

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

Tratamiento de efluentes químicos farmacéuticos mediante reactores biológicos aerobios, empacados con carbón activado granular.

TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

JOSÉ EMMANUEL GARCÍA SALGADO

ASESOR: DRA. FERNANDA MORALES GUZMÁN

CUERNAVACA, MOR.

MAYO 2021



Cuernavaca, Mor., a 3 de mayo de 2021

DR. ROBERTO FLORES VELÁZQUEZ
MTRA. MARIBEL OSORIO GARCÍA
DRA. FERNANDA MORALES GUZMÁN
ING. ROBERTO CERVANTES PÉREZ
ING. KAREN GUADALUPE SUÁREZ SÁNCHEZ

P R E S E N T E

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** del trabajo de: **TESIS**

Titulado:

Tratamiento de efluentes químicos farmacéuticos mediante reactores biológicos aerobios, empacados con carbón activado granular.

Que presenta (el) o (la) **C. JOSÉ EMMANUEL GARCÍA SALGADO**

Del programa educativo de: **INGENIERÍA QUÍMICA**

A T E N T A M E N T E
Por una humanidad culta

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA

Se anexa firma electrónica

D I C T A M E N

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA DE LA FCQeI
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTÁMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito informarle que nuestro voto es:

VOTO	NOMBRE	FIRMA
	DR. ROBERTO FLORES VELÁZQUEZ	
	MTRA. MARIBEL OSORIO GARCÍA	
	DRA. FERNANDA MORALES GUZMÁN	
	ING. ROBERTO CERVANTES PÉREZ	
	ING. KAREN GUADALUPE SUÁREZ SÁNCHEZ	

El voto del comité es aprobatorio, se anexan firmas electrónicas

VALH/fmg

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2021-05-04 12:03:23 | Firmante
HqiACUJGvVMuT7FBpqyUy+xnyg1dMyR1ntY1W2iQLXoUx0kzoPbrIk+NachBUJzDCQwGxjDyuVQ+U4xe/Dd1DwRavWLHDjhtZjKa4dUW/xay2R8is/h5bj3JIBsRDncbkn6DRhs
p+EnEK6n7qw+UJo+NQR8S4O9jsYWzoLqPOr446Bjc6eh/mlTr/gp0xZLZ9v1FG5I7KARjicCwqjZKTSzVzGx0/SL3QNNvppKc6JUWidJbJzT2+zm/2R1FsrA+xshBCGNPpD0H4Vwk
9diJxvBMxW0lJe/nb8zc+1lwffMq7MWMxNnnTCFHKxeMxXfXclmpkqkx7xCzqpdw==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



1bMVHt

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/50fJ5vWsqzGCxGIGH5Nox1wabFvvL0Kc>

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

FERNANDA MORALES GUZMAN | Fecha:2021-05-04 19:02:36 | Firmante
KGJZ5aEoC/OTCj40F+DIXO0+uS0DC2lpmfUzaw+mbV7XmYmNxZEKACHHT2kmqrKuP4MhMBwriwCGxUNw0URHCkUahAEePKoblnXv8i6s33waEvWFEc6YkokblsXJHaCu
0CGWnCTJnbs8VUJsGjbyxmayi2E3/QirZrVd/DoFKmGi9zVD3SKqXYKRDcT+MJHy8rOuhCQCium5hUKMkCyl3PbRO5U/0RAYbMSb1MqLBvR0Xsj44z8vZQigbvhqDJQW7Bm
IZchHDS8qGoYxysYA9SBao62CSUeU8bpjnXceuDfVnhKMwrDhHNSRpLdzzCx6vDkjuAhm9uLV7g==

MARIBEL OSORIO GARCIA | Fecha:2021-05-04 21:35:16 | Firmante
5HFeZdM8faKwk6piHrBKSFWwhxEF08w3Rtj61gkL/MXoDG87fbPOxnNXEq8rQm67AB/4yS6+dws2JgKmxS3kwwRHgTUILrsWP4xMyAkt89fnGkf6uBOQJGwUkMjBaukVGx3E
uQSKqVoVQgwn8nL/MK3xORq0mWY/ucrBG4ybQlyegxm17wzHi90PH5/3iLed6we9OZzYp17QXt5DxAQEeVXe6k7Ux8iI9SBGCF73uns7EnCa0imacuQt6T4iweEBw/pM/GaY3G
d3FLFi5FQAV1Pp/DU41XgPiToyBHjTrLZKj90p5dwgEyWd7Z08Ust6S9b8CpzuZNRciO5KnUYQ==

KAREN GUADALUPE SUAREZ SANCHEZ | Fecha:2021-05-05 08:00:38 | Firmante
m86wYyf7JXVXBtW6j1AwmESauybiS7+9bTniO0iVvkGCZ9GAdmztJo7ybnDlRqJ9KU2ieglLuCLEGaWDCe7A73sJG8L9Ypp053s4m/kmzNwJeBzn2VzR0M3QWOFIOZnjTJ
xqfChlOfWVj05n015fiJU60kT/KK6+FDiOnoHwXiThLSIZBeo6iFAoK8zz2hAiYjT/g7ys65ze3gpr+VsEF371qIFXQWLL6qC/7WG+VnU+ngFymhWHwemUWLkHdWH4GY7ykY1w
X5go1TIEpqlQdYdQuyZb93zWleSgyj25iFKG7ihbVxtj/NtD72qwh7CJVD+GoZIRJzPrVig==

ROBERTO FLORES VELAZQUEZ | Fecha:2021-05-06 13:39:41 | Firmante
r+BN8U9TPoblyIH5EBWHjmcEqF2b5B1avX1KKFH40+z4cuvHWj4YQy9tgzq2nLU0hID0zTPoXV7A7esFJUnDNYMwxNRoyh9rCaTUSIHroiTLSS6ECVTWU86zklxl6C9ztjxGA7J
EAsYM2B29P3ohjOMtGC9kXHxcZUQikKaM9C+LrPleOQtr3LD8COWpBUiKRVocSL0Bz7uc2KBW7DHPBwXzdvj3s+prCII20DUKE94La/FudfxbwQF2FWEkBnn8GbRw1nM
OKvyOgtKchEVM81hFy3RabqaFFy0IT9ZMj5VTjrE8Wxjz0uf60jyfWgK8ts47gLqm8laODYA==

ROBERTO CERVANTES PEREZ | Fecha:2021-05-11 17:58:31 | Firmante
ntMfs2sNPM5v2CFI2K+9rrov4vgFAIEZkxxMI/J6vObx5HX02DLP3b6v+ymPMGSyZListm3UgB9MmDz0pYV/IIUPf1EWY5nOiPI8r8qaH2zk+SQwoCe50+AwJqPndUVGQfd4bT
4/PfNgaBupzJlpXn2frihqB0OLBox2hOMzv2MqRSIIPQAA3AvM697QbhtOAUJEL0M/TNBDcNvwxKFnlIAosAtDxsTVHvxxKKvbxGQYxelgi65bkEcdU36TLAVZ+bFkCPwoTl3kF16q
hk9Oe+mhpI+9dV+PqnGxOfQ2aUvEmSHECqL83s3RITAMqW1GTSwfinU9Y800dBfPkIQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



twZKv9

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/XrkHZeUgKXjngcWjaUJul3MILXa5KET1>

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, Diana hermana, Norma hermana y Daniel hermano, por el amor y apoyo incondicional que siempre me han dado, mi motor a seguir, por nunca dejar de preguntar que como iba la tesis, ¿cuándo la terminaría? y ¿cuándo me iba a titular?, nunca me dejaron perder el hilo de este trabajo, gracias por los momentos de pelea y felicidad, me encanta ser necio y hacerlos de enojar.

Por mi padre Brígido, que desde los cielos disfruta de este trabajo y que sabe que con amor lo dedico a él, por todo el esfuerzo que me brindo y ha brindado con su presencia física y espiritual hasta ahora, quiero seguir aprendiendo de ti, de tu seriedad y de tu noble corazón.

Por mi madre Dominga, no me alcanzan las palabras para agradecerte todo lo que has hecho por mí, que siempre has estado presente en las buenas y en las malas, por su amor incondicional de madre y por aguantarme todas las travesuras en esta vida, este documento debería llevar su nombre, gracias por tu cariño y entrega hacia mí.

A mis amigos, (a todos), que admiro, quiero y me han dado momentos de alegría y locura inolvidables, gracias por su sincera amistad, apoyo y también por no dejarme de preguntar que como iba la tesis y cuando me iba a titular.

Mención Honorífica a Daniela y Eduardo, amigos, gracias por seguir aguantando de mis locuras, agradezco a Dios el dejarme compartir la vida con ustedes, neta no sería el mismo si ustedes y su locura no fueran parte de mí.

A todos mis profesores, que han dado parte de su tiempo para poder enseñarme ciencia y ser participe de ella, a mi jefa de carrera que igual me preguntaba como iba el trabajo y después de tanto he aquí el trabajo.

A mis mascotas, por ser esos seres que nos ayudan a tener momentos de paz y de risa, igual no hablan, pero si pudieran hacerlo, estoy seguro que preguntarían que ¿hasta cuándo la tesis?

ÍNDICE GENERAL

Índice general	<i>v</i>
Índice de tablas	<i>viii</i>
Índice de figuras	<i>ix</i>
Abreviaciones	<i>xi</i>
Introducción	<i>xiii</i>

Contenido

Capítulo 1. Marco teórico	1
1.1. Situación de agua en México	2
1.2 Usos del agua en México	4
1.3 Contaminación	5
1.3.1. Contaminación del agua	6
1.4. Efluentes industriales	9
1.5 Presencia de compuestos farmacéuticos en aguas residuales	10
1.6 Plantas de tratamiento de aguas residuales	12
1.7 Tipos de tratamiento de aguas residuales	18
1.7.1 Tratamiento primario	18
1.7.2 Tratamiento secundario	20
1.7.3 Tratamiento terciario	21
1.8 Sistema de lodos activados en el tratamiento de aguas residuales	22
1.8.1. Sistema aerobio	23
1.8.2 Sistema anaerobio	24

1.9 Acoplamiento de carbón activado granular en el tratamiento de aguas residuales	25
1.10. Indicadores analíticos que se utilizan en el tratamiento de las aguas residuales	26
1.10.1 Potencial de hidrógeno (pH).....	26
1.10.2 Temperatura (T)	27
1.10.3 Sólidos suspendidos totales (SST).	27
1.10.4 Demanda química de oxígeno (DQO)	27
Capítulo 2. Objetivo e Hipótesis	30
2.1 Objetivo	30
2.2 Hipótesis	30
Capítulo 3. Metodología	31
3.1 Instalación experimental.....	31
3.2 Inoculación	32
3.3 Arranque de los reactores y aclimatación de la biomasa al efluente químico-farmacéutico.....	33
3.4 Funcionamiento de los reactores A y B, a diferentes concentraciones de efluentes químico-farmacéuticos.	33
3.5. Métodos analíticos	34
Capítulo 4. Resultados	34
4.1 Temperatura.....	34
4.2 Potencial de hidrógeno.....	35
4.3 Carga orgánica determinada como DQO	36
4.3.1 Reactor A, efluente procedente de la planta de tratamientos de aguas industriales	37
4.3.2 Reactor B, efluente procedente de la industria químico-farmacéutica.....	40
4.3.3 Porcentaje de remoción por ciclo Reactor A vs Reactor B	43

4.4 Determinación de la biomasa, comportamiento de los sólidos suspendidos totales	46
Capítulo 5. Conclusiones.....	47
Capítulo 6. Bibliografía	48
A N E X O S	53

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de las aguas residuales.....	7
Tabla 2. Puntos de descarga de aguas residuales municipales sin tratamiento en el 2014.....	8
Tabla 3. Tipos de contaminantes en la generación de las aguas residuales	11
Tabla 4. Compuestos farmacéuticos detectados en aguas residuales.....	12
Tabla 5. Descarga de aguas municipales y no municipales (Industriales) 2016.....	15
Tabla 6. Tipos de procesos aerobios.....	24
-Tabla 7. Tipos de procesos anaerobios.....	25
Tabla 8. Escala de clasificación de la calidad del agua residual con base en la DQO.....	29
Tabla 9. Relación de concentraciones aplicadas a los reactores A y B.....	34
Tabla 10. Resultados generales de Reactor A.....	38
Tabla 11. Resultados por grupo de lotes de reactor A.....	38
Tabla 12. Agua residual proveniente de PTAR industriales.....	40
Tabla 13. Resultados generales de Reactor B.....	41
Tabla 14. Resultados por grupo de lotes de reactor B.....	41
Tabla 15. Agua residual proveniente de industria químico-farmacéutica.....	43

Índice de figuras

Figura 1. Precipitación media normal en México, 2000-2017.....	2
Figura 2. Disponibilidad de agua en relación con la distribución geográfica del país	3
Figura 3. Uso consuntivo del agua en México.....	4
Figura 4. Puntos de descarga de aguas residuales municipales sin tratamiento por entidad federativa	9
Figura 5. Generación de residuos durante el proceso industrial.....	10
Figura 6. Clases de tratamiento de efluentes industriales.....	14
Figura 7. Plantas de tratamientos de aguas residuales por entidad federativa en 2019	15
Figura 8. Número de plantas por proceso en 2019	16
Figura 9. Plantas de tratamiento de aguas municipales en operación en el estado de Morelos	17
Figura 10. Representación visual de carbón activado granular.....	26
Figura 11. Esquema de diseño de instalación de los reactores SBR empacado	31
Figura 12. Esquema del funcionamiento de los reactores SBR empacados con carbón activado granular	32
Figura 13. Mediciones de pH, reactor A y reactor B.....	35
Figura 14. Porcentaje de remoción por ciclo Reactor A	38
Figura 15. Porcentaje de remoción por ciclo Reactor B	41

Figura 16. Porcentaje de remoción por ciclo de Reactor A vs Reactor B 43

Abreviaciones

CAG	Carbón Activado Granular
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONAPO	Consejo Nacional de Población
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
FCEA	Fondo de la Comunicación y Educación Ambiental
.hm ³	Hectómetros Cúbicos
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
L	Litros
Kg	Kilogramos
SBR	Sequencing Batch Reactor (Reactor Discontinuo Secuencial)
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SST	Sólidos Suspendidos Totales
T	Temperatura
TWh	Teravatio-hora
pH	Potencial de Hidrógeno
MW	Megavatio
m ³ /s	Metros cúbicos sobre segundo
ml	Mililitros

mm	Milímetros
NMX	Normas Mexicanas
NOM	Normas Oficiales Mexicanas
PIB	Producto Interno Bruto
PNUMA	Programa Nacional de Unidades para el Medio Ambiente
km ³	Kilómetros Cúbicos
ST	Sólidos Totales
STV	Sólidos Totales Volátiles
SDT	Sólidos Disueltos Totales

Introducción

El deterioro ambiental provocado por las actividades antropogénicas se ha incrementado exponencialmente en las últimas décadas y el daño ocasionado puede constatarse de muchas formas: sequías severas, huracanes y tormentas cada vez con mayor intensidad, pérdidas irreparables de biodiversidad, extinción de diversas especies y la contaminación de suelos, atmósfera y fuentes hídricas. Este problema está directamente relacionado con el aumento en la población y en la producción de diversos productos (bienes y servicios) que forman parte de las necesidades básicas, con el incremento en la expectativa de vida del ser humano y en gran medida con el interés de grandes empresas por incrementar sus ganancias, sin considerar el impacto ambiental que sus decisiones y acciones conlleva, ni el bienestar social. Si bien es cierto que en los últimos seis años el interés por la conservación y restauración del ambiente, la preocupación por el cambio climático y la importancia del cuidado del agua se ha incrementado, aún hace falta mucho más por hacer para concientizar a la acción de que existe un problema serio con la calidad ambiental que tenemos hoy en día en el planeta y particularmente, en el país.

El Estado de Morelos es un territorio privilegiado rico en recursos naturales: agua, suelo y vegetación, que combinados con su clima han dado lugar a la formación de una amplia diversidad de ecosistemas que a su vez han propiciado condiciones favorables para impulsar el desarrollo social y económico en esta región del país. Sin embargo, durante las últimas décadas tales recursos se han ido deteriorando por malas prácticas de uso y a su vez por la carencia de políticas públicas adecuadas, que en muchas ocasiones no van de la mano con los principios de desarrollo sustentable y en consecuencia, han derivado en problemas ambientales tales como el aumento en la escasez del agua, acentuando las necesidades sociales básicas representando limitaciones importantes para poder potenciar un mayor y mejor desarrollo de la entidad.

De acuerdo con la información asentada en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), a finales del año 2013 se tenían registrados 396 títulos de concesión de aguas superficiales en el Estado, donde el primer uso en volumen era el agrícola, con más de

800 Mm³/año, siguiendo el uso público urbano con 36.7 Mm³/año y finalmente el industrial con 2 Mm³/año.

Las principales corrientes son los ríos: Amacuzac, Cuautla, Yautepec, Apatlaco, Tembembe, Chalma, Salado, El Sabino-Colotepec, Tejaltepec, Tepalcingo, Grande y Agua Dulce y también cuenta con cuatro cuerpos lagunares, los cuales son: Lago de Tequesquitengo, Laguna el Rodeo, Laguna de Coatetelco y el complejo de Lagunas de Zempoala, los cuales se encuentran registrados en la ley federal de derechos como cuerpos receptores de aguas tratadas, y en diversos estudios se han encontrado una gran cantidad de contaminantes. Es por ello la importancia de darle un adecuado tratamiento al agua que se descarga a estos cuerpos receptores.

De acuerdo al Programa Estatal Hídrico 2014-2018, en Morelos existe un padrón de 48 plantas de tratamiento municipales que han sido construidas por el Gobierno del Estado, de las cuales 14 se encuentran fuera de operación, 2 colapsadas por desbordamientos fluviales y 32 en funcionamiento. De estas últimas, solamente 8 operan por arriba del 80% de su capacidad instalada y las 24 restantes por debajo de la misma.

Para el tratamiento de las aguas industriales, a inicios del año 2012 se tenían registradas 99 PTAR (plantas de tratamiento de aguas residuales) industriales en el Estado, localizadas en 10 municipios. Ayala, Cuernavaca, Jiutepec y Zacatepec concentran el 81% de estas PTAR instaladas. El nivel de saneamiento de las plantas industriales se considera de nivel secundario (remoción de materiales orgánicos coloidales y disueltos).

Las 99 PTAR industriales totalizan una capacidad instalada de 800.34 Ls⁻¹ y registran un gasto de operación de 582.40 Ls⁻¹; lo que representa una utilización del 73% de su capacidad instalada. En base a esta información, se hace patente la importancia que tiene el aumentar el porcentaje de la capacidad instalada de PTAR y de darle un adecuado tratamiento al agua residual en el Estado. La investigación básica y aplicada orientada a mejorar la eficiencia en los tratamientos de aguas residuales, contribuirá en menor o mayor medida a reducir el impacto ambiental mencionado, específicamente en los recursos hídricos del planeta. Este es el propósito del presente proyecto.

En el Estado de Morelos uno de los principales problemas son las descargas de aguas residuales de la industria farmacéutica, que necesita de soluciones tecnológicas para el tratamiento de los residuos líquidos originados por sus diversas producciones de medicamentos novedosos, las cuales generan aguas residuales no caracterizadas ni evaluadas anteriormente por algún proceso. La disposición de ellas produce serios impactos en los recursos hídricos, con incumplimiento de las regulaciones y normas ambientales vigentes. Se tiene una planta tratadora de aguas residuales que recibe efluentes de la industria químico farmacéutica, su sistema actual es utilizando torres biológicas para abatir la carga orgánica. La empresa tratadora ha recibido efluentes que han desestabilizado su sistema, por lo tanto, en el presente trabajo se analizará directamente uno de los efluentes del cual se sospecha es participe de esta desestabilización, al mismo tiempo que se utilizará carbón activado granular como medio de soporte de la biomasa para evitar por una parte la generación de subproductos (más lodos residuales) mientras se logra abatir la carga orgánica.

En el capítulo 1, se presenta los aspectos relevantes de la situación del agua en México, sus usos y contaminantes, así como los tratamientos que se utilizan para mejorar su uso, como es el uso de los reactores biológicos utilizando microorganismos.

En el capítulo 2, se describe el objetivo e hipótesis planteada en el desarrollo del trabajo. En el capítulo 3 se presenta la metodología de los experimentos realizados. En el capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos a través de la experimentación y en el capítulo 5 se presentan las conclusiones obtenidas.

Con relación al anexo se muestran los resultados analíticos de la operación de los reactores, así como las técnicas utilizadas en el monitoreo de los parámetros determinados y fotografías de la instalación experimento.

Capítulo 1. Marco teórico

El agua constituye parte importante de la materia que forma los vegetales, animales y el ser humano. El agua es uno de los elementos más comunes en la Tierra, y no es coincidencia que también se le llame el planeta azul: en estado líquido se halla en lagos, ríos y presas, en depósitos subterráneos (llamados acuíferos) y ocupa los mares y océanos circundantes; en estado gaseoso se presenta como vapor de agua en la atmósfera; y en estado sólido cubre las regiones polares y las montañas más altas en forma de hielo o nieve (SEMARNAT, 2015).

El agua se emplea en diversas actividades diarias, por ejemplo, para el baño, para cocinar alimentos y para regar las plantas. También se le usa en la agricultura; en la actividad minera que requiere enormes volúmenes para sus procesos de separación y purificación de productos; en la industria textil y de curtido de pieles; en fin, se pueden seguir añadiendo más actividades y se llegaría a la misma conclusión: el agua es un elemento indispensable para el funcionamiento y desarrollo de las sociedades. No sólo el ser humano depende del agua para subsistir, también en los bosques, selvas y otras comunidades naturales, el agua es indispensable tanto para la supervivencia de las plantas y los animales, como para que puedan darse los flujos de nutrientes que mantienen a los ecosistemas (CONAGUA, 2016).

Aunque el agua es el elemento más frecuente en la Tierra, el 97.5% es agua salada contenida en los mares y los océanos y sólo 2.5% es la llamada agua dulce, que realmente no es que tenga un sabor dulce, sino que tiene pocas sales disueltas. Esta última, en su mayoría, se encuentra en glaciares y capas de hielo, principalmente en Groenlandia y la Antártica. También una porción importante se encuentra atrapada en depósitos subterráneos profundos de difícil acceso y sólo 0.3% de esta agua dulce se localiza en lugares que podríamos llamar accesibles como los lagos y ríos para ser utilizada por los seres vivos de las zonas continentales, incluyendo al hombre.

1.1. Situación de agua en México

El uso intensivo del agua en las diversas actividades socioeconómicas ha dado lugar a la sobreexplotación de las aguas superficiales y subterráneas, al deterioro de los ecosistemas en algunas regiones debido a la disminución del escurrimiento. También esa situación dio lugar a un sobre concesionamiento de los volúmenes de agua disponibles en cuencas y acuíferos (SEMARNAT, 2014).

La mayor parte del agua que tienen los países para su disponibilidad pública es obtenida por medio de la precipitación. En México, se recibe cerca de un volumen anual de 1.5 Tm³ de agua en forma de precipitación, la precipitación normal promedio del país es de 740 mm anuales como se aprecia en la en la Figura 1 para los años 2000-2017.

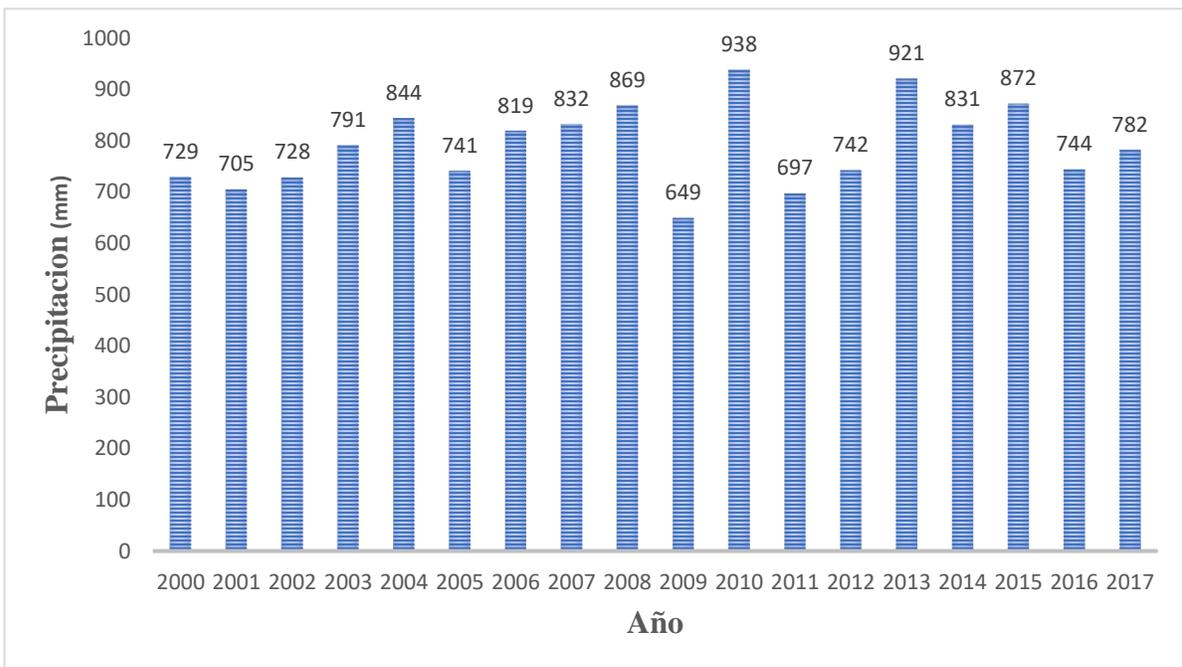


Figura 1.- Precipitación media normal en México, 2000-2017, CONAGUA 2018.

El cual aproximadamente el 70% es regresado a la atmósfera por efecto de evapotranspiración, esto sumado a los aproximados 48 km³ de aportación de ríos ubicados en el norte y centro del país y la exportación de 0.43 km³ anualmente del río bravo a los Estados Unidos. Así la disponibilidad natural media del país es de 451.6 km³ de agua en promedio anualmente (CONAGUA, 2016).

Hablando en términos de distribución, geográficamente la disponibilidad de agua no coincide con la distribución geográfica de la población. Según datos reportados en “La agenda del agua 2030”, México es un país que presenta un desequilibrio entre disponibilidad hídrica y demanda, existen cuencas donde se utiliza solo un bajo porcentaje de agua total disponible y otras en donde se utiliza más del 100%. Aproximadamente se demandan 78.4 miles de millones de metros cúbicos, para cuyo abastecimiento se recurre a 11.5 miles de millones de metros cúbicos de volumen no sustentable. Esta brecha se duplicaría en un lapso de 20 años. Figura 2.



Figura 2. Disponibilidad de agua en relación con la distribución geográfica del país, CONAGUA, 2010.

Un punto importante a considerar en tema de disponibilidad de agua es el crecimiento poblacional, según proyecciones realizadas por el Consejo Nacional de Población se alcanzará cerca de 130 millones de personas en el año 2040. (CONAPO, 2015). El fondo de la Comunicación y la Educación Ambiental A.C. nos dice que el incremento de la población ocasionara la disminución de agua renovable en México per cápita a nivel nacional, (FCEA, 2016)

1.2 Usos del agua en México

El agua es empleada de diversas formas prácticamente en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o para producir e intercambiar bienes y servicios.

En México, la CONAGUA clasifica a los consumidores de agua en tres sectores: agrícola, abastecimiento público e industrial, como se aprecia en la Figura 3. En el año 2017, el volumen que se concesionó a estos usos consuntivos fue 21% mayor al registrado en 2001, pasando de 72.7 a 87.9 km³; esta última cifra representa el 19.2% del agua renovable total (451.6 km³). En 2017, además de los 87.9 km³ concesionados a los sectores antes mencionados, se concesionaron 183 kilómetros cúbicos adicionales para usos no consuntivos, en particular, para la generación de electricidad en hidroeléctricas.

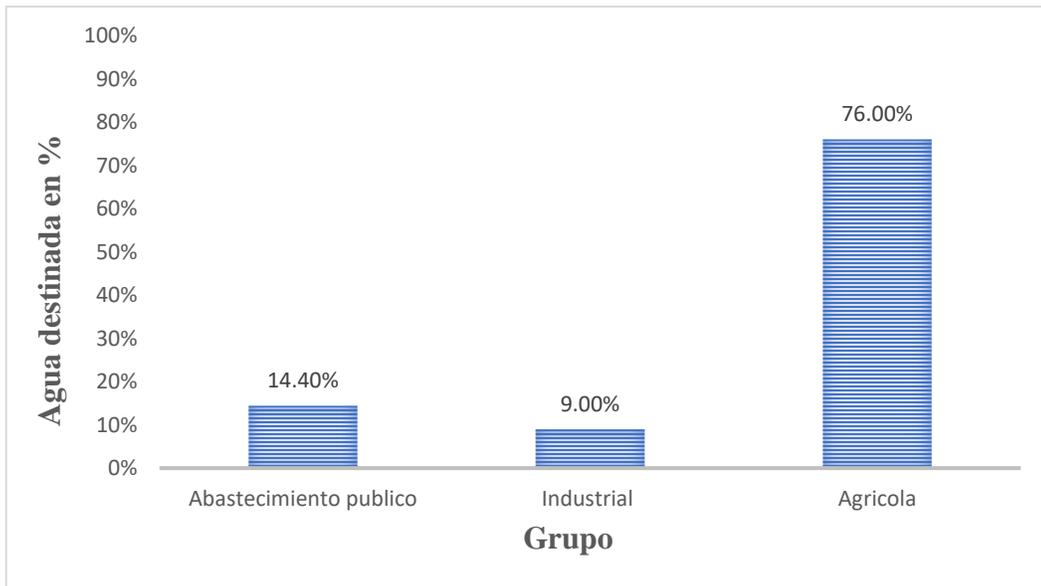


Figura 3. Uso consuntivo del agua en México, CONAGUA 2017.

En 2018 la aportación del sector agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal, pesca y caza al Producto Interno Bruto Nacional (PIB) fue de 3.5%. Al año 2018, la superficie sembrada bajo riego en México fue de 6.17 millones de hectáreas, de las cuales un poco más de la mitad corresponden a 86 distritos de riego, y el restante en más de 40 mil unidades de riego. Tomando en cuenta que existen variaciones anuales, el volumen de agua subterránea.

El grupo de la agricultura es el sector que más agua consume en 2016 recibió 76% del volumen concesionado (66,799 hm³), principalmente para riego, aunque incluye también a las actividades pecuarias y acuícolas. El líquido que se concesiona a la agricultura se destina a los distritos de riego, los cuales cubren el 18% del área total agrícola, (CONAGUA, 2016).

El grupo de abastecimiento público corresponde a la que se entrega por las redes de agua potable y que abastece a los usuarios domésticos, así como al sector público urbano. Es el sector con el segundo mayor consumo de agua en el país: en 2017 utilizó el 14.4% del volumen total concesionado, siendo su principal fuente de abasto los acuíferos (58% del volumen para este uso, 7 378 hm³)

El grupo de industria autoabastecida, los principales rubros son industria química, azucarera, petróleo, celulosa, papel y de generación de energía eléctrica, Utilizó alrededor del 9% del agua concesionada en 2017. Con respecto a su fuente de abasto, lo dominan las aguas superficiales (osciló entre 68 y 77% en el periodo 2001 y 2017, esto es, entre 5 074 y 5 659 hm³ respectivamente), sin embargo, la extracción de agua subterránea para la industria aumentó poco más del 68.6% entre 2001-2017 alcanzando 2 683 hm³ (CONAGUA, 2018).

En el 2017 las plantas hidroeléctricas emplearon un volumen de agua de 133,938 hm³, lo que permitió la generación de 30.1 TWh de energía eléctrica, que correspondía al 11.7% del total nacional. La capacidad instalada en las centrales hidroeléctricas fue de 12,117 MW, que correspondía al 28.5% de la instalada en México al 2017. (CONAGUA, 2019).

1.3 Contaminación

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), define a la contaminación como la introducción de microorganismos, sustancias químicas, sustancias tóxicas, desperdicios, o aguas negras en el agua, el aire o el suelo, en tal concentración que el medio no es apto para su uso. El término se aplica también a las superficies de objetos, edificios y varios productos de usos agrícolas y caseros.

En general, la presencia de una sustancia en el ambiente que, debido a su cantidad o composición química, prohíbe el funcionamiento de procesos naturales y produce efectos indeseables para la salud y el medio ambiente. Bajo la Ley de Agua Limpia, el término ha sido definido así: las alteraciones hechas o provocadas por los seres humanos a la integridad física, biológica, química y radiológica del agua y otros medios. (EPA, 2016).

1.3.1. Contaminación del agua

La contaminación del agua se define como la alteración de la flora y fauna de un cuerpo de agua. En la NOM-001-SEMARNAT-1996, se define a los contaminantes como aquellos parámetros o compuestos que, en determinadas concentraciones, pueden producir efectos negativos en la salud humana y en el medio ambiente, dañar la infraestructura hidráulica o inhibir los procesos de tratamiento de las aguas residuales.

La contaminación del agua está dada por:

- Desechos urbanos e industriales.
- Drenados de la agricultura y minas.
- La erosión.
- Derrames de sustancias tóxicas (accidentales o intencionales).
- Ruptura de drenajes.

Las aguas residuales son aquellas que están contaminadas con sustancias que alteran la vida de los seres que habitan en los cuerpos de agua, así como aquellos que las consumen. Estas aguas contienen sustancias fisicoquímicas y biológicas que impiden el consumo y utilización directa de ella (EPA, 2016).

En la Tabla 1 se muestra la clasificación de las aguas residuales según su origen.

Tabla 1. Clasificación de las aguas residuales

Tipo de agua residual.	Proviene de:
Domésticas	Uso cotidiano, el aseo de personas y la elaboración de los alimentos, es decir, de casas habitación.
Municipales	El lavado de calles, vehículos, banquetas, fuentes, riego de áreas verdes, o sea las que usa el municipio en los servicios urbanos.
Comerciales	Descargadas por restaurantes, taquerías, centros comerciales, etc.
Industriales	Las industrias para llevar a cabo su proceso de producción de cualquier tipo.
Agrícolas	Aguas sobrantes y que escurren después de ser utilizadas en cultivos

Las aguas residuales domésticas son resultado de las actividades cotidianas de las personas. La cantidad y naturaleza de los vertidos industriales es muy variada, dependiendo del tipo de industria, de la gestión de su consumo de agua y el grado de tratamiento que reciben antes de su descarga. La infiltración de aguas residuales se produce cuando se sitúan conductos de alcantarillado por debajo del nivel freático o cuando el agua de lluvia se filtra hasta el nivel de la tubería. (CONAGUA, 2016).

La descarga de aguas residuales domésticas, industriales, agrícolas y pecuarias sin tratamiento provoca la contaminación de los cuerpos de agua receptores disminuyendo la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, poniendo en riesgo la salud de la población y la integridad de los ecosistemas. La Tabla 2 nos muestra la descarga de aguas residuales sin tratamientos a diferentes denominaciones que se tuvieron registradas en el año 2014.

La descarga de aguas residuales de origen urbano proviene de viviendas, edificios públicos y de la escorrentía urbana que se colecta en el drenaje. Sus principales contaminantes son el nitrógeno y fósforo, compuestos orgánicos, bacterias, coliformes fecales, materia orgánica, entre muchos otros (Jiménez-Cisneros, 2010).

Tabla 2. Puntos de descarga de aguas residuales municipales sin tratamiento en el 2014. INEGI 2015

Denominación	No. Puntos
Con salida al mar	8
Con salida al cuerpo de una presa	40
Con salida a un gran colector	150
Con salida a un lago o laguna	249
Con salida a un canal	594
Con salida al suelo o barranca	972
Con salida a un río o barranca	2461

Las aguas residuales domésticas, industriales, agrícolas y pecuarias contienen elementos y sustancias químicas disueltas, así como sólidos suspendidos, en concentración variable, que cuando son vertidas sin tratamiento causan la contaminación de los cuerpos de agua superficiales. Se estima que a nivel mundial entre 80 y 95% del agua residual se descarga directamente a los ríos, lagos y océanos sin recibir tratamiento previo (CONAGUA, 2017).

Las aguas contaminadas y la falta de saneamiento básico obstaculizan la erradicación de la pobreza extrema y de las enfermedades en los países más pobres, El 80% de las aguas residuales retornan al ecosistema sin ser tratadas o reutilizadas (UNESCO, 2017)

El tratamiento de aguas residuales se ha convertido en una prioridad dentro de las agendas políticas en México, se han logrado avances importantes al incrementar el porcentaje de agua residual tratada del 23% al 36.1% (Peña, *et al.*, 2013).

Para 2016, el volumen de aguas residuales provenientes de las descargas municipales fue de aproximadamente 7.2 miles de hm³/año, equivalente a 228.9 metros cúbicos por segundo, de las cuales se colectaron en los sistemas de alcantarillado 6.69 miles de hm³/año (212 m³/s; 92.6% del generado) y se trataron 3.9 miles de hm³ en el mismo

periodo (123.6 m³/s; 58.3% del colectado (CONAGUA, 2017)). En la Figura 4 se puede apreciar la cantidad de puntos municipales por estado que tiene descarga de aguas residuales sin tratar.

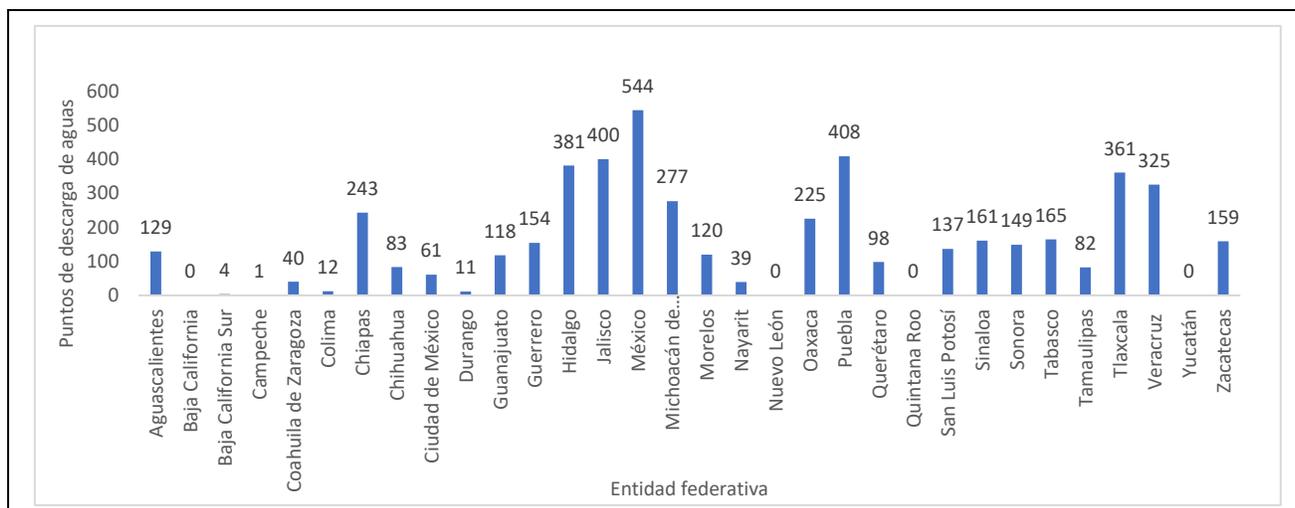


Figura 4. Puntos de descarga de aguas residuales municipales sin tratamiento por entidad federativa. INEGI, 2015.

1.4. Efluentes industriales

Las industrias presentan problemas significativos de contaminación al ambiente. Algunos giros industriales, tales como: textil, papel y celulosa, química, farmacéutica, entre otras, generan grandes volúmenes de efluentes de naturaleza principalmente refractaria. Además de que estos efluentes se reconocen por la capacidad de aumentar la cantidad de sustancias tóxicas lanzadas en los cuerpos de agua, afectando los ecosistemas acuáticos. Algunos efluentes industriales son ricos en materia orgánica disuelta, de la cual una parte es de difícil degradación y permanece reminiscente después del tratamiento por procesos biológicos (Rodríguez, *et. al.*, 2009).

Los efluentes que tienen contaminantes tales como productos químicos sintéticos, colorantes, materia orgánica, residuos orgánicos refractarios, metales pesados, etc. y que son descargadas a los cuerpos de agua más cercanos con o sin tratos. Esto provoca graves daños al nivel de oxígeno disuelto (OD) así como al equilibrio del ecosistema de los cuerpos de agua receptores cercanos (Tamal, *et al.*, 2010).

1.5 Presencia de compuestos farmacéuticos en aguas residuales

La industria farmacéutica comprende la fabricación de materias primas de uso farmacéutico y de especialidades farmacéuticas (medicamentos, preparados para uso terapéutico o profiláctico, etc.). Dentro de las materias primas de uso farmacéutico se encuentran los principios activos terapéuticos, los productos intermedios y los excipientes o sustancias auxiliares. El poder contaminante de esta especialidad de la industria química (10 a 20 %) se encuentra en su mayor parte en la producción del principio activo (Alvariño, 2006).

En la Figura 5 se puede apreciar las etapas de la generación de residuos del proceso de producción de una industria farmacéutica. Los productos farmacéuticos llegan a las fuentes de agua a través de los efluentes de instalaciones de fabricación o producción insuficientemente controladas, principalmente las relacionadas con los medicamentos genéricos (OMS, 2016).

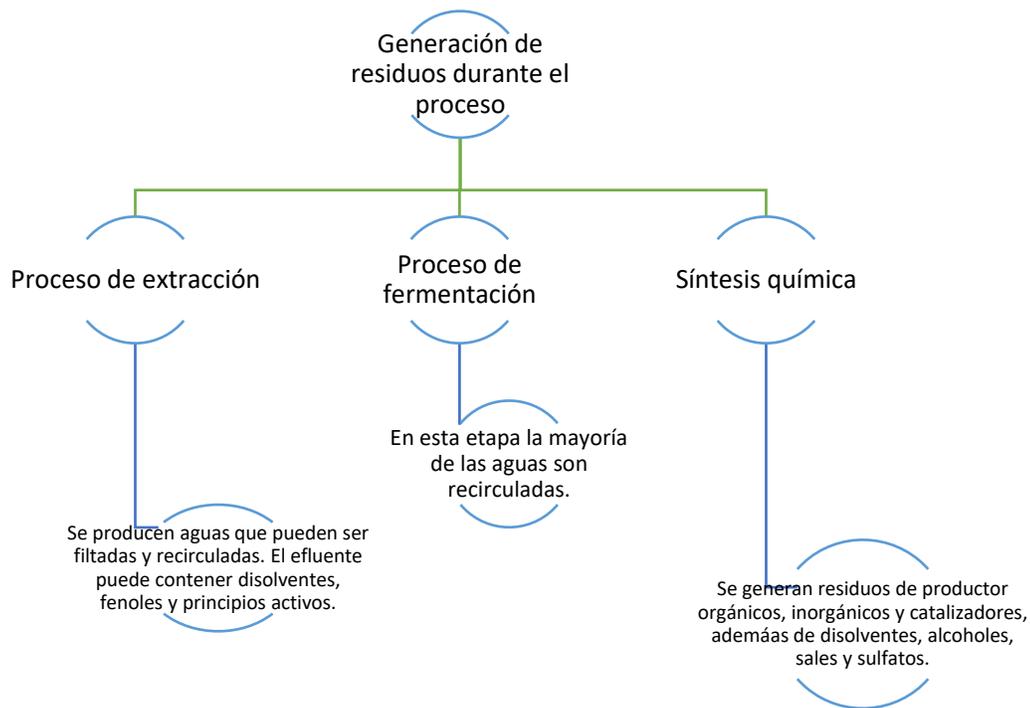


Figura 5. Generación de residuos durante el proceso industrial

Dentro de la generaciones de las aguas residuales industriales contamos con diferentes grupos de contaminantes los cuales se describen a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3. Tipos de contaminantes en la generación de las aguas residuales.

Grupo de contaminantes.	Descripción.
Compuestos orgánicos alifáticos o aromáticos	Alcanos, alcoholes, cetonas, ésteres y tolueno. Se utilizan como medio de reacción, disolventes de extracción de principios activos y en las etapas de aislamiento y purificación de productos finales e intermedios. En menor cantidad se usan como materias de partida en síntesis química.
Organohalogenados	Compuestos de carbono que presentan en su estructura molecular un halógeno, generalmente cloro. Se utilizan principalmente como disolventes. El más utilizado es el diclorometano. El cloroformo y el tetracloruro de carbono están en desuso.
Metales pesados	Dentro de los procesos de síntesis intervienen generalmente como catalizadores (níquel, paladio) o como oxidantes (manganeso, cromo).
Cianuros	Suelen emplearse como catalizadores y como reactivos en síntesis química. Compuestos de nitrógeno-fósforo: generalmente se introducen en el proceso de fermentación como nutrientes.
Ácidos y bases	Se utilizan como disolventes acuosos, medios de reacción y extracción, etcétera.
Materia orgánica de origen biológico:	En procesos de extracción natural proviene de la materia vegetal o animal de partida. En procesos de fermentación está constituida por biomasa.
Compuestos organometálicos	Se usan como reactivos en procesos de síntesis química.

De todos los contaminantes, los que probablemente suscitan mayor preocupación y estudio en los últimos años son los fármacos y en particular, los antibióticos. Según las propiedades físico-químicas de los fármacos, sus metabolitos, productos de degradación y las características de los suelos, estas sustancias pueden llegar a alcanzar las aguas subterráneas y contaminar los acuíferos o bien quedar retenidas en el suelo y acumularse pudiendo afectar al ecosistema y a los humanos a través de la cadena trófica (Barceló y López, 2012).

Se encuentran también contaminantes antropogénicos, sustancias que se encuentran en el medio ambiente debido a actividades humanas y pueden causar efectos directa o indirectamente en organismos vivos, muchos de estos contaminantes han sido reconocidos como disruptores endocrinos y pueden causar riesgos en la salud humana como desequilibrio hormonal, metabolismo, trastornos neurológicos, inmunológicos y desequilibrio del sistema reproductor masculino/femenino. (López-Pacheco, *et al.*, 2019).

Estos contaminantes corresponden, en la mayoría de los casos, a contaminantes no regulados, que pueden ser candidatos a regulación futura, dependiendo de investigaciones sobre sus efectos potenciales en la salud y los datos de monitoreo con respecto a su incidencia (Becerril, 2012). Alguno de estos compuestos detectados se nombre en la tabla Tabla 4.

Tabla 4.- Compuestos farmacéuticos detectados en aguas residuales. Petrovic *et. al.*, 2005.

Tipo de compuesto farmacéutico	Compuestos detectados
Antilipemiantes	Ácido clofibrico, Gemfibrozil, Bezafibrato
Antiepilépticos	Carbamacepina
Antiulcerosos	Ranitidina
Antibióticos	Azitromicina, Sulfametoxazol, Trimetropina
Beta-bloqueadores.	Atenolol, Sotalol, Propanolol

1.6 Plantas de tratamiento de aguas residuales

La escasez cada vez mayor de las aguas dulces debido al crecimiento demográfico, a la urbanización y, probablemente, a los cambios climáticos, ha dado lugar al uso creciente de aguas residuales para la agricultura, la acuicultura, la recarga de aguas subterráneas y otras áreas. En algunos casos, las aguas residuales son el único recurso hídrico de las comunidades pobres que subsisten por medio de la agricultura. Si bien el uso de aguas

residuales en la agricultura puede aportar beneficios (incluidos los beneficios de salud como una mejor nutrición y provisión de alimentos para muchas viviendas), su uso no controlado generalmente está relacionado con impactos significativos sobre la salud humana (OMS, 2016).

Las plantas de tratamiento municipales se diseñan por lo general para procesar aguas residuales del tipo doméstico; es decir, no tienen la capacidad de tratar aguas residuales muy concentradas. Estas pueden causar interferencia o inhibir en el tratamiento biológico de la planta municipal, por ejemplo, las altas concentraciones de la DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno). Los sólidos suspendidos y la alta acidez o alcalinidad hacen estas aguas no compatibles con el sistema de tratamiento. Otro beneficio es el control de los lodos. Estos pueden incluir cantidades muy altas de metales pesados y tóxicos orgánicos, haciéndolos no aptos para su disposición final. Con relación al sistema de drenaje y alcantarillado, los daños que se evitan con el establecimiento preliminar del programa son: al controlar las condiciones ácidas, se protege el sistema de tuberías y los equipos de bombeo; se evita el riesgo de explosión en el alcantarillado, concentraciones por arriba del diseño de proceso de la planta de tratamiento municipal y taponamiento de colectores por el exceso de sólidos, grasas y aceites (Cortes, *et al.*, 2010).

Las aguas residuales industriales presentan una gran cantidad de contaminantes que tienen una acción muy compleja sobre el medio ambiente, afectando el desarrollo natural de los ecosistemas por el cambio de condiciones tales como la toxicidad, olor, color, entre otras. Estas aguas han sido tradicionalmente tratadas por métodos convencionales. Sin embargo, la efectividad de estos procesos se está viendo seriamente limitada en los últimos años principalmente por restricciones cada vez más severas. Estas restricciones son debido al mayor conocimiento del impacto de los contaminantes en el ambiente, la disminución de la disponibilidad de agua fresca, y al aumento de la demanda tanto humana como industrial, lo cual significa mayores caudales de agua residual a tratar. En respuesta a esta creciente demanda ambiental para la descontaminación de aguas residuales de la industria se han desarrollado en los últimos años nuevas tecnologías, que tienen en cuenta en su aplicación factores fundamentales como la naturaleza y las propiedades fisicoquímicas del sistema; la

factibilidad de reúso, la economía y la eficiencia de los procesos y sus rangos de aplicación (Forero, et al., 2005). En la Figura 6 se ilustra de forma general, los principales métodos de tratamiento de efluentes utilizados por las industrias:

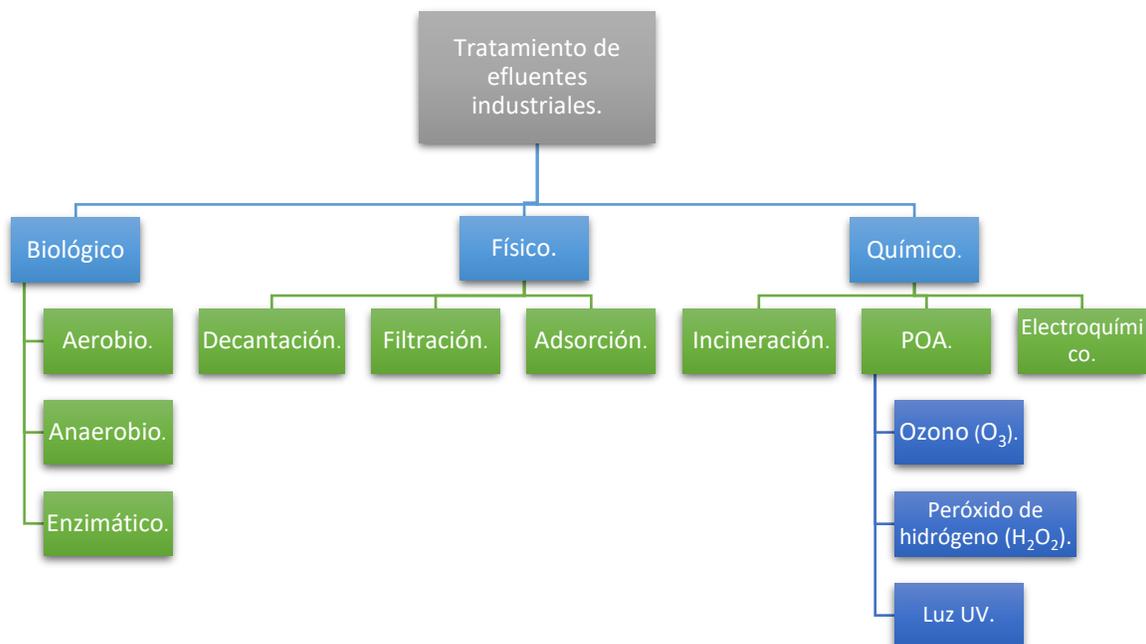


Figura 6. Clases de tratamiento de efluentes industriales

En México, durante el año 2016, las 2 536 plantas en operación a lo largo del país trataron 123.6 (m³/s, es decir el 58.3% de los 212 m³/s recolectados a través de los sistemas de alcantarillado. En el ámbito industrial, se trataron 75.9 m³/s de aguas residuales, en 3 041 plantas en operación a escala nacional, como podemos apreciar en la Tabla 5.

Tabla 5. Descarga de aguas municipales y no municipales (Industriales) 2016.
CONAGUA, 2018.

Aguas residuales municipales	7.22 miles de hm³/año (228.9 m³/s)
Se recolectan en alcantarillado	6.69 miles de hm ³ /año (212.2 m ³ /s)
Se tratan	3.90 miles de hm ³ /año (123.6 m ³ /s)
Aguas residuales no municipales (industriales)	6.86 miles de hm ³ /año (217.4 m ³ /s)
Se tratan	2.39 miles de hm ³ /año (75.9 m ³ /s)

En la Figura 7 se puede apreciar el número de plantas de tratamiento de aguas en operación que cuenta cada entidad federativa del país.

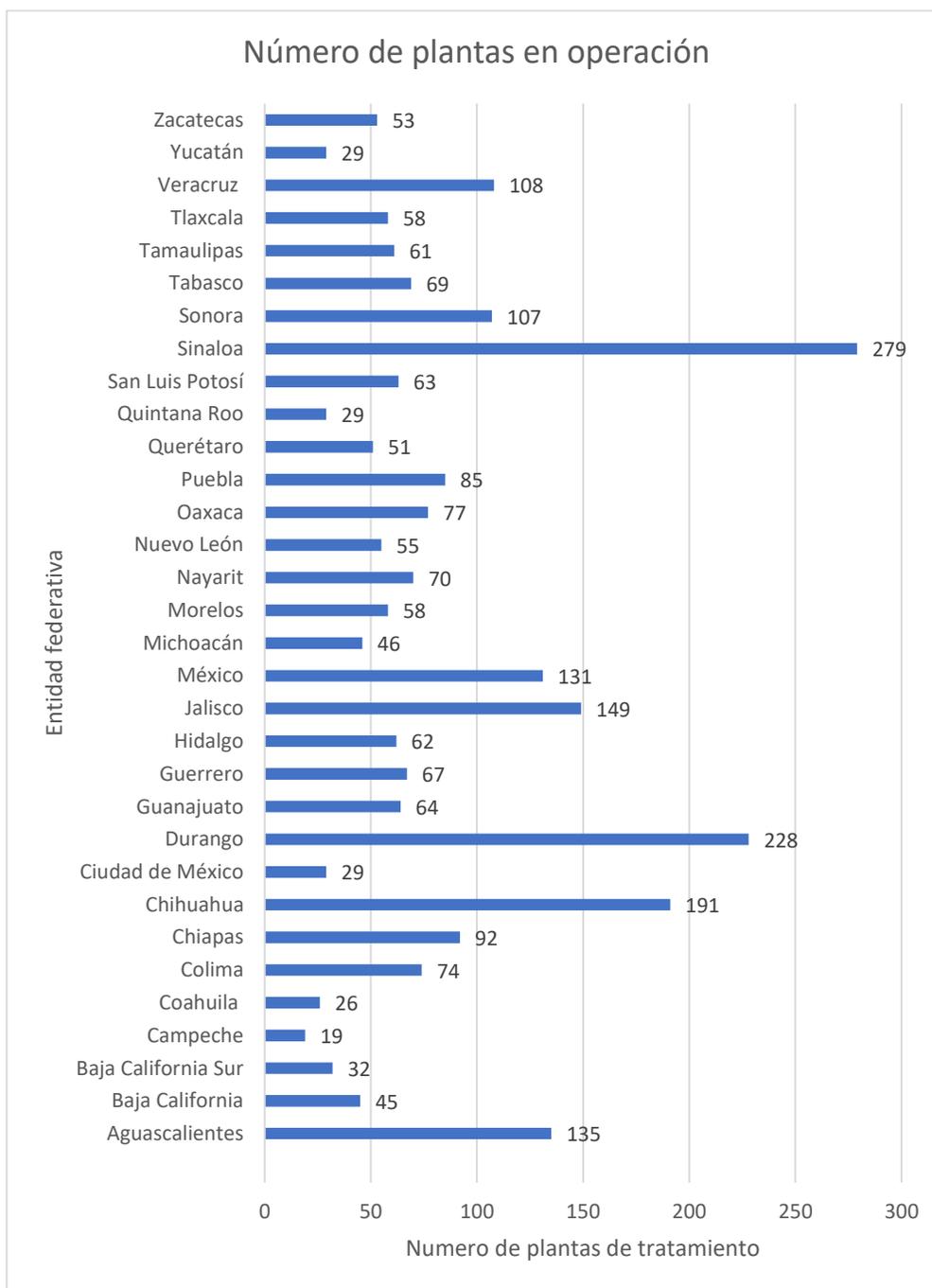


Figura 7.- Plantas de tratamientos de aguas residuales por entidad federativa en 2019, CONAGUA, 2019.

Se pueden encontrar distintos tipos de tratamientos de aguas en el país, pero por mencionar algunos procesos de tratamiento se puede encontrar sistemas aerobios y anaerobios, humedales, lodos activados, discos biológicos o biodiscos entre otros, la Figura 8 nos menciona algunos tipos de procesos.

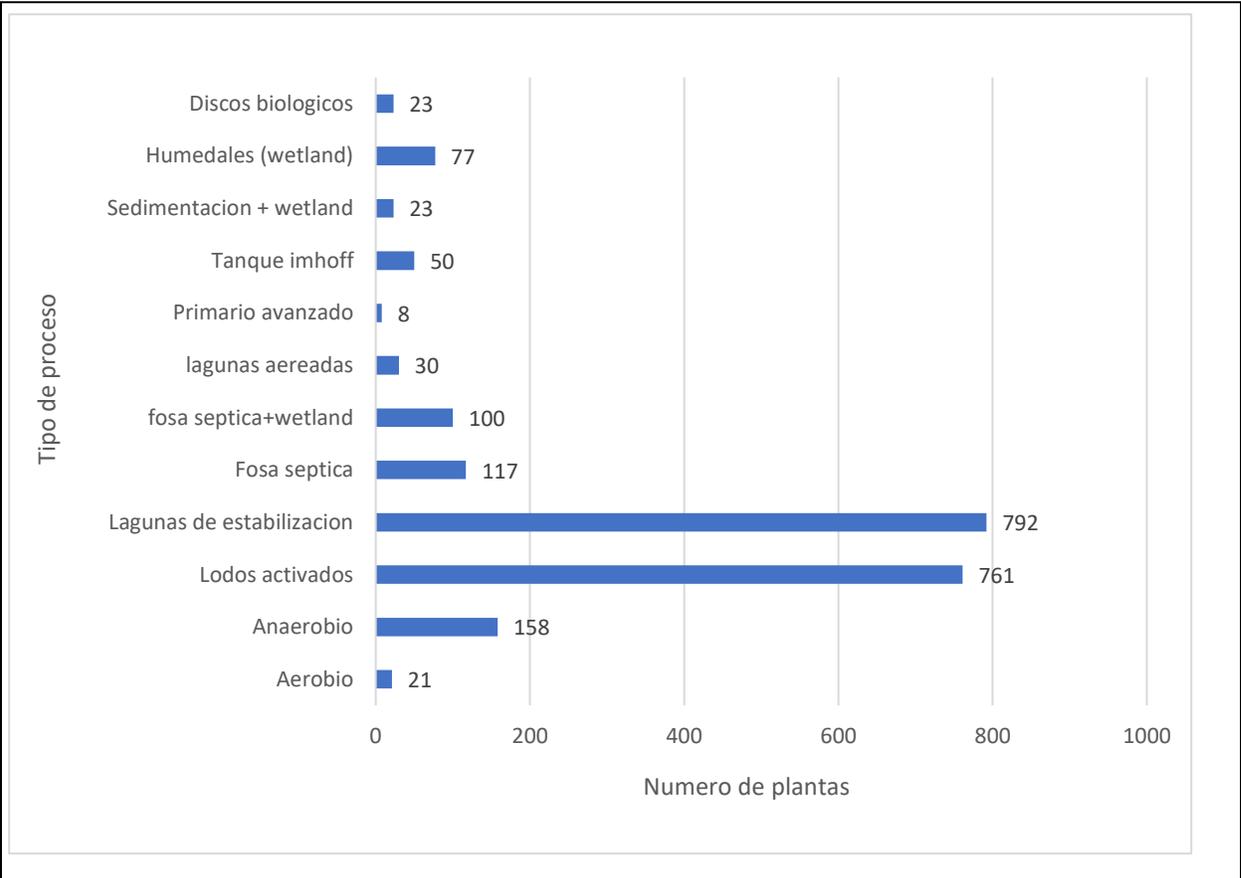


Figura 8. Número de plantas por proceso en 2019, CONAGUA, 2020.

Hasta el año 2019, el estado de Morelos cuenta con 58 plantas de tratamiento de aguas municipales, con una capacidad instalada total de 2964 L/s y un caudal tratado de 1360.9 L/s. en la Figura 9, se muestra el número de plantas de tratamientos de aguas municipales con los que cuenta el estado.

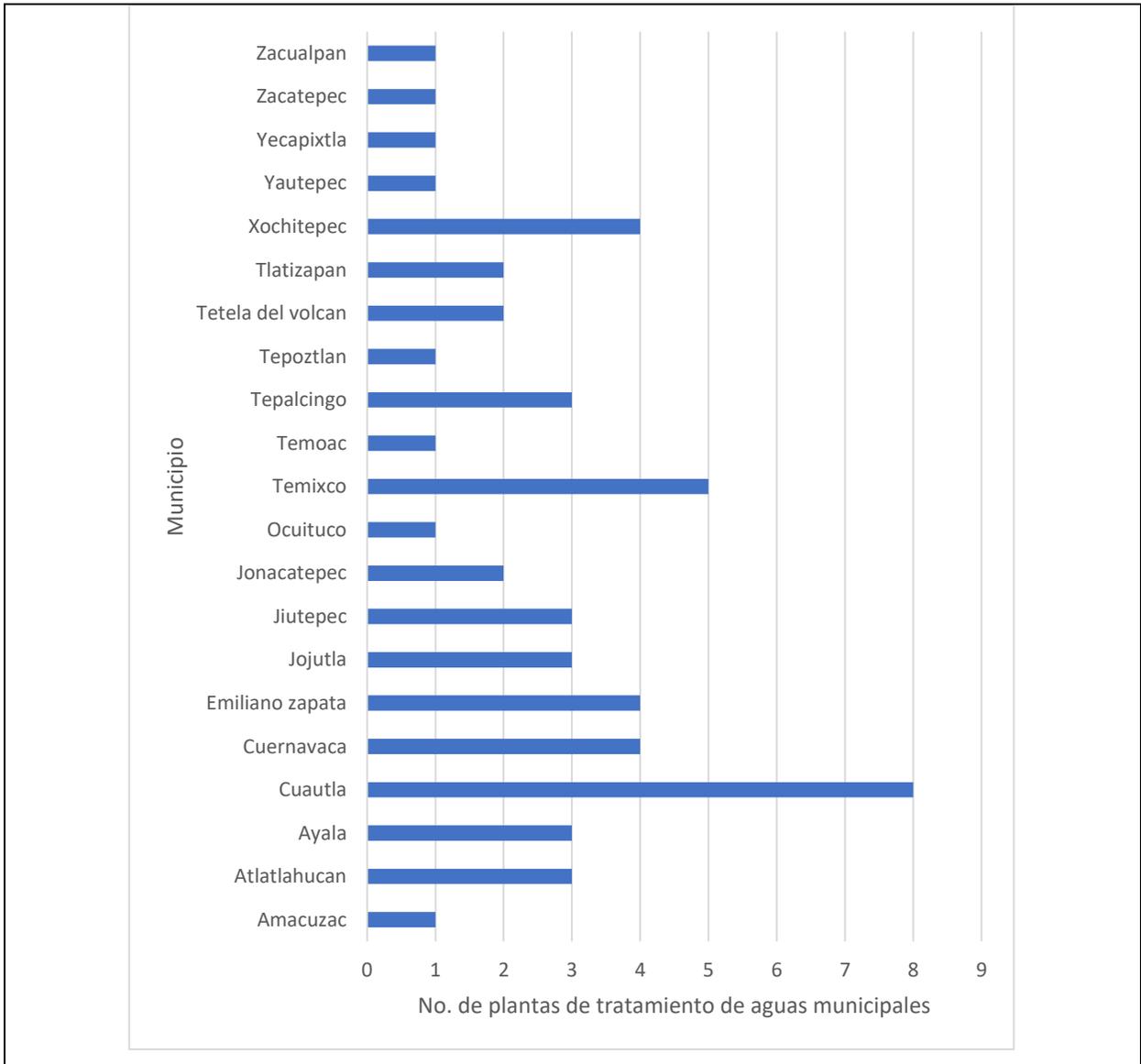


Figura 9. Plantas de tratamiento de aguas municipales en operación del estado de Morelos. CONAGUA, 2020.

1.7 Tipos de tratamiento de aguas residuales

Las aguas residuales industriales son tratadas en tres niveles: primario, secundario y terciario, de los cuales el más utilizado es el secundario (49.5 m³/s; 59%), empleado en 1 831 plantas de tratamiento.

Este nivel de tratamiento, además del cribado y la sedimentación que se realiza en el proceso primario, implica un proceso biológico en el que el material orgánico se digiere y convierte en células o tejido celular y otros subproductos inocuos como bióxido de carbono y agua. En el tratamiento secundario se puede obtener una remoción de entre 80 y 90% de la DBO original, lo que permite que el agua vertida con estas condiciones no tenga impactos significativos en el cuerpo de agua receptor (CONAGUA, 2016).

En 2017, el 35.9% (30.1 m³/s) del caudal de aguas residuales industriales generadas recibió tratamiento primario, 59.1% (49.5 m³/s), tratamiento secundario y el 2.2% (1.8 m³/s) tratamiento terciario, (SEMARNAT, 2018).

1.7.1 Tratamiento primario

Los tratamientos primarios, eliminan la materia insoluble y rebajan levemente la DBO. Según la EPA como tratamiento primario se define aquel que rebaja la DBO en un 30-40%. Son todos procesos físicos. (Muñoz, *et al.*, 2018).

Estos tipos de tratamiento preparan las aguas residuales para su tratamiento biológico, eliminan ciertos contaminantes y reducen las variaciones de caudal y concentración de aguas que llegan a la planta.

Los decantadores primarios, llamados así para distinguirlos de los secundarios que acompañan al tratamiento biológico, se utilizan para separar los sólidos en suspensión por un proceso de sedimentación. Las partículas más densas que el agua se separan por acción de la gravedad. Algunas partículas como lo es la arena, sedimentan de una forma discreta, otras de ellas forman tendencia a aglomerarse. Este fenómeno se

aprovecha para inducirse en partículas difícilmente decantables, en un proceso de previa coagulación. Se podría definir el proceso de decantación simple, el proceso de decantación físico-químico realizado en varias etapas y que pueden realizarse en equipos independientes o combinados en un solo equipo, cuando el espacio es una variable económica importante, se pueden utilizar decantadores lamelares, una de las características de este decantador es que puede producir un fango de más fácil concentración.

La eliminación de metales pesados es una necesidad frecuente en los vertidos industriales, este puede que sea el tratamiento requerido para este tipo de vertidos o un tratamiento para proteger el biológico posterior a la elevada toxicidad de algunos metales. El cadmio, el plomo, el mercurio el cromo, el níquel etc. En su forma inorgánica, en general, precipitan por hidróxido como ajuste de pH, mediante la adición de cal o sosa, aunque a veces es más conveniente una precipitación conjunta con $\text{Fe}(\text{OH})_3$ o $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Otras ocasiones se recurren a la precipitación de sales o bien, oxidarlos o reducirlos previamente. En pequeños volúmenes la precipitación se puede realizar discontinuamente. Una de las alternativas a la precipitación se puede utilizar el intercambio iónico o los procesos de filtración por osmosis inversa. (Rigola, 1999).

La operación de cribado o desbaste se emplea para remover el material grueso, por lo general basura flotante o en suspensión, contenida en las aguas residuales crudas que pueden obstruir o dañar bombas, tuberías y equipos de las plantas de tratamiento o interferir con la buena operación de los procesos de tratamiento. El cribado puede ser grueso si se emplean rejillas, medio con rejillas o fino si se usan rejillas finas.

El desarenado consiste en separar la arena de otras materias presentes en el agua, en especial material orgánico, de tal manera que la arena retenida no arrastre otras materias, lo cual, generalmente es muy difícil. La arena que se extrae contiene siempre una cierta proporción de materia orgánica que sedimenta al mismo tiempo.

La sedimentación primaria, reduce la carga orgánica en los procesos de tratamiento de aguas mediante la eliminación de una gran cantidad de sólidos suspendidos, y materiales flotantes del afluente del agua residual. Cuando se opera de manera eficiente la sedimentación primaria, típicamente puede remover hasta el 90 por ciento de los sólidos sedimentables, del 40 al 60 por ciento de los sólidos en suspensión y del 20 al 40 por ciento de la demanda bioquímica de oxígeno entrante al sedimentador.

El sistema de flotación con aire disuelto (DAF, por sus siglas en inglés), se realiza generando burbujas muy pequeñas con un promedio de diámetro de 20 micrones. Estas burbujas se adhieren tanto a los sólidos finos, materia en suspensión, microorganismos, precipitados de grasas y aceites, metales pesados, colorantes, proteínas, elementos orgánicos, etc., levantándolas y haciéndolas flotar en la superficie y permitiendo la clarificación en el fondo del tanque.

1.7.2 Tratamiento secundario

Los tratamientos secundarios, son aquellos procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales tanto aerobios como anaerobios. El tratamiento más común es un tratamiento biológico aerobio seguido de una decantación secundaria, en un tratamiento biológico, las bacterias y otros microorganismos destruyen y metabolizan las materias orgánicas solubles y coloidales, reduciendo la DBO y la DQO a valores inferiores a 100 mg/L. La velocidad de degradación depende de qué tipo de microorganismos se hallen presentes, la mayoría de las sustancias químicas orgánicas se degradan, especialmente las de origen natural, algunas de origen sintético son muy resistentes. (Rigola 1999).

Es la fase de tratamiento final antes de la desinfección y del regreso del agua al ecosistema. Un tanque de tratamiento secundario (clarificador secundario) recibe las aguas residuales del clarificador primario y del aireador después de que tuvo lugar la evacuación inicial de lodos y de las impurezas de la superficie. (Troconis, 2010).

El tratamiento biológico se realiza mediante la intervención de microorganismos, fundamentalmente bacterias que en condiciones aerobias actúan sobre la materia

orgánica presente en las aguas residuales. Una parte de la materia orgánica se oxida por la flora bacteriana, que obtiene de esta forma la energía necesaria para el mantenimiento celular. De forma simultánea, otra fracción de materia orgánica se convierte en nuevo tejido celular nuevo (síntesis celular), empleándose para ello la energía liberada en la fase de oxidación. (Manual de depuración de aguas residuales urbanas ,2008)

1.7.3 Tratamiento terciario

Un tratamiento terciario tiene como finalidad remover materia orgánica, sólidos suspendidos y disueltos y otras sustancias a volúmenes más estrictos que los alcanzados a un nivel secundario teniendo como causas principales: el reuso de aguas en aplicaciones industriales, evitar interferencias con la desinfección y aumentar la eficiencia de remoción de microorganismos, utilizar el agua para aumentar la disponibilidad de fuentes de suministro ya sean superficiales o subterráneas; en este caso es necesario remover metales pesados, orgánicos, refractarios y otras sustancias potencialmente tóxicas así como microorganismos, remover nutrientes y otras sustancias en descargas en cuerpos de agua receptores sensibles. Este tipo de tratamiento consiste en un proceso físico-químico que utiliza la precipitación, la filtración y/o la cloración para reducir drásticamente los niveles de nutrientes inorgánicos, especialmente los fosfatos y nitratos del efluente final. El agua residual que recibe un tratamiento terciario adecuado no permite un desarrollo microbiano considerable. Estos procesos son de naturaleza biológica o físico química, siendo el proceso unitario más empleado el tratamiento físico-químico. Este consta de una coagulación-floculación y una decantación. (Troconis, 2010).

De los procesos más reconocidos del tratamiento terciario es la desinfección del agua a base de operaciones que consiste destruir o inactivar los microorganismos que puedan causar enfermedades. Se puede distinguir el uso de la radiación ultravioleta, la cloración y la ozonización. (Rodríguez, *et al.*, 2009).

1.8 Sistema de lodos activados en el tratamiento de aguas residuales

El empleo de lodos activados nos ofrece una alternativa eficiente para el tratamiento de aguas residuales ya que poseen una gran variedad de microorganismos capaces de remover materia orgánica, patógenos y nutrientes (Nitrógeno y Fósforo), razón por la cual resulta un método ideal para tratar aguas residuales domésticas y municipales. Una planta de lodos activados es un sistema de mezcla completa, el ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de aireadores mecánicos que pueden estar ubicados en el lecho o superficie del mismo. Al cabo de un periodo determinado de tiempo, la mezcla de las nuevas células con las antiguas se conduce hasta un tanque de sedimentación para ser separados por decantación del agua residual tratada. Una parte de las células sedimentadas se recirculan para mantener en el reactor la concentración de células deseadas, mientras que la otra parte se purga del sistema. (Varila y Diaz, 2008).

El método de tratamiento mediante lodos activados se desarrolló por primera vez en Inglaterra en el año 1914 y actualmente es el método estándar de tratamiento de aguas residuales en los países desarrollados (Méndez *et al.*, 2004).

Este tratamiento se lleva a cabo en tanques grandes especiales, en el cual se mantienen en suspensión grumos de microorganismos (el lodo activado) por inyección de aire mecánica de la superficie o introduciendo aire a presión desde el fondo del tanque. Los grumos de microorganismos comprenden bacterias unicelulares floculas, tanto las de forma esférica como los bastoncillos, que coexisten y compiten con otras de tipo filamentosas y con actinomicetatos y hongos.

Esta diversidad de ecosistema es complementado con protozoos, metazoos y nematodos. Se considera que el lodo activado es quizá el único proceso de tratamiento de aguas residuales en donde se merece la pena realizar un estudio microscópico cada vez que el proceso no trabaje con satisfacción; una de las razones que podría causar este problema sería el desequilibrio de los organismos anteriormente mencionados. (Arundel, 2000).

En la reducción o eliminación de contaminantes se consigue por la intervención de los microorganismos que aprovechan la materia orgánica soluble e insoluble para alimentarse, generar nuevos productos, gases y energía, así como también para multiplicarse, generando nuevas células (síntesis celular). Estos procesos biológicos pueden dividirse en dos grandes grupos: Procesos aerobios y Procesos anaerobios

1.8.1. Sistema aerobio

Son aquellos en que la biomasa está constituida por microorganismos aerobios o facultativos, consumidores de oxígeno. El elemento carbono de la materia orgánica disuelta en el agua se convierte parcialmente en CO₂, con producción de energía y en parte es anabolizada para sintetizar materia celular. (Rigola, 1999).

La presencia de O₂ hace que este elemento sea el aceptor de electrones, por lo que se obtienen unos rendimientos energéticos elevados, provocando una importante generación de fangos, debido al alto crecimiento de las bacterias aerobias. Su aplicación a aguas residuales puede estar muy condicionada por la baja solubilidad del oxígeno en el agua. (Rodríguez, 2009). En la tabla 6, podemos observar tipos de procesos aerobios empleados en el tratamiento de aguas residuales.

Tabla 6.- Tipos de procesos aerobios. Crites y Tchobanoglous, 2000.

	Tipo	Nombre común	Uso
Procesos aerobios	Crecimiento en suspensión	Proceso de lodos activados	Remoción de la DBO carbonácea, nitrificación
		Lagunas aireadas	
		Digestión aerobia	Estabilización, Remoción de la DBO carbonácea.
	Película bacterial adherida	Filtros percolados	Remoción de la DBO carbonácea, nitrificación
		Sistemas biológicos de contacto rotatorios	
		Reactor de lecho empacado	
	Híbrido /combinación (Crecimiento en suspensión y Película bacterial adherida)	Filtros percoladores /Lodo activado	Remoción de la DBO carbonácea, nitrificación
		Humedales artificiales	

1.8.2 Sistema anaerobio

Es el proceso fermentativo que ocurre en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales. El proceso se caracteriza por la conversión de la materia orgánica a metano y de CO₂, en ausencia de oxígeno y con la interacción de diferentes poblaciones bacterianas. En este caso el aceptor de electrones puede ser el CO₂ o parte de la propia materia orgánica, obteniéndose como producto de esta reducción el carbono es su estado más reducido, CH₄. La utilización de este sistema, tendría, como ya se explicará, como ventaja importante, la obtención de un gas combustible. (Rodríguez, 2009).

La digestión anaerobia es un proceso que se produce en ambientes naturales como los pantanos, en zonas anegadas para el cultivo de arroz, en los sedimentos de lagos y mares, en las zonas anóxicas del suelo, en fuentes de aguas termales sulfurosas y en el tracto digestivo de los rumiantes (Díaz-Báez, *et al.*, 2002).

Es un proceso de transformación y no de destrucción de la materia orgánica, como no hay presencia de un oxidante en el proceso, la capacidad de transferencia de electrones de la materia orgánica permanece intacta en el metano producido. En vista de que no hay oxidación, se tiene que la DQO teórica del metano equivale a la mayor parte de la DQO de la materia orgánica digerida (90 a 97%), una mínima parte de la DQO es convertida en lodo (3 a 10%). En las reacciones bioquímicas que ocurren en la digestión anaerobia, solo una pequeña parte de la energía libre es liberada, mientras que la mayor parte de esa energía permanece como energía química en el metano producido. (Rodríguez, 2009). En la Tabla 7 se puede apreciar los tipos de procesos anaerobios empleados en el tratamiento de aguas residuales.

Tabla 7.- Tipos de procesos anaerobios, Crites y Tchobanoglous, 2000

	Tipo	Nombre común	Uso
Procesos anaerobios	Crecimiento en suspensión	Procesos de contacto anaerobio	Remoción de la DBO carbonácea, nitrificación.
		Digestión anaerobia	Estabilización remoción de la DBO carbonácea
	Película bacteriana adherida	Lecho anaerobio fijo	Remoción de la DBO carbonácea, estabilización de desechos (Desnitrificación)

1.9 Acoplamiento de carbón activado granular en el tratamiento de aguas residuales

El carbón activado es capaz de retener contaminantes poco polares, covalentes y no disociados que suelen ser los de origen orgánico en cualquier concentración, sin embargo, se aplica en el tratamiento terciario ya que, en términos técnico-económicos, es competitivo respecto a otros procesos, para llevar los niveles de contaminantes orgánicos de “relativamente bajos” a “muy bajos” (Carbotecnia, 2014).

Los carbones activos ya sea en forma granular o en polvo, se pueden emplear en el tratamiento de aguas como absorbentes para eliminar olores y sabores que producen los contaminantes. La preparación de estos partes de materias primas carbonosas tales como madera, lignito, carbón y cáscaras de nuez mediante procesos térmicos que implican la deshidratación y carbonización seguidos de la aplicación de vapor caliente. Se obtiene una estructura muy porosa (Figura 8) con grandes áreas superficiales (tan elevadas como $1000\text{m}^2/\text{g}$). De las grandes ventajas que tiene el emplear carbón activado como absorbente, es que tiene la posibilidad de reactivarse (hasta 30 veces o más), sin pérdida apreciable de absorción. Usualmente la reactivación se lleva a cabo calentado el carbón agotado hasta 930°C aproximadamente en una atmósfera aire-vapor conocida como una reactivación térmica. (Ramalho, 1996).

El uso de carbón activado granular (CAG), se suele utilizar una columna como medio de contacto entre el agua a tratar y el carbón activado, en la que el agua entra por la parte inferior y asciende hacia la superior. El tamaño de partícula en este caso es mayor que en el otro. Se suele utilizar para eliminar elementos traza, especialmente orgánicos, que pueden estar presentes en el agua y que habitualmente han resistido un tratamiento biológico. Son elementos que, a pesar de su pequeña concentración, en muchas ocasiones proporcionan mal olor, color o sabor al agua. (Condorchem ,2021)

Una de las ventajas que tiene el carbón activado granular (CAG), es que no se requiere de un proceso de separación carbón-agua y la operación de un proceso continuo es muy sencilla, se puede reactivar y reutilizar, en su operación se promueve la formación de biomasa que degrada la materia orgánica adsorbida y libera los espacios de adsorción, aumentando así la vida útil del carbón activado. (Carbotecnia, 2014).

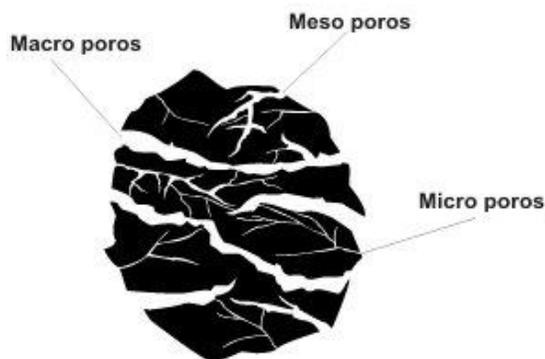


Figura 10. Representación visual de carbón activado granular. Carbotecnia, 2014.

1.10. Indicadores analíticos que se utilizan en el tratamiento de las aguas residuales

En el análisis de muestras, para evaluar la calidad del agua se consideran algunos parámetros que nos indican la influencia antropogénica desde el punto de vista de la afectación en zonas urbanas e industriales, por la presencia de desechos líquidos de calidad diferenciable. Los parámetros considerados son los siguientes:

1.10.1 Potencial de hidrógeno (pH).

Es una medición de la cantidad relativa de iones de hidrógeno e hidróxido en el agua. Si el agua contiene más iones de hidrógeno tiene una mayor acidez, mientras que agua que contiene más iones de hidróxido indica un rango básico. La actividad biológica se desarrolla dentro de un intervalo de pH generalmente estricto. Un pH que se encuentre entre los valores de 5 a 9, no suele tener un efecto significativo sobre la mayoría de las especies, aunque algunas son muy estrictas a este respecto. Un aspecto importante del pH es la agresividad de las aguas ácidas, que da lugar a la solubilización de sustancias por ataque a los materiales. De este modo, un efluente con pH adverso puede alterar la composición y modificar la vida biológica de las aguas naturales. También es más difícil de tratar por métodos biológicos, que sólo pueden realizarse entre valores de pH de 6,5 a 8,5. Las aguas residuales urbanas suelen tener un pH próximo al neutro. Aparte del efecto directo, el pH tiene un efecto indirecto, influenciando la toxicidad de algunas sustancias, especialmente de aquellas en las que, la toxicidad depende del grado de disociación. (Espigares y Pérez, 1985).

1.10.2 Temperatura (T)

La temperatura del agua residual suele ser siempre más elevada que la del agua de suministro, hecho principalmente debido a la incorporación de agua caliente procedente de las casas y los diferentes usos industriales. Dado que el calor específico del agua es mucho mayor que el del aire, las temperaturas registradas de las aguas residuales son más altas que la temperatura del aire durante la mayor parte del año y sólo son menores que ella durante los meses más calurosos del verano. Es un parámetro muy importante dada su influencia, tanto sobre el desarrollo de la vida acuática como sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción. Hablando en tema de oxígeno, este elemento es menos soluble en agua caliente que en agua fría, el aumento brusco de este indicador, causa con frecuencia el agotamiento de las concentraciones de oxígeno disuelto durante los meses más calurosos, esto puede conducir a una alta mortalidad de la vida acuática en los cuerpos receptores, así como temperaturas anormalmente altas pueden dar pauta a una proliferación de planta acuáticas y hongos. (Guzmán *et al.*, 2005).

1.10.3 Sólidos suspendidos totales (SST).

El incremento de los niveles de SST hace que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática. La determinación de los SST se basa en el incremento de peso que experimenta un filtro de fibra de vidrio (previamente tarado) tras la filtración al vacío, de una muestra que posteriormente es secada a peso constante a 103-105° C. El aumento de peso del filtro representa los sólidos totales en suspensión.

La diferencia entre los sólidos totales y los disueltos totales, puede emplearse como estimación de los sólidos suspendidos totales. (Severiche, *et al.*, 2013).

1.10.4 Demanda química de oxígeno (DQO)

El parámetro más importante en el presente estudio es la Demanda Química de Oxígeno (DQO) que se define como la cantidad de oxígeno necesario para la oxidación de toda la materia orgánica presente en las aguas residuales (Moreno, 2006). Los valores de DQO en relación a la calidad del agua pueden interpretarse con base en la información presentada en la Tabla 8.

Tabla 8. Escala de clasificación de la calidad del agua con base en la DQO. Mejía, *et al.*, 2005

DQO	CRITERIO	DESCRIPCIÓN
Menos o igual a 10 mg/l	Excelente	No contaminada
Mayor a 10mg/L y menor o igual a 20 mg/L	Buena calidad	Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable.
Mayor de 20 mg/L y menor o igual a 40 mg/L	Aceptable	Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente.
Mayor de 40 mg/L y menor o igual a 200 mg/L	Contaminada	Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal.
Mayor de 200 mg/L	Fuertemente contaminada	Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales.

Es la medida del equivalente en oxígeno del contenido de materia orgánica de una muestra que es susceptible de oxidación por un oxidante químico fuerte. Para muestras de una fuente específica, la DQO puede relacionarse empíricamente con la DBO, carbono orgánico o contenido de materia orgánica. El método de reflujos con dicromato es el más aceptado, para su determinación debido a su mayor capacidad oxidativa, aplicabilidad a una gran variedad de muestras y fácil manipulación.

La mayoría de materiales orgánicos son oxidables por una mezcla en ebullición de ácidos crómico y sulfúrico. Una muestra es colocada en reflujo en una solución fuertemente ácida con un exceso conocido de dicromato de potasio, después de la digestión, el dicromato que no se ha reducido es titulado con sulfato ferroso amoniacal. La cantidad de dicromato consumido y la cantidad de materia orgánica oxidable se determina en términos de equivalentes oxígeno. (APHA, 1998).

Capítulo 2. Objetivo e Hipótesis

2.1 Objetivo

Tratar efluentes de aguas residuales químico-farmacéuticas a través de un reactor discontinuo aerobio con lodos activados utilizando carbón activado granular como medio de soporte, para la remoción de la carga orgánica medida como DQO. (Demanda química de oxígeno)

2.2 Hipótesis

La carga orgánica medida como DQO contenida en aguas residuales farmacéuticas se puede disminuir a través de un reactor discontinuo aerobio con lodos activados soportados en el carbón activado granular.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Instalación experimental

Se utilizaron dos reactores cilíndricos de vidrio de 30 cm de alto y 13 cm de diámetro con un volumen total de 3 L, como se muestra en la Figura 11. Los reactores se controlaron por medio de dos bombas que permitieron la aireación del proceso, las bombas contaban con doble salida de aire que mediante un sistema de mangueras que bifurcaban al final de cada reactor, los extremos de las mangueras contenían difusores porosos que permitían una correcta y homogénea oxigenación en ambos reactores y mantenían una fase aerobia. Cada uno de los reactores, que denominaremos como reactor A y reactor B, fue empacado con una cantidad de 1 kg de carbón activado granular que sirvió como medio de soporte del lodo activado.

Se determinó que el volumen de intercambio de ambos reactores sería de 1.625 L. (Cantidad de efluente tratado a cambiar por efluente tratado). El proceso de intercambio de efluente tratado, se ocupó un sistema de mangueras conectado a dos bombas peristálticas que permitían su descarga para posteriormente poderlo volver a cargar con el volumen de intercambio descrito.

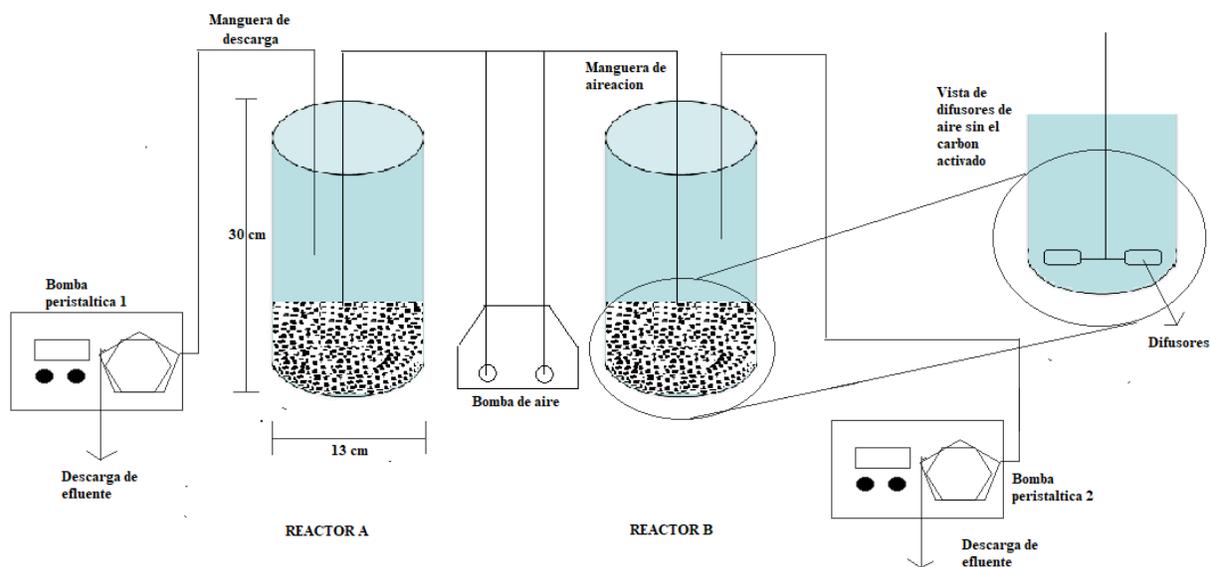


Figura 11.- Esquema de diseño de instalación de los reactores SBR empacado

3.2 Inoculación

Cada uno de los reactores (Reactor A y reactor B) fueron inoculados con una mezcla de lodos activados aerobios provenientes de una planta de tratamientos de aguas industriales. La concentración inicial de biomasa (SSV) en el reactor fue de 3620 mg L⁻¹.

El agua residual a tratar se utilizaron dos efluentes, uno proveniente de una planta de tratamientos de agua residuales industriales y otro procedente de una industria químico-farmacéutica.

Para el proceso de inoculación, tanto reactor A y reactor B fue dividido en tres partes, la primera parte contenía el empaque de carbón activado granular, la segunda parte fue integrada por el lodo activado (1 L) el restante del reactor fue conformado por los efluentes, permitiendo tratar 1.626 L de agua residual por cada reactor. (Ver Figura 12).

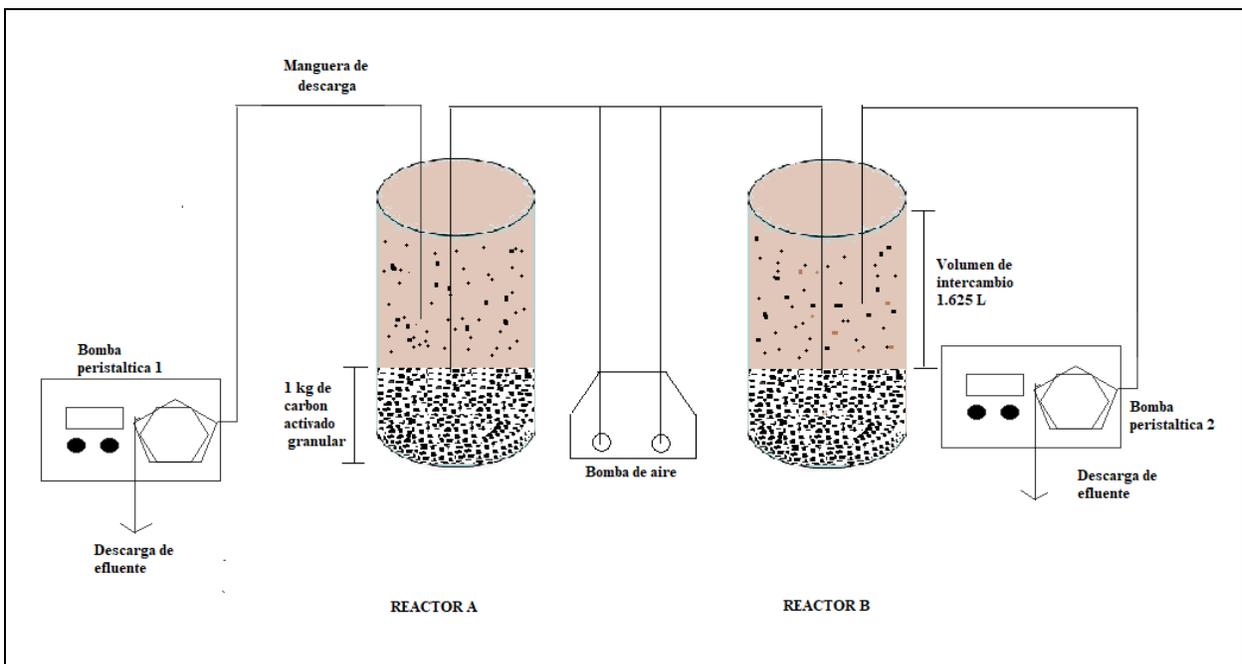


Figura 12.- Esquema del funcionamiento de los reactores SBR empacados con carbón activado granular.

3.3 Arranque de los reactores y aclimatación de la biomasa al efluente químico-farmacéutico.

La alimentación inicial del reactor para la aclimatación de la biomasa fue de una dilución 1/10 tanto en el reactor A como en el reactor B, es decir, por cada parte de efluente agregado se utilizaron 9 partes de agua. El volumen total de biomasa en aclimatación en los reactores era de 1 L. La cantidad restante de volumen en los reactores era conformada por el carbón activado granular (1 kg) y el efluente a intercambio. La oxigenación de cada uno de los reactores permaneció constante ya que el sistema era aerobio en su totalidad. En tanto a la forma de operación de los reactores fue el mismo, solo se diferenció por el tipo de efluente cargado a cada uno, el reactor A opero con el efluente proveniente de la planta de tratamientos de aguas industriales, y el reactor B opero con el efluente proveniente de la industria químico-farmacéutica.

3.4 Funcionamiento de los reactores A y B, a diferentes concentraciones de efluentes químico-farmacéuticos.

Una vez aclimatada la biomasa en los reactores A y B se procedió a modificar la concentración de cada uno de los efluentes de forma gradual. El criterio para determinar en que momento seria optimo poder modificar la concentración de los efluentes, fue la repetición de 3 ciclos de operación con eficiencias de remoción total constantes del 80% de contaminantes de los efluentes tratados, así como los periodos de retención reduciéndolo al menor tiempo posible. Las concentraciones tratadas son las mostradas en la Tabla 9.

Tabla 9. Relación de concentraciones aplicadas a los reactores A y B

Concentración	Volumen de intercambio en Litros	Volumen de efluente en litros	Volumen de agua en Litros
1/10	1.625	0.162	1.463
1/5		0.325	1.3
1/2		0.8125	0.8125
1/1		1.625	0

3.5. Métodos analíticos

Para efectuar el análisis de las muestras obtenidas en los reactores denominados A y B, se emplearon los métodos establecidos por las Normas Mexicanas (NMX) para la determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y de los Sólidos Suspendidos Totales (SST) como se explican en el Anexo 1.

Capítulo 4. Resultados

Se instalaron dos reactores con las especificaciones mencionadas anteriormente, empacados con carbón activado granular e inoculados con un lodo activado, se inició con la aclimatación de la biomasa, en donde los microorganismos se adaptaron a vivir en presencia de compuestos tóxicos, la aclimatación de microorganismos se llevó a cabo en condiciones aerobias.

La selección del efluente a tratar se debió a que este tipo de aguas contiene variedad de compuestos tóxicos difíciles de degradar, que hace difícil su tratamiento cuando son conducidos a la planta de tratamiento de aguas.

4.1 Temperatura

Se midió la temperatura con un termómetro de mercurio, la cual estuvo en el rango entre 24 a 26°C con la cual el rendimiento de las bacterias fue adecuado. Se sabe que en los procesos aerobios, las temperaturas menores a los 10°C se afectan seriamente la capacidad de oxidación del proceso. (Ward *et al.*, 2014).

4.2 Potencial de hidrógeno

El parámetro de potencial de hidrógeno se determinó utilizando un potenciómetro al termino de cada lote de operación, el cual se mantuvo entre 6.5 y 8.5 por su carácter aerobio, lo que permitió evitar un medio ácido y que influyera negativamente en el desarrollo biológico de la fauna bacteriana presentes en los lodos activados.

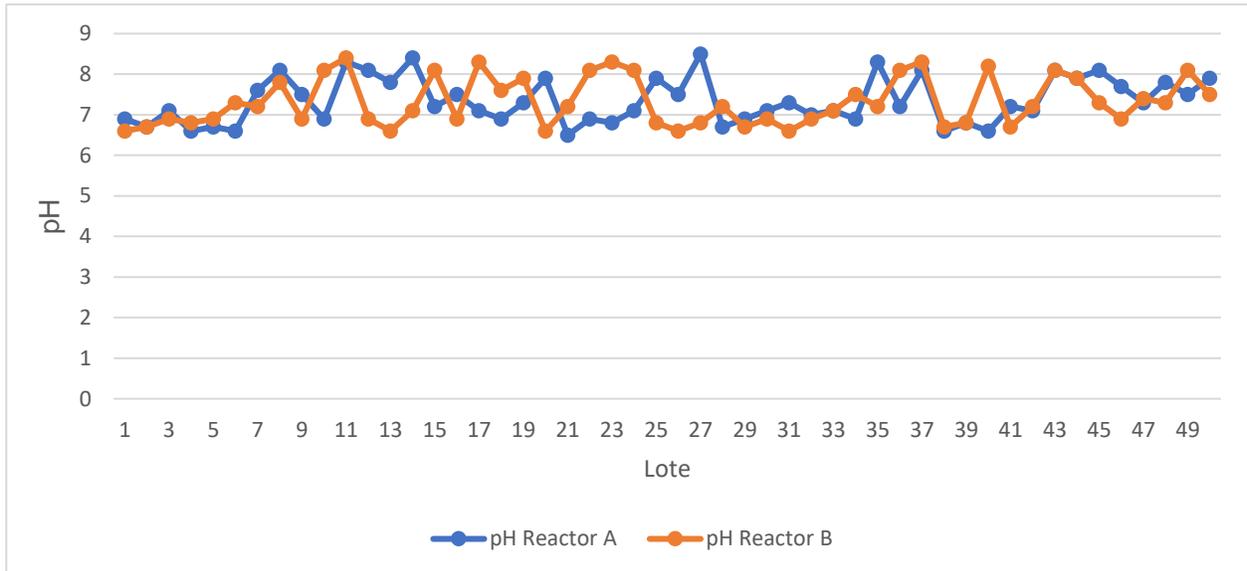


Figura 14. Mediciones de pH, Reactor A y Reactor B

4.3 Carga orgánica determinada como DQO

La DQO es probablemente el parámetro más utilizado para indicar el nivel de contaminación y el nivel de eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales producidas por los efluentes industriales, en este caso particular, los efluentes de la industria químico-farmacéutica.

Los sistemas anaerobios son capaces de soportar altas cargas orgánicas en comparación con los sistemas aerobios; sin embargo, a pesar de que los tratamientos anaerobios son más eficientes, los efluentes procedentes de los bioreactores anaerobios continúan teniendo un valor alto de DQO (presenta cerca del 60% de eficiencia) a un cuando más de la mitad de materia orgánica se remueve es necesario un tratamiento aerobio para remover el remanente. (Dos Santos, *et al.*, 2006).

Como se ha mencionado anteriormente, se emplearon dos reactores para el tratamiento de efluentes químicos-farmacéuticos, el reactor A que trato el efluente proveniente de la planta de tratamientos de aguas industriales y el reactor B trato el efluente proveniente de una industria químico-farmacéutica.

Los resultados obtenidos se detallan a continuación en los siguientes apartados.

4.3.1 Reactor A, efluente procedente de la planta de tratamientos de aguas industriales

En la Tabla 10 se muestran las condiciones de operación del reactor A.

Tabla 10. Resultados generales de Reactor A

Volumen de intercambio	1.625 L
Etapas de variación de dilución	4
Numero de ciclos	50
Eficiencia promedio	80 %
Número de días totales que duro el proceso	100 días

En la Tabla 11 se presenta un resumen de operación aplicando el parámetro de DQO como indicador de materia orgánica susceptible de ser removida.

Tabla 11. Resultados por grupo de lotes de reactor A

Grupo de lotes	Volumen de intercambio	Etapas de dilución	Numero de ciclos	Número de días totales de duración de lote	Eficiencia promedio
1-20	1.652 L	1/10	20	40	71 %
21-27		1/5	7	14	88 %
28-37		1/2	10	20	83 %
38-50		1/1	13	26	87 %

La evolución que se presentó durante la remoción de la DQO se muestra en la Figura 15 y en la Tabla 12 se muestra los resultados analíticos en la determinación de la DQO así como de las concentraciones que se aplicaron durante el tratamiento.

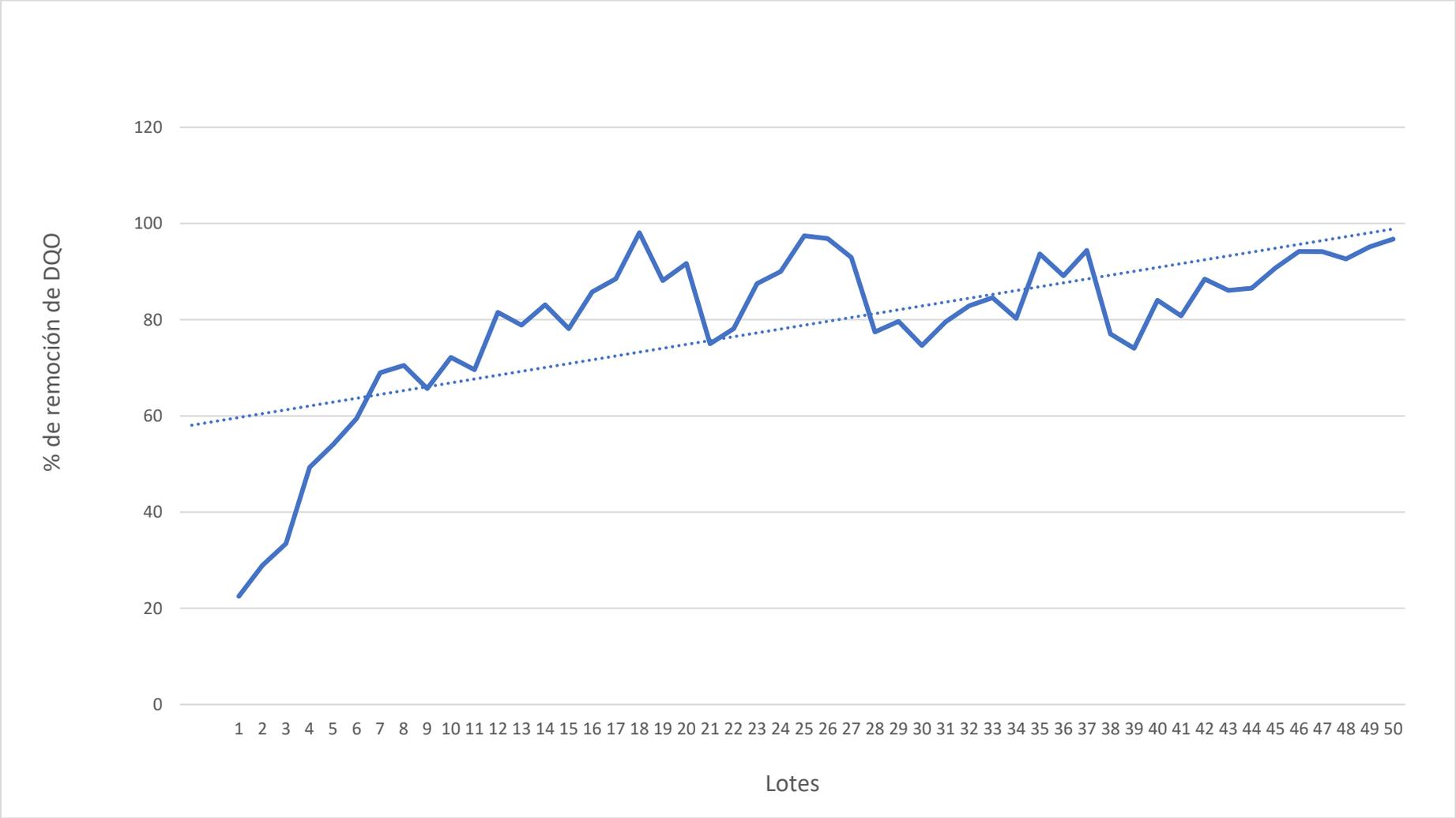


Figura 14. Porcentaje de remoción por ciclo Reactor A

Tabla 12.- Agua residual proveniente de PTAR industriales

Lote	Dilución	Ciclo tiempo de reacción	DQO Inicial	DQO Final	% Eficiencia de remoción
		Días	mg/L	mg/L	
1	1/10	2	0.106	0.082	22.5
2	1/10	2	0.110	0.078	28.9
3	1/10	2	0.104	0.069	33.4
4	1/10	2	0.121	0.061	49.3
5	1/10	2	0.103	0.047	54.0
6	1/10	2	0.112	0.045	59.5
7	1/10	2	0.108	0.033	69.0
8	1/10	2	0.134	0.039	70.5
9	1/10	2	0.118	0.040	65.7
10	1/10	2	0.124	0.034	72.2
11	1/10	2	0.130	0.039	69.6
12	1/10	2	0.106	0.019	81.5
13	1/10	2	0.121	0.025	78.9
14	1/10	2	0.104	0.017	83.1
15	1/10	2	0.126	0.027	78.1
16	1/10	2	0.131	0.018	85.8
17	1/10	2	0.101	0.011	88.5
18	1/10	2	0.120	0.002	98.1
19	1/10	2	0.115	0.013	88.2
20	1/10	2	0.128	0.010	91.7
21	1/5	2	0.178	0.044	75.0
22	1/5	2	0.181	0.039	78.2
23	1/5	2	0.173	0.021	87.5
24	1/5	2	0.197	0.019	90.0
25	1/5	2	0.185	0.004	97.5
26	1/5	2	0.183	0.005	96.9
27	1/5	2	0.179	0.012	92.9
28	1/2	2	0.211	0.047	77.5
29	1/2	2	0.209	0.042	79.6
30	1/2	2	0.203	0.051	74.6
31	1/2	2	0.213	0.043	79.6
32	1/2	2	0.214	0.036	82.9
33	1/2	2	0.205	0.031	84.6
34	1/2	2	0.206	0.040	80.3
35	1/2	2	0.201	0.012	93.7
36	1/2	2	0.217	0.023	89.1
37	1/2	2	0.209	0.011	94.4
38	Directo	2	0.281	0.064	77.0
39	Directo	2	0.291	0.075	74.1
40	Directo	2	0.286	0.045	84.1
41	Directo	2	0.279	0.053	80.8
42	Directo	2	0.283	0.032	88.5
43	Directo	2	0.299	0.041	86.1
44	Directo	2	0.295	0.039	86.6
45	Directo	2	0.278	0.025	90.8
46	Directo	2	0.287	0.016	94.2
47	Directo	2	0.285	0.016	94.2
48	Directo	2	0.293	0.021	92.6
49	Directo	2	0.301	0.014	95.1
50	Directo	2	0.298	0.009	96.8

4.3.2 Reactor B, efluente procedente de la industria químico-farmacéutica.

En la Tabla 13 se muestran las condiciones de operación del reactor B.

Tabla 13.- Resultados generales de Reactor B

Volumen de intercambio	1.625 L
Etapas de variación de dilución	4
Numero de ciclos	50
Eficiencia promedio	78 %
Número de días totales que duro el proceso	100 días

En la Tabla 14 se presenta un resumen de operación aplicando el parámetro de DQO como indicador de materia orgánica susceptible de ser removida.

Tabla 14.- Resultados por grupo de lotes de reactor B

Grupo de lotes	Volumen de intercambio	Etapas de dilución	Numero de ciclos	Número de días totales de duración de lote	Eficiencia promedio
1-19	1.652 L	1/10	20	40	74 %
20-28		1/5	7	14	80 %
29-40		½	10	20	80 %
41-50		1/1	13	26	84 %

La evolución que se presentó durante la remoción de la DQO en el reactor B se muestra en la Figura 16 y en la Tabla 15 se muestra los resultados analíticos en la determinación de la DQO así como de las concentraciones que se aplicaron durante el tratamiento.

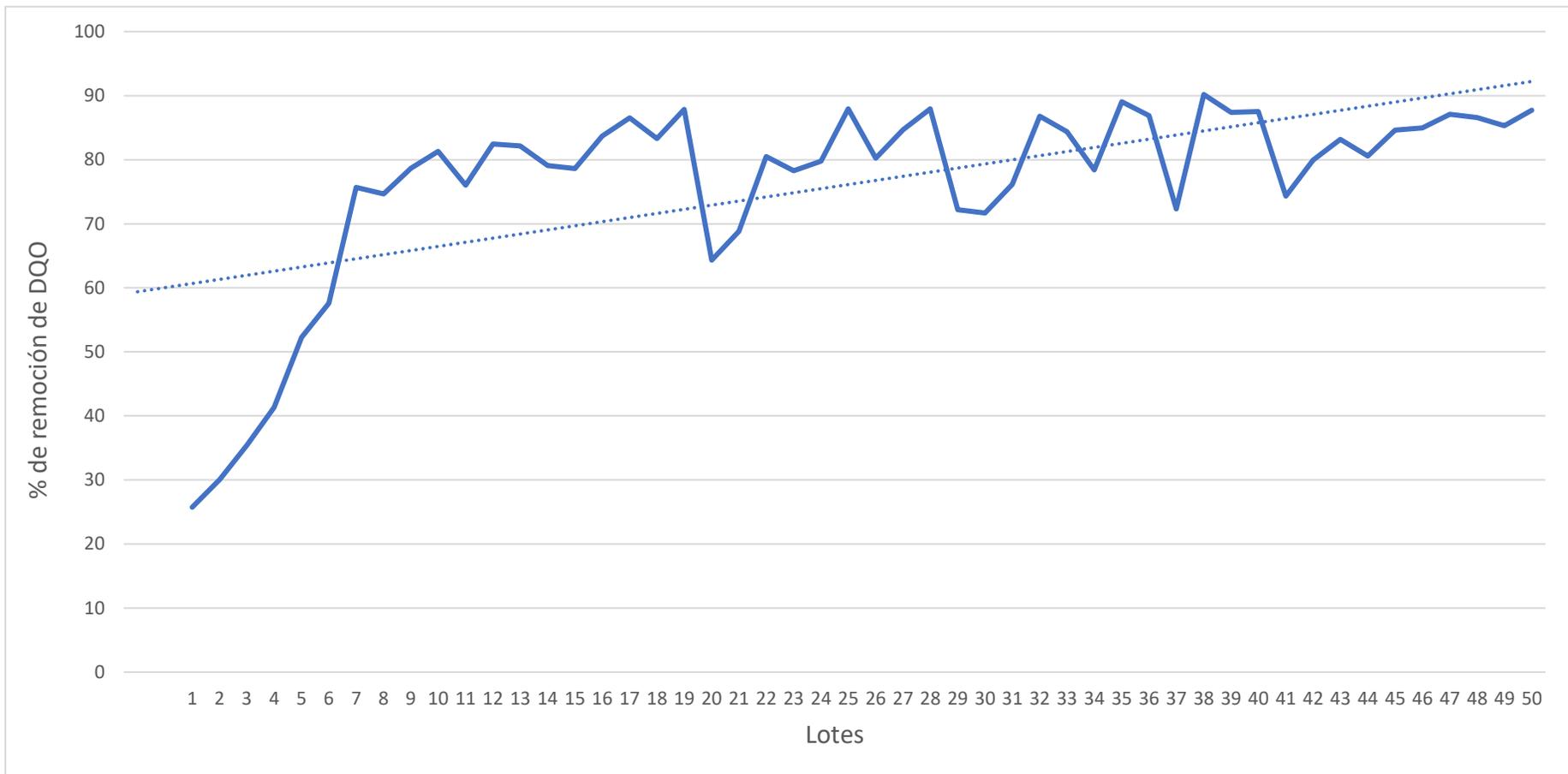


Figura 15. Porcentaje de remoción por ciclo Reactor B

Tabla 15. Agua residual proveniente de industria químico-farmacéutica

Lote	Dilución	Ciclo tiempo de reacción	DQO Inicial	DQO Final	% Eficiencia de remoción
		Días	mg/L	mg/L	
1	1/10	2	0.178	0.132	25.7
2	1/10	2	0.169	0.118	30.1
3	1/10	2	0.163	0.105	35.4
4	1/10	2	0.159	0.093	41.3
5	1/10	2	0.181	0.086	52.3
6	1/10	2	0.192	0.081	57.6
7	1/10	2	0.179	0.043	75.7
8	1/10	2	0.156	0.039	74.7
9	1/10	2	0.190	0.040	78.7
10	1/10	2	0.185	0.034	81.3
11	1/10	2	0.165	0.039	76.0
12	1/10	2	0.163	0.028	82.5
13	1/10	2	0.177	0.031	82.2
14	1/10	2	0.189	0.039	79.1
15	1/10	2	0.171	0.036	78.6
16	1/10	2	0.169	0.027	83.7
17	1/10	2	0.183	0.024	86.6
18	1/10	2	0.195	0.032	83.3
19	1/10	2	0.178	0.021	87.9
20	1/5	2	0.189	0.067	64.3
21	1/5	2	0.178	0.055	68.8
22	1/5	2	0.254	0.049	80.5
23	1/5	2	0.265	0.057	78.3
24	1/5	2	0.245	0.049	79.8
25	1/5	2	0.287	0.034	87.9
26	1/5	2	0.261	0.051	80.2
27	1/5	2	0.284	0.043	84.7
28	1/5	2	0.345	0.041	87.9
29	1/2	2	0.372	0.103	72.2
30	1/2	2	0.348	0.098	71.7
31	1/2	2	0.371	0.088	76.1
32	1/2	2	0.361	0.047	86.8
33	1/2	2	0.356	0.055	84.4
34	1/2	2	0.378	0.081	78.4
35	1/2	2	0.398	0.043	89.0
36	1/2	2	0.378	0.049	86.9
37	1/2	2	0.356	0.098	72.3
38	1/2	2	0.628	0.061	90.2
39	1/2	2	0.632	0.079	87.4
40	1/2	2	0.654	0.081	87.5
41	Directo	2	0.621	0.159	74.3
42	Directo	2	0.671	0.134	80.0
43	Directo	2	0.634	0.106	83.2
44	Directo	2	0.626	0.121	80.6
45	Directo	2	0.642	0.098	84.6
46	Directo	2	0.629	0.094	85.0
47	Directo	2	0.678	0.087	87.1
48	Directo	2	0.631	0.084	86.6
49	Directo	2	0.610	0.089	85.3
50	Directo	2	0.674	0.082	87.7

4 .3.3 Porcentaje de remoción por ciclo Reactor A vs Reactor B.

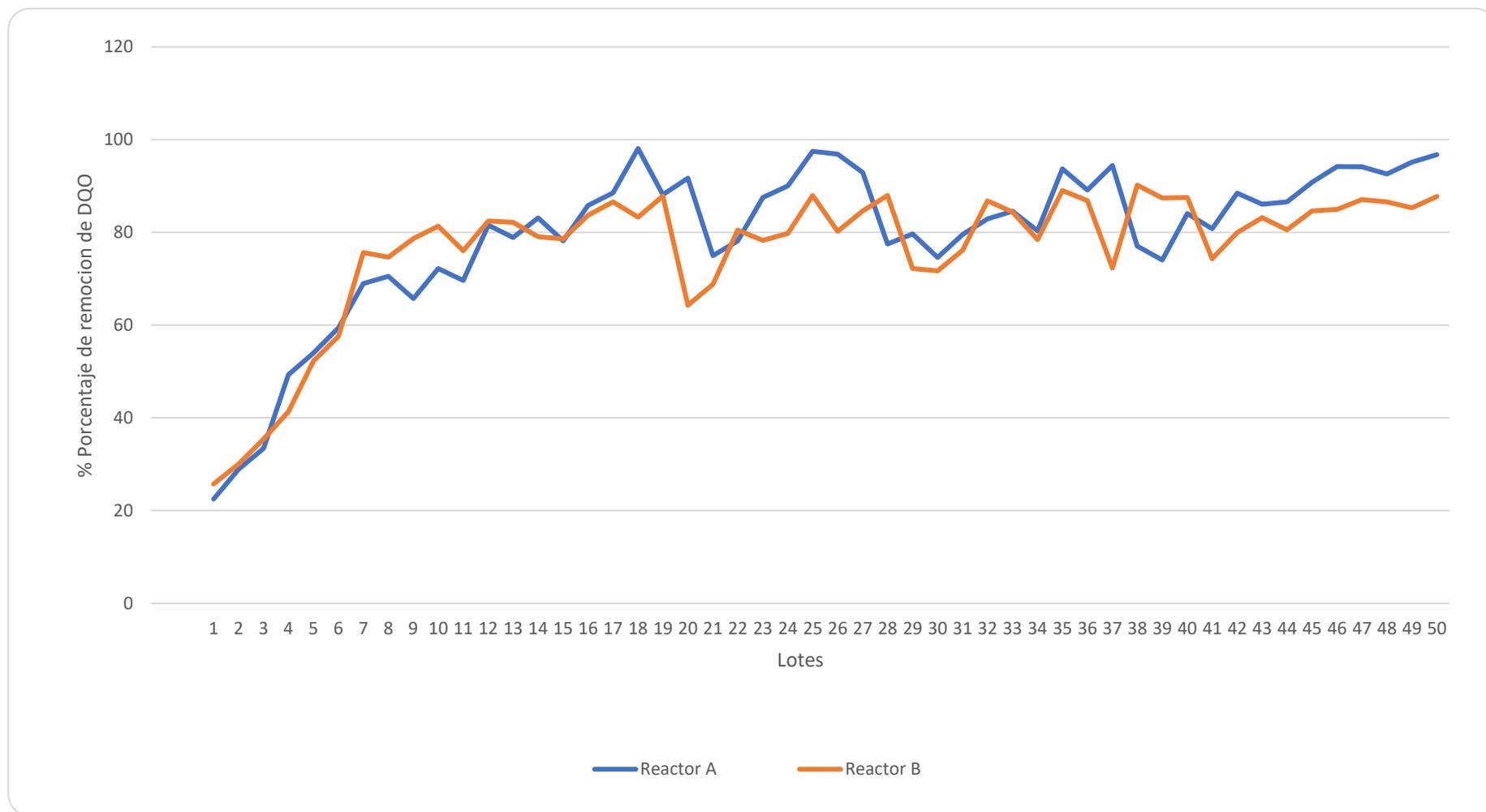


Figura 16. Porcentaje de remoción por ciclo de Reactor A vs Reactor B

Como podemos notar en la Figura 17, se observa que tanto el reactor A y el reactor B se aclimatizaron a un paso muy parecido teniendo como diferencia un lote de intercambio. El reactor A con un tiempo de aclimatación de 20 ciclos tuvo una eficiencia promedio de 71 %, en tanto el reactor B en un tiempo de 19 ciclos de aclimatación tubo una eficiencia promedio de 74 % por lo que el reactor B tuvo un mejor desempeño en esta etapa.

En el lote 21 del reactor A se aumenta la concentración de efluente de una dilución 1/10 a una dilución 1/5 con una ligera baja de eficiencia, en el lote 20 se tiene una eficiencia de 91.7 % a una eficiencia de 75 %, esto se atribuye al cambio de concentración del efluente, mas sin en cambio como los lodos ya estaban aclimatados al efluente se tiene una recuperación en los próximos lotes teniendo eficiencias mayores del 80 %. Esta baja de eficiencia la podemos notar también en el lote 28 cuando se aumenta nuevamente la concentración del efluente de una dilución de 1/5 a una dilución 1/2. Para el lote 38 teniendo 3 eficiencias mayores al 80% se hace el intercambio de efluente con la concentración directa, notamos nuevamente la disminución de la eficiencia del reactor en el lote siguiente (lote 39) para tener un aumento de eficiencia en los siguientes lotes y terminar los intercambios con eficiencias mayores al 95% de remoción de DQO en los últimos 2 lotes de intercambio.

Para el reactor B el aumento de concentración una vez aclimatado el lodo activado se da en el lote 20, la eficiencia de remoción de DQO baja de un 87.9% que se tuvo en el lote 19 a un 64.3%, atribuyendo el suceso al cambio de concentración del efluente. Podemos notar este mismo suceso en el lote 29 al cambio de dilución del efluente de 1/5 a 1/2. Para el lote 41 se hace el intercambio de efluente con la concentración directa, se nota una disminución en la eficiencia de remoción de DQO mas sin en cambio notamos que para los siguientes lotes la eficiencia promedio es del 84% , se nota que en los lotes finales de remoción de este reactor a comparación del reactor A no logra llegar e eficiencias mayores del 90 %.

Podemos deducir este hecho a que la concentración del efluente B (Proveniente de una industria Químico-farmacéutico) se componía en una mayor proporción de residuos antimicóticos y esto pudo provocar una alteración en la flora de microorganismos del reactor, más sin en cambio se mantuvo arriba del 80% teniendo una remoción de DQO favorable.

Hablando del efluente del reactor A, proveniente de una PTAR industrial, se puede deducir que este al pasar por un sistema de canal recolector, la composición del efluente consta de diversos tipos de aguas residuales, así como lixiviados de zonas municipales, se deduce que la concentración es más diversa en cuestión de químicos, así como de menor contenido antimicótico, al trabajar con lodos activados provenientes de estas aguas podría el haber favoreciendo la eficiencia de remoción de las mismas.

4.4 Determinación de la biomasa, comportamiento de los sólidos suspendidos totales

En el tema de la determinación de sólidos suspendidos totales se monitoreó al inicio de la operación de los reactores y al final de cada concentración para verificar el cumplimiento de la normatividad vigente. Los resultados obtenidos de los sólidos suspendidos totales en promedio son 23 mg/L. Revisando la normatividad vigente (NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales en aguas y bienes nacionales) nos dice que para la protección de vida acuática y uso público urbano el valor de SST no debe rebasar los 30 mg/L. Los resultados mostraron que el comportamiento de la biomasa se mantuvo constante así notando un comportamiento por debajo de lo indicado normativo. Esto nos sugiere que la dinámica poblacional entre células nuevas y la eliminación de las mismas por desprendimientos, se mantuvo equilibrada y que la cantidad fue suficiente para soportar los cambios bruscos de concentración de efluentes a tratar, demostrando la fiabilidad de estos sistemas de tratamiento.

Capítulo 5. Conclusiones

Fue posible tratar efluentes de aguas residuales procedentes de la industria químico-farmacéutica a través de un reactor discontinuo aerobio con lodos activados empacados con carbón activado granular, logrando una remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en un 80% en un periodo promedio de dos días.

Se utilizaron dos reactores denominados A y B con una capacidad de 3 L, el reactor A que trató el efluente proveniente de la planta de tratamientos de aguas industriales y el reactor B que trató el efluente proveniente de una industria químico-farmacéutica. El cual, conforme a los resultados obtenidos, se deduce que el reactor A, fue mejor y más adecuado para el efluente industrial con el 82% de remoción de DQO, el resultado de remoción del reactor B fue del 80% en el mismo periodo de tiempo.

Los reactores A y B operaron eficientemente durante 100 días, con eficiencias de remoción del 80 % en su mayoría una vez aclimatada la biomasa y a 4 diferentes fases de concentración.

La combinación de lodos activados y carbón activado granular demostró ser eficaz en la remoción de efluentes industriales químicos-farmacéuticos.

El carbón activado que fue empacado en el reactor A tanto en el reactor B fungió como medio móvil para que la biomasa pudiera adherirse al mismo y esta permanecer en el reactor, con esto podemos deducir que durante el proceso de operación de los reactores no se tuvo una generación de lodos manteniendo una concentración parecida a la del inicio el proceso ya que esta se mantuvo fija en el carbón activado.

Los efluentes de los reactores A y B cumplieron con lo que establece la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Capítulo 6. Bibliografía

Alvariño, C. R., 2006. Los residuos en la industria farmacéutica. *CENIC Ciencias Biológicas. Vol. 37 No.1*

Arundel John. 2000. Tratamiento de aguas negras y efluentes industriales. España Editorial Acribia S.A

APHA.1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Edition 20. APHA/ AWWA/WPCF. pag. 5-14

Barceló, D. y López, M. 2012. Contaminación en Función y Calidad Química del Agua: El Problema de los Contaminantes Emergentes. Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales-CSIC. Barcelona Pág. 16

Becerril, J. 2012. Optimización de Metodologías Analíticas Para la Determinación de Contaminantes Emergentes en Aguas de Abastecimiento y Residuales. Santiago de Compostela. Pág. I

Carbotecnia, 2014, Boletín técnico AR-001, Hoja 1 de 2.

CONAGUA, Comisión nacional del agua, 2010. Disponibilidad del agua en México

CONAGUA, Comisión nacional del agua, 2012. Agenda del agua 2030

CONAGUA, Comisión nacional del agua, 2016. El Agua en México.

CONAGUA, Comisión nacional del agua, 2017. Estadísticas del Agua en México

CONAGUA, Comisión nacional del agua, 2018. Estadísticas del Agua en México.

CONAGUA, Comisión nacional del agua, 2019. Usos del Agua.

CONAGUA, Comisión nacional del agua, 2020. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación.

CONAPO, 2015. Consejo Nacional de Población.

Condorchem Envitech 2021. Absorción en carbón activado para el tratamiento de aguas residuales. Barcelona España. <https://condorchem.com/es/>

Correia, Angelina, & Marcano, Lily. (2015). Presencia y eliminación de compuestos farmacéuticos en plantas de tratamientos de aguas residuales: Revisión a nivel mundial y perspectiva nacional. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 55(1), 1-18

Cortes Martínez, F., Betancourt Silva, F. & Medrano Chávez, J. F., 2010. Control inicial en la descarga de aguas residuales industriales y comerciales. *Conciencia Tecnológica*. No. 39, Enero-Junio 2010 Pág. 44

Crites Ron y Tchobanoglous George, 2000. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. McGraw-Hill Interamericana, S.A. Bogotá. Primera edición

Diaz-Baez, M., Espitia, S. y Molina, F. 2002. Digestión anaerobia una aproximación a la tecnología. Universidad Nacional de Colombia. Instituto de biotecnología. Primera edición

Dos Santos, A.B., Bisschops, I.A.E., Cervantes, F.J., 2006. *Advance Biological Treatment for industrial wastewater*. IWA Publishing, United Kingdom, pp. 298-320.

Elorriaga, Y., Marino, D., Carriquiriborde, P. y Ronco, A. 2012. Contaminantes Emergentes: Productos farmacéuticos en el medio ambiente. Asociación de Universidades Grupo Montevideo, VII Congreso de Medio Ambiente.

EPA. Agencia de protección de los estados unidos. 2016

Espigares García, M. y Perez Lopéz, JA 1985. Aspectos sanitarios del estudio de las aguas. Universidad de Granada. Servicio de publicaciones Granada 1995.

FCEA. Fondo de la Comunicación y la Educación Ambiental A.C, 2016.

Forero, J. E., Ortiz, O. P. & Rios, F., 2005. Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. *Ciencia, Tecnología y futuro*. 3(1), pp. 97-109.

Guzmán José Efraín, Renderos Vanessa, Guerrero Luis Alberto. 2005. Aspectos Importantes sobre Manejo Sanitario de Aguas Residuales. Unidad de atención al ambiente. Ministerio de salud pública y asistencia social-Salvador. Pág. 5

INEGI, Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2015. Modulo Ambiental de Agua Potable y Saneamiento.

Jiménez-Cisneros, Blanca. 2010. El Agua en México. Cauces y Encauses. Academia Mexicana de Ciencias. México, Primera edición.

López-Pacheco I., Silva-Núñez, A., Salinas-Salazar, C. Arévalo-Gallegos, A., Lizarazo-Holguin, L., Barceló, D., M.N. Iqbal Hafiz, Parra-Saldívar, R. 2019 *Anthropogenic Contaminants of High Concern: Existence in Water Resources and their Adverse Effects*. Science of the total environment 690,1068-1088. Pág. 1069

Manual de Depuración de Aguas Residuales Urbanas Z-2802/08, 2008. Monograficos agua en Centroamérica. Secretariado alianza por el agua/ecología y desarrollo. ARPIrelieve. Pág. 5

Mejía, M. E., Rosales, C. F., Rojas, G. J. A. & Molina, S. C., 2005. *Evaluación de la calidad del agua*, Ciudad de México.: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).

Méndez, V. Miyashiro, R. Rojas, M. Cotrado, N. Carrasco. 2004. Treatment of Residual Waters by Means of Activated Muds I. Revista del Instituto de Investigación, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Vol.7 N°.14, 74-83(2004) . Pág. 75

Moreno, G. B., 2006. *Higiene e inspección de carnes*. 1° ed. s.l.:Díaz de Santos

Muñoz Eugenio, Contreras López Alfonso, Molero Meneses Mariano, 2018. Ingeniería del medio ambiente, Universidad Nacional de Educación a Distancia. España

NMX (2012) NORMA MEXICANA NMX-AA-030-SCFI-2012, análisis de agua - medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. - método de prueba - parte 1 - método de refluo abierto.

NMX (2015) NORMA MEXICANA NMX-AA-034-SCFI-2015, Análisis de agua – Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

NOM (1996) NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Peña María Eugenia de la, Ducci Jorge, Zamora Plascencia Viridiana, 2013. Tratamiento de Aguas Residuales en México. Nota técnica IDB-TN-521. Sector de infraestructura y medio ambiente. Pág. 4

Petrovic, M., Hernando, Díaz - Cruz, S. y Barceló, D. 2005. Cromatografía Líquida, Espectrometría de Masas en Tándem para el Análisis de Residuos Farmacéuticos en Ambientales Ampollas. Una revisión de Journal of Chromatography 1067.

PNUMA, 2007. Programa Nacional de Unidades para el Medio Ambiente.

Programa Estatal Hídrico de Morelos 2014 – 2018, Publicado: 5207 Segunda Sección “Tierra y Libertad” Pag:48

REPDA, 2014. Registros Públicos de Derechos del Agua.

Rigola Lapeña Miguel, 1999. Tratamiento de Aguas Industriales, Aguas de Proceso y Residuales. Alfaomega Grupo editor. Colombia. Pág.142

Rodríguez, T., Botelho, D. & Cleto, E., 2009. Tratamiento de efluentes industriales de naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta.. *Fac. Ing. Univ. Antioquia Rev.fac.ing.univ. Antioquia* [online]. 2008, n.46, pp.24-38.

Rodríguez Fernández-Alba Antonio, Letón García Pedro, Rosal García Roberto, Dorado Quiroz Santiago, Menéndez Carlos, Izquierdo Elena. Nov, 2019 Tratamiento de Aguas y Aguas Residuales.

Rodríguez V. Jenny Alexandra. 2009. Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales. Universidad el valle. Cali, Colombia.

Ramalho R.S. 1996. Tratamiento de Aguas Residuales, Faculty of Science and Engineering. Editorial Reverte, S.A. Quebec, Canada.

OMS, 2016. Organización Mundial de la Salud.

Severiche Sierra Carlos Alberto, Castillo Bertel Marlon Enrique y Acevedo Barrio Rosa Leonor. 2013. Manual de Métodos Analíticos para la Determinación de Parámetros Fisicoquímicos Básicos en Aguas. Pág. 47

SEMARNAT,Secretaria de Medio ambiente y Recursos Naturales, 2014. Informe del Medio Ambiente. *SEMARNAT.gob.mx*.

SEMARNAT, Secretaria de Medio ambiente y Recursos Naturales, ,2015.*SEMARNAT.gob.mx*.

SEMARNAT, Secretaria de Medio ambiente y Recursos Naturales,2018. Informe del Medio Ambiente. *SEMARNAT.gob.mx*.

Tamal, M., Sudakshina, M., Dalia, D. & Siddhartha, D., 2010. Advanced oxidation process and biotreatment: Their roles in combined. *Desalination*, Issue 250.

Troconis Alejandra. Belzona Inc, 2010. Tratamiento de Aguas Residuales.Primera edición. Pág.19

UNESCO, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. 2017

Varila Quiroga Julián Andrés, Díaz López Fabio Eduardo. DIC 2008 Tratamiento de Aguas Residuales Mediante Lodos Activados a Escala Laboratorio, Revista de Tecnología, Vol. 7. N°. 2Jul-Dic 2008.ISSN1692. Pág. 21-28

Ward H.C., Moulden Y.Y., Olmo J. S (2014) 100th anniversary of the activated sludge process 1914- 2014. *Environmental Engineering and Science*.50,18.

ANEXOS

A. Métodos analíticos

A1. Demanda química de oxígeno (DQO)

Los productos químicos empleados en este método son grado reactivo.

Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4)

Dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)

Sulfato mercúrico (HgSO_4)

Sulfato de plata (Ag_2SO_4)

Biftalato de potasio patrón primario ($\text{HOOC}_6\text{H}_4\text{COOK}$)

Sulfato ferroso amoniacal hexahidratado ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

1,10 fenantrolina ($\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2$)

Sulfato ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

- Disolución estándar de biftalato de potasio (1 mL = 1 mg de DQO).

Deshacer los grumos y secar el biftalato de potasio a 120°C . Pesar aproximadamente y con precisión 0,851 g de biftalato de potasio, disolver en agua y aforar a 1 L. Es estable hasta por 3 meses cuando se mantiene en refrigeración y si no se observa crecimiento biológico.

- Disolución de sulfato de plata en ácido sulfúrico.

Pesar aproximadamente y con precisión 15 g de sulfato de plata y disolver en 1 L de ácido sulfúrico concentrado. El sulfato de plata requiere un tiempo aproximado de dos días para su completa disolución. La disolución formada debe mantenerse en la obscuridad para evitar su descomposición.

- Disolución de digestión A (alta concentración).

Pesar aproximadamente y con precisión 10,216 g de dicromato de potasio, previamente secado a 103°C por 2 h, y añadirlos a 500 mL de agua adicionar 167 mL de ácido sulfúrico

concentrado y aproximadamente 33,3 g de sulfato mercúrico. Disolver y enfriar a temperatura ambiente. Aforar a 1 L con agua.

- Disolución de digestión B (baja concentración).

Pesar aproximadamente y con precisión 1,021 6 g de dicromato de potasio, previamente secado a 103°C por 2 h, y añadirlos a 500 mL de agua. Adicionar 167 mL de ácido sulfúrico concentrado y 33,3 g de sulfato mercúrico. Disolver y enfriar a temperatura ambiente. Aforar a 1 L con agua.

- Disolución estándar de dicromato de potasio (para concentraciones altas).

Pesar aproximadamente y con precisión 12,259 g de dicromato de potasio previamente secado durante 2 h a 105°C ± 1°C, disolver y aforar a 1 L con agua y homogeneizar.

- Disolución estándar de dicromato de potasio (para concentraciones bajas).

Pesar aproximadamente y con precisión 12,259 g de dicromato de potasio previamente secado durante 2 h a 105°C ± 1°C, disolver y aforar a 1L con agua y homogeneizar.

- Disolución de ácido sulfúrico-sulfato de plata.

Disolver cristales o polvo de sulfato de plata, en ácido sulfúrico concentrado en una relación 5,5 g Ag₂SO₄ /Kg H₂SO₄. Se requieren de 1 a 2 días para que se disuelva completamente el sulfato de plata.

- Disolución indicadora de 1,10-fenantrolina.

Pesar aproximadamente y con precisión 1,485 g de 1,10-fenantrolina y aproximadamente 0,695 g de sulfato ferroso heptahidratado, diluir y aforar a 100 mL con agua y homogeneizar.

- Disolución estándar de biftalato de potasio (500 mg O₂/mL)

Pesar aproximadamente y con precisión 0,425 g de biftalato de potasio patrón primario previamente secado a 120°C durante 2 h, disolver y aforar a 1 L con agua. El biftalato tiene una DQO teórica de 1,176 mg O₂/mg de Biftalato, por lo que la DQO teórica de esta disolución es de 500 mg O₂/mL. Esta disolución es estable hasta por 3 meses si se mantiene en refrigeración y en ausencia de crecimiento biológico visible.

Material y Equipo

- Placa de calentamiento con horadaciones para los tubos de reacción de DQO que alcance una temperatura de 150° C ± 2 °C. (Digester)
- Espectrofotómetro. Disponible para utilizarse de 190 nm a 900 nm y equipado con celdas de 1 cm de paso óptico de luz o tubos de 16 mm x 100 mm de calidad espectro.
- Tubos para digestión, 16 mm x 100 mm con tapa.
- Equipo de destilación con parrilla de calentamiento que asegure la ebullición del contenido del matraz de reflujo y condensadores tipo Friedrich, con mangueras.
- Bureta

Recolección, preservación y almacenamiento de muestras

Inmediatamente después de su toma, la muestra debe analizarse. De lo contrario se debe conservar en refrigeración a 4°C y se debe adicionar ácido sulfúrico hasta pH < 2. El tiempo de almacenamiento máximo previo al análisis es de 28 días.

Procedimiento

Método espectrofotométrico

1. Precalear a 150° C el digester de DQO.
2. Colocar en los tubos de reacción 1,5 mL de la disolución de digestión A o B.
3. Tomar cuidadosamente 2,5 mL de muestra previamente homogeneizada dentro de los tubos de reacción. Cerrar inmediatamente para evitar que se escapen los

vapores, asegurarse de que están herméticamente cerrados. Suavemente invertir los tubos varias veces destapando después de cada inversión para liberar la presión.

4. Nota: La disolución es fuertemente ácida y el tubo se calienta en este proceso, trabajar con guantes aislantes.
5. Añadir cuidadosamente 3,5 mL de la disolución de digestión respectiva.
6. Colocar 2,5 mL de agua en un tubo para la determinación del blanco de reactivos.
7. Colocar todos los tubos en el digestor previamente calentado a 150°C y reflujar por 2 h.
8. Retirar los tubos del digestor y dejar que los tubos se enfríen a temperatura ambiente, permitiendo que cualquier precipitado se sedimente.
9. Medir la absorbancia en el espectrofotómetro, previamente calibrado o cuantificar por titulación.
10. Para aguas que contengan una DQO baja (5 mg/L a 75 mg/L), utilizar la disolución de digestión B.
11. Si el valor de la DQO determinado es más alto que 75 mg/L después de usar estos reactivos, reanalizar la muestra, utilizando la disolución A.

A2. Sólidos suspendidos totales (SST)

Para la obtención de resultados de sólidos suspendidos totales se realizó la siguiente técnica establecida en la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015, medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

Equipo

- ✓ Horno de secado capaz de mantener una temperatura de $105\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$
- ✓ Balanza analítica calibrada, con una resolución de 0,1 mg
- ✓ Mufla eléctrica capaz de mantener una temperatura de $550\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$.
- ✓ Equipo de filtración al vacío
- ✓ Parrilla de calentamiento.

Materiales

- ✓ Cápsulas de evaporación (porcelana, níquel o platino), del tamaño acorde al volumen de la muestra. -Desecador, provisto con un desecante o con control de humedad.
- ✓ Filtro de fibra de vidrio. Los filtros deberán ser circulares, con una porosidad de 1,5 μm y del diámetro correspondiente para adaptarse perfectamente en el dispositivo de filtrado.
- ✓ Soporte de secado: charola de aluminio o Crisol Gooch.
- ✓ Dispositivo de filtración o Crisol Gooch, El crisol Gooch o dispositivo de filtración debe tener suficiente permeabilidad para permitir que el agua pase libremente.
- ✓ Pinzas para cápsula y/o crisol.
- ✓ Probeta

Reactivos y patrones

Los productos químicos empleados en este método deben ser grado reactivo.

La disolución control debe contener los elementos siguientes: Cloruro de sodio (NaCl), carbonato de calcio (CaCO_3), celulosa microcristalina ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$), tierra de diatomáceas y caolín o almidón. Agregar la cantidad necesaria de cloruro de sodio, previamente secado a $105\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ por 2 horas, carbonato de calcio, celulosa microcristalina, tierra de diatomáceas y almidón o caolín, de acuerdo a la concentración deseada de sólidos en las muestras de control, agregar agua y llevar al aforo de 1 000 mL. Esta disolución tiene una vida útil de máximo doce meses.

Recolección, preservación y almacenamiento de muestras

El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 7 días y almacenarlas a una temperatura de $4\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$. Es conveniente que para muestras provenientes de reactores biológicos el análisis se realice dentro de las 24 h posteriores a la toma de muestra para minimizar la interferencia por generación de biomasa. Al menos recolectar un mínimo de 600 mL de muestra en envases de plástico o vidrio y taparse inmediatamente después de la recolecta. Pueden utilizarse muestras compuestas o

simples. Evitar llenar los recipientes completamente (hasta el borde) para permitir eficientemente la homogenización por medio de la agitación.

Procedimiento

Preparación de capsulas

1. Introducir las cápsulas al horno a una temperatura de $105\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, 20 min como mínimo. Únicamente en el caso de la medición de sólidos volátiles, las cápsulas posteriormente se introducen a la mufla a una temperatura de $550\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$, durante 20 min como mínimo. Después de este tiempo transferirlas al horno.
2. Trasladar la cápsula al desecador y dejar enfriar por 20 min como mínimo. El manejo de la cápsula durante el análisis, debe realizarse en todo momento con las pinzas.
3. Pesar las cápsulas y repetir el ciclo horno-desecador hasta obtener una diferencia $\leq 0,0005\text{ g}$ en dos pesadas consecutivas. Registrar como m_1 considerando para los cálculos el último valor de la masa.
4. Pesar las cápsulas y repetir el ciclo horno-desecador hasta obtener una diferencia $\leq 0,0005\text{ g}$ en dos pesadas consecutivas. Registrar como m_1 considerando para los cálculos el último valor de la masa.

Preparación de dispositivo de filtración y/o soportes de secado.

- 1) Utilizar filtro de fibra de vidrio que adapte al dispositivo de filtración y/o secado y/o charola de aluminio, con la ayuda de unas pinzas colocarlo con la cara rugosa hacia arriba en el dispositivo de secado y/o filtración. Mojar el filtro con agua para asegurar que se adhiera perfectamente, solo en caso de utilizar crisol Gooch.
- 2) El soporte de secado con el filtro se introduce al horno a $105\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ durante 20 min como mínimo, después de este tiempo transferirlo a un desecador.
- 3) Pesar el dispositivo de filtración y/o soportes de secado y repetir el ciclo horno-desecador hasta obtener una diferencia $\leq 0,0005\text{ g}$ en dos pesadas consecutivas. Registrar como m_2 , considerando para los cálculos el último valor de la masa.

Preparación de la muestra

Las muestras deben estar a temperatura ambiente al realizar el análisis. Agitar las muestras para asegurar la homogeneización.

a) Medición de sólidos totales (ST)

- 1) Se recomienda seleccionar el volumen de muestra de tal manera que el residuo seco sobre la cápsula se encuentre en un intervalo de masa de 2,5 mg a 200 mg.
- 2) Transferir la muestra a la cápsula previamente puesta a masa constante y evaporar a sequedad en el horno de secado a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 3) En caso de utilizar placa de calentamiento llevar a casi sequedad sin llegar a ebullición de la muestra y posteriormente pasar al horno de secado a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ para su secado total por una hora.
- 4) Trasladar la cápsula al desecador y dejar enfriar por 20 min como mínimo. Llevar la cápsula a masa constante repitiendo el ciclo horno-desecador, hasta obtener una diferencia $\leq 0,0005\text{ g}$ en dos pesadas consecutivas. Registrar como m_3 , la última masa obtenida.

b) Medición de sólidos totales volátiles

- 1) Introducir la cápsula conteniendo el residuo a la mufla a $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 15 min a 20 min, transferir la cápsula al horno a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 20 min como mínimo. Trasladar la cápsula s y registre el valor como m_4 .

c) Sólidos disueltos totales

- 1) En la cápsula llevada previamente a masa constante m_1 , filtrar una alícuota de la muestra a través de un filtro de fibra de vidrio en el crisol o dispositivo de filtrado. Verter la alícuota en una cápsula preparada y evaporar a sequedad en el horno de secado a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ o evaporar casi a sequedad sin llegar a ebullición de la muestra, en una parrilla de calentamiento.
- 2) Introducir al horno a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ la cápsula con la muestra, durante al menos 1 h. Pasar la cápsula al desecador para llevar a masa constante. Registrar como m_5 . Si al cabo de 1 h aún se observa humedad o líquido en la cápsula, continuar secando en el horno

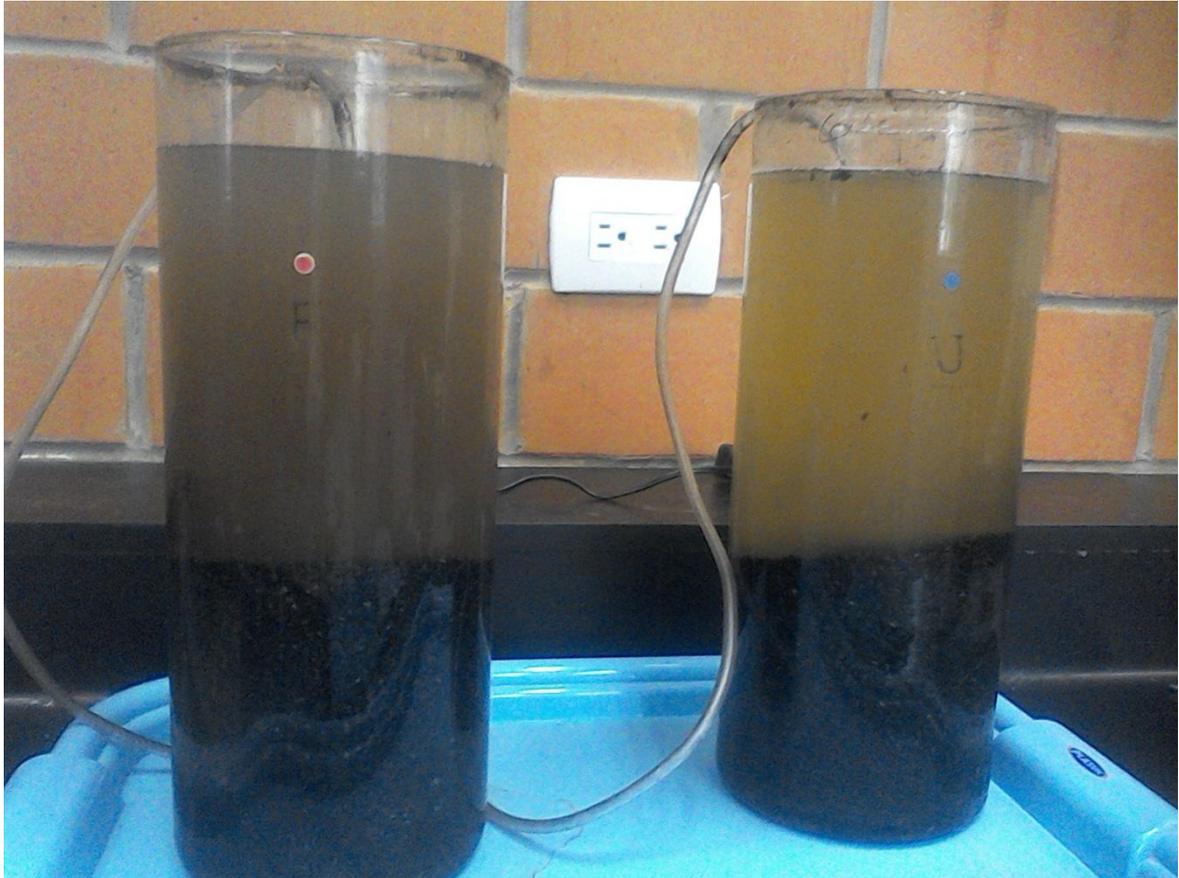
D) Medición de sólidos suspendidos totales (SST)

- 1) Homogeneizar la muestra mediante agitación vigorosa del envase, transferir de forma inmediata y en un solo paso un volumen adecuado de muestra a una probeta.
- 2) Filtrar la muestra a través del filtro colocado en el crisol Gooch o a través del filtro que es tomado de la charola de aluminio y colocado en el equipo de filtración con ayuda de unas pinzas.
- 3) Enjuagar la probeta con el volumen suficiente para arrastrar los sólidos y verter en el filtro. Algunos tipos de agua contienen materiales que bloquean los poros del filtro o reducen su diámetro. Esto incrementa el tiempo de filtrado y los resultados se relacionan en función del volumen de la muestra. Si se observa tal bloqueo del filtro, deberá repetirse la medición con menor volumen. Los resultados deberán interpretarse considerando lo anterior.
- 4) Introducir el soporte de secado con el filtro al horno a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 1 h como mínimo, en caso de usar un soporte de secado diferente al crisol Gooch retirar con cuidado el filtro del equipo de filtrado usando pinzas. Posteriormente llevar a masa constante y registrar como m_6 la masa obtenida.

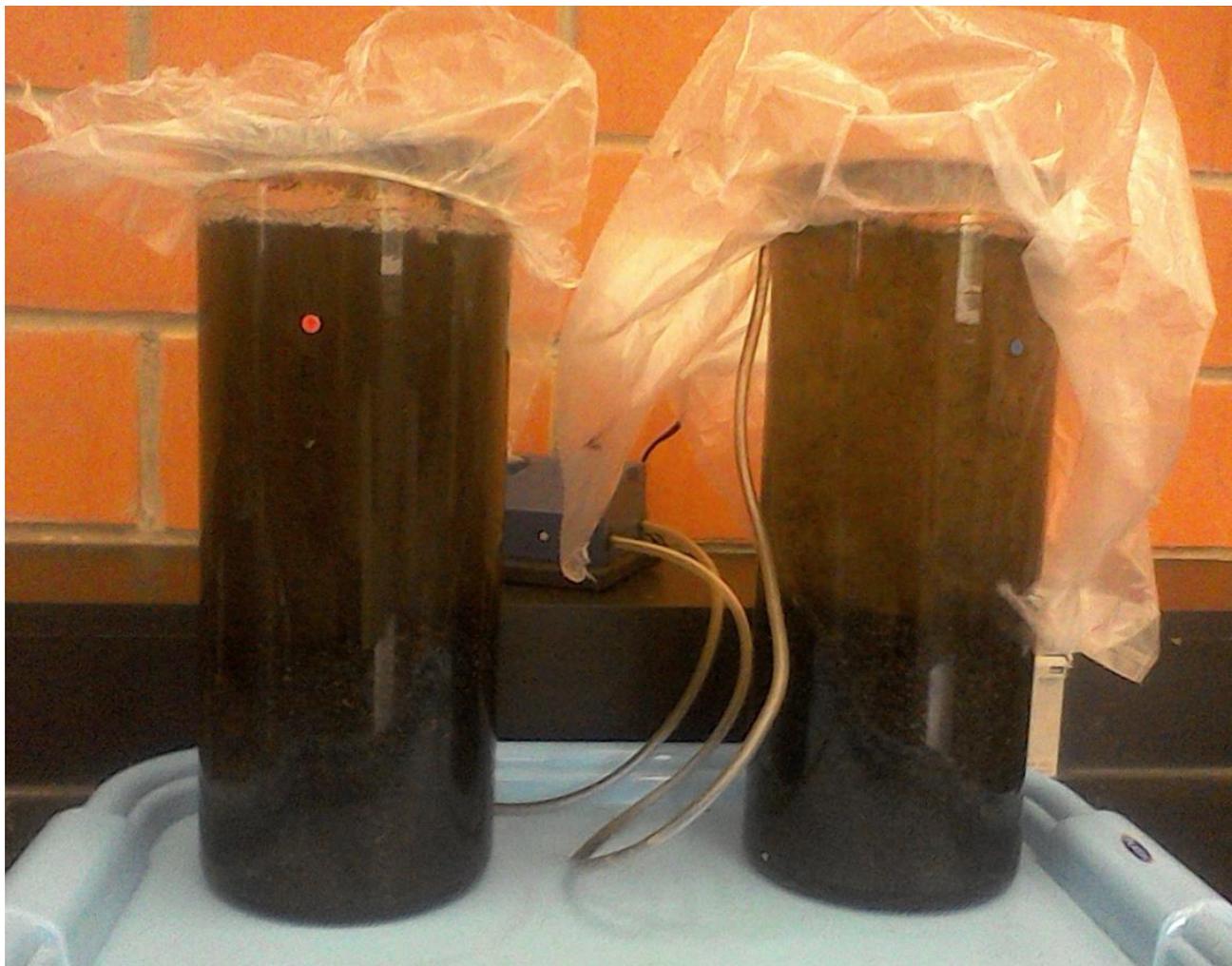
F) Medición de sólidos suspendidos volátiles (SSV)

- 1) Introducir el soporte de secado con el filtro que contiene el residuo m_6 a la mufla a una temperatura de $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 15 min a 20 min.
- 2) Trasladar el soporte de secado con el filtro al horno a una temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 20 min como mínimo.
- 3) Transferir el soporte de secado con el filtro al desecador y llevar a masa constante. Registrar como m_7

A3. Imágenes de operación de los reactores A y B



A3.1 Visualización de los reactores A (Izquierda) y B (Derecha) antes de iniciar un ciclo de operación tras un intercambio de lotes de efluentes.



A3.2 Visualización del inicio de operación de los reactores.

(Izquierda) Reactor A con efluente proveniente de una PTAR industriales.

(Derecha) Reactor B con efluente proveniente de una industria químico-farmacéutica.

Nota: Se improvisó una cubierta plástica con orificios pequeños para evitar salpicación de pequeñas gotas de agua residual al exterior de los reactores debido a la inyección de aire en el fondo del reactor



A3.3 Visualización de la operación de los reactores A y B tras cerca de 40 horas de remoción de DQO. Se puede apreciar que el reactor A (lado izquierdo) una mejor clarificación del agua residual debido a un mejor desempeño de remoción de DQO debido a eficiencias mejores de remoción en comparación del reactor B (lado derecho).



A3.4 Otra perspectiva de operación de los reactores A y B. (Lado izquierdo al fondo) Reactor B, (Lado derecho) reactor A.



A3.5 Visualización del reactor A en operación



A3.6 Visualización del reactor A al termino de operación.