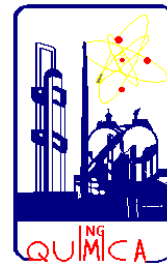




Benemérita Universidad Autónoma de Puebla



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**Tesis para obtener el grado de Licenciatura en ingeniería
química**

**APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ANÁLISIS DE AGUA
DQO ALTERNATIVO DE LA NORMA OFICIAL
MÉXICANA.**

Presenta:

Fausto Omar Pineda Toscano

Director de Tesis:

Dr. Edgar Ayala Herrera

Puebla, Pue. Febrero 2022



BUAP

Oficio No. FIQ/AC/094/2022
Asunto: Registro de Tema de Tesis

C. FAUSTO OMAR PINEDA TOSCANO
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA QUÍMICA
P R E S E N T E:

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la Licenciatura en Ingeniería Química cuyo título es el siguiente:

“APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ANÁLISIS DE AGUA DQO ALTERNATIVO DE LA NORMA OFICIAL MÉXICANA”

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Director de Tesis: Dr. Edgar Ayala Herrera.

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **UNICAMENTE POR UN AÑO**.

Atentamente
"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"
H. Puebla de Z., a 10 de marzo de 2022

Dra. Valeria Jordana González Coronel
Secretaria Académica



C.c.p. Director de Tesis: Dr. Edgar Ayala Herrera.
C.c.p. Archivo.

Facultad
de Ingeniería
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San
Manuel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C. P. 72590
01 (222) 229 55 00
Exts. 7250 y 7251

AUTORIZACION DE IMPRESIÓN

AGRADECIMIENTOS

En agradecimiento a mi familia, amigos y a todas las personas que me brindaron su apoyo en cuanto pudieron, para lograr convertirme en profesional.

Al profesor Dr. Edgar Ayala Herrera, por aportar su gran apoyo como asesor de tesis y a todos los profesores que aportaron su orientación, experiencia y disponibilidad para lograr mis metas y objetivos.

INDICE

INTRODUCCIÓN	8
1.- Marco teórico.....	9
1.1.- Generalidades.....	9
1.1.1 Impacto Ambiental.....	10
1.1.3.- Normatividad	13
1.2.- Demanda Química de Oxígeno	14
1.3.- Precisión.....	16
1.3.1.- Desviación estándar	17
1.3.2.- Coeficiente de variación	18
1.4.- La toxicidad de los residuos.....	18
1.4.1.- La Toxicidad del Cromo	19
1.4.2.- La Toxicidad de la Plata	19
1.4.3.- La Toxicidad del Mercurio	20
1.5.- Tratamiento de residuos	21
2.- Metodología y experimentación.....	22
2.1.- Objetivo.....	22
2.2.- Fundamento	23
2.3.- Método experimental	24
2.4.- Cálculo de Precisión	28
2.4.1.- Programación en Excel.....	28
2.5.- Construcción de los biorreactores biológicos de prueba.....	28
2.5.1.- Descripción de sistema de pruebas.....	28
2.5.2.- Diseño de biorreactores anaerobio-anóxico-aerobio	29
2.6.- Proceso de depuración llevado a cabo en biorreactores a escala laboratorio.	32
2.7.- Agua residual preparada sintéticamente	34
2.8.- Seguimiento del proceso de depuración	35
2.9.- Elaboración del biorreactor anaerobio-anóxico-aerobio.....	36

2.10.- Operación de los biorreactores anaerobio-anóxico-aerobio a escala laboratorio.	37
3.- Resultados.....	39
3.1- Proceso de adaptación de los lodos activados para la remoción de nutrientes, sin recirculación del agua residual	39
3.1.1.- Demanda Química de Oxígeno.	39
.....	41
3.2.- Proceso de estabilización de los lodos, recirculación en etapa aerobia hacia anóxica.....	42
3.1.2.- Comentarios	44
4.- Conclusiones.....	45
5.- Bibliografía	47

Lista de Figuras

Figura 1. Viales para determinación de DQO	24
Figura 2. Calentador para Tubos de Ensayo DQO	26
Figura 3. Micropipetas volumétricas usada en proceso de titulación	27
Figura 4. Dimensiones del sistema anaerobio-anóxico-aerobio	29
Figura 5 Descripción del biorreactor anaerobio.....	30
Figura 6. Identificación de Partes del reactor anaerobio tipo RAFA	31
Figura 7. Funcionamiento del reactor anaerobio tipo RAFA.....	32
Figura 8. Identificación de partes del reactor aerobio.....	33
Figura 9. Identificación del proceso de depuración llevados a cabo en cada biorreactor	35

Lista de imágenes

Imagen 1. Construcción del reactor anaerobio-anóxico-aerobio.	36
Imagen 2. Reactor anaerobio-anóxico-aerobio	36
Imagen 3. Operación del reactor anaerobio tipo RAFA a escala laboratorio.....	37
Imagen 4. Operación del reactor aerobio a escala laboratorio	38
Imagen 5. Operación del reactor anaerobio-anóxico-aerobio a escala laboratorio	38
Imagen 6. Reactor anaerobio-anóxico-aerobio a escala laboratorio	38

Lista de Tablas

Tabla 1. Volumen utilizado en muestras	25
Tabla 2. Composición del agua residual preparada sintéticamente	34
Tabla 3.- Valores de DQO a través del tiempo, etapa de adaptación	40
Tabla 4.- Valores de DQO a través del tiempo, etapa de estabilización	44

Lista de Gráficos

Gráfico 1.- Remoción de DQO en el sistema anaerobio-anóxico-aerobio durante el proceso de adaptación..	41
Gráfico 2.- Porcentajes de DQO removido durante el proceso, etapa de adaptación.....	41
Gráfico 3.- Remoción de DQO en el sistema anaerobio-anóxico-aerobio durante el proceso de estabilización.	42
Gráfico 4.- Porcentajes de DQO removido durante el proceso, etapa de estabilización.....	43

INTRODUCCIÓN

El agua es, sin lugar a duda, un recurso indispensable para la vida, por ende, es de los más importantes, sin embargo, es de los más contaminados por el ser humano. Existen diferentes formas de contaminación, entre ellas encontramos, los desechos químicos, los residuos sólidos, la actividad minera cerca de cuerpos hídricos, actividad agrícola y pecuaria usando pesticidas, herbicidas, y desechos de animales. Contaminantes que solo parecen ir en aumento con el pasar de los años.

Debido a esta situación los temas relacionados con el tratamiento de aguas contaminadas resultan de suma importancia para el gobierno de cada país, es por esto que existen diversas normas que se centran en las aguas residuales, sobre su tratamiento y sobre su análisis, en México existe la NMX-AA-030/1-SCFI-2012 que precisamente habla de este último, donde se menciona el uso de la prueba Demanda Química de Oxígeno, prueba que de manera irónica genera residuos peligrosos que de deponerse de manera incorrecta, no solo contribuye a la contaminación de agua, si no que, también presenta un riesgo a la salud por las propiedades de los residuos.

Es por esta razón que vale la pena examinar a detalle la prueba DQO para poder optimizarla de la mejor manera posible reduciendo la cantidad de contaminantes que genera.

En esta investigación se trabajó en un método de determinación de la demanda química de oxígeno DQO a pequeña escala, para validar el método se realizaron mediciones en un sistema de tratamiento de aguas residuales combinado, anaerobio-anóxico-aerobio, se alcanzó el estado estacionario y se hicieron determinaciones de análisis del agua en cada etapa del tratamiento. El agua de alimentación al biorreactor se preparó sintéticamente con los contaminantes que nos representan un agua residual industrial como son nitrógeno, fósforo y compuestos orgánicos de cadenas largas.

El método de análisis de DQO se basó en el método de la norma con diferencia en las cantidades de reactivos que en nuestra investigación se redujo en un 95%. Se utilizó el equipo y material de laboratorio adecuado para utilizar pequeñas cantidades. También es importante comparar los resultados obtenidos con el método de la norma oficial mexicana. De los resultados obtenidos observamos que la repetitividad del método utilizado presenta resultados satisfactorios debido a que se tomaron 4 muestras diarias (alimentación, anaerobio, anóxico, aerobio) durante 30 días, lo que hace un total de 120 muestras. Se llevó el análisis de los datos de acuerdo con la norma mexicana NMX-AA-115-SCFI-2015, que nos describe los criterios generales para análisis de agua.

1.- Marco teórico

1.1.- Generalidades

Señalar la importancia del agua parece ser innecesario, ya que es bien sabido por la mayoría de las personas, sin embargo, muchas veces es necesario recordar la magnitud que está realmente tiene.

Nuestro planeta cuenta con una gran cantidad de agua, alrededor del 70% de la superficie del planeta está cubierta por agua, aproximadamente el 96% de esta se encuentra en los océanos por lo que no es potable, el resto del agua, alrededor de un 4%, corresponde a los casquetes polares, aguas subterráneas, ríos, lagos y demás corrientes.

Se estima que, alrededor del año 2045, una parte importante de la población se encontrara viviendo las localidades sin agua suficiente para el día a día. Esto a causa de la creciente sobrepoblación, lo cual a su vez incrementará la cantidad de agua contaminada generada, por lo que no se dará abasto a la purificación de esta, para llegar a suministrar a todas las localidades.

El agua es sin dudas el recurso natural más importante para el ser humano, aun cuando muchos no parecen darse cuenta de esto, tan solo por la variedad de usos que esta presenta, no existe manera de pensar en una vida donde esta no este, situaciones donde el agua sea tan valiosa como el oro o más se ven en obras ficticias, sin embargo, esa situación cada vez parece más probable cada año que pasa.

El agua representa el recurso natural más importante de todos, también, debido a sus diversas aplicaciones. Es muy común escuchar que el agua es “El disolvente universal” esto es debido a que es el disolvente que disuelve a más tipos de sustancias y en cantidades mayores que cualquier otro. Esta propiedad de disolvente es debido a su carácter polar, gracias a esto el agua puede aislar un ion de los demás que lo rodean, es capaz de neutralizar las fuerzas de atracción que conforman a una estructura sólida, aquellas sustancias que al disolverse en agua dan lugar a la formación de iones, se les denomina electrolitos.

La misma naturaleza realiza un proceso de depuración del agua, esto a través del ciclo del agua, sin embargo, este proceso natural ya no da abasto a la cantidad de residuos que genera la creciente población humana.

Se puede considerar agua contaminada a toda agua que ya no cumpla con las características biológicas, químicas y de composición. En resumen, es aquella que no cumple con los estándares de calidad estipulados para el uso que se desea darle, ya sea industrial, agrícola, de consumo humano, etc.

1.1.1 Impacto Ambiental

La población humana, la cual se incrementa año tras año, representa diversos problemas ambientales. Especialmente cuando se habla de la contaminación del agua. Es por esto, por lo que se necesitan acciones inmediatas tanto en la disminución de la generación de contaminantes como en la purificación del agua.

Existen diversas fuentes de contaminación del agua, estas pueden ser de origen natural o artificial, la contaminación natural es generada por el ambiente y la artificial es generada por acciones humanas.

La industria química ha generado grandes avances en la mejora de la calidad de vida, sin embargo, no es ningún secreto que esta misma industria genera grandes cantidades de residuos contaminantes, los cuales tienen un gran impacto ambiental, a esto se le debe de sumar que la industria química solo es una de las muchas que generan residuos contaminantes en grandes cantidades, por lo que el problema de generación de residuos es un tema de gran importancia.

Una vez resaltada la importancia del agua y su contaminación, se debe mencionar el tratamiento de aguas residuales, este tema se ha convertido en un problema de interés para todo el mundo, ya que nos dirigimos rápidamente a un punto sin retorno, por lo que investigar un método para poder darle un tratamiento adecuado a la misma es un tema muy interesante así como importante; gracias a esto se ha estudiado de manera intensiva la protección del agua y del medio ambiente a través de diversas Normas y monitoreando la calidad del agua por distintos métodos de análisis.

Algunos laboratorios que se dedican al análisis de la calidad del agua regularmente realizan aproximadamente 50 pruebas para el análisis de la demanda química de oxígeno por semana, con esto tenemos alrededor de 3.8 L de residuos tóxicos generados a la semana (Estudio hecho en los laboratorios del CCIQS, en 2013).

Para poder reducir la cantidad de residuos se debe cambiar constantemente los procesos anteriores por otros más eficientes, en donde se logre eliminar o en caso de no ser posible, por lo menos disminuir lo más posible la generación de emisiones contaminantes, para así reducir el impacto al medio ambiente.

1.1.2.- Calidad del agua

Las industrias generadoras de descargas de agua residual deben cumplir con estrictas normatividades de calidad del agua, acotando los parámetros y características estipuladas por la normatividad del país, esto ya que varía de país a país, grandes corporaciones que consumen grandes cantidades de agua para sus procesos instalan sus fábricas en diversos países para aprovechar cualquier ventaja legal que puedan obtener, sin mencionar la búsqueda de mano de obra más económica.

Para lograr establecer los criterios de calidad del agua, es necesario tener en cuenta ciertos parámetros tanto físicos como químicos y bacteriológicos, estos parámetros son determinados con ayuda de una caracterización. Esto con el objetivo de dar a conocer los atributos de esta, todo con el fin de definir el uso que se le puede dar a esta, ya sea para consumo humano u otro tipo de uso como el industrial, agrícola, recreacional o como reductor de concentración en descargas contaminantes, además podemos saber qué tipo de tratamiento necesita en caso de no ser apta para el uso deseado.

Uno de los métodos más utilizados en la actualidad para analizar las características de aguas residuales es precisamente la demanda química de oxígeno (DQO), ya que esta es capaz de reflejar con una alta precisión la cantidad de materia orgánica químicamente oxidable en una muestra.

Debido a que es una prueba relativamente rápida, entre 2.5 a 3 h, sencilla y, sobre todo, económica. Los parámetros pueden diferir bastante para describir dicha calidad, estos dependiendo de su uso, ya sea potable u otro tipo de actividad que requiera de agua con un cierto grado de pureza.

El agua pura es un recurso renovable; sin embargo, puede llegar a estar tan contaminada por diversos tipos de agentes contaminantes, que ya no solo resulta ser inútil, sino, nociva para la salud. Es aquí donde podemos ver el verdadero impacto de nuestras acciones, en donde realmente es necesario entrar en acción más que en palabras.

1.1.3.- Normatividad

Los estándares para cumplir para el análisis de la calidad del agua dependen de diversos criterios, el uso para el cual esta destinada es uno de estos criterios, sin embargo, es importante mencionar que las legislaciones y normas varían estos criterios dependiendo del país, es por eso que es importante conocer las normas que aplican a nuestro país.

En México se encuentra la Norma oficial mexicana, **NOM-127-SSA1-1994**, "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACIÓN".

Donde se establece la reglamentación para el uso del agua y residuos líquidos. los límites permisibles de calidad del agua, Características físicas y organolépticas, entre otras características y criterios de calidad.

Por otra parte, tenemos la **NOM-052-SEMARNAT-93**, la cual establece características de los residuos peligrosos, los límites permitidos de agentes tóxicos presentes en el agua y un listado de estos.

Útil como referencia para conocer los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente y bajo que rangos de concentración estos no se pueden eliminar al drenaje.

La Norma Mexicana **NMX-AA-030/1-SCFI-2012** ANÁLISIS DE AGUA - MEDICIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS.

Nos describe la técnica estandarizada para la medición de DQO en México en donde se especifica el uso de sulfato de plata, Dicromato de potasio y Sulfato de mercurio, así como sus debidas concentraciones, los residuos contaminantes de interés para este artículo provienen del uso de estos reactivos.

LA NORMA MEXICANA **NMX-AA-115-SCFI-2015** ANÁLISIS DE AGUA.

Esta norma describe los criterios generales para el control de calidad analítico, dentro y entre laboratorios, con el fin de tener una seguridad al obtener resultados con cierto nivel de exactitud para el análisis de agua.

Esto aplicado en mediciones analíticas para la cuantificación de contaminantes en aguas residuales, es indispensable demostrar que el desempeño del método empleado es adecuado y que el laboratorio cumple con ciertos criterios, tales como.

- Las mediciones analíticas se realizan utilizando métodos y equipos que han sido probados para asegurar que son adecuados a su propósito.
- El personal que realiza las mediciones analíticas es calificado y competente para emprender la tarea asignada;
- Las mediciones analíticas realizadas en un laboratorio deben ser consistentes con las que se efectúan en cualquier otro laboratorio
- Los laboratorios que hacen mediciones analíticas deben tener procedimientos bien definidos de control y de aseguramiento de calidad.

Estos son solo algunos de los criterios más importantes mencionados en la norma, se puede observar que el análisis de la calidad de agua debe ser muy precisa y se deben tomar todas las medidas necesarias para asegurar una obtención de datos precisos.

1.2.- Demanda Química de Oxígeno

La Demanda Química de Oxígeno o como se abrevia comúnmente “DQO”, es utilizado para determinar la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar principalmente la materia orgánica y algunos componentes inorgánicos presentes en la muestra a través de medios químicos, produciendo así, CO₂ Y H₂O.

Entre los diversos métodos para determinar la contaminación en aguas residuales, este es uno de los más utilizados, debido a sus características, consiste en la determinación de material oxidable que es susceptible a ser oxidado, mediante el uso de un agente oxidante fuerte y bajo condiciones de tiempo y temperatura que se verán en esta investigación.

Teniendo en cuenta esto, podemos decir que entre mayor es la DQO, mayor es la contaminación del agua. Esta prueba toma alrededor de 2.5 a 3 horas, por lo que los resultados se pueden tener en mucho menor tiempo que lo que requiere una prueba de DBO, por ejemplo.

Este método es muchas veces preferido sobre otros, debido a que posee una mayor capacidad para oxidar, alrededor de un 98% de la materia orgánica presente, a su vez, por ser aplicable a una gran variedad de muestras, por su fácil manipulación y por los bajos costos, lo cual hace de esta prueba bastante atractiva en comparación con otras o variaciones de esta misma.

El parámetro obtenido se define como la cantidad de oxígeno necesario, o equivalente, para oxidar químicamente la materia orgánica susceptible de oxidación existente en un agua. Esta es expresada en $\text{mg O}_2/\text{L}$.

Los valores de DQO en aguas industriales se encuentra entre los 50 y 2500 mgO_2/l , claro que dependiendo de la naturaleza de la industria estos valores se pueden elevar hasta los 5000 mgO_2/l .

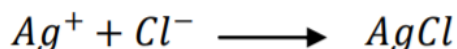
Recapitulando para entrar más a detalles, el método consiste en la descomposición de sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables presentes en la muestra de algún agua residual, esto se logra mediante el calentamiento en una disolución fuertemente ácida, utilizando H_2SO_4 , en presencia de **sulfato de plata**, Ag_2SO_4 , que actúa como agente catalizador y una cantidad de agente oxidante, el **Dicromato de Potasio**, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, con ayuda de **Sulfato Mercúrico** HgSO_4 para remoción de la interferencia causado por los cloruros.

Durante esta reacción, el ion cromo Cr^{6+} es reducido al ion cromo Cr^{3+} , por acción de la materia orgánica y parte de la inorgánica presente en la matriz (Villamizar, 2008).

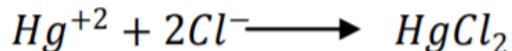
Cabe mencionar que la presencia de una cantidad alta de cloruros en la muestra interfiere en la determinación de la DQO de la siguiente forma:



De igual forma, los cloruros pueden reaccionar con el sulfato de plata, precipitando como cloruro de plata:



Con la adición del sulfato de mercurio, se evitan estos tipos de interferencia:



Ya transcurrido el tiempo necesario para la digestión, el Dicromato de Potasio sin reducir, en otras palabras, el remanente, es cuantificado por medio de una titulación con Sulfato Ferroso Amoniacal o FAS como se suele abreviar y ferroina como indicador formando el complejo naranja, también es posible utilizar una curva de calibración para el caso de espectrofotometría.

1.3.- Precisión

Se trata de la proximidad de concordancia entre los resultados de pruebas independientes obtenidos bajo condiciones controladas. La precisión depende de la distribución de los datos obtenidos en las pruebas, mide la repetibilidad de un evento o de un error de muestreo, Cuando una prueba produce resultados similares cada vez que se realiza, es porque esta presenta una alta precisión.

La precisión es generalmente representada en términos de desviación estándar. También puede expresarse en términos de la varianza y el coeficiente de variación, para una mejor comprensión de la precisión, como es el caso de esta investigación.

1.3.1.- Desviación estándar

Se trata de una medida del grado de dispersión de los valores alrededor de una media, es decir, la precisión que existe en una distribución de valores, en el caso de no haber ninguna variación en los datos, en otras palabras, que todos arrojasen el mismo valor, la desviación estándar sería de cero.

