

ANÁLISIS DE LAS FRACCIONES DE DQO EN LAS AGUAS DE LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR).

JOHN FREDY MORANT CARMONA

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA-UNAD
ESCUELA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE-
ECAPMA

CEAD MEDELLÍN

2017

ANÁLISIS DE LAS FRACCIONES DE DQO EN LAS AGUAS DE LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR).

Ingeniero de Alimentos John Fredy Morant Carmona

Director: Ingeniero Ambiental, M. Sc Luis Fernando Restrepo Lagos

Tesis presentada como requisito para optar por el título de:

Ingeniero Ambiental

Línea de investigación:

Gestión y manejo ambiental

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA-UNAD
ESCUELA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE.
ECAPMA
CEAD MEDELLÍN

2017

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos a:

A Dios por sostenerme y regalarme sabiduría e inteligencia para realizar este trabajo.

A mi Esposa Elizabeth Vélez por su apoyo incondicional y su voz de aliento durante el desarrollo de este trabajo.

A mi tutor Luis Fernando Restrepo Lagos, por su orientación y apoyo para sacar adelante esta investigación.

A Andrea González, Oladier Hoyos, Andrés Alfonso, Luz Adriana Restrepo y a todos mis compañeros de operación de la planta de tratamiento de aguas residuales por su ayuda en cada momento que lo solicite en el desarrollo de la investigación.

Porque Jehová da la sabiduría, Y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia.

Proverbios 2:6

Resumen

Este trabajo presenta las fracciones de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y su dinámica, obtenidas para una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la ciudad de Medellín, el cual se realizó por un periodo de 6 meses (marzo 29 a septiembre 29 de 2016) en las diferentes líneas de tratamiento (Afluente Primario, Efluente Primario, Efluente secundario y Efluente final). Dichas fracciones son obtenidas con la ayuda de 984 datos arrojados por el laboratorio de control calidad aguas de empresas públicas de Medellín mediante el análisis de DQO, DBO_5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días) y DBO_{32} (Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 32 días). Los datos del laboratorio fueron: DQO fácilmente biodegradable (S_s), DQO lentamente biodegradable (X_s), DQO soluble no biodegradable (S_i) y DQO particulada no biodegradable (X_i). Dichas fracciones se hallaron por medio del protocolo de Stowa (asociación holandesa de investigación aplicada al agua), la cual se compone de la una filtración (a 0,45 micras) de las muestras y los respectivos análisis de DQO y DBO_5 (totales, como solubles), además de DBO_{32} , con la cual se obtuvo la DBO_u (DBO última), que permitió obtener la relación (DBO_5/DBO última). Esta relación (depende de cada PTAR) y se realizó en el laboratorio con el equipo Oxitop (para hallar la DBO por respirometría), la cual es necesaria para hallar la fracción DQO lentamente biodegradable (X_s). De igual manera, se diseñó el proyecto de investigación para llevarlo a cabo con las muestras obtenidas y analizadas por laboratorios certificados durante un periodo de 6 meses, tiempo en el cual se pudo verificar el grado de biodegradabilidad del agua del afluente y sus respectivas fracciones de DQO, igualmente para todo el tren de tratamiento y su dinámica inherente a dichas fracciones.

Palabras claves: Fraccionamiento de la DQO, aguas residuales, DBO_5 , DBO_u .

Abstract

Key Words: Fragmentation of the COD, wastewater, BOD₅, BOD_u.

The following work presents the fractions of the COD and its dynamic, obtained for a Residual Water Treatment Plant in Medellin city, in which it was carried out in a period of 6 months approximately (from March 29th to September 29th 2016), in the different lines of treatment (Primary tributary, primary Effluent, secondary effluent and secondary final), said fractions are obtained with the help of 984 datum produced by the laboratory by way of the analysis of COD, BOD₅, and BOD₃₂. The BOD fractions that were investigated and the ones that were worked on from the laboratory were:

Easily biodegradable COD (S_s), slowly biodegradable COD (X_s), soluble non-biodegradable COD (S_i), and particulate non-biodegradable COD (X_i).

Said fractions were found by application of the formulas used worldwide by the STOWA protocol (Netherlands Applied Water Investigation Partnership), which is composed of a filtration (to 0.45 microns) of the samples and the respective COD analysis and BOD (totals, like solubles) as well as of the BOD₃₂, with which the BOD_u (latest BOD) was obtained, that allowed it to get the ratio (BOD/BOD_u). This ratio (depends on each Residual Water Treatment Plant), and was performed in the laboratory with the Oxitop team (to find the COD by respirometers), which is necessary to find the slowly biodegradable COD (X_s) fraction.

The research project was designed to be carried out with the obtained samples and analyzed by certified laboratories during a 6-month period, time in which the grade of biodegradability of the water from the tributary and its respective COD fractions could be verified, and the same for the

whole treatment train and its dynamic inherent to said fractions.

Índice de contenido

Resumen	v
Abstract.....	vi
Lista de Figuras	x
Lista de gráficas.....	xi
Lista de tablas	xii
Introducción.....	1
Objetivos.....	3
1. Marco teórico.....	4
1.1. Sobre la calidad del agua a tratar.....	4
1.2. Sobre la PTAR.....	5
1.3. Sobre las fracciones de DQO.....	6
1.4. Conceptos sobre las diferentes fracciones.....	9
1.4.1. DQO fácilmente biodegradable (S_s).....	9
1.4.2. DQO lentamente biodegradable (X_s).....	9
1.4.3. DQO soluble no biodegradable (S_i).....	10
1.4.4. DQO particulada no biodegradable (X_i).....	10

1.5. Metodologías utilizadas para hallar las fracciones de DQO a nivel mundial.....	12
1.5.1. Método fisicoquímico:.....	14
1.5.1.1. Método fisicoquímico por stowa (sin DBO)	18
1.5.1.2. El protocolo de stowa utilizando la DQO, DBO ₅ y DBO _u	19
1.5.1.3 Método fisicoquímico sugerido por una empresa mexicana.	21
1.5.1.4. Método por DBO ₃₂ por Respirometria con Oxitop.	23
1.6. Principios básicos del proceso biológico del tratamiento de aguas residuales y su interacción con la materia orgánica.	26
1.7. Sobre procedimientos para determinar las fracciones de DQO.....	27
2. Metodología.	30
2.1. Recopilación de información en fuentes secundarias.	30
2.2. Muestreos y análisis de muestras.	30
2.2.1 Toma de muestras.	31
2.2.2 Análisis de muestras.	33
2.2.2.1. Análisis de laboratorio utilizados para obtener las fracciones de DQO:.....	33
2.2.2.1.1. Separación física por filtración al vacío.	34
2.2.2.1.2. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	34
2.2.2.1.3. Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO ₅ (winkler) incubación a cinco días y electrodo de luminiscencia.	35

2.2.2.1.4. Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO_{32} empleando el método respirometrico para analizar la DBO última.....	36
2.3. Resultados:	38
2.4. Análisis de resultados.....	41
2.4.1. Resultado relación DBO_5 : DQO.....	42
2.5. Análisis de las Fracciones de DQO en el Tratamiento AP.	45
2.6. Comparación con otras plantas.....	62
3. Conclusiones y recomendaciones.	63
3.1. Conclusiones.....	63
3.2. Recomendaciones.	65
3.3. Bibliografía	66

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama de flujo PTAR.....	5
Figura 2. Fraccionamiento de la DQO	9
Figura 3. Clasificación de las fracciones de DQO.....	12
Figura 4. Acondicionamiento y análisis de muestra	14
Figura 5. Las fracciones de DQO por el protocolo de stowa	18
Figura 6 . Diagrama de Flujo y Toma de Muestras PTAR.....	30
Figura 7 . Cronograma de toma de muestras para fracciones de DQO (2016)	32
Figura 8. Recopliación de datos y cálculos de fracciones.....	33

Lista de gráficas

Gráfica 1. Relación DBO_5 : DQO en 6 meses.....	42
Gráfica 2. DQOfb en todo el tratamiento.....	45
Gráfica 3. Fracciones de DQO en el AP	46
Gráfica 4. DQO biodegradable vs DQO no biodegradable AP.	46
Gráfica 5. DQO biodegradable DQO vs DQO no biodegradable en el AP.....	47
Gráfica 6. DQO pnb vs snb en el AP	48
Gráfica 7. DQO fb en todo el tratamiento.....	49
Gráfica 8. Fracciones de DQO en el AP.	49
Gráfica 9. DQO biodegradable vs DQO no biodegradable en el AP.....	50
Gráfica 10. % de DQO biodegradable vs % de DQO no biodegradable en el AP.....	51
Gráfica 11. X_i AP vs X_i EP	52
Gráfica 12. DQO S_s AP vs DQO S_s EP.....	53
Gráfica 13- comparacion fracciones AP vs EP.....	54
Gráfica 14- comparacion fracciones EP vs ES	55
Gráfica 15. Comparación fracciones DQO ES vs EF	56
Gráfica 16. dinamica de las fracciones de DQO en la PTAR.	57
Gráfica 17. Comparación del % de la fraccion bio vs no bio en 3 PTARS	62
Gráfica 18. Comparación fracciones de DQO en el AP de las PTAR.....	62

Lista de tablas

Tabla 1. Comparación de clasificación de las fracciones de DQO.....	11
Tabla 2. Métodos para la caracterización de las distintas fracciones del agua residual.....	13
Tabla 3. Fórmulas para hallar las fracciones de DQO.	17
Tabla 4. Fracciones de DQO promedio en el AP.....	38
Tabla 5. Fracciones de DQO promedio en el EP.....	38
Tabla 6. Fracciones de DQO promedio en el AP y valores típicos	39
Tabla 7. Fracciones AP por Respirometria Oxitop.....	39
Tabla 8. Fracciones de DQO promedio en el ES	39
Tabla 9. Fracciones de DQO promedio en el EF.....	40
Tabla 10. Resultados análisis LCCA	41
Tabla 11. Rango de biodegradabilidad.....	43
Tabla 12. Valores para la relación DBO: DQO en AP encontrados en la bibliografía.....	43
Tabla 13. Valores medios de la DQO encontrados en bibliografía y comparados con el valor medio obtenido en este estudio.....	43
Tabla 14. Valores medio del % DQO soluble en la bibliografía comparados con el valor medio obtenido en este estudio	44

Lista de fotografías.

Foto 1. Papel de filtro de fibra de vidrio y sistema de filtración	14
Foto 2. Termoreactor y preparación de viales de digestión para análisis de DQO.....	15
Foto 3. Incubación de muestras de DBO₅ en la oscuridad a 20°C.	15
Foto 4. Muestra de EP para análisis DBO₃₂ por respirometría con oxitop	23
Foto 5. lectura de DBO₃₂ por respirometría con el control del oxitop	24
Foto 6. Lectura de DBO del EP expresada en mg/l	25

Introducción.

Ante la importancia que tiene las aguas residuales en el mundo, surge la necesidad de evaluar las fracciones de la DQO en los diferentes procesos del tratamiento de las aguas residuales de la línea líquida de la PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales), con el ánimo de determinar cuanta de la DQO total es biodegradable y cuanta no, además contar con unos primeros datos de estas fracciones en el afluente, tratamiento primario y biológico para apoyar la toma de decisiones a nivel operativo.

En ese sentido, no cabe duda de que, el agua residual que está ingresando a la PTAR el día de hoy, no es igual en su composición al agua caracterizada para efectos de diseño de la planta en los años 90. En su momento se conocía que el 70% era agua residual no doméstica y un 30% de aporte doméstica, pero nunca se ha realizado un estudio que muestre las fracciones de DQO de las aguas que llegan a la planta, ni su dinámica por los diferentes procesos y/o operaciones.

Por consiguiente, el crecimiento poblacional e industrial en la zona sur del Valle de Aburra, ha incrementado el aporte y el nivel de contaminación de los vertidos líquidos, trayendo consigo cambios en las características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales en el afluente de la PTAR. De lo anterior, la naturaleza cambiante de la contaminación de las aguas residuales urbanas refleja el comportamiento de los diferentes vertimientos de la zona de influencia a la cual sirve la PTAR, y crea el desafío de conocer y profundizar más sobre la composición química de las aguas a tratar y así tener herramientas que sirvan para optimizar los procesos y/o operaciones de la planta; además de conocer por primera vez las fracciones de DQO de las aguas que llegan a la planta y su dinámica durante todo el tratamiento.

Siguiendo ese mismo orden de ideas, este trabajo busca conocer la biodegradabilidad de las aguas residuales que ingresan a la PTAR, con el fin de apoyar las decisiones operativas al interior de la planta, y que tendrán utilidad predictiva. Igualmente, conocer el comportamiento de las diferentes fracciones de DQO en los efluentes del tratamiento primario, el tratamiento secundario y final, para poder evaluar el desempeño de estas operaciones y/o procesos que son tan importantes en el tratamiento del agua residual.

Objetivos.

Objetivo general:

Determinar la dinámica de las fracciones de la DQO en las diferentes etapas de la línea líquida del proceso de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).

Objetivos específicos:

1- Caracterizar las fracciones de DQO en el afluente, efluente primario, secundario y final de la PTAR.

2- Analizar la dinámica de las fracciones de DQO obtenidas en las diferentes etapas del tratamiento.

1. Marco teórico.

1.1. Sobre la calidad del agua a tratar.

Es importante conocer que fuera del agua residual que llega a la PTAR, hay otros flujos como: aguas de desechos de baños móviles, aguas de pozos sépticos, natas de sedimentación primaria y aguas del centrado de las centrifugas espesadoras y deshidratadoras que van a aportar contaminación al proceso de tratamiento y por ende DQO y DBO₅, las cuales harán parte de las fracciones de DQO que se van a calcular.

Por con siguiente, en el manual de operación de la PTAR están consignados varios conceptos sobre la relación entre la DQO y la DBO₅:

La DQO es generalmente mayor que la DBO, pero la relación DQO y la DBO₅ varía de planta a planta. La relación normal de DBO₅: DQO para las aguas residuales crudas es de 0.5:1.0.

La relación DBO₅: DQO medida durante el proceso de diseño de la PTAR fue de 0,44:1,0

Las características del Afluente Primario (AP) en promedio anual que se esperaba en la PTAR eran de una DBO₅ de 210 mg/L y unos SST de 380 mg/L (datos de bases de diseño años 1993 y 1994).

En ese sentido, para el diseño del tratamiento primario las características del Efluente Primario (EP) que se esperaba eran una DBO₅ de 141 mg/L y SST de 168 mg/L.

En la sedimentación primaria se puede remover 33% de DBO₅ (del 20-35%) y 56% de los SST (del 40-60%). “La relación entre la DQO y la DBO es usada para estimar la biodegradabilidad de un vertido así:

- $DQO/DBO \geq 5$ (No biodegradable)
- $DQO/DBO \leq 1,7$ (Muy biodegradable)

- Para un agua residual doméstica, esta relación oscila entre 2,0 y 2,5.

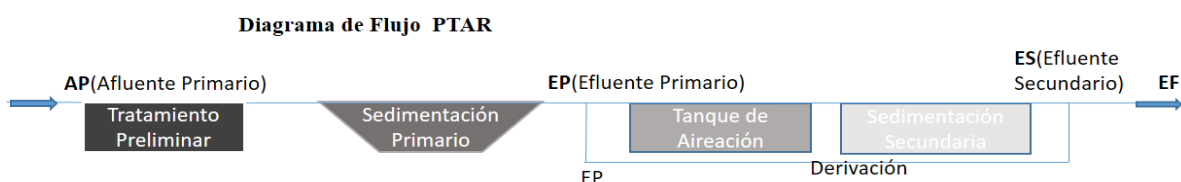
Tanto la DQO como la DBO se emplean para determinar la calidad del agua o la carga contaminante de un vertido, para diseñar las unidades de tratamiento biológico y para evaluar y/o controlar la eficiencia de los tratamientos” (Lozano-Rivas, 2012). Igualmente, las fracciones de DQO se pueden utilizar como insumos en programas de simulación de plantas de tratamiento de aguas residuales.

1.2. Sobre la PTAR.

La PTAR, trata las aguas crudas provenientes de la zona Sur del Valle de Aburrá (la Estrella, Sabaneta, Itagüí, Envigado y parte de Medellín), proporcionándoles un tratamiento de tipo secundario. El agua cruda es recogida por alcantarillados sanitarios y combinados, a través de los interceptores oriental y occidental que se encuentran paralelos al río Medellín.

El tratamiento de las aguas residuales, presenta dos líneas de proceso una líquida, que consiste en someter el agua residual a un conjunto de procesos físicos y biológicos, con el fin de eliminar los elementos, sustancias o compuestos contaminantes y una línea sólida (que comprende los lodos primarios y secundarios, los cuales se llevan al tratamiento de digestión anaeróbica, ya estabilizados van a deshidración para obtener el biosólido y luego disposición final). A su vez, en la Planta se cuenta con un sistema de control de olores.

Figura 1. Diagrama de flujo PTAR.



Fuente: elaboración propia.

De lo anterior, el proceso comienza en la etapa de cribado, donde se retiran materiales grandes que traen consigo las aguas residuales que ingresan a la planta, a su vez las partículas de arenas son removidas por los desarenadores, los cuales junto con las rejillas hacen parte del edificio de tratamiento preliminar. Allí se cuenta con bombas que elevan el flujo a un nivel tal que el agua pueda fluir por gravedad hacia el resto de procesos.

Por otra parte, las aguas residuales después de haber pasado por un tratamiento preliminar continúan hacia el tratamiento primario que se realiza a través de los sedimentadores primarios donde se remueve parte de los sólidos y de la DBO. Luego de ello, el agua sigue su recorrido hacia el tratamiento secundario el cual es realizado mediante un sistema de lodos activados, donde una parte del agua residual se trata biológicamente, ya que una porción proveniente del efluente primario es derivada, mezclándose con el efluente de tanques de sedimentación final o secundaria, y esta mezcla se constituye en el Efluente Final, el cual va directamente al río Medellín.

Por consiguiente, el lodo removido en el proceso de lodos activados es espesado por centrífugas espesadoras, los cuales se mezclan con los lodos de sedimentación primaria. Esta mezcla es bombeada hacia los digestores anaeróbicos, en los cuales se estabiliza el lodo y se produce gas metano para generar energía eléctrica, la cual abastece una parte de la planta. Los lodos digeridos o biosólidos son deshidratados por centrífugas deshidratadoras, para finalmente ser transportados por camiones para su respectiva aplicación.

1.3. Sobre las fracciones de DQO.

La naturaleza de la contaminación que llega a la planta es diversa y cambiante, lo que hace que el proceso de tratamiento en algunas ocasiones sea complejo. Es por ello que conocer mejor la composición del agua residual que llega a la PTAR y su dinámica durante todos los procesos, permitirá fortalecer la toma de decisiones sobre cómo tratar estas aguas según su calidad.

En ese sentido, aclaran los autores del artículo científico sobre fraccionamiento de materia orgánica que: “Un aspecto importante en el diseño y la operación de los sistemas de tratamiento biológico, ha sido el reconocimiento de la existencia de diferentes velocidades de degradación de las fracciones de los sustratos” (Orhon & Cojgor, 1997, págs. 283-293).

Como se señala, conocer las fracciones de DQO, es conocer más de: “la materia orgánica, en virtud de su tamaño, ha sido clasificada en soluble y particulada. Desde la perspectiva bioquímica, se clasifica en biodegradable y no biodegradable” (Wentzel, Mbewe, & Ekama, 1999, págs. 327-336). La unión de estas dos clasificaciones da origen a cuatro fracciones principales: biodegradable soluble, biodegradable particulada, no biodegradable soluble y no biodegradable particulada (Park & Novotny, 1997, pág. 6)

Con referencia a lo anterior, “la fracción biodegradable soluble está relacionada con compuestos que pueden ser directamente adsorbidos para síntesis de nuevo material celular, como ácidos grasos volátiles, carbohidratos simples, aminoácidos, alcoholes, entre otros, por tal motivo es, por lo común, denominado fracción rápidamente biodegradable. La fracción biodegradable particulada está relacionada con macromoléculas que se deben desglosar en formas más simples, antes de ser aprovechadas por los microorganismos. “La ruptura de este tipo de materia orgánica, se realiza a través de proceso de hidrolisis con enzimas extracelulares” (Rodríguez, Mañunga, & Cárdenas, 2012, pág. 448). (Gujer, Henze, Matsuo, & Marais, 1995) ,establecieron que la hidrolisis requiere de dos horas antes de que la materia orgánica biodegradable particulada sea transportada a través de la membrana celular y metabolizada, razón por la cual, a esta fracción, se le denomina lentamente biodegradable; sin embargo, el tiempo para la hidrolisis de este tipo de materia orgánica no es estándar, presentándose diversas velocidades de degradación.

De igual manera, “La fracción no biodegradable o inerte está compuesta por sustancias, como ácidos húmicos o fúlvicos disueltos. También, se ha identificado que los subproductos generados en la actividad microbiológica hacen parte de este tipo de materia orgánica” (Dulekuegen, Dogruel, Karahan, & Orhon, 2006, págs. 273-282).

En efecto, para estimar las fracciones de materia orgánica en el agua residual, se han desarrollado diversos métodos: desde los simples que emplean separación física, hasta métodos más elaborados, involucrando pruebas respirométricas” (Mathieu & Etienne, 2000, págs. 1233-1246) y cromatografía. Combinar la separación física (filtración) con análisis de laboratorio estandarizados, como DQO Y DBO5, permite determinar, con alto grado de precisión y rapidez, las principales fracciones de materia orgánica en el agua residual.

Por otra parte, los autores del trabajo de Fraccionamiento de DQO del agua residual de Toluca por el protocolo de stowa, hablan sobre aplicar el protocolo físico-químico de caracterización propuesta por la Asociación Holandesa de Investigación Aplicada al Agua (STOWA), para determinar el patrón de fraccionamiento de la DQO en las aguas residuales de la ciudad de Toluca, además realizaron pruebas respirométricas para hallar el valor de algunos de los parámetros cinéticos del ASM1 (El modelo número 1 de lodos activados), así como para investigar la cantidad de biomasa heterótrofa inicialmente presente en las aguas residuales (Vasquez, Ortega., R., & Falla, 2012, pág. 21).

No obstante, las fracciones de la DQO con las que se acostumbra a trabajar son las mismas que emplean los modelos de lodos activados del International Association of Water Quality (IAWQ) y son los siguientes:

DQO fácilmente biodegradable (*S_s*).

DQO lentamente biodegradable (*X_s*).

DQO soluble no biodegradable (*S_i*).

DQO particulada no biodegradable (X_i).

Figura 2. Fraccionamiento de la DQO



Fuente: Elaboración propia

1.4. Conceptos sobre las diferentes fracciones.

1.4.1. DQO fácilmente biodegradable (S_s).

Esta fracción, que se asimila a la DQO soluble en el agua, es la que la biomasa consume más rápidamente (en pocos minutos), generando una rápida y elevada demanda de oxígeno. Los compuestos que conforman esta fracción son sustancias solubles, de bajo peso molecular, como es el caso de azúcares, alcoholes y ácidos grasos.

1.4.2. DQO lentamente biodegradable (X_s).

Esta fracción se relaciona con la DQO biodegradable no soluble, o particulada, y habitualmente es la fracción biodegradable mayoritaria. Está formada por moléculas solubles de elevado peso molecular, sustancias coloidales y partículas sólidas. Todas ellas tienen en común que no son de fácil degradación de la biomasa. Antes, deben ser hidrolizadas por las enzimas segregadas por los microorganismos y convertidas en moléculas solubles, de bajo peso molecular y, por tanto, de fácil asimilación para las células. La etapa de hidrólisis es lenta, es la etapa que

controla el proceso y lleva asociados tasas de consumo de oxígeno mucho más bajas que las de consumo de la DQO fácilmente biodegradable.

1.4.3. DQO soluble no biodegradable (Si).

Esta fracción no se ve alterado por el contacto con la biomasa, no sufre ningún tipo de variación durante el tratamiento biológico, ni separación física y sale con el efluente. Si esta fracción es mayoritaria en el efluente, los procesos biológicos quedan directamente descartados.

1.4.4. DQO particulada no biodegradable (Xi).

Esta fracción, aunque no es consumida por la biomasa, gran parte decanta junto a los lodos, reduciendo la concentración a la salida en relación a la entrada. Al respecto, (Rodríguez, Mañunga, & Cárdenas, 2012, pág. 449), hablan de Fraccionamiento de la Materia Orgánica así: La materia orgánica, se fracciona en virtud de su biodegradabilidad y su tamaño en:

- Biodegradable soluble (BS)
- Biodegradable particulado (BP)
- no Biodegradable soluble (nBS)
- no Biodegradable particulada (NBp).

Esta clasificación describe la misma función de la primera, pero con diferente nombre:

