 mg/L. Relación DBO/N/P de 100:3:1. volumen del medio 25% y 47% del volumen del reactor	La operación del reactor duro 110 días. Para analizar las muestras de lodo en el reactor se utilizó la técnica de recuento en placa y microscopio de Epifluorescencia. El color sugerido de la biomasa que se adhiere al medio es beige dorado, la cual es un indicador de crecimiento saludable	Para TRH de 2 y 0.9 días se obtuvieron eficiencias de DQO de 43.4 y 44.8%. DBO entre 96.3 y 97.1%. Algunos de los microorganismos adheridos al medio de soporte fueron cocos, cocobacilos, bacilos fusiformes y bacterias filamentosas. Se concluye que se obtuvieron mejores eficiencias con un volumen de medio de 25% reduciendo los TRH y aumentado las eficiencias de remoción de DQO y DBO
4	Evaluación de la combinación de dos medios de soporte en reactores de lecho móvil para la remoción de	Flores, E. (2007) Tesis de grado Universidad Nacional Autónoma de México	Analizar y evaluar el comportamiento de dos reactores continuos con biopelículas desarrollándose sobre dos diferentes materiales de soporte para la remoción de	Se cuenta con dos reactores de 12 L c/u. El primer reactor trabaja con medio poroso (espuma de poliureteano), el segundo trabaja con una combinación entre medio liso y poroso (canasta *kaldne*s 40% y espuma 60%). El sistema de aireación está conformado por una bomba de pecera y difusores de burbuja fina. Se cuenta con una bomba para la recirculación de	Los reactores se alimentaron del mismo tanque para garantizar las mismas condiciones de entrada del agua residual. Las primeras semanas el sistema funciono por baches. Y se consideró estabilizado cuando los porcentajes de remoción	El reactor con medio poroso alcanzo una remoción de DQO hasta 92%, NH_4^+ de 75% y P: 17%, mientras que el reactor con medio combinado alcanzo una remoción de DQO hasta 84%, NH_4^+ de 80% y P: 19%. En el estudio, los dos reactores mostraron ser eficientes para la remoción de

ID	Título y Autor/es	Formato y Referencia	Objetivo de la Investigación	Parámetros de diseño	Parámetros de control	Conclusiones
	nitrógeno. Flores, E. (2007)		materia orgánica y nitrógeno, de un agua residual sintética	agua. Con el fin de mantener en movimiento el medio móvil se creó un flujo turbulento en el sistema (movimiento generado por la recirculación del agua). **Criterios Diseño:** COS: 4.8 gDBO/m^2-d, TRH:12 horas, OD: 2 a 3 mg O_2/L, T° C: 25°C, As: 0.875 m^2. Q: 24 L/d. Edad lodos de 4.8 a 6.5 días. As de contacto del medio es de 82 m^2/m^3. La cantidad del medio a utilizar se definió según el As, el cual está en función de la carga de DQO, Q y CO	eran constantes. Los parámetros de pH, T° C, OD, DQO, SST, NH_4^+, NO_2, y PO_4, fueron medidos en la entrada y salida del reactor, tomando muestras compuestas 24 horas, 3 veces por semana.	MO, y solo llevaron a cabo procesos de nitrificación. No se generó remoción de nitrógeno total debido a que solo se trabajó con secuencias de reacción aerobias. Gracias a la creación de biopelícula delgada se permitió la difusión de oxígeno.
5	Inmovilización de microorganismos en esferas de alginato como protección contra condiciones adversas en un tratamiento de agua residual. Hernández, S., (2011)	Hernández, S., (2011). Tesis de grado. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. México	Determinar si la Inmovilización de Microorganismos para tratamiento de agua residual en esferas de alginato brinda algún tipo de protección contra las condiciones adversas (depredación y competencia) presentes en el agua residual doméstica.	Se realizó un conteo de microorganismos en la esfera y en el agua residual tanto al comienzo como al final del ciclo de incubación. Los experimentos se llevaron a cabo en matraces tipo Erlenmeyer por quintuplicado, para ello se inocularon con 4 g de esferas y 100 ml de agua residual, y se colocaron en una incubadora, con una agitación de 120 rpm y una T° C de 27°C. Posteriormente se realizaron los ensayos para conteo de bacterias	Para eliminar las posibles bacterias adheridas a la superficie de la esfera se realizaron tres lavados consecutivos con solución estéril de tween al 4% y solución salina estéril al 0.85%. Al final del ensayo se tomaron esferas lavadas y otras sin lavar a las cuales se les realizo la técnica de FISH para posteriormente visualizar las bacterias y poder realizar su conteo	El estudio permitió identificar que en efecto muchas de las bacterias se encuentran en la superficie de la esfera y que esta si sirve como barrera entre los microorganismos del medio y los inmovilizados para brindar protección contra depredación. El estudio concluyo que con el paso del tiempo las esferas presentaron deterioros y pequeños abultamientos los cuales con el tiempo llegan a fracturarse formando poros en forma de cráter, por donde puede liberarse los microorganismos.
6	Comparación de un reactor de biomasa suspendida y un reactor de biomasa adherida para la biodegradación de compuestos tóxicos presentes en aguas residuales de refinerías de petróleo. Nava, L., Gasperín, R. y Durán A., (2014)	Nava et al., (2014). Artículo Revista Internacional de Contaminación Ambiental, Volumen 30 (núm 1) pp. 101-112. Universidad Nacional Autónoma de México	Estudiar la degradación de compuestos tóxicos presentes en aguas residuales de refinerías por medio de dos reactores tipo SBR, el primero de tipo convencional y el segundo de lecho móvil usando soportes tipo *Kaldnes* 1. Con el fin de identificar cual es el proceso más eficiente	La aclimatación se realizó en un reactor con un volumen de 3 L inoculado con lodos activados con una concentración de 6 g SST/L. Se cuenta con dos reactores de 5 L c/u. Se mantuvo un flujo de aire de 20 L/min el cual fue medido por un rotámetro. La alimentación del reactor se realizó cada 24 horas. **Criterios Diseño:** Densidad del soporte 0.95 g/cm^3, ASE de 300 m^2/m^3, volumen del medio igual al 60% del volumen del reactor. TRH: 24 hrs. Tiempo llenado 15 min, Reacción 23 hrs. Sedimentación 25 min y descarga 15 min. OD: entre 3.4 y 3.6 mg/L. COV: entre 0.44 y 0.52 kg DQO/m^3-d. Para el reactor de biomasa adherida, COS: entre 1.56 – 1.8 gr DQO/m^2-d. SSTLM: entre 450 Y 560 mg/L. La concentración de biomasa en los soportes oscilo entre 3.98 y 5.45 g ST/m^2, relación de SSV/SST entre 0.9 y 1.	La aclimatización de los reactores duro 20 días y su operación duro 45 días. Se realizaron 5 ciclos de experimentación para cada concentración. Los parámetros medidos fueron DQO, COD, fenoles a la entrada y salida del reactor. Y se analizaron dos veces por semana los SST y SSV en el licor de mezcla. También se cuantifico semanalmente la biomasa seca adherida a los soportes plásticos mediante la medición de SST. Se realizaron cuatro perfiles de degradación en cada reactor, los cuales finalizaron cuando se	Se obtuvieron porcentajes de remoción de DQO, COD y fenoles en el rector de biomasa suspendida de 75, 73 y 99% respectivamente, mientras que el reactor de biomasa adherida de 77, 81 y 99% respectivamente. El estudio identifico que los reactores de biomasa adherida presentan un mejor rendimiento, más resistencia a compuestos tóxicos, mayor estabilidad frente a la relación F/M y mayor remoción de contaminantes. El desarrollo de la biopelícula en el soporte duro 5 semanas debido al tipo de agua a tratar, se encontró que a mayor carga orgánica se obtiene mayor cantidad de biomasa adherida

ID	Título y Autor/es	Formato y Referencia	Objetivo de la Investigación	Parámetros de diseño	Parámetros de control	Conclusiones
				Para el reactor de biomasa suspendida. SSTLM: 2200 mg/L y relación SSV/SST entre 0.8 y 0.85.	obtenían valores constates de DQO y fenoles.	
7	Tratamiento de aguas residuales de refinerías de petróleo por medio de reactores biológicos con membrana. Nava L., (2014)	Nava. L., (2014). Tesis de Grado Universidad Nacional Autónoma de México Programa de maestría y doctorado en Ingeniería	Evaluar y comparar el desempeño de un reactor biológico híbrido (MBMBR) con el de un reactor biológico con membrana convencional (MBR), durante la remoción de los contaminantes presentes en aguas residuales reales de refinerías.	Se utilizaron dos reactores con un volumen de 5L c/u. Uno con biomasa adherida (con soportes *Kaldnes*. SE 300 m^2/m^3. Se utilizó como volumen del medio el 60% del volumen del reactor). y otro con biomasa suspendida. La alimentación de los rectores fue cada 24 horas. **Criterios Diseño:** Tiempo llenado 15 min, Reacción 23 hrs. Sedimentación 25 min y descarga 15 min. Flujo aire: 20 L/min. OD: entre 3.4 y 3.6 mg/L. COV: entre 0.47 y 0.54 kg DQO/m^3-d que corresponde a una COS entre 1.56-1.80 g DQO/m^2-d. Relación SSVLM/SSLM entre 0.8 y 0.85	Los reactores fueron inoculados durante 45 días. Y su operación se realizó en 105 días. Se llevaron a cabo 6 experimentos con una duración de 15 días cada uno. Se identificó que la presencia de grasas y aceites puede impedir la transferencia de oxígeno a los microorganismos e inhibir su actividad enzimática, por lo que fue necesario implementar un tratamiento fisicoquímico	Se observó una relación DBO/DQO menor a 0.35. Se obtuvieron porcentajes de remoción de DQO entre 69 y 78%, COD entre 75 y 81% y fenoles superiores al 98%. El reactor de biopelícula presento un incremento de eficiencia de remoción en comparación con el reactor de biomasa suspendida. Debido a que los microorganismos del primero poseen una mayor actividad metabólica y se ven menos afectados a las alteraciones de las condiciones ambientales
8	Utilización de materiales de reciclaje como medio de soporte en reactores aerobios de biopelícula para tratamiento de agua residual doméstica. Romero, P., (2015)	Romero, P. (2015). Tesis de grado Universidad Técnica de Machala. Unidad académica de Ciencias químicas y de la salud.	Determinar la efectividad de varios materiales reciclables para ser utilizados en reactores aerobios de biopelícula en el tratamiento de agua residual doméstica.	Se utilizaron 6 reactores con un volumen útil de 3.55 L c/u. El proyecto contemplo el uso de tres medios de soporte fijo de los siguientes materiales: polietileno de alta densidad con una SE de 235.70 m^2/m^3 (HDPE botellas de desinfectantes), polietileno tereftalato con una SE de 626.31 m^2/m^3 (PET botellas de bebidas no gaseosas) y polipropileno con una SE de 479.86 m^2/m^3 (PP tapas plásticas) respectivamente.	Se realizó el experimento por duplicado (dos reactores con un mismo medio) durante 3 meses. Los parámetros a analizar fueron: SSV, SSVi, NT, PT. La medición de estos últimos se realizó únicamente al inicio del experimento. El medio se localizó sobre una malla plástica	Aunque el HDPE tiene un área específica menor a la del PET, se generó una mayor adherencia de biomasa en este primero, debido a que es más liso. El estudio concluyo que el medio que genero mayor eficiencia fue el HDPE con respecto a la remoción de DQO. Sin embargo, las diferencias no fueron significativas, por lo que la aplicación de alguno de estos es posible.
9	Effect of increasing organic loading rates on the performance of moving-bed *biofilm* reactors filled with different support media: Assesing the activity of suspended and attached biomass fractions. Bassin, et al (2016)	Bassin, et al (2016). Artículo Revista Science Direct, Volumen 100 pp. 131-141. Federal University of Rio de Janeiro. COPPE- Chemical Engineering Program, PO Box 68502, 21941-972, Brazil	Evaluar el impacto en el incremento de las tasas de carga orgánica de DQO y nitrógeno en dos MBBRs con medio móvil de biomasa adherida operados durante 700 días	Se utilizaron 2 reactores con un volumen de 1 L c/u. El proyecto contemplo el uso de dos medios de soporte: *Kaldnes* K1 con SE de 500m^2/m^3 (volumen del medio 50% del volumen reactor) y *MUTAG BIOCHIP* con SE de 3000 m^2/m^3 (volumen del medio 8.3% del volumen reactor). El diseño está basado en cargas de área de superficie especifica que son dependientes de la actividad de la biomasa **Criterios Diseño:** COV 0.8, 1.6, 2.4 y 3.2 kg DQO/m3-d. COS: 3.2, 6.4, 9.6 y 12.8 gDQO/m2-d. TRH: 12, 6 Y 3 hr. El ASE de 250 m2/m3. OD 4 – 5 mg/L	Cada 15 a 30 minutos por 6 horas fueron recolectadas muestras para la medición de concentración de amonio. La concentración de biomasa adherida incremento gradualmente de 3 a 5.5 g/L	La remoción de nitrógeno fue de 86 y 73% en el reactor 1 y 2 respectivamente. En cuanto a la biomasa adherida al medio móvil, se evidencio que el soporte Kaldnes genero un contenido de biomasa 2.5 veces mayor al obtenido en el *MUTAG BIOCHIP*. La investigación dio como resultado que a menor TRH y carga orgánica constante se generó una mayor remoción de nitrógeno
10	Evaluación de un reactor aerobio piloto con medio de soporte de	Muñoz, et al., (2016). Artículo Revista UTE Enfoque, Volumen	Evaluar la eficiencia de un reactor aerobio para el tratamiento de un sustrato sintético	Se utilizó un reactor de flujo pistón aerobio horizontal de aireación extendida con un volumen útil de 2 L. El volumen del medio de	Se utilizó un inoculo bacteriano aclimatado con el afluente a tratarse. Los parámetros de control fueron DQO, pH, SST,	Se determinaron eficiencias de remoción de MO del 62.2, 85 y 94% operando con TRH de 5.14, 6.01 y 8.01 hr y COV de 7.68, 6.19 y 4.61

ID	Título y Autor/es	Formato y Referencia	Objetivo de la Investigación	Parámetros de diseño	Parámetros de control	Conclusiones
	polietilentereftalato (PET) para tratamiento de efluente lechero. Muñoz, M., Reina, J. y Belén, M., (2016)	7 pp. 31-42. ISSN. 1390-6542. Universidad UTE Quito, Ecuador. Recuperado de http://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/public/journals/1/html_v7n4/art003.html	elaborado a partir de suero lácteo, para la remoción de carga contaminante, y a su vez identificar sus parámetros de diseño	soporte (PET) corresponde al 13.79% del volumen del reactor. **Criterios Diseño:** TRH de 5.14, 6.01 y 8.01 hr. COV de 7.68, 6.19 y 4.61 kg/día-m3. Constante cinética de transferencia másica 0.2 m/día. F/M entre 0.4 y 0.7. Biomasa reactor: 11560 mg/L. OD: 2 mg/L. T° entre 15 y 17°C. SE: 650 m^2/m^3 y relación biomasa – carga orgánica de 0.28	TRH, COV, COS, SE, relación biomasa-carga orgánica y F/M. La aclimatación del reactor duro 21 días y su operación 60 días más, esta última se dividió en 3 fases variando los TRH. El análisis de la biopelícula formada en el material se determinó mediante los SSV.	kg/día-m^3. El estudio concluye que entre mayores TRH y menor COS, mayor es la remoción. Por último, se recomienda verificar durante la operación del reactor que las condiciones ambientales sean adecuadas, principalmente pH.
11	Diseño y operación de un reactor de lecho móvil aerobio para tratamiento de agua residual doméstica. García F. Gutiérrez D. (2018)	García F. Gutiérrez D. (2018). Tesis de grado. Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ingeniería, Bogotá.	Diseñar un reactor de lecho móvil aerobio a escala de laboratorio para tratar aguas residuales de origen doméstico.	Reactor con un volumen de 22.5 L. Se contempla como medio móvil anillos de Biopack (Material en polietileno y con una SE de 950 m^2/m^3). Se utilizó como volumen del medio el 50% del volumen del reactor. Se tomó lodo de la PTAR del campus de la Universidad, que fue inoculado previamente. **Criterios Diseño:** TRH: 20 horas. Q:1.1L/hr. Edad de lodo: 30 días. SSTLM: 4160 y 3590 mg/L. SSVLM 590 y 1190 mg/L. F/M 0.72. IVL de 182. OD. 4.51 mg/L	El lodo fue inoculado durante 18 días. En donde se tomó 2.3 Litros de agua residual con 1.2 Litros de lodo. El reactor se operó durante 43 días. Diariamente se midieron parámetros como pH, T°. Y cada dos días se medían SSV Y SST, tanto a la entrada, en el interior y a la salida del reactor	Con un TRH de 20 horas y un volumen de medio del 50% del reactor se logró reducir el arrastre significativo de biomasa. Se presentó una variación significativa en los SSTLM y SSVLM por dificultades en el suministro de oxígeno y arrastre de biomasa. Se lograron remociones de SST de 45.84%, SSV 59.20%, DBO de 22.67%, DQO 35.6%. La relación F/M y IVL no fueron óptimos
12	Prueba piloto para la evaluación de *MUTAG* en el tratamiento de aguas residuales provenientes del sector de hidrocarburos. Gonzales, H. y Giraldo, J., (2019)	Gonzales, H. y Giraldo, J., (2019). Tesis de grado. Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería, Bogotá.	Evaluar la viabilidad del uso del *MUTAG* mediante una prueba piloto a escala de laboratorio usando un reactor mezcla completa tipo batch para el tratamiento de aguas provenientes del sector de hidrocarburos	Se cuenta con dos reactores de 1.5 L c/u, operando en paralelo. Se llevó un proceso de bioaumentación de microorganismos. En el primero reactor se utilizó 15% *MUTAG,* 30% Inoculo y 70% agua residual, mientras que en el segundo reactor solo se utilizó inoculo y agua residual. De esta manera lograr comparar la eficiencia del tratamiento. OD: entre 2 y 3 mg/L. Así mismo, el método para identificar los microorganismos se realizó mediante la coloración de gram.	El monitoreo duro 7 días en los cuales se realizó la medición de los parámetros de fenoles, grasas y aceites. En el recuento se encontraron microorganismos como *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli y Raoultella ornithinolytica*. Lo que indica que estos microorganismos tienen tolerancia y eficiencias de remoción de los parámetros a evaluar.	La remoción de fenoles, grasas y aceites comenzó a verse desde el día 2. Las eficiencias en el reactor con *MUTAG* fue de 61 y 47.06%, mientras que en el reactor sin *MUTAG* fue de 32.41 y 23.53%. El aumento en la remoción se debe al aumento de la superficie de contacto que genera el medio. El estudio concluye que si bien, no se generaron los resultados esperados, es necesario realizar la evaluación a escala piloto para evaluar adecuadamente el proceso, ya que el *MUTAG* representa una alternativa importante para el tratamiento de aguas residuales.
13	Diseño y evaluación de un reactor biológico de lecho móvil de cargas secuenciales como	Sanabria, A. y Pacheco, J., (2019). Tesis de grado. Universidad de la Salle,	Evaluar el comportamiento de un reactor biológico de lecho móvil de cargas secuenciales a escala piloto para tratar aguas	Volumen reactor 68.3 L. Se utilizaron 5 aireadores de 240 L/hr. El medio de soporte marca Small Boss, tiene un área superficial especifica de 1000m^2/m^3. El reactor se encuentra automatizado.	La fase de adaptación duro 20 días, monitoreando parámetros como SST, SSV, DQO, N, PT, OD. La fase de operación duro 45 días, donde se llevaron a cabo 3	En la fase de adaptación se evidenció un crecimiento de la concentración de SSVLM (este parámetro esta correlacionado con el crecimiento de la biomasa), una reducción en la DQO con eficiencias

ID	Título y Autor/es	Formato y Referencia	Objetivo de la Investigación	Parámetros de diseño	Parámetros de control	Conclusiones
	alternativa de tratamiento para un vertimiento procedente de una industria farmacéutica. Sanabria, A. y Pacheco, J., (2019)	Facultad de Ingeniería, Bogotá	residuales provenientes de una industria farmacéutica para la remoción de MO	El parámetro clave de diseño es la carga del área superficial, la cual según Bengston (2017) depende del porcentaje de remoción esperado. Para el desarrollo de este estudio se adoptó un porcentaje de remoción entre 90 y 95%, por lo cual se adoptó un valor de 7.5 g/m^2-d. El volumen del medio se tomó como 50% del volumen del reactor. **Criterios Diseño:** Volumen reactor: 0.068 m^3. SSVLM: 3000 mg/L. En el tiempo de reacción se proyectaron 3 horas ae y 3 horas an. SSTLM no deben superar los 1500 mg/L.	lotes, analizando los mismos parámetros. Los análisis se realizaron diariamente, por cada bache	hasta 82%. No se observó adherencia considerable en el medio. En la fase de operación no se observó crecimiento de biopelícula en el medio, sin embargo, si hubo aumento en los SSVLM y se alcanzaron remociones de DQO hasta 92%. Por lo que se concluye que el sistema opero como un reactor convencional y tiene gran capacidad de resiliencia
14	Estudio de un sistema Moving Bed Biorector (MBBR) con Carriers fabricados en impresión 3D para la optimización del tratamiento de aguas residuales textiles. Cantarero, A., (2019)	Cantarero, A., (2019). Tesis de grado. Escola de Camins UPC Barcelona	Mejorar la eficiencia del tratamiento biológico para el tratamiento de aguas industriales del sector textil mediante el uso de Carriers	Se utilizó un reactor de 4 L de volumen. El Carrier es de plástico, diámetro 28 mm **Criterios Diseño:** TRH de 2 y 1.5 días. El volumen del medio se tomó como 25% del volumen del reactor.	Los carriers se dejaron en proceso de adaptación al agua por una semana, para que se formara una capa superficial de *biofilm.* Los parámetros analizados tanto a la entrada y salida del reactor son COT, DQO, pH, conductividad y N	El estudio concluye que el reactor con carriers es mejor que el tratamiento de aguas con fangos activados. Presentando porcentajes de remoción DQO, color y materia en suspensión superiores a las obtenidas en el proceso de lodos activados. Así mismo, se logro observar que el uso de carriers reduce los TRH requeridos.

Fuente: elaboración Propia

De acuerdo con lo presentado en la Tabla 44 se evidencia que el material de los medios de soporte utilizados va desde el uso de arcilla a plástico. Si bien algunos estudios no lograron una adecuada formación de biopelícula en el medio (la cual puede determinarse mediante los SSV), en la mayoría se logró una eficiencia de remoción de materia orgánica y SS, superior a la obtenida en la tecnología de lodos activados convencionales. Estos resultados se obtienen gracias a que muchos de los microorganismos inmovilizados en el soporte aumentan su actividad microbiana, incrementando su rendimiento en el reactor y generando más resistencia a variaciones de carga y compuestos tóxicos. Por otro lado, se logró identificar que el parámetro de diseño más relevante en el reactor para algunos estudios, es el área de superficie específica que proporciona el medio a utilizar. Este parámetro logra una reducción en los volúmenes requeridos por el reactor.

.

Anexo E. Diseño Reactor Biológico Tipo SBR con biomasa Suspendida y Biomasa adherida de medio móvil

DISEÑO REACTOR BIOMASA SUSPENDIDA

A continuación, en la Tabla 45 se presenta el diseño del reactor SBR de aireación extendida con biomasa suspendida

Tabla 45. Diseño Reactor SBR aireación extendida con biomasa suspendida

ID	VARIABLE	PARÁMETROS DISEÑO	UNIDAD	VALOR			CRITERIOS	REFERENCIA
				DBO_5 BAJA	DBO_5 MEDIA	DBO_5 ALTA		
1	VU	Volumen Útil	L	25	25	25		Se adopto este volumen considerando la facilidad de efectuar las cochadas y contar con suficiente disponibilidad de agua residual
			m^3	0.025	0.025	0.025		
2	B	Ancho Adoptado	m	0.29	0.29	0.29		Se adoptaron estos valores por la disponibilidad del material
3	L	Largo adoptado	m	0.29	0.29	0.29		
4	As	Área proyectada	m^2	0.084	0.084	0.084	$As = B * L$	
5	Hu	Altura útil agua	m	0.30	0.30	0.30	$Hu = \frac{VU}{As}$	
6	HL	Borde libre	m	0.21	0.21	0.21		Borde libre adoptado para el reactor
7	HT	Altura Total	m	0.51	0.51	0.51	$HT = HU + HL$	
	CARACTERIZACION DEL AGUA ESPERADA ENTRADA Y SALIDA REACTOR							
8	DBOe	DBO_5 Entrada	mg/L	120	240	528		Valor DBO_5 de acuerdo con la caracterización
9	DBOs	DBO_5 Efluente	mg/L	20	28	45		Valor DBO_5 máximo Art 11 Res. 631 de 2015
10	E DBO_5	Eficiencia DBO_5	%	83	88	91		Eficiencia remoción requerida
11	DQOe	DQO Entrada	mg/L	150	300	660	$EDBO = \frac{DBOe - DBOs}{DBOe} * 100\%$	Valor DQO de acuerdo con la caracterización
12	DQOs	DQO Salida	mg/L	36	50.4	81		Valor DQO esperado Salida tratamiento
13	E DQO	Eficiencia DQO	%	76.00	83.20	87.73	$EDQO = \frac{DQOe - DQOs}{DQOe} * 100\%$	Eficiencia remoción Esperada
14	SSTe	SST Entrada	mg/L	80	93	100		Valor SST de acuerdo con la caracterización
15	SSTs	SST Salida	mg/L	20	23	23		Valor SST máximo Art 11 Res. 631 de 2015
16	E SST	Eficiencia SST	%	75	75	77	$ESST = \frac{SSTe - SSTs}{SSTe} * 100\%$	Eficiencia remoción requerida
17	Se	DBO_5 del efluente	mg/L	7.4	13.51	30.51	$Se = DBOs - 0.63 * SSTs$	Ecuación 17.16 (Rojas, 1999)
	DISEÑO HIDRÁULICO REACTOR							
18	Qd	Caudal diseño	L/hora	1.95	1.95	1.95		Caudal de entrada y salida para el diseño proyectado del reactor
			m^3/d	0.0468	0.0468	0.0468		
19	C DBO_5	Carga DBO_5	kg DBO_5 /d	0.0056	0.0112	0.0247	$C\ DBO = Qd * DBOe * \frac{24}{1 * 10^6}$	
20	COV	Carga orgánica volumétrica	kg DBO_5 / m^3-día	0.22	0.45	0.99	$COV = \frac{C\ DBO}{VU}$	Lodos activados de aireación extendida COV debe ser mayor a 0.4

ID	VARIABLE	PARÁMETROS DISEÑO	UNIDAD	VALOR			CRITERIOS	REFERENCIA
				DBO_5 BAJA	DBO_5 MEDIA	DBO_5 ALTA		
21	C DQO	Carga DQO	kg DQO/d	0.01	0.01	0.03	$CDQO = Qd * DQOe * \frac{24}{1*10^6}$	
22	COV	Carga orgánica volumétrica	g DQO/ m^3-día	280.80	561.60	1235.52	$COV = \frac{CDQO}{VU}$	
23	F/M	Relación Alimento /Microorganismo	kg DBO_5 / kg SSVLM-d	0.05	0.1	0.22		Lodos activados de aireación extendida la relación F/M debe estar entre 0.05 a 0.25
24	X SSLM	Concentración Sólidos Suspendidos en el reactor	mg/L	4492.8	4492.8	4492.8	$X\,SSLM = \frac{Qd * DBOe}{\frac{F}{m} * Vu}$	Lodos activados de aireación extendida X SSLM debe estar entre 3000 a 6000 mg/L
25	TRH	Tiempo retención hidráulica	d	0.50	0.50	0.50	$TRH = \frac{DBOe - Se}{\frac{F}{M} * X\,SSLM}$	Lodos activados de aireación extendida el tiempo de retención hidráulica debe ser inferior a 18 horas
			Horas	12.03	12.10	12.08		
26	T° C	Temperatura agua	°C	12	12	12		Temperatura del agua medida en campo
27	Φ	Coeficiente de corrección T°		1.05	1.05	1.05		Coeficiente de la ecuación de Arrhenius para kd y b. Ramalho, R
28	C SST	Carga SSTe	kg SST/d	0.0037	0.0044	0.0047	$C\,SST = Qd * SSTe * \frac{24}{1*10^6}$	
29	Θx	Edad de lodos	horas	12.03	12.10	12.08	$\theta c = \frac{V}{Q} = \theta$	De acuerdo con Romero en un modelo mezcla completa sin recirculación la edad de lodos es igual al TRH
			días	0.50	0.50	0.50		
	DISEÑO SISTEMA DE MEZCLA							
30	As	Área proyectada	cm2	841.00	841.00	841.00		Área proyectada para el reactor
31	Dt	Diámetro del tanque	cm	32.72	32.72	32.72	$Dt = \sqrt{\frac{4 * As}{\pi}}$	
32	D	Diámetro de la paleta	cm	11.00	11.00	11.00	$D = \frac{Dt}{3}$	Ecuación 15 Dautan et al. (1998)
33	t	Ancho del impulsor	cm	2.80	2.80	2.80	$t = 0.2 * D$	Ecuación Dautan et al. (1998)
	PRODUCCIÓN DE LODO							
34	Y	Coeficiente cinético	mg SSV/mg DBO5	0.6	0.6	0.6		Coeficiente Cinético, Ramalho, R
35	kd 20°	Coeficiente cinético T. 20°	d-1	0.06	0.06	0.06		Coeficiente Cinético para T=20°
36	kd 12°	Coeficiente cinético T.12°	d-1	0.0406	0.0406	0.0406	$Kd\,(T) = Kd\,(20°) * \Phi^{T-20}$	
37	Y obs	Producción Observada		0.58	0.58	0.58	$Yobs = \frac{Y}{1 + Kd * \Theta x}$	
38	Px	Producción diaria neta de fango activado	kg/d	0.0031	0.0062	0.0136	$Px = \frac{Yobs * QD * (DBOe - Se)}{1000}$	
39	SSV/SST	Relación SSV/SST		0.8	0.8	0.8		Metcalf & Eddy (1995) adoptan relación 80%
40	Px SS	Masa total de fango	kg/día	0.0038	0.0077	0.0170	$Px\,SS = \frac{Px}{\frac{SSV}{SST}}$	
41	Cssv	Concentración de sólidos totales del lodo	mg/L	15000	15000	15000		Rojas (1999) adopta una concentración de sólidos de 15000 mg/L
42	Qw	Caudal lodos desecho	m^3/d	2.56E-04	5.14E-04	1.13E-03	$Qw = \frac{Px\,SS * 1000}{Cssv}$	

ID	VARIABLE	PARÁMETROS DISEÑO	UNIDAD	VALOR			CRITERIOS	REFERENCIA
				DBO_5 BAJA	DBO_5 MEDIA	DBO_5 ALTA		
43	Pl	Densidad lodo	kg/m^3	1.15	1.15	1.15		Valor densidad de lodo
44	P lodo	Cantidad lodo seco	kg/d	2.94E-04	5.92E-04	1.30E-03	$P\ lodo = Qw * Pl$	
	CONSUMO OXIGENO							
45	M DBO_5	Masa DBO_5 utilizada	kg/d	0.0077	0.0156	0.0342	$MDBO5 = \frac{QD * (DBOe - Se)}{0.68} * \frac{1}{1}$	Masa DBO_5 utilizada
46	DO	Demanda de oxigeno	kgO_2/d	0.0034	0.0068	0.0150	$DO = MDBO5 - (1.42 * Px)$	
47	a	Tasa respiración sustrato	$KgO2/KgDBO_5$	0.5	0.5	0.5		Valor asumido, debe estar entre 0.48 a 0.71
48	DO Sus	O2 Requerido para la respiración sustrato	KgO_2/d	0.0023	0.0050	0.0113	$DO\ Sus = a * DBO\ a\ remover$	
49	O2N	Tasa de nitrificación	$KgO_2/KgN\text{-}NH_4$	4.6	4.6	4.6		Valor asumido
50	N	Nitrógeno	mg/L	30	30	30		Valor adoptado
51	%L	porcentaje lodo en exceso	%	6	6	6		Para agua residual es de 6 a 12%
52	NLex	N2 lodo en exceso	$KgNH_4\text{-}N/d$	1.76E-05	3.55E-05	7.80E-05	$Nlex = Plodo * \%L$	
53	C NH4- N	Carga Nitrógeno	$KgNH_4\text{-}N/d$	0.0014	0.0014	0.0014	$C\ NH4 - N = \frac{E\ SST * DO}{1000}$	
54	L NOx	Nitrificación	$KgNH_4\text{-}N/d$	0.0014	0.0014	0.0013	$L\ NOx = C\ NH4 - N - Nlex$	
55	DO N	O2 Requerido para la nitrificación	kgO_2/d	0.006	0.006	0.006	$DO\ N = C\ NH4 - N * O2N$	
56	Kre	Cte respiración endógena	kg/(KgSSLMd)	0.1	0.1	0.124		Valor adoptado tabla 1, depende F/M
57	DO E	O2 Requerido para la respiración endógena	KgO_2/d	0.011232	0.011232	0.01392768	$DO\ E = Kre * X\ SSLM * VU * \frac{1}{1000}$	
58	AOR	Requerimiento actual de oxigeno	KgO_2/d	0.0234	0.0295	0.0467	$AOR = DO + DO\ Sus + DO\ N + DO\ E$	
			kgO2/hr	0.0010	0.0012	0.0019		
59	Q aire	Caudal de aire	m^3/d	0.0841	0.1059	0.1676	$Q\ aire = \frac{AOR}{0.232 * 1.2}$	
60	E O2	Eficiencia transferencia Oxigeno		0.07	0.07	0.07		Valor adoptado según Romero (1999)
61	Q aire	Caudal de airea real requerido	m^3/d	1.2018	1.5124	2.3949	$Q\ airer = \frac{Q\ aire}{E\ O2}$	
62	Q aire Bomba	Caudal de aire bomba pecera a utilizar	L/min	1.97	1.97	1.97		Caudal de aire promedio medido con ayuda de un burbujeometro para c/bomba de pecera
			m3/d	2.8368	2.8368	2.8368		

Tabla 1	
F/M	Kre
<ó= 0,1	0.1
0.2	0.12
0.3	0.13
0.5	0.14
>ó= 1	0,15 a 2

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 46 se presentan los cálculos de la cinética para este reactor.

Tabla 46. Cinética Reactor SBR aireación extendida con biomasa suspendida

ID	Variable	Descripción	Unidad	Valor	CRITERIOS	REFERENCIA
1	Qd	Caudal diseño	m3/d	0.0468		Tomado de la Tabla 45 ID 18
2	X SSLM	Concentración Sólidos Suspendidos en el reactor	mg/L	4492.8		Tomado de la Tabla 45 ID 24
3	VU	Volumen Útil	m3	0.025		Tomado de la Tabla 45 ID 1
4	kd 12°	Coeficiente cinético T.12°	d-1	0.0406		Tomado de la Tabla 45 ID 36
5	Y	Coeficiente cinético	mg SSV/mg DBO_5	0.6		Tomado de la Tabla 45 ID 34
6	Y obs	Producción Observada		0.58		Tomado de la Tabla 45 ID 37
7	U	Tasa especifica utilización sustrato	d-1	2.3054	$U = \frac{kd}{Y * Yobs}$	Tomado Ecuación 17.37 Romero 1999
8	r_s	Tasa utilización del sustrato	mg/L-d	-10357.64	$r_s = -U * X$	Tomado Ecuación 17.31 Romero 1999
9	μ'	Tasa de crecimiento especifica neta	d-1	1.872	$\mu' = \frac{Q}{V}$	Tomado Ecuación 17.26 Romero 1999
10	μ	Tasa especifica de crecimiento	d-1	1.913	$\mu = \mu' + kd$	Tomado Ecuación 17.26 Romero 1999
11	r_g	Tasa de Crecimiento microbial	mg/L-d	8592.976	$r_g = \mu * X\ SSLM$	Tomado Ecuación 9.9 Romero 1999
12	r'_g	Tasa neta de crecimiento bacterial	mg/L-d	6032.131	$r'_g = -Yobs * r_s$	Tomado Ecuación 17.35 Romero 1999
13	TRH	Tiempo retención hidráulica	d	0.50		Tomado de la Tabla 45 ID 25
14	F/M	Relación Alimento /Microorganismo	kg DBO_5 / kg SSVLM-d	0.1		Tomado de la Tabla 45 ID 23
15	So	Concentración sustrato del afluente	mg/L	226.49	$So = \frac{F}{M} * TRH * X$	Tomado Ecuación 17.51 Romero 1999
16	S	Concentración sustrato del Efluente	mg/L	23.054	$S = \frac{r_s * TRH}{-So}$	Tomado Ecuación 17.32 Romero 1999
17	μm	Tasa máxima especifica de crecimiento	d-1	1.00E-05	$\mu = \frac{\mu_m}{2}$	Tomado Ecuación 9.16 Romero 1999
18	K	Tasa máxima remoción de sustrato por unidad de masa de microorganismos	d-1	1.6667E-05	$k = \frac{\mu_m}{Y}$	Tomado Ecuación 9.26 Romero 1999

Fuente: Elaboración propia

DISEÑO REACTOR BIOMASA ADHERIDA DE MEDIO MOVIL

En la Tabla 47 se presenta el diseño del reactor SBR completamente mezclado con biomasa adherida de medio móvil

Tabla 47. Diseño Reactor SBR completamente mezclado de biomasa adherida de medio móvil

ID	VARIABLE	PARÁMETROS DISEÑO	UNIDAD	VALOR			CRITERIOS	REFERENCIA
				DBO_5 BAJA	DBO_5 MEDIA	DBO_5 ALTA		
	CARACTERIZACION DEL AGUA ESPERADA ENTRADA Y SALIDA REACTOR							
1	DBOe	DBO_5 Entrada	mg/L	120	240	528		Valor DBO_5 de acuerdo con la caracterización
2	DBOs	DBO_5 Efluente	mg/L	20	28	45		Valor DBO_5 máximo Art 11 Res. 631 de 2015
3	E DBO_5	Eficiencia DBO_5	%	83.33	88.33	91.48	$EDBO = \frac{DBOe - DBOs}{DBOe} * 100\%$	Eficiencia remoción requerida
4	DQOe	DQO Entrada	mg/L	150	300	660		Valor DQO de acuerdo con la caracterización
5	DQOs	DQO Salida	mg/L	36	50.4	81		Valor DQO esperado Salida tratamiento
6	E DQO	Eficiencia DBO_5	%	76.00	83.20	87.73	$EDQO = \frac{DQOe - DQOs}{DQOe} * 100\%$	Eficiencia remoción Esperada
7	SSTe	SST Entrada	mg/L	80	93	100		Valor SST de acuerdo con la caracterización
8	SSTs	SST Salida	mg/L	20	23	23		Valor SST máximo Art 11 Res. 631 de 2015
9	E SST	Eficiencia SST	%	75.00	75.27	77.00	$ESST = \frac{SSTe - SSTs}{SSTe} * 100\%$	Eficiencia remoción requerida
10	Se	DBO_5 del efluente	mg/L	7.4	13.51	30.51	$Se = DBOs - 0.63 * SSTs$	Ecuación 17.16 (Rojas, 1999)
	DISEÑO HIDRÁULICO REACTOR							
11	Qd	Caudal diseño	L/hora	1.95	1.95	1.95		Caudal de entrada y salida para el diseño proyectado del reactor
			m^3/d	0.0468	0.0468	0.0468		
			L/d	46.8	46.8	46.8		
			m^3/hr	0.00195	0.00195	0.00195		
12	C DBO_5	Carga DBO_5	kg DBO_5 /d	0.0056	0.0112	0.0247	$C\ DBO = Qd * DBOe * \frac{24}{1 * 10^6}$	
13	C DQO	Carga DQO	kg DQO/d	0.0070	0.0140	0.0309	$C\ DQO = Qd * DQOe * \frac{24}{1 * 10^6}$	
14	SALR	Carga por área superficial	g/m^2-d	7.50	7.50	7.50		Adoptado table 5.3 Tomaszek & Grabas, (1998). Tabla 2
15	Rsa	AS requerida por el medio en el reactor	m^2	0.7488	1.4976	3.29472	$Rsa = \frac{C\ DQO}{SALR}$	
16	Csa	Área Superficial especifica del medio	m^2/m^3	3000	3000	3000		*MUTAG BIOCHIP*® tiene una superficie especifica de 3000 m2/m3.
17	VRc	Volumen del medio requerido en el reactor	m^3	0.0002	0.0005	0.0011	$VRc = \frac{Rsa}{Csa}$	

ID	VARIABLE	PARÁMETROS DISEÑO	UNIDAD	VALOR			CRITERIOS	REFERENCIA
				DBO_5 BAJA	DBO_5 MEDIA	DBO_5 ALTA		
18	Lc	Porcentaje de llenado de medio en el reactor	%	8.3	8.3	8.3		Según Bassin, et al (2016) por SALR, se adoptó como volumen del medio el 8.3% del volumen del reactor
19	VTk	Volumen útil del tanque	m3	0.0030	0.0060	0.0132	$VTk = \frac{VRc}{Lc}$	
			L	3.01	6.01	13.23		
20	H útil	Altura útil	m	0.3	0.3	0.3		Altura adoptada en el reactor de biomasa suspendida Tabla 45 ID 5
21	ÁS	Área superficial	m2	0,01	0,02	0,04	$Hu = \frac{VU}{As}$	
22	COV	Carga orgánica volumétrica	kg DBO_5 / m^3-día	1.87	1.87	1.87	$COV = \frac{C\ DBO}{VU}$	Lodos activados completamente mezclado COV entre 0.8 a 2
23	F/M	Relación Alimento /Microorganismo	kg DBO_5 / kg SSVLM-d	0.31	0.31	0.31		Lodos activados completamente mezclado la relación F/M debe estar entre 0.2 a 0.6
24	X SSLM	Concentración Sólidos Suspendidos reactor	mg/L	6000	6000	6000	$X\ SSLM = \frac{Qd * DBOe}{\frac{F}{m} * Vu}$	Lodos activados completamente mezclado X SSLM debe estar entre 2500 a 6000 mg/L
25	TRH	Tiempo retención hidráulica	d	0.06	0.12	0.27	$TRH = \frac{DBOe - Se}{\frac{F}{M} * X\ SSLM}$	Lodos activados aireación extendida y completamente mezclado el tiempo de retención hidráulica debe ser inferior a 18 y 4 horas respectivamente
			Horas	1.4	2.9	6.4		
26	T°C	Temperatura agua	°C	12	12	12		Temperatura del agua medida en campo
27	Φ	Coeficiente de corrección de la temperatura		1.05	1.05	1.05		Coeficiente de la ecuación de Arrhenius para kd y b. Ramalho, R
28	C SST	Carga SSTe	kg SST/d	0.0037	0.0044	0.0047	$C\ SST = Qd * SSTe * \frac{24}{1 * 10^6}$	
29	Θx	Edad de lodos	horas	1.45	2.91	6.39	$\Theta x = \frac{VU * X\ SSLM}{C\ SST * 1000}$	Lodos activados aireación extendida y completamente mezclado la edad de lodos debe estar entre 5 y 30 días
			días	0.1	0.1	0.3		
	PRODUCCIÓN DE LODO							
30	Y	Coeficiente cinético	mg SSV/mg DBO5	0.6	0.6	0.6		Coeficiente Cinético, Ramalho, R
31	kd 20°	Coeficiente cinético T. 20°	d-1	0.06	0.06	0.06		Coeficiente Cinético para T=20°
32	kd 12°	Coeficiente cinético T.12°	d-1	0.0406	0.0406	0.0406	$Kd\ (T) = Kd\ (20°) * \Phi^{T-20}$	
33	Y obs	Producción Observada		0.60	0.60	0.59	$Yobs = \frac{Y}{1 + Kd * \Theta x}$	
34	Px	Producción diaria neta de fango activado	kg/d	0.0032	0.0063	0.0137	$Px = \frac{Yobs * QD * (DBOe - Se)}{1000}$	
35	SSV/SST	Relación SSV/SST		0.8	0.8	0.8		Metcalf & Eddy (1995) relación 80%
36	Px SS	Masa total de fango	kg/día	0.0039	0.0079	0.0172	$Px\ SS = \frac{Px}{\frac{SSV}{SST}}$	

ID	VARIABLE	PARÁMETROS DISEÑO	UNIDAD	VALOR			CRITERIOS	REFERENCIA
				DBO_5 BAJA	DBO_5 MEDIA	DBO_5 ALTA		
37	Cssv	Concentración de sólidos totales del lodo	mg/L	15000	15000	15000		Rojas (1999) adopta una concentración de sólidos de 15000 mg/L
38	Qw	Caudal lodos desecho	m^3/d	2.63E-04	5.26E-04	1.15E-03	$Qw = \frac{Px\ SS * 1000}{Cssv}$	
39	Pl	Densidad lodo	kg/m^3	1.15	1.15	1.15		Valor densidad de lodo
40	P lodo	Cantidad lodo seco	kg/d	3.02E-04	6.05E-04	1.32E-03	$P\ lodo = Qw * Pl$	
		CONSUMO OXIGENO						
41	M DBO_5	Masa DBO_5 utilizada	kg/d	0.0077	0.0156	0.0342	$MDBO5 = \frac{QD * (DBOe - Se)}{0.68} * \frac{1}{1000}$	Masa DBO_5 utilizada
42	DO	Demanda de oxigeno	kgO_2/d	0.0033	0.0066	0.0147	$DO = MDBO5 - (1.42 * Px)$	
43	a	Tasa respiración sustrato	$KgO_2/KgDBO_5$	0.5	0.5	0.5		Valor asumido, esta entre 0.48 a 0.71
44	DO Sus	O2 Requerido para la respiración sustrato	KgO_2/d	0.0023	0.0050	0.0113	$DO\ Sus = a * DBO\ a\ remover$	
45	O2N	Tasa de nitrificación	$KgO_2/KgN\text{-}NH_4$	4.6	4.6	4.6		Valor asumido
46	N	Nitrógeno	mg/L	30	30	30		Valor adoptado
47	%L	porcentaje lodo exceso	%	6	6	6		Para agua residual es de 6 a 12%
48	NLex	N2 lodo en exceso	$KgNH_4\text{-}N/d$	1.81E-05	3.63E-05	7.91E-05	$Nlex = Plodo * \%L$	
49	C NH4- N	Carga Nitrógeno	$KgNH_4\text{-}N/d$	0.0014	0.0014	0.0014	$C\ NH4 - N = \frac{E\ SST * DO}{1000}$	
50	L NOx	Nitrificación	$KgNH_4\text{-}N/d$	0.0014	0.0014	0.0013	$L\ NOx = C\ NH4 - N - Nlex$	
51	DO N	O2 Requerido para nitrificación	kgO_2/d	0.006	0.006	0.006	$DO\ N = C\ NH4 - N * O2N$	
52	Kre	Cte respiración endógena	kg/KgSSVLMd	0.131	0.131	0.131		Valor adoptado tabla 1, depende F/M
53	DO E	O2 Requerido para la respiración endógena	KgO_2/d	0.0024	0.0047	0.0104	$DO\ E = Kre * X\ SSLM * VU * \frac{1}{1000}$	
54	AOR	Requerimiento actual de oxigeno	KgO_2/d	0.0144	0.0228	0.0428	$AOR = DO + DO\ Sus + DO\ N + DO\ E$	
			kgO2/hr	0.0006	0.0009	0.0018		
55	Q aire	Caudal de aire	m^3/d	0.0518	0.0817	0.1539	$Q\ aire = \frac{AOR}{0.232 * 1.2}$	
56	E O2	Eficiencia transferencia O2		0.07	0.07	0.07		Valor adoptado según Romero (1999)
57	Q aire	Caudal de airea real requerido	m^3/d	0.7405	1.1675	2.1983	$Q\ airer = \frac{Q\ aire}{E\ O2}$	
58	Q aire B	Caudal de aire bomba pecera a utilizar	L/min	1.97	1.97	1.97		Caudal de aire promedio medido con burbujeometro para c/bomba de pecera
			m3/d	2.8368	2.8368	2.8368		

Tabla 1	
F/M	Kre
<ó= 0,1	0.1
0.2	0.12
0.3	0.13
0.5	0.14
>ó= 1	0,15 a 2

Criterios de carga de DBO_5 para diseños típicos	
Aplicación (Objetivo)	DBO_5 SALR (g/m2-d)
Alta tasa (75 a 80% Remoción DBO_5)	20
Tasa Normal (80 a 90% Remoción DBO_5)	5 a 15
Baja Tasa (Nitrificación)	5

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 48 se presentan los cálculos de la cinética para este reactor

Tabla 48. Cinética Reactor SBR completamente mezclado con biomasa adherida de medio móvil

ID	Variable	Descripción	Unidad	Valor	CRITERIOS	REFERENCIA
1	Qd	Caudal diseño	m3/d	0.0468		Tomado de la Tabla 47 ID 11
2	X SSLM	Concentración Sólidos Suspendidos en el reactor	mg/L	6000		Tomado de la Tabla 47 ID 24
3	VU	Volumen Útil	m3	0.00601		Tomado de la Tabla 47 ID 19
4	kd 12°	Coeficiente cinético T.12°	d-1	0.0406		Tomado de la Tabla 47 ID 32
5	Y	Coeficiente cinético	mg SSV/mg DBO5	0.6		Tomado de la Tabla 47 ID 30
6	Y obs	Producción Observada		0.60		Tomado de la Tabla 47 ID 33
7	U	Tasa especifica utilización sustrato	d-1	9.37	$U = \frac{kd}{Y * Yobs}$	Tomado Ecuación 17.37 Romero 1999
8	r_s	Tasa utilización del sustrato	mg/L-d	-56214.197	$r_s = -U * X$	Tomado Ecuación 17.31 Romero 1999
9	μ'	Tasa de crecimiento especifica neta	d-1	7.781	$\mu' = \frac{Q}{V}$	Tomado Ecuación 17.26 Romero 1999
10	μ	Tasa especifica de crecimiento	d-1	7.822	$\mu = \mu' + kd$	Tomado Ecuación 17.26 Romero 1999
11	r_g	Tasa de Crecimiento microbial	mg/L-d	46931.1621	$r_g = \mu * X\ SSLM$	Tomado Ecuación 9.9 Romero 1999
12	r'_g	Tasa neta de crecimiento bacterial	mg/L-d	33484.856	$r'_g = -Yobs * r_s$	Tomada ecuación 17.35 Romero 1999
13	TRH	Tiempo retención hidráulica	d	0.12		Tomado de la Tabla 47 ID 25
14	F/M	Relación Alimento /Microorganismo	kg DBO_5 / kg SSVLM-d	0.31		Tomado de la Tabla 47 ID 23
15	So	Concentración sustrato del afluente	mg/L	226.49	$So = \frac{F}{M} * TRH * X$	Tomado Ecuación 17.51 Romero 1999
16	S	Concentración sustrato del Efluente	mg/L	30.10	$S = \frac{r_s * TRH}{-So}$	Tomado Ecuación 17.32 Romero 1999
17	μm	Tasa máxima especifica de crecimiento	d-1	1.00E-05	$\mu = \frac{\mu_m}{2}$	Tomado Ecuación 9.16 Romero 1999
18	K	Tasa máxima remoción de sustrato por unidad de masa de microorganismos	d-1	1.6667E-05	$k = \frac{\mu_m}{Y}$	Tomado Ecuación 9.26 Romero 1999

Fuente: Elaboración propia

Anexo F: Construcción del reactor biológico de biomasa suspendida

El reactor biológico fue construido en acrílico transparente de 10 mm de espesor, cuenta con 29 cm de lado y una altura total de 55 cm. Para generar un volumen útil de 25 Litros. A continuación, se describe cada una de las partes que conforman el reactor

SISTEMA DE ENTRADA DE AGUA AL REACTOR

Para controlar el ingreso de agua al reactor se instaló un tanque de plástico de 30 litros. El cual alimentaba al reactor por medio de una manguera de 6 mm diámetro externo. En un extremo, la manguera tenía una tee y estaba amarrada a un flotador. De esta manera garantizar un caudal constante de entrada al reactor de 2.5 L/hr. En el otro extremo se instaló una válvula de control (llave de graduar que hace parte del equipo de infusión del suero) y tiene como función controlar la entrada de agua al reactor (ver Fotografía 7).

Fotografía 7. Sistema de entrada de agua al reactor
Fuente: Elaboración Propia

SISTEMA DE AIREACIÓN Y MEZCLA

Para suministrar aire al reactor, se utilizaron dos aireadores de pecera de doble salida marca Xilong. En la Tabla 49 se presentan las características:

Tabla 49. Características de los aireadores

Parámetros	Aireador 1	Aireador 2
Modelo	Xilong AP 003	Xilong AP 005
Voltaje	110 V/60Hz	110 V/60Hz
Caudal máximo de aire*	1.60 L/min	2.35 L/min

*Este valor fue medido en laboratorio con ayuda de un burbujeómetro y un cronómetro
Fuente: Elaboración Propia

Para garantizar una distribución homogénea de aire en el reactor se diseñó y construyo un sistema de una sola conexión con mangueras de 6 mm de diámetro localizadas en el fondo del reactor. Las mangueras están conectadas entre sí con tes y tienen forma de espina de pescado. El sistema cuenta con cinco salidas, en cada una de ellas se instaló una piedra porosa circular para pecera (ver Fotografía 8).

Fotografía 8. Sistema Distribución de aire y mezcla
Fuente: Elaboración Propia

Con el fin de garantizar una concentración de oxígeno en el reactor entre 2 y 4 mg/L, y mantener la mezcla en el sistema durante la fase de reacción. Se proyecto el diseño de un sistema de mezcla. Para ello se tuvo en cuenta la velocidad de agitación obtenido en las pruebas fisicoquímicas del medio *MUTAG BIOCHIP*® con ayuda del equipo de jarras, de 80 a 110 rpm. El sistema de mezcla para el reactor de biomasa suspendida está conformado por una paleta de 11 cm de largo y 2.8 cm de ancho. La paleta en su parte superior fue soldada a un motorreductor de potencia de 9 Watts, tensión nominal de 12 Voltios DC, 150 RPM. El cual tenía la potencia suficiente para garantizar la mezcla en el reactor SBR de biomasa suspendida. Es importante destacar que para la prueba del reactor SBR con biomasa adherida de medio móvil se requiere la instalación de una paleta de mayores dimensiones y un motor con mayor potencia.

SISTEMA DE DECANTACIÓN

Para controlar la salida de agua decantada del reactor se instaló una manguera de 6 mm diámetro externo. En un extremo, la manguera tenía una tee y estaba amarrada a un flotador. De esta manera garantizar un caudal constante de salida del reactor de 4.17 L/hr. En el otro extremo se instaló una válvula de control (llave de graduar que hace parte del equipo de infusión del suero) y tiene como función controlar la salida del agua clarificada del reactor. En la Fotografía 9 se observa el sistema que controla la salida de agua clarificada del reactor.

Fotografía 9. Sistema de salida de agua clarificada del reactor
Fuente: Elaboración Propia

SALIDA Y PURGA DE LODOS

Para efectos de llevar control sobre la concentración del licor de mezcla en el reactor, se instaló una válvula de plástico de 1/2". De esta manera realizar las purgas de lodo sin ningún problema (ver Fotografía 9)

SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN

Para llevar a cabo la fase de reacción dentro del reactor, se opta por un sistema de automatización básico controlado por un módulo Arruinó Mega y varios accesorios como relé, regulador de tensión 120V-AC / 9V-DC, Variador de Velocidad PWM, regulador de tensión 120V-AC- 12V DC, Tomacorrientes 120 Voltios AC (ver Fotografía 10).

Fotografía 10. Sistema de automatización
Fuente: Elaboración Propia

El Arduino es programado por medio de un computador portátil gracias al software de Arduino, de la siguiente forma:

1. Encendido de las bombas de aireación por 20 minutos.
2. Apagar las Bombas después de este tiempo y encender el sistema de mezcla durante 30 minutos.
3. Este ciclo se repitió durante el tiempo proyectado para la reacción.
4. Después del tiempo de reacción se apaga totalmente el sistema de aireación y mezcla, hasta el tiempo de reacción de la siguiente cochada.

Anexo G: Construcción del Modelo matemático reactor biológico de biomasa suspendida y reactor biológico de biomasa adherida de medio móvil

Para la modelación matemática se realizó la construcción y ejecución de dos modelos matemáticos. El primero corresponde al reactor biológico SBR (Proceso de crecimiento suspendido, Reactor SBR), y el segundo corresponde al reactor biológico de medio móvil (Proceso de crecimiento adherido, Reactor hibrido película fija o biomasa suspendida). A continuación, se presentan cada uno de los pasos para llevar a cabo la construcción de los dos modelos.

Paso 1: Iniciar la aplicación, selección del modelo y ajuste de temperatura

Después de iniciar la aplicación GPS-X se despliega la ventana principal donde se aprecian los elementos básicos del software tales como: Barra de título, Barra de menú, Barra de Herramientas, Tablero de dibujo, Objetos del modelo de proceso y Botón de alternancia para modelado simulado (ver Ilustración 17).

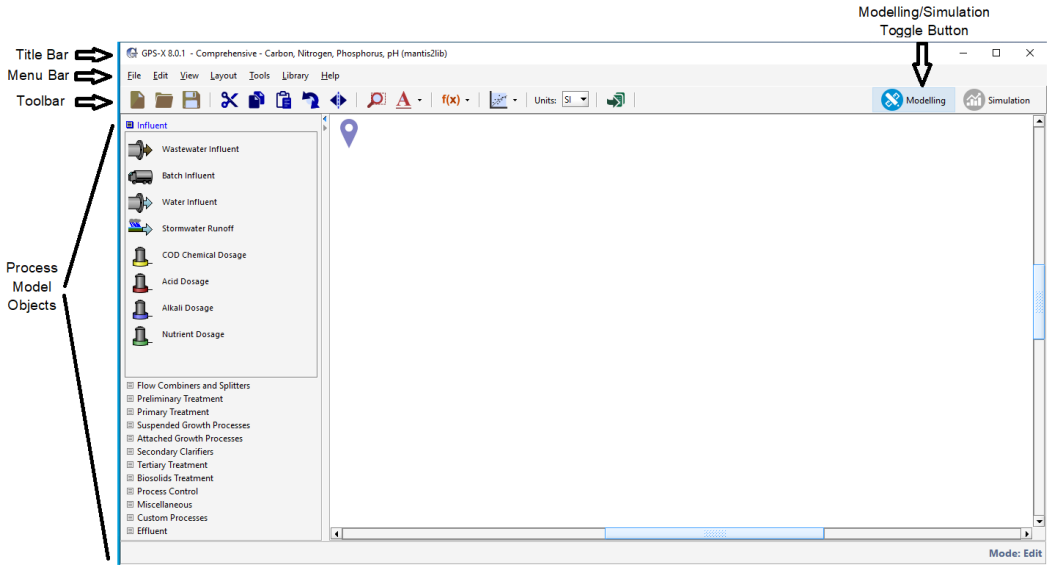


Ilustración 17 Ventana Principal GPS-X
Fuente: Adaptado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

Para la selección del modelo, en la barra de menú seleccione la pestaña *library*, donde se despliegan varios modelos que maneja el software, seleccione la opción *comprehensive – Carbon, Nitrogen, Phosphorus*, pH (mantis 2 lib). Para el ajuste de la temperatura en la

barra de menú seleccione la pestaña *layout, Site Properties*. En esta ventana se pueden especificar detalles adicionales de la planta y tomar notas sobre el modelo. Para modificar la temperatura seleccione la pestaña *Plant Wide Properties*, donde se especifica la temperatura del líquido de 12°C.

Paso 2: Construcción de la planta

Dentro de la ventana se localizan los objetos del proceso del modelo (ver Ilustración 23). Estos iconos representan los procesos unitarios y puntos de control que son utilizados para construir un diseño de planta. Se separan en grupos de objetos similares como afluente, tratamiento primario, tratamiento primario, procesos de crecimiento suspendidos, procesos de crecimiento adherido, clarificadores secundarios, efluente, entre otros.

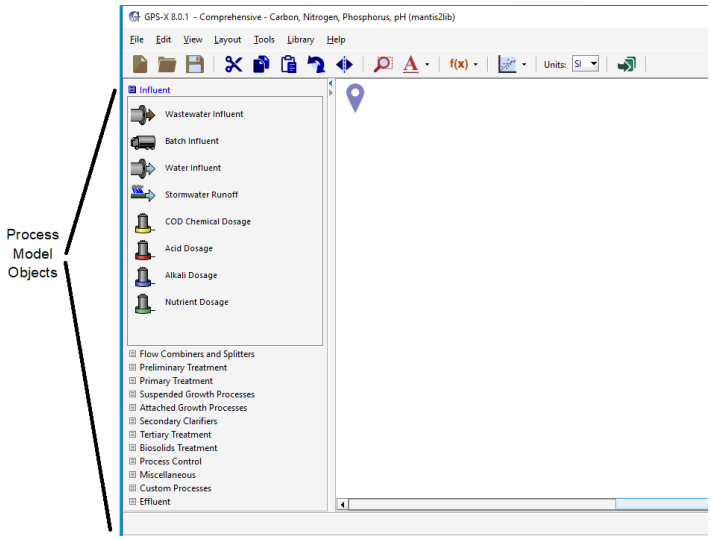


Ilustración 18 Barra iconos que representan procesos unitarios
Fuente: Adaptado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

Los dos modelos están conformados por tres objetos: El primer está conformado por afluente, proceso de crecimiento suspendido – Reactor Secuencial de cochadas SBR y emisario final. El segundo está conformado por afluente, proceso de crecimiento adherido – Reactor hibrido (MBBR) y emisario final. Para colocar los objetos en el tablero de dibujo, se busca y selecciona cada uno de los objetos proyectados. Posteriormente, presionado el botón izquierdo del *mouse* se arrastra el cursor al tablero de dibujo y se suelta el objeto soltando el botón del *mouse*. Repetir este proceso para cada objeto (ver Ilustración 19).

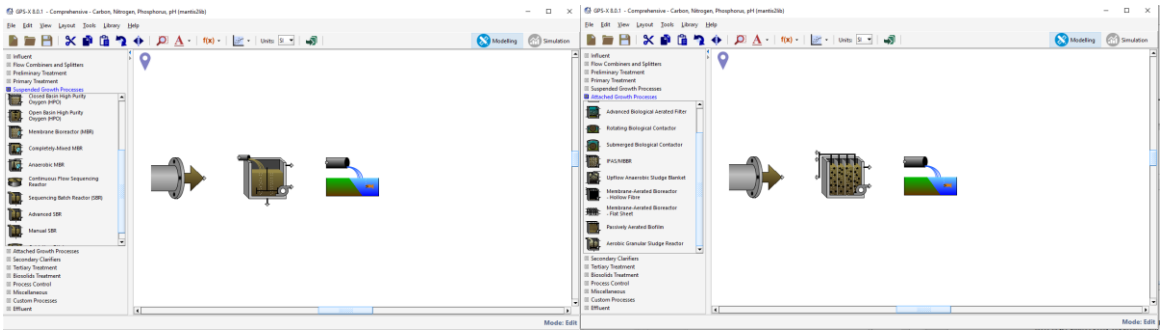


Ilustración 19 Creación objetos del modelo 1 y 2
Fuente: Adaptado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

Teniendo en cuenta que la conectividad entre objetos es fundamental para obtener el balance del proceso de tratamiento. Se procede a realizar la conectividad para cada uno de los modelos. Para ello es necesario considerar que las líneas de flujo generadas por el modelo son direccionales, es decir, los materiales fluyen desde el punto inicial al punto terminal. Para especificar la conectividad entre objetos, mueva el puntero en el tablero de dibujo sobre el punto de conexión del afluente. A penas aparezca la flecha de conexión, haga clic para anclar la línea de flujo en el punto inicial. Arrastre el puntero desde el punto inicial hasta el punto de conexión final, tanque SBR o MBRR. Para los tanques del proceso de crecimiento suspendido y adherido el punto de conexión final corresponde al punto de flujo localizado en la esquina superior. La conexión inferior corresponde al flujo de retorno de lodos. Es importante resaltar, que para este proyecto no aplica el uso de esta línea de retorno de lodos, ya que se proyecta el uso de un reactor SBR, el cual no requiere sistema de recirculación ya que todo el proceso se realiza en el mismo tanque. Cuando vuelva a aparecer la flecha de conexión en el punto final, suelte el botón del ratón. Se dibujará una tubería de conexión entre el objeto del afluente y el tanque SBR o MBRR. Realice este mismo procedimiento para la conexión entre los tanques y la descarga (ver Ilustración 20). Es importante resaltar que el software GPS-X no permite conexiones de flujo no válidas, pues mostrará un signo inválido, es decir, no permite conexiones entre influentes de dos objetos.

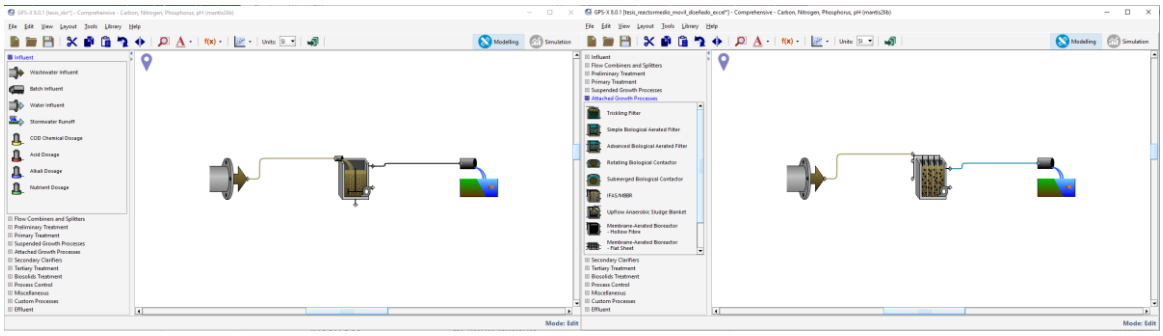


Ilustración 20 Conectividad objetos modelo 1 y 2
Fuente: Adaptado de Hidromantis (2019) y elaboración propia

Paso 3: Cambio de los atributos y propiedades de cada objeto

Para llevar a cabo la simulación se utilizó el modelo No.3 conocido en el software como modelo C*ODState*s. Este modelo está basado en la DQO, nitrógeno total, fósforo total, algunas variables de estado y varias fracciones estequiométricas. Las fracciones de entrada de DQO se establecen como una fracción de la DQO total. A continuación, se procede a realizar el cambio de los atributos o propiedades para cada uno de los objetos planteados en cada modelo.

Afluente

Inicialmente en el objeto de afluente debemos seleccionar el modelo a utilizar. Para ello seleccionamos la opción modelos – *CODdstates*. Posteriormente cambiamos la composición del afluente. Para ello colocamos el cursor en este objeto y damos clic derecho. Aparece un menú de datos de proceso. Seleccionamos la opción *composition* – *Influent Characterizatio*n. Inmediatamente se despliega una ventana denominada *influent advisor*. En el cual se aprecia un formulario con datos de entrada del agua residual. Tal como se aprecia en la Ilustración 21

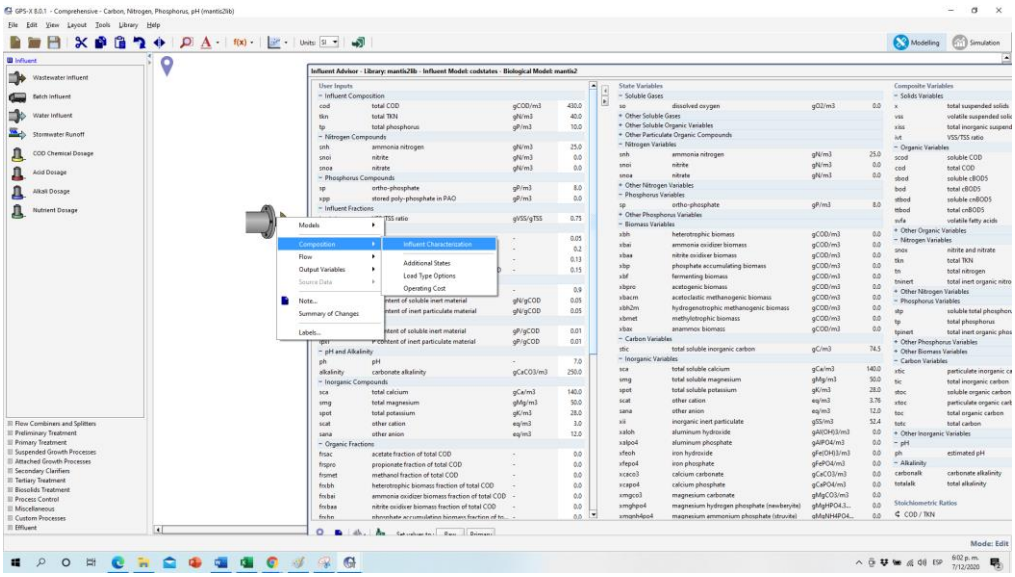


Ilustración 21 Formulario con datos de entrada modelo 1 y 2
Fuente: Adaptado de *Hidromantis* (2019) y elaboración propia

En la primera columna de la ventana *influent advisor* se cambiaron los datos de entrada predeterminados por el programa por los datos que se presentan en la Tabla 50.

Tabla 50. Parámetros a modificar en el formulario datos de entrada

Parámetro	Unidad	Valor
DQO	g/m3	300
Nitrógeno Total*	g/m3	17
Fosforo*	g/m3	1.79

Parámetro	Unidad	Valor
pH		7.5

*Valor tomado de Gonzales y Giraldo (2019) para aguas de estaciones de servicio

Fuente: Elaboración Propia

Los parámetros como relación SSV/SST, fracciones orgánicas, fracción soluble de amonio, contenido de material inerte soluble y contenido de material particulado inerte de fosforo se dejaron con los valores dados por defecto por el modelo. Los parámetros restantes que no fueron mencionados se les asigno un valor de cero (0). Posteriormente se procede a subir la información de caudal. Para ello colocamos el cursor en este objeto y damos clic derecho. Aparece un menú de datos de proceso. Seleccionamos la opción *Flow – Flow data*. En la cual se cambia el valor del parámetro *influent Flow* por 259,44 m^3/d. Valor tomado de la Tabla 31 ID 4.

Reactor SBR

Se procede a subir la información del reactor SBR. Para ello colocamos el cursor en este objeto y damos clic derecho. Aparece un menú de datos de proceso. Seleccionamos la opción *models* y verificamos que este seleccionado la opción Mantis 2. Luego se procede a cambiar los parámetros de entrada en el reactor. Para cambiar las condiciones físicas del reactor, colocamos el cursor en este objeto y damos clic derecho. Aparece un menú de datos de proceso. Seleccionamos la opción *Input Parameters – Physical*. En el cual se indica un valor de área de 46.5 m^2, un nivel máximo de agua y de punto de alimentación de 3 m. Es importante resaltar que estos valores fueron tomados de la Tabla 31 ID 6 y 7, donde se aprecian las condiciones de diseño del reactor.

Para la configuración del ciclo seleccionamos la opción *Input Parameters – Cycle Settings* en la cual se debe indicar el tiempo requerido para cada una de las etapas del proceso. Para la configuración del aire, seleccionamos la opción *Input Parameters – Aeration Setup,* en donde se especifica un valor de oxígeno de 3.3 mg/L O_2. Para cambiar la configuración del caudal, seleccionamos la opción *Input Parameters – Flow Control*. En la casilla de caudal de vaciado se coloca un valor de 259,44 m3/d y un caudal de decantado de 0. Para cambiar la cinética del reactor seleccionamos la opción *Input Parameters – Kinetic*. En la casilla de tasa máxima especifica de crecimiento de sustrato se coloca un valor de 1.87 d-1 (tomado de la Tabla 46 fila 9). Los demás valores se dejan con los valores predeterminados por el modelo, debido a la ausencia de información. Es importante destacar, que dentro de este proceso no se realizó ninguna modificación en las ventanas de estequiometria del modelo, configuración de la sedimentación y costos operacionales. Dejando los valores predeterminados por el modelo. Finalmente se procede a cambiar las condiciones iniciales en el reactor. Para ello seleccionamos la opción *Initial Conditions – Initial Volume*, en la cual se indica un volumen de 138,59 m^3 (tomado de la Tabla 31 ID 5).

Reactor MBRR

Con el fin de llevar a cabo la comparación entre los dos tipos de reactores a utilizar, inicialmente se sube al modelo los mismos datos de volumen, altura y tiempos de retención

que el reactor SBR y que fueron plasmados en la Tabla 31 – Sin Medio. Para subir los datos al reactor colocamos el cursor en este objeto y damos clic derecho. Aparece un menú de datos de proceso. Seleccionamos la opción *model*s y verificamos que este seleccionado la opción Mantis 2. Luego se procede a cambiar los parámetros de entrada en el reactor. Para cambiar las condiciones físicas del reactor, seleccionamos la opción *Input Parameters – Physical.* Esta ventana cuenta con 5 aspectos relevantes para el diseño del reactor. El primero denominado dimensiones se debe indicar el número de tanques en serie. El segundo aspecto corresponde al volumen del reactor, en él se especifica la altura del agua y volumen máximo del reactor. El tercer aspecto corresponde al volumen inicial del medio en el cual debe indicarse el valor del volumen lleno por el medio en el reactor. El cuarto aspecto corresponde a parámetros relacionados con la biopelícula, en donde se deben especificar parámetros tales como; superficie específica, densidad específica, espesor máximo, densidad y contenido de material seco en la biopelícula. Los datos fueron diligenciados de acuerdo con la información presentada en la Tabla 38 y de los que no se contaba con información se dejaron con los valores predeterminado por el modelo.

Después se cambiaron las condiciones operacionales en el reactor. Para ello seleccionamos la opción *Input Parameters – Operational*. En donde debemos especificar una transferencia de oxígeno de 3.3 mg/L O_2. Para cambiar la cinética del reactor seleccionamos la opción *Input Parameters – Kinetic*. En la casilla de tasa máxima especifica de crecimiento de sustrato se coloca un valor de 7.78 d-1 (tomado de la Tabla 48 fila 9). Los demás valores se dejan con los valores predeterminados por el modelo, debido a la ausencia de información. Para cambiar la consistencia del reactor seleccionamos la opción *Input Parameters – consistency*. En donde se suben los datos de tiempos mínimos y máximos de retención hidráulica. Para este modelo se proyecta un rango entre 1 y 12.1 horas. Este último valor es el tiempo de retención hidráulica calculado para el reactor SBR y presentado en la Tabla 31. Es importante destacar, que dentro de este proceso no se realizó ninguna modificación en las ventanas de transporte de masa, estequiometria del modelo y costos operacionales. Dejando los valores predeterminados por el modelo.

Paso 4: Simulación del modelo

Después de creada la planta e indicados los parámetros del modelo se procede a ejecutar la simulación. Para ello en el Botón de alternancia presentando en la Ilustración 17 cambia del modo de modelado al modo de simulación. Una vez se cambia al botón de simulación se inicia el proceso de compilación y vinculación, creando un modelo ejecutable. El software despliega una nueva ventana que tiene controladores de entrada, Tablero de dibujo, datos de salida, y barra de herramientas de simulación (ver Ilustración 22).

El controlador de entrada es una herramienta interactiva que se utiliza para cambiar el valor de una variable durante la ejecución de la simulación. En ella se pueden crear tantos controladores de entrada como se desee. Para ello se debe colocar el cursor sobre el objeto al que le queremos crear el parámetro de control y damos clic derecho.

Inmediatamente se despliega una ventana con los datos de ingreso al objeto. Desde allí seleccionamos el parámetro de interés y lo arrastramos hasta la ventana de control de entrada. A penas se realice este proceso, en la ventana de control se ha creado una nueva pestaña, donde se visualiza el control de entrada anteriormente creado. Para editar las propiedades de este elemento se debe dar clic derecho sobre el objeto y automáticamente aparece una ventana. En ella no solo se pueden establecer los valores mínimos y máximos de control para una variable en particular. Sino que permite elegir entre varios tipos de controladores. Este tipo de controlador depende de la simulación a realizar, ya sea estado estacionario o fase dinámica

Ilustración 22 Ventana Simulador GPS-X
Fuente: Tomado de Hidromantis (2019)

Por su parte en la ventana de salida del proceso se cuenta con una pestaña de salida para cada objeto, en donde se puede observar rápidamente la información importante sobre los parámetros operativos de cada objeto, los resultados de la simulación y los flujos másicos. Así como se pueden crear gráficas, tablas, esquemas, análisis de costos y consumos de energía y otros elementos que se puedan requerir para la evaluación de cada una de las salidas de agua de los procesos. Posteriormente, se cuenta con la barra de herramientas de simulación, localizada en la parte baja de la pantalla. Para iniciar la simulación solo es necesario presionar el botón iniciar localizado en la parte izquierda. La simulación se correrá en estado estable y una vez termine las tablas de la pantalla de salida se llenarán con valores. Por otro lado, es importante mencionar que dentro del módulo de simulación más exactamente en la barra de herramientas se cuenta con un módulo de análisis. Este módulo cuenta con cuatro opciones para el análisis.