“La desviación estándar de una población de n valores, σ , está dada por la siguiente expresión” (CENAM, 2005):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}}$$

En análisis de laboratorio Se analizan muestras y no una población entera, por ende, la desviación estándar para una muestra se obtiene de la siguiente manera:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

1.3.2.- Coeficiente de variación

El coeficiente de variación al cual también se le conoce como “coeficiente de variación de Pearson” es una medida estadística, la cual representa la dispersión de un grupo de datos. Hace referencia a la relación entre el tamaño de la media y la variabilidad.

Es decir, representa que tanto difieren los valores de una variable, similar a otras medidas de dispersión de datos. En cuanto mayor sea el valor del coeficiente de variación tendremos una mayor heterogeneidad de los datos.

Para calcular este valor, es necesario tener el valor de la desviación típica y el valor absoluto de la media del conjunto de datos, se divide la desviación típica entre la media de datos y se multiplica por cien para una mejor comprensión de los datos.

$$CV\% = \frac{S}{\bar{x}} * 100$$

1.4.- La toxicidad de los residuos

Siempre sería mejor prevenir que solucionar los problemas ambientales. En este sentido, dado que entre las sustancias agregadas en el análisis de DQO, la más peligrosa es el mercurio, luego el cromo, después el ácido sulfúrico y, por último, la plata, es importante investigar un sustituto de los dos primeros para realizar esos análisis. (López-Galán, 2006)

1.4.1.- La Toxicidad del Cromo

En el método DQO, se utiliza el **dicromato de potasio** como agente oxidante, por lo que conocer su riesgo a la salud y el medio ambiente es importante.

Se trata de una sustancia de color anaranjado intenso, es un oxidante fuerte por lo que se utiliza como agente oxidante en diversos procesos, si tiene contacto con ciertas sustancias orgánicas puede provocar incendios, por lo que se debe tener cuidado con su manipulación.

Por otra parte, el cromo, Cr, se puede encontrar en dos formas, la forma hexavalente es la más soluble de las dos y también la más tóxica, puede generar estrés oxidativo, por lo que es de mayor interés en términos de contaminación ambiental.

Por desgracia, se trata de un contaminante frecuentemente encontrado en aguas residuales de carácter industrial. Debido a sus propiedades carcinogénicas su concentración máxima en agua potable ha sido regulada en muchos países a 0.05 mg/L.

1.4.2.- La Toxicidad de la Plata

El sulfato de plata (Ag_2SO_4) actúa como agente catalizador en el método DQO, por lo que la plata se puede encontrar entre los residuos generados. La exposición humana a los compuestos de plata y a la plata se puede producir por vía oral, dérmica o por inhalación.

La ingestión de grandes dosis de nitrato de plata ha producido dolor abdominal, vómitos, diarrea, shock, convulsiones, daños corrosivos en el tracto gastrointestinal y muerte, irritación respiratoria por la exposición aguda por inhalación de plata o de compuestos de plata.

Un dato interesante es que la exposición prolongada a la plata puede causar argiria, una enfermedad que le da una coloración azul grisácea a la piel y órganos internos, el cual es el indicador más común de exposición prolongada a la plata o compuestos de plata en los seres humanos.

1.4.3.- La Toxicidad del Mercurio

Como se mencionó con anterioridad el Sulfato Mercúrico (HgSO_4) se usa para remover la interferencia de los cloruros y forma parte de los contaminantes producidos por la DQO.

El mercurio es un metal pesado utilizado ampliamente, es bien sabido que es muy tóxico en caso de ingestión, puede causar daño renal y al sistema nervioso. Este se acumula en todos los seres vivos ya que no es esencial para ningún proceso biológico.

El mercurio disuelto en el agua es uno de los problemas más comunes en cuanto a tratamiento de aguas contaminadas. Una de las mayores dificultades para su eliminación es la alta complejidad de controlar los parámetros del agua de alimentación para conseguir absorber este compuesto del agua a un costo no muy elevado.

Para lograr conseguir un sistema de absorción de mercurio eficiente y que podría implementarse en cualquier parte del mundo, diversos equipos de desarrollo e investigación han buscado desarrollar un equipo sencillo y sobre todo económico para tratar grandes cantidades de agua y que cuente con una durabilidad y vida útil elevada, claro que esto no es tarea sencilla, pero el compromiso que han hecho diversos equipos de investigación refleja el compromiso de mucha gente por combatir la contaminación del planeta.

1.5.- Tratamiento de residuos

Debido a un inadecuado tratamiento del agua residual generada, ha habido un incremento en la contaminación del agua, esto nos ha llevado a una alteración significativa en el medio ambiente. Por ello, es por lo que, existen diversos proyectos de investigación que buscan reducir el impacto ecológico que tiene este método de análisis, así como este, para así mejorar aún más la técnica de la determinación de la demanda química de oxígeno.

Para la correcta deposición de residuos peligrosos, cualquier generador o poseedor de estos pueden contratar un servicio de manejo de los residuos peligrosos, esto con algún gestor que este autorizado por la SEMARNAT, también se pueden transferir a alguna empresa o industria que lo pueda utilizar como insumo dentro de los procesos que lleve a cabo, todo esto esta respaldado por el Artículo 42 de la LGPGIR.

Dentro de la LGPGIR, se indica que se debe promover la prevención de la generación de residuos, se nos señala la responsabilidad compartida de los sectores involucrados y nos recomienda encarecidamente a la innovación de los procesos, métodos y tecnologías no solo para un mejor manejo de los residuos si no para la prevención de su generación, buscando un punto en el que se ayude al medio ambiente y también sea económicamente viable.

Debido a las concentraciones resultantes del cromo, el mercurio y la plata, en los residuos generados por el método, estos no pueden simplemente ser depositados en el alcantarillado, principalmente por la toxicidad del cromo y el mercurio, ya que estos valores están muy por encima de lo que recomienda la Organización Mundial de la Salud (los valores deben estar por debajo de 0.1 mg/L, 2 µg/L y 25 µg/L, respectivamente en los tres metales) (OMS, 2000). En Colombia, se debe cumplir el decreto 1594 de 1984 (Normativa Ambiental de Aguas) y en México, la norma es la NOM-052-ECOL-1993. Por esta razón, y debido a que la mayor parte de los laboratorios que hacen estos análisis de DQO, poco o nada hacen para solucionar apropiadamente este problema (López-Galán, 2006).

Por otra parte, debido a lo rentable que resulta recuperar la plata económicamente hablando, y a los severos problemas ambientales que puede causar el mercurio. Se han buscado separar selectivamente a los metales provenientes de dicho proceso por distintos métodos, algunos involucrando la electroquímica al emplear técnicas que permiten reducir, transformar o incluso eliminar residuos tóxicos por medio de esta.

Uno de estos métodos es el descrito por la tesis que presenta el I.Q.P. GILBERTO CARREÑO AGUILERA. “Para precipitar la plata, se realizaron ensayos con viruta de cinc y con cloruro de sodio NaCl (en concentraciones mayores a las estequiométricas).

Para precipitar el mercurio, se utilizó FeS para generar el ión sulfuro del H₂SO₄ que precipitó este 2 metal (el exceso de reactivo fue mayor en este caso que en el anterior, por haber un mayor efecto de las reacciones colaterales). Igualmente, se trató de precipitar el mercurio y el hierro, con los iones sulfato del CaSO₄, por ser lo más recomendado en la literatura (Cotton et al., 1998), aunque Gould et al. (1984), recomiendan hacerlo con hierro” (López-Galán, 2006).

2.- Metodología y experimentación

A continuación, se describirá el procedimiento para la obtención de los valores de DQO, así como el procedimiento a seguir para tener un ambiente controlado en donde se puedan realizar las pruebas de DQO con el método modificado para su posterior análisis de precisión y análisis de resultados.

2.1.- Objetivo

Lograr una eficiente determinación de la presencia de materia orgánica químicamente oxidable en agua, utilizando una modificación del método descrito por la norma mexicana, por medio de una titulación.

2.2.- Fundamento

La Demanda Química de Oxígeno, nos expresa la cantidad de oxígeno molecular requerido para oxidar la materia orgánica presente en una muestra de agua, esto bajo condiciones oxidantes generadas por el dicromato de potasio en un medio ácido utilizando una solución de ácido sulfúrico, a una temperatura de 150°C, se debe dar tiempo para la digestión, un periodo de por lo menos 2 horas.

En el método, la digestión con dicromato puede ser catalizada con sulfato de plata, y en ocasiones, se utiliza iones mercurícos para la eliminación de las interferencias por cloruros. Esto dependiendo de las preferencias y necesidades de quien realiza la prueba. Una vez pasado el tiempo para la digestión, para conocer el exceso de dicromato de potasio, esta se debe titular una solución estándar de sulfato ferroso amoniacal (FAS), utilizando un indicador de ferroina. La cantidad de oxígeno utilizada se calculará en base a la diferencia con respecto a la de un blanco que se prepara en paralelo.

Esta prueba tiene un tiempo aproximado de 2 horas, dependiendo de la muestra analizada y de las concentraciones utilizadas.

Medidas de seguridad a seguir:

Esta prueba utiliza sustancias peligrosas de diversos tipos, por lo que se recomienda encarecidamente seguir las medidas de seguridad respectivas. Se debe tener cuidado con la manipulación de la solución digestora en medio ácido ya que es tóxica, oxidante y corrosiva, es indispensable contar con el equipo de protección necesario para evitar cualquier contacto con la piel. La dosificación debe hacerse en la campana, evitando cualquier derrame. Los desechos generados por la prueba deberán de ser depositados en un contenedor especial para residuos para su posterior tratamiento y disposición ya que se considera un residuo peligroso.

Reactivos por utilizar:

Solución Digestora de Dicromato de Potasio.

Solución de sulfato ferroso amoniacal (FAS).

Indicador de ferroina.

Solución de Ácido Sulfúrico.

Ftalato ácido de potasio (curva de calibración).

2.3.- Método experimental

1. En un vial, colocar la muestra a analizar, posteriormente agregar la solución digestora de potasio y posteriormente la solución ácida (Revisar medidas de seguridad antes de manipular), agregar soluciones de acuerdo con la siguiente tabla dependiendo del volumen de los viales:



Figura 1. Viales para determinación de DQO

Volumen total	Muestra	Solución de Dicromato de Potasio	Solución de Ácido Sulfúrico
7.50 ml	2.50 ml	1.50 ml	3.50 ml
15 ml	5 ml	3 ml	7 ml
22.50 ml	7.50 ml	4.50 ml	10.50 ml

Tabla 1. Volumen utilizado en muestras

Para la investigación presente se utilizó un volumen total de 15 ml como se muestra la tabla, cuando se agregue la solución de ácido sulfúrico se debe de hacer lentamente y procurar que la solución caiga lentamente por las paredes del tubo, ya que esta produce una reacción exotérmica por lo tanto deben utilizarse guantes de seguridad. En caso de que la muestra este muy concentrada, al añadirle los reactivos tomara una coloración verde antes del proceso de digestión, en este caso debe realizarse una dilución de esta, la coloración debe ser amarilla durante la digestión. Verter varias ocasiones el vial para mezclar perfectamente los reactivos.

2. Se debe preparar una solución más de igual concentración, sin embargo, ahora se debe utilizar agua destilada en lugar de la muestra, esta solución será nuestro blanco.
3. Colocar el vial en el digestor y calentar la reacción a 150°C durante 2 horas.



Figura 2. Calentador para Tubos de Ensayo DQO

4. Transcurridas las 2 horas, dejar enfriar y transferir el contenido a un matraz Erlenmeyer de 25ml. Enjuagar 2 veces el vial con agua destilada y transferir a matraz.
5. Añadir de una a dos gotas de indicador ferroina al matraz

Se procede a titular con una solución de sulfato ferroso amoniacal utilizando micropipetas, continuar hasta que la solución pase de color verde a café rojizo en el punto de vire. Prestar atención al cambio de color, cuando se presente un cambio de verde a azul verdoso, significa que el punto de vire esta cercano.



Figura 3. Micropipetas volumétricas usada en proceso de titulación

6. Calcular el valor de la DQO utilizando la siguiente ecuación:

$$DQO = \frac{(A - B)(8.0 \text{ mg/peso equiv})(M \text{ FAS})(1000 \text{ ml/l})}{\text{Volumen de la muestra en ml}}$$

A = Volumen de titulante para el blanco en ml.

B = Volumen de titulante para la muestra en ml.

M FAS = Molaridad de la solución titulante FAS (0.1)

La DQO se expresa en = mg/l de oxígeno.

7. Si se desea utilizar el método utilizando el colorimétrico se debe ingresar el programa 2720 del espectrofotómetro, a una longitud de onda de 620 nm.

2.4.- Cálculo de Precisión

La precisión en cada método se estimará, en términos de la desviación estándar (S) y de coeficiente de variación, la cual se mostrará en porcentaje para su mejor comprensión, de los análisis realizados a las muestras y patrones, utilizando las siguientes formulas.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Ecuación 1.- Desviación estándar

$$CV\% = \frac{s}{\bar{x}} * 100$$

Ecuación 2.- Coeficiente de variación en porcentaje

2.4.1.- Programación en Excel

2.5.- Construcción de los biorreactores biológicos de prueba

2.5.1.- Descripción de sistema de pruebas

Para las pruebas del método alternativo de DQO se utilizó un biorreactor cuyo fin es el de disminuir los valores de DQO, por ende, se espera una disminución progresiva del valor de la DQO a través del sistema, si el método alternativo refleja una disminución de valores de DQO a través del sistema, esto significara que el método es efectivo, sin embargo, para llegar a ser viable es necesario calcular la precisión. Se realizarán pruebas en cada etapa del sistema y se cotejarán con pruebas realizadas usando el método tradicional.

El proceso para la depuración del agua residual es por medio de un sistema biológico combinado, anaerobio-anóxico-aerobio, el biorreactor a utilizar tiene las siguientes dimensiones:

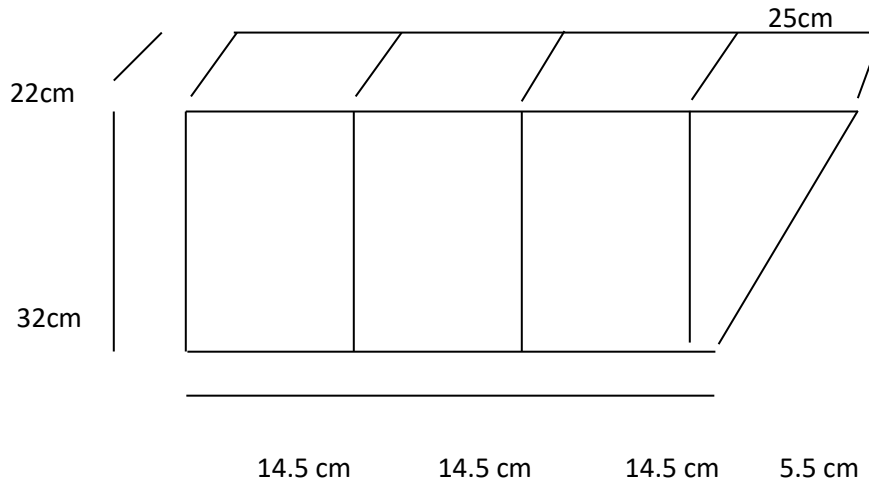


Figura 4. Dimensiones del sistema anaerobio-anóxico-aerobio

El primer tanque del proceso es el de la alimentación, tiene una capacidad aproximada de 10 litros en volumen, este viene equipado con una tapa para su cerrado hermético y así poder descartar cualquier contaminación exterior. El reactor es de acrílico de 6.5 mm de espesor, en cuanto al volumen de los reactores anaerobio y anóxico es de 9.8 litros.

El volumen del reactor aerobio es de 13.5 litros, y por último el tanque de sedimentación tiene una capacidad de 5 litros, dándonos como resultado un volumen total de 38.2 litros.

2.5.2.- Diseño de biorreactores anaerobio-anóxico-aerobio

Los reactores anaerobio y anóxico son de tipo RAFA (Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente), y estos consisten en una base de acrílico con perforaciones circulares y está localizada a 5.5 cm de altura, con esto se busca un desplazamiento uniforme del fluido para así tener un mejor contacto con el lecho biológico, haciéndolo más uniforme.

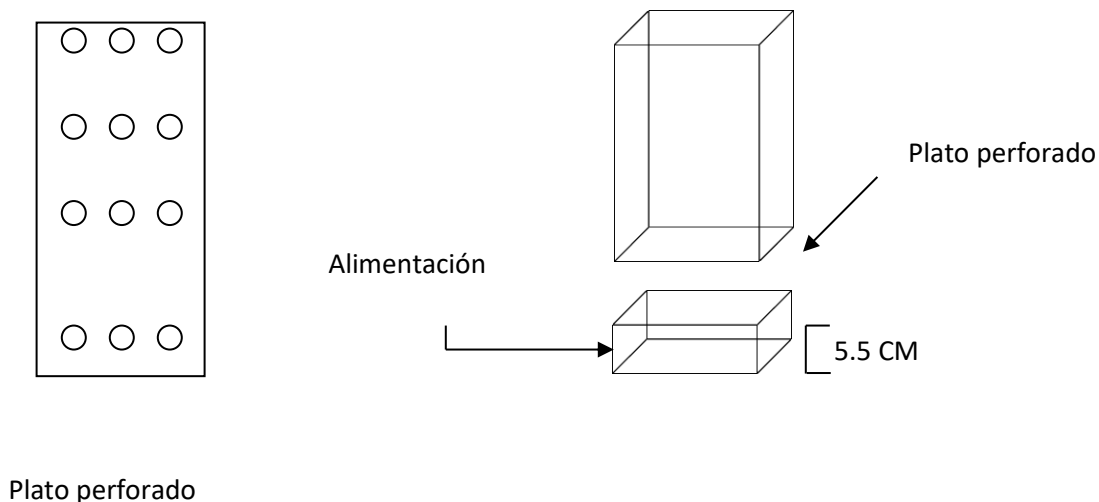


Figura 5 Descripción del biorreactor anaerobio.

El objetivo del plato perforado es el de sostener la caja contenedora de los lodos activados en la parte superior del plato. Por otra parte, y con la finalidad de manipular la entrada de los lodos biológicos al reactor, se cuenta con una caja de acrílico que entra y sale adecuadamente en el reactor.

Esta caja está equipada con dos mamparas, esto con el fin de que los lodos no salgan arrastrados fuera del reactor debido a la producción del gas metano.

Estas cajas tienen en el fondo una malla de poro pequeño de diámetro (0.5 mm) gracias a estos poros los lodos no logran pasar a la parte inferior del reactor, ya que esto tapanía la entrada hacia la alimentación. El reactor anaerobio tiene en la parte superior una tapa con una perforación, cuyo objetivo es el de capturar el biogás generado en el proceso.

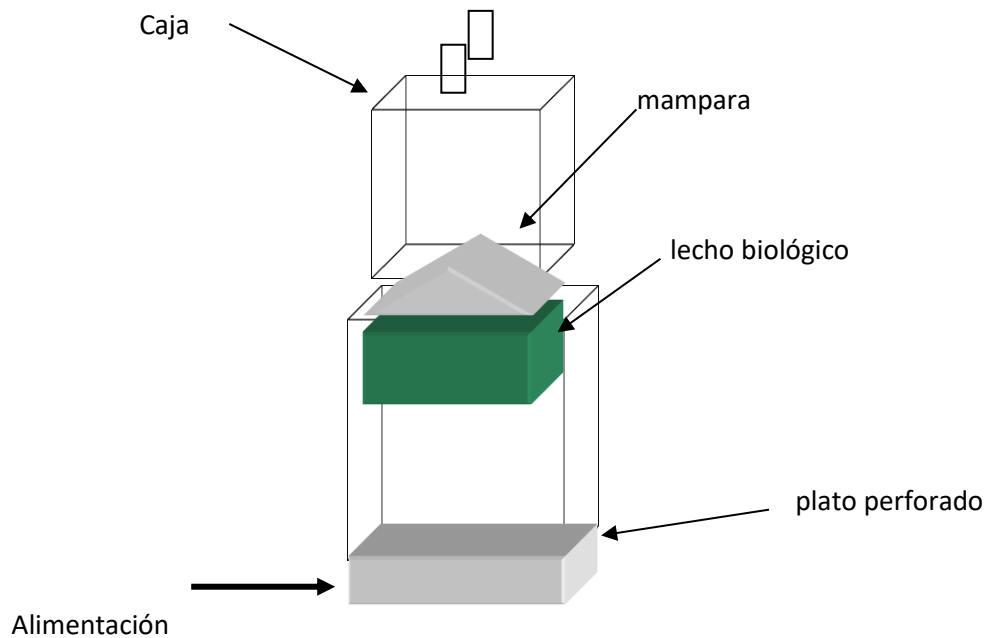


Figura 6. Identificación de Partes del reactor anaerobio tipo RAFA

El reactor anóxico funciona de manera similar al reactor anaerobio, la única diferencia notoria es que el reactor anóxico tiene dos perforaciones laterales en la parte inferior, una destinada a la entrada de la alimentación y la otra para la recirculación proveniente de la etapa aerobia.

Conforme asciende el flujo en el reactor anóxico, el agua tratada sale por un orificio que se encuentra en la parte superior de la pared, entrando a la etapa aerobia, con ayuda de un pequeño ángulo de inclinación se logra que los reactores anóxico-aerobio no se mezclen por dicho orificio.

2.6.- Proceso de depuración llevado a cabo en biorreactores a escala laboratorio.

Biorreactores anaerobio y anóxico

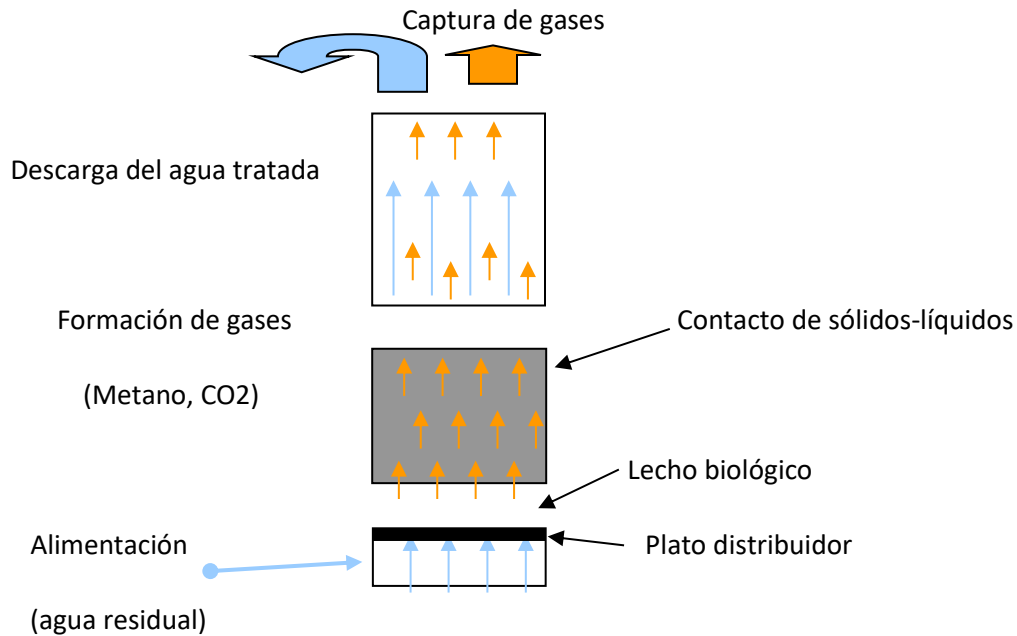


Figura 7. Funcionamiento del reactor tipo RAFA

Para el flujo de los líquidos de la alimentación a los biorreactores anaerobio, anóxico se utilizó una bomba peristáltica marca Masterflex (Cole Parmer) 7518-14.

Cuenta con una adaptación de dos cabezales para hacer lograr que la velocidad de flujo sea constante para los reactores.

Biorreactor aerobio

El reactor aerobio consta de un tanque agitado, el cual mantiene en constante suspensión a los lodos activos con la ayuda de un difusor de peceras, a su vez, este produce burbujas que contienen oxígeno, logrando una mejor área de contacto con el agua residual.

Posteriormente, se continúa al sedimentador (Ver Figura 8), es aquí en donde se separan las fases líquido-sólido, el agua que ya fue tratada sale por la parte superior y una parte se dirige a la descarga del sistema y otra parte va a recirculación a la etapa anóxica, en caso de incluir recirculación. En el sedimentador se cuenta con una purga en la parte inferior para poder sacar el lodo en exceso.

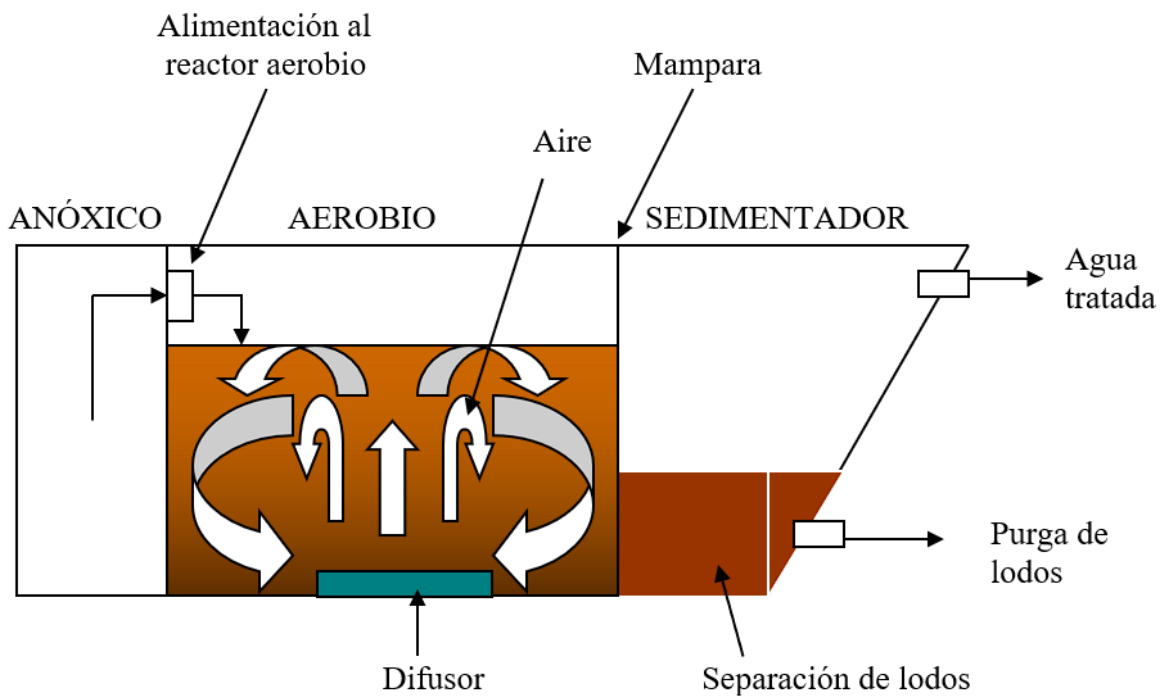


Figura 8. Identificación de partes del reactor aerobio

2.7.- Agua residual preparada sintéticamente

Se dispone a preparar agua residual de manera sintética, buscando imitar las características típicamente encontradas en estas aguas. Esta composición incluye los contaminantes más comunes en agua residual, nitrógeno, fósforo, carbono, además de minerales.

Compuesto	Concentración (gramos/litros)
Azúcar	1.689
Extracto de Levadura (Bioxon)	0.393
Urea	0.125
Fosfato monoácido de Potasio	0.00651
Fosfato diácido de Potasio	0.005788
Sulfato de Magnesio	0.00452
Cloruro de Calcio	0.00551
Cloruro Férrico	0.0000499
Bicarbonato de Sodio	0.051

Tabla 2. Composición del agua residual preparada sintéticamente

2.8.- Seguimiento del proceso de depuración

La manera en la que se conoce el rendimiento del sistema es por medio de los parámetros de calidad del agua que se mencionaron con anterioridad, como lo es la DQO, la cual no deja de ser nuestro objetivo de investigación, esta engloba la mayor parte del material contaminante agregado a el agua residual sintéticamente preparada, se deben realizar pruebas en 4 etapas del sistema de depuración, como se observa en la siguiente figura:

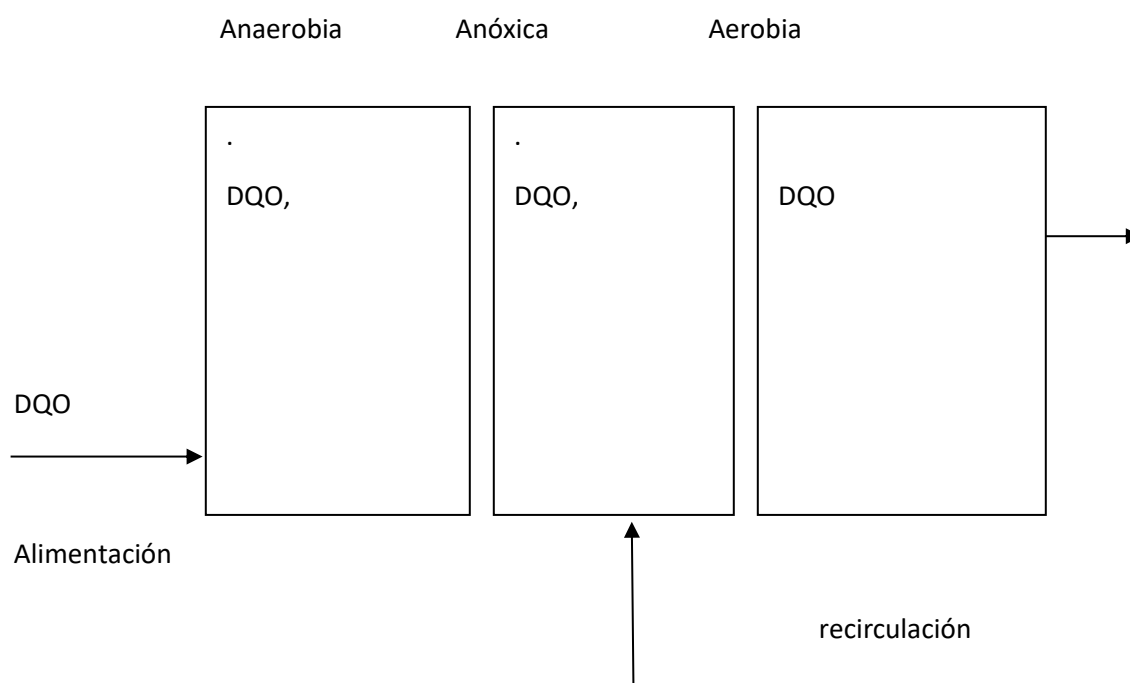


Figura 9. Identificación del proceso de depuración llevados a cabo en cada biorreactor

Los lodos de tipo anaerobios fueron proporcionados por la central de malta Lara Grajales Puebla, la cual realiza tratamiento de aguas residuales en sus procesos, en cuanto al lodo aerobio este fue proporcionado por una planta tratadora de aguas de la universidad de las Américas-Puebla.

2.9.- Elaboración del biorreactor anaerobio-anóxico-aerobio

ANAEROBIO ANÓXICO AEROBIO SEDIMENTADOR

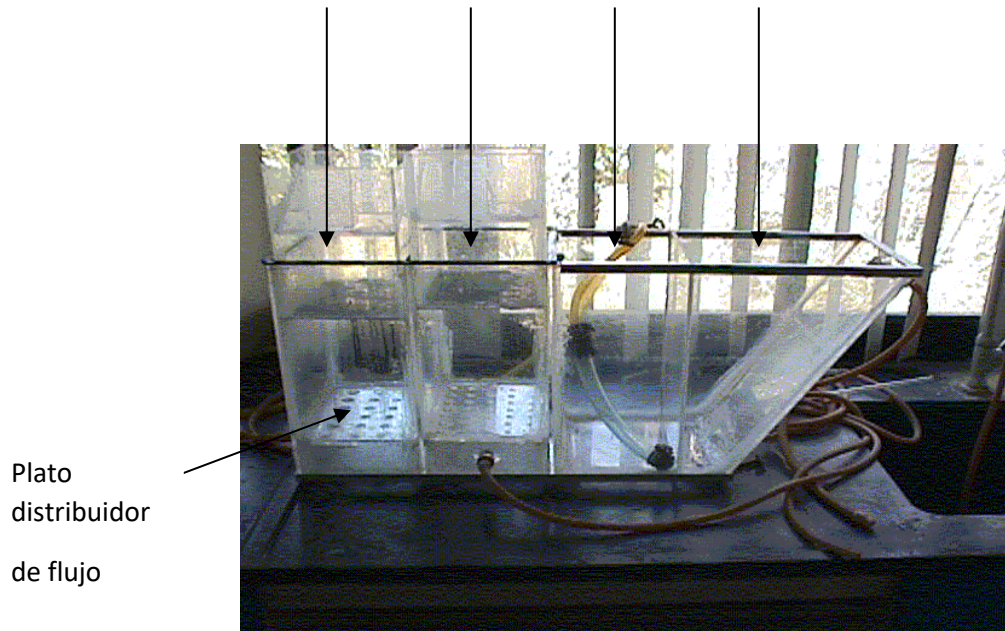


Imagen 2. Construcción del reactor anaerobio-anóxico-aerobio.

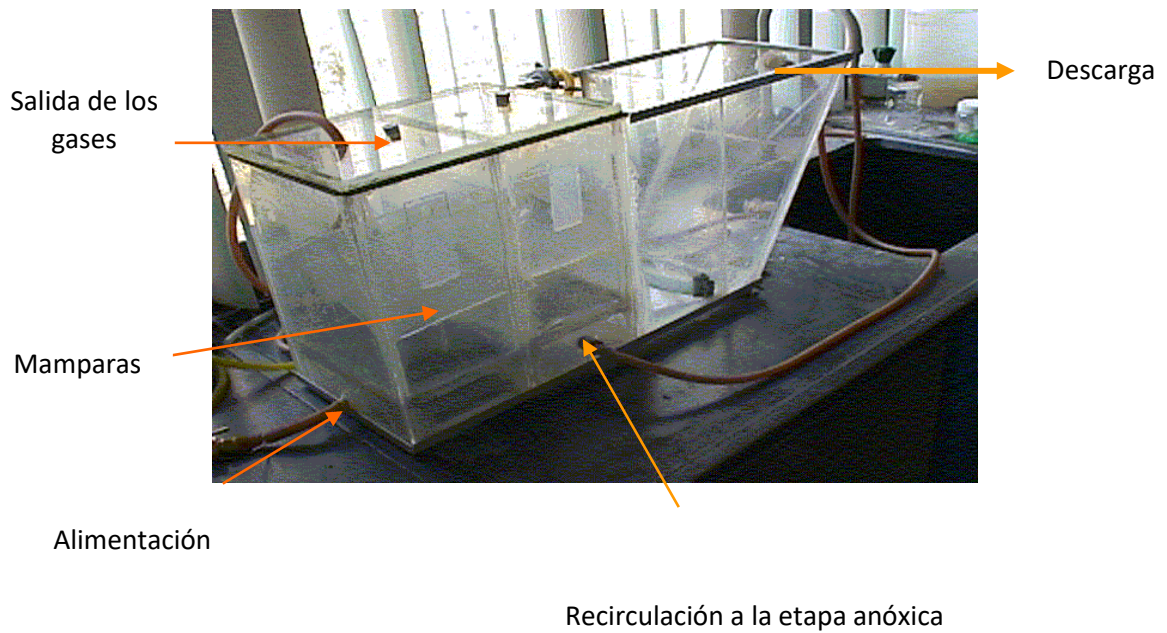


Imagen 3. Reactor anaerobio-anóxico-aerobio

2.10.- Operación de los biorreactores anaerobio-anóxico-aerobio a escala laboratorio.

Biorreactores anaerobio y anóxico

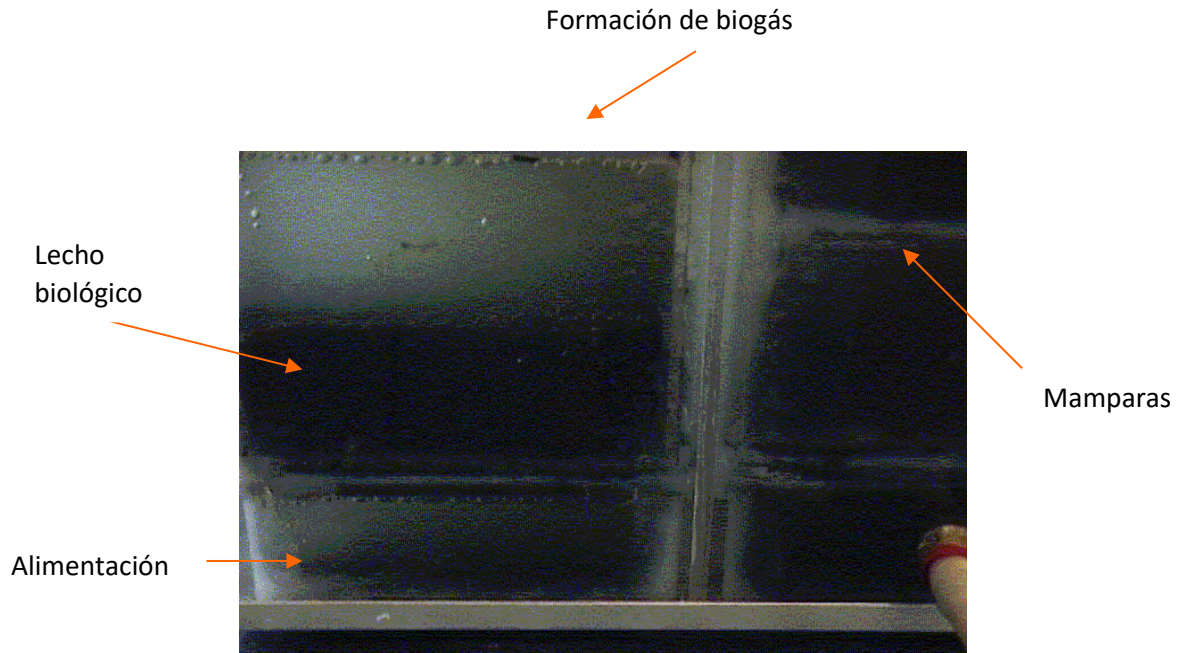


Imagen 4. Identificación de Operación del reactor anaerobio tipo RAFA a escala laboratorio

Biorreactor aerobio

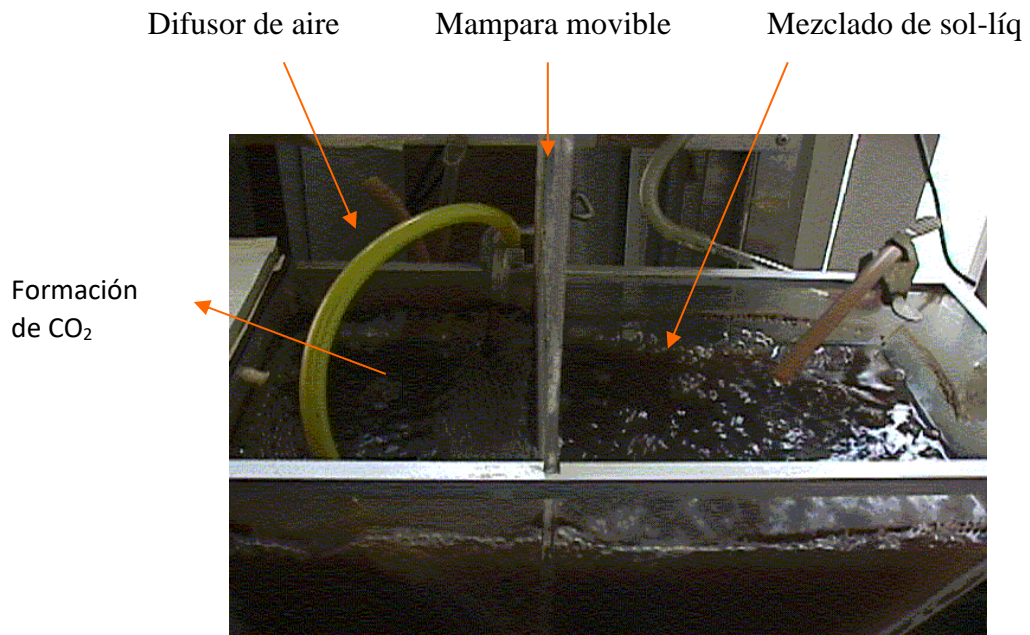


Imagen 5. Operación del reactor aerobio

Operación del sistema anaerobio-anóxico-aerobio



Imagen 6. Reactor anaerobio-anóxico-aerobio a escala laboratorio

3.- Resultados

Las pruebas de DQO realizadas fue en un reactor anaerobio-anoxico aerobio donde los lodos activados del reactor anaerobio y anóxico provienen de una planta de tratamiento de agua residual de la industria central de malta en Lara Grajales Puebla, los lodos aerobios provienen de la planta de tratamiento de agua residual de la Universidad de las Américas Puebla. Una vez que se obtuvieron los inóculos de los sistemas anaerobio y aerobio los cuales estaban acostumbrados a un tipo de agua residual se adaptan a las nuevas condiciones de operación, flujo, carga orgánica, compuestos de nitrógeno y fosforo los cuales se encuentran en el agua sintética preparada. En el trabajo se alcanza el estado estacionario del sistema para lo cual se hacen determinaciones de DQO en las etapas de adaptación y estabilización. Estas pruebas se hacen con el objetivo de ver la variación de los resultados y posteriormente la validación del método propuesto.

3.1- Proceso de adaptación de los lodos activados para la remoción de nutrientes, sin recirculación del agua residual

3.1.1.- Demanda Química de Oxígeno.

La Tabla 3 muestra el seguimiento en la remoción de la DQO en cada una de las etapas de tratamiento, durante los primeros días de pruebas. Estos resultados se obtuvieron sin recirculación de agua residual entre las etapas aerobia y anóxica. Es decir, se tiene un tren de tratamiento sólo secuencial.

El agua residual preparada sintéticamente tiene una DQO de aproximadamente **2950 mg/l** que entra primero a la etapa anaerobia y salen de ésta aproximadamente a **1600 mg/l**. Esta cantidad pasa posteriormente a la etapa anóxica y salen aproximadamente **770 mg/l**, que pasan a la etapa aerobia, y teniendo la descarga final de aproximadamente **100 mg/l**, esto para la etapa de adaptación.

Fecha: marzo del 2021

DÍA	Alimentación	ANAEROBIO	ANOXICO	AEROBIO
0	2900	1621	696	112.62
1	2800	1648	868	119.31
2	2882	1622	696	76
3	2948	1620	720	110
4	3002	1948	904	95.21
5	3010	1600	780	90.11
6	3008	1472	720	87.20
7	3012	1470	764	85
8	3000	1480	796	88
PROMEDIO	2951.333333	1609	771.5555556	95.93777778
VARIANZA	5703	21461	5537.777778	214.2043444
DESVEST	75.51820972	146.4957337	74.41624673	14.63572152
CV%	2.558782801	9.104769032	9.644962854	15.25543103

Tabla 3.- Valores de DQO a través del tiempo, etapa de adaptación

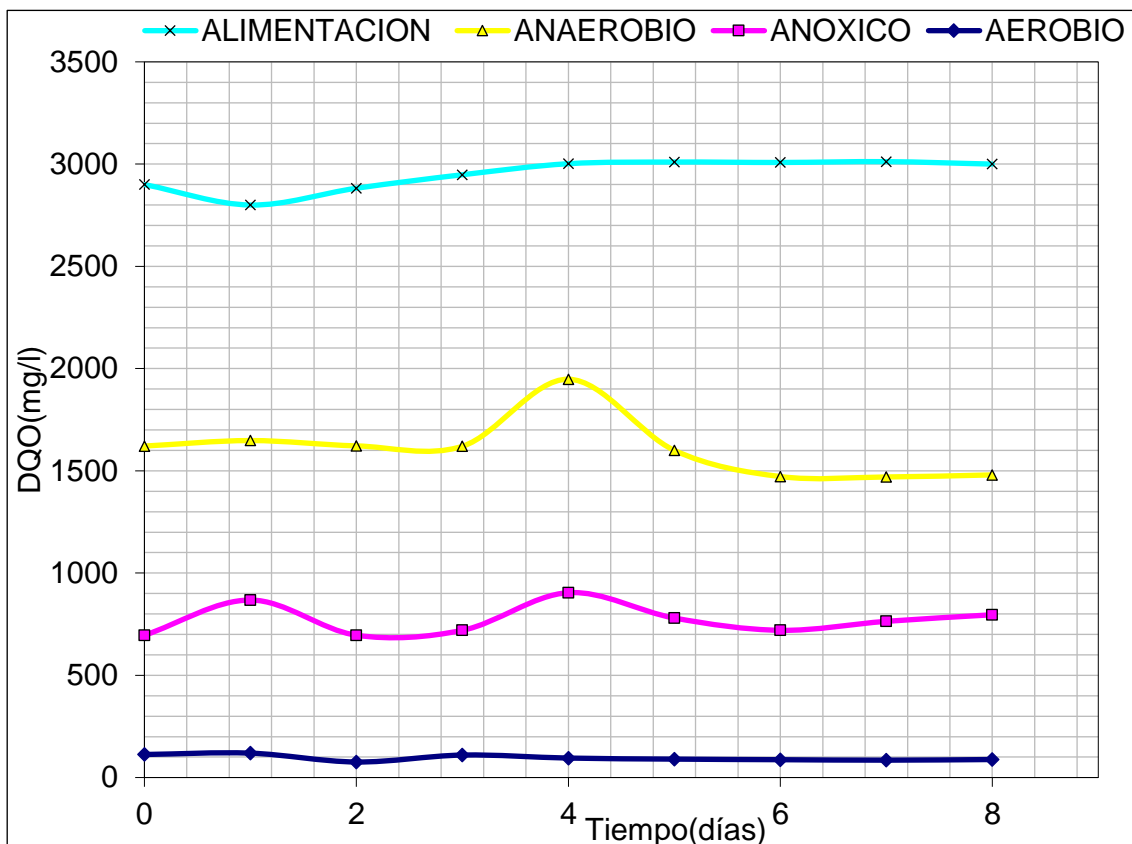


Gráfico 1.- Remoción de DQO en el sistema anaerobio-anóxico-aerobio durante el proceso de adaptación (8 Días).

En la gráfica 2 se observa que la mayor parte de remoción de DQO la tienen las etapas anaerobia y anóxica, con una remoción del 76% entre ambas etapas, lo cual indica que tienen una gran actividad.

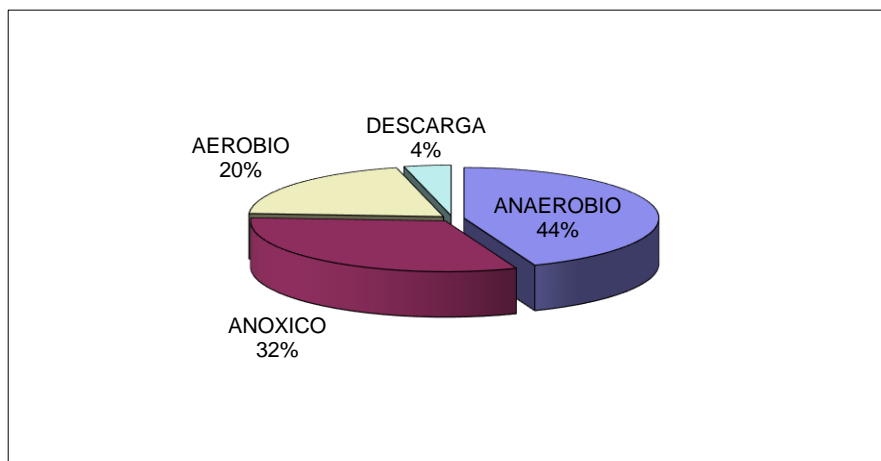


Gráfico 2.- Porcentajes de DQO removido durante el proceso, etapa de adaptación.

3.2.- Proceso de estabilización de los lodos, recirculación en etapa aerobia hacia anóxica.

La grafica 3 nos presenta el proceso de remoción de DQO en la etapa de estabilización, se observa claramente un cambio respecto a la etapa de adaptación, con menor variación en cada etapa, sobre todo en los últimos días, como se puede observar en la gráfica 3 a partir del día 20. Es gracias a estos datos que podemos saber que el sistema se ha estabilizado.

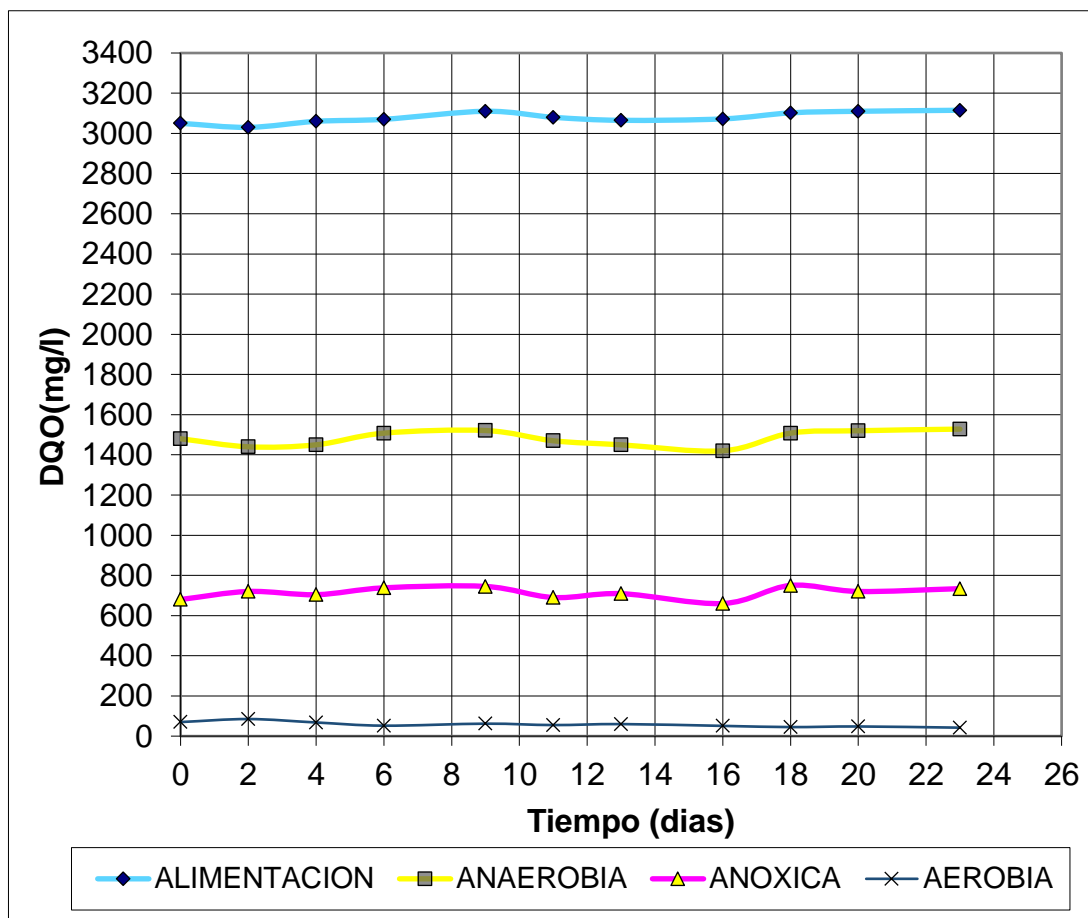


Gráfico 3.- Remoción de DQO en el sistema anaerobio-anóxico-aerobio durante el proceso de estabilización.

En el gráfico 4, se puede observar que la mayor parte de la remoción se encuentra en la etapa anaerobia, logrando un poco más del 50% de la remoción total del sistema, seguido de la etapa anóxica y la aerobia.

Con el paso del tiempo tanto la etapa anóxica, como la aerobia, mejoran sus valores de remoción de DQO, comportamiento esperado en la etapa de estabilización.

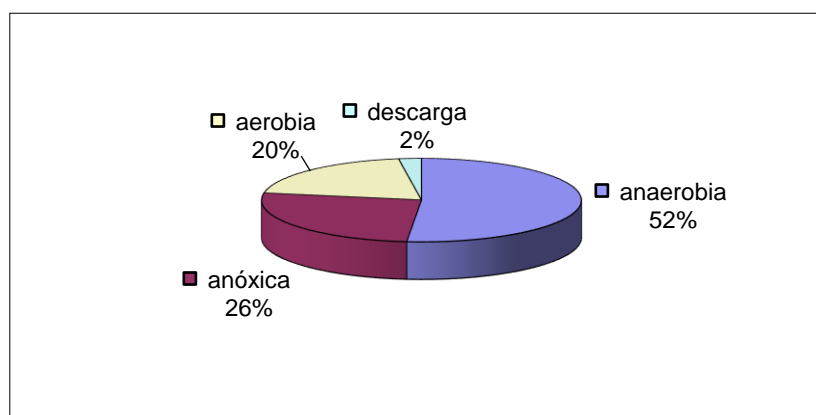


Gráfico 4.- Porcentajes de DQO removido durante el proceso, etapa de estabilización.

La Tabla 4 muestra el seguimiento en la remoción de la DQO en cada una de las etapas de tratamiento, durante los días posteriores a la adaptación. Estos resultados se obtuvieron ya incluyendo una recirculación de agua residual entre las etapas aerobia y anóxica.

El agua residual preparada sintéticamente tiene una DQO de aproximadamente **3080 mg/l** que entra primero a la etapa anaerobia y salen de ésta aproximadamente a **1480 mg/l**.

Esta cantidad pasa posteriormente a la etapa anóxica y salen aproximadamente **715 mg/l**, que pasan a la etapa aerobia, y teniendo la descarga final de aproximadamente **60 mg/l**.

Abril/2021

DIA	ALIMENTACIÓN	ANAEROBIO	ANOXICO	AEROBIO
31	3050	1480	680	70
2	3030	1440	720	85
4	3060	1450	704	68
6	3070	1508	738	52
9	3110	1521	745	62
11	3080	1470	690	55
13	3065	1450	709	60
16	3072	1420	660	51
18	3102	1508	750	45
20	3110	1520	720	48
23	3115	1528	734	42
PROMEDIO	3078.545455	1481.36364	713.636364	58
VARIANZA	959.3409091	1779.06818	1009.56818	201.5
DESVEST	30.97322891	42.1790017	31.7737027	14.1950696
CV%	1.006099451	2.8473091	4.45236598	24.4742579

Tabla 4.- Valores de DQO a través del tiempo, etapa de estabilización

3.1.2.- Comentarios

En la gráfica 1 se observa que hay una rápida adaptación y un alto rendimiento de las etapas anaerobia y anóxica. Esto debido a la procedencia de los lodos activados que es de tipo industrial, la variación que se observa en estas etapas es debido al proceso de adaptación y al control del pH.

Un paso importante fue el de controlar el pH, agregando bicarbonato de sodio para controlar el pH entre 7 y 8, esto produjo un aumento en la concentración de DQO en la alimentación.

Posterior a la etapa de adaptación, la velocidad de flujo de la alimentación se modificó, aumentando a $7.5 \frac{ml}{min}$ y se empezó a recircular de la etapa aerobia a la etapa anóxica.

Estos valores de flujo se mantuvieron hasta que el sistema logro alcanzar la estabilización, teniendo en cuata los valores de nutrientes removidos tales como nitrógeno fosforo y carbono, así como analizando el nitrógeno total y amoniacal entro otros, y por supuesto los valores de DQO

Se mandaron a hacer pruebas de DQO a un laboratorio de análisis de agua con norma oficial, con la cual pudimos obtener un valor exactitud del 99.1%, las muestras fueron aleatorias y por cuestiones de costo no se pudieron mandar todas las muestras.

Es importante mencionar que este método se aplica para aguas residuales que poseen una DQO de por lo menos 50 mg O₂/L, ya que, cuando se trata de analizar muestras con valores de DQO menores a esto, el método presenta una precisión baja e incluso se debe utilizar una modificación del método para muestras entre 5 y 50 mg O₂/L.

4.- Conclusiones

El análisis del método de análisis alternativo de DQO, permitió evaluar y cuantificar experimentalmente la precisión y exactitud de dicha variación del método, demostrando la vialidad de esta, así mismo, demostrando que existe el interés de parte de otros investigadores por reducir los residuos que se generan en la prueba descrita por la norma mexicana, todo para el cuidado del planeta.

En la etapa de adaptación se esperaba de antemano una variación mayor, debido al mismo proceso de adaptación y al control del pH.

Por otra parte, se puede observar un aumento del promedio de la medida de DQO en la alimentación en comparando la etapa de adaptación y estabilización, lo cual resultara confuso a primera vista ya que en la alimentación es en donde el valor

debería ser más constante, sin embargo, como se mencionó con anterioridad un paso importante fue el de controlar el pH, agregando bicarbonato de sodio para controlar el pH, esto produjo un aumento en la concentración de DQO en la alimentación.

Los resultados indican que, para muestras con concentraciones altas, el método presenta una mayor precisión en los resultados, comparándolos con los análisis realizados a muestras de concentraciones bajas, como los que se presentan en la sección anóxica y aerobia, presentando una mayor variabilidad en sus resultados.

Esto respaldado de igual manera por otros artículos de investigación, sobre el método de análisis DQO (método fiel a la norma) que se consultaron como referencia para esta investigación, confirmando así que este método presenta una relación directamente proporcional entre la precisión y la concentración de contaminantes en la muestra, incluso si se utiliza el método especificado en la norma.

Los datos en la etapa de estabilización, los cuales son los más estables, presentan una precisión del método, evaluada como CV%, no mayor a 5% para los datos mayores a 650 mg O₂/L por lo que presenta una precisión más que aceptable por manuales de calidad de laboratorios, la cual suele ser de 10% o menos. Sin embargo, para valores de menos de 100 mg O₂/L, el CV% sube hasta un 25% aproximadamente.

Se puede concluir que el método alternativo es eficiente siempre que se analicen muestras con concentraciones altas de DQO, específicamente valores mayores a 650 mg O₂/L donde se puede esperar un valor de CV% menor a 5% indicando una alta precisión.

5.- Bibliografía

- CENAM. (2005). Método analíticos adecuados a su propósito: Guía de laboratorio. México: PUBLICACIÓN TÉCNICA CNM-MRD-PT-030.
- Aguilera I., R. S. (2003). Validación de la Determinación de la DQO en la Unidad Analítica del CEBI. Cuba: Revista Cubana de Química.
- Ambiental, D. d. (2000). RESUMEN DE SALUD PÚBLICA PLATA. ATSDR.
- Bernal S. I., P. O. (2015). Aplicación de rizobacterias en la biorremediación del cromo hexavalente presente en aguas residuales. Cuban Journal of Biological Sciences.
- Calderon, D. (Julio de 1997). DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO. Obtenido de Dr. Calderon Labs.: http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Analisis_De_Aguas/Determinacion_de_DQO.htm
- Castro, A. (2012). VALIDACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DQO REFLUJO CERRADO SULFATOS Y NITRATOS, EN AGUAS, EN EL LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES. Bucaramanga: ACADEMIA.
- D, J., & V, S. (2004). Química del agua. México: Limusa, Noriega editores.
- DOMÉNECH, X., & PERAL, J. (2006). Química Ambiental de sistemas terrestres. Química Ambiental de sistemas terrestres: Ed. Reverté.
- JENKINS D., S. V. (2004). Química del agua. México: Limusa, Noriega editores.
- Lenore S. Clesceri, W. C. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. SM 5220-c.

- Llena, M. J. (2011). La calidad del agua y sus usos diferentes en ganadería. Divagaciones Alimnetarias.
- López-Galán, J. (2006). Separación de plata, mercurio y cromo de residuos provenientes de los análisis de la demanda química de oxígeno (DQO). Ingeniería y competitividad colombiana .
- Ma, L. J. (2011). La calidad del agua y sus usos diferentes en ganadería. Divagaciones Alimnetarias.
- Marín Galvín, R. (2003). Físicoquímica y microbiología de los medios acuáticos, tratamiento y Control de calidad de aguas. España: Ed. Serv.
- NMX-AA-030/1-SCFI-2012, N. o. (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 REFLUJO ABIERTO.
- Palacios, P. C. (2016). SUSTITUCIÓN DEL AGENTE OXIDANTE EN LA DETERMINACIÓN DE LA DQO Y TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS GENERADOS: HACIA UN ANÁLISIS SUSTENTABLE. TOLUCA: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO.
- Ramalho, R. (2003). Tratamiento de aguas residuales. México: Reverté.
- Ramírez, A. V. (2008). Intoxicación ocupacional por mercurio. Obtenido de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1025-55832008000100010
- Raposo, F., A, R. M., B. R., & M., A. (2008). Assessment of a modified optimized method for determining chemical oxygen demand of solid substrates and solutions with high suspended solids content. . Talanta.
- Romero Rojas, J. (2005). Calidad del Agua. Escuela Colombiana de ingeniería.
- SKOOG, D. (2001). Química Analítica. México: Ed 7 .

- SKOOG, D. e.-H. (2008). Estandarización de métodos analíticos usados para el análisis del agua en el laboratorio del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales. Universidad Industrial de Santander.
- Villamizar, M. (2008). Estandarización de métodos analíticos usados para el análisis del agua, en el laboratorio del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales. Universidad Industrial de Santander: CEIAM.
- Vyrides, I., & C., S. D. (2009). A modified method for the determination of chemical oxygen demand (COD) for samples with high salinity and low organics. Bioresource Technology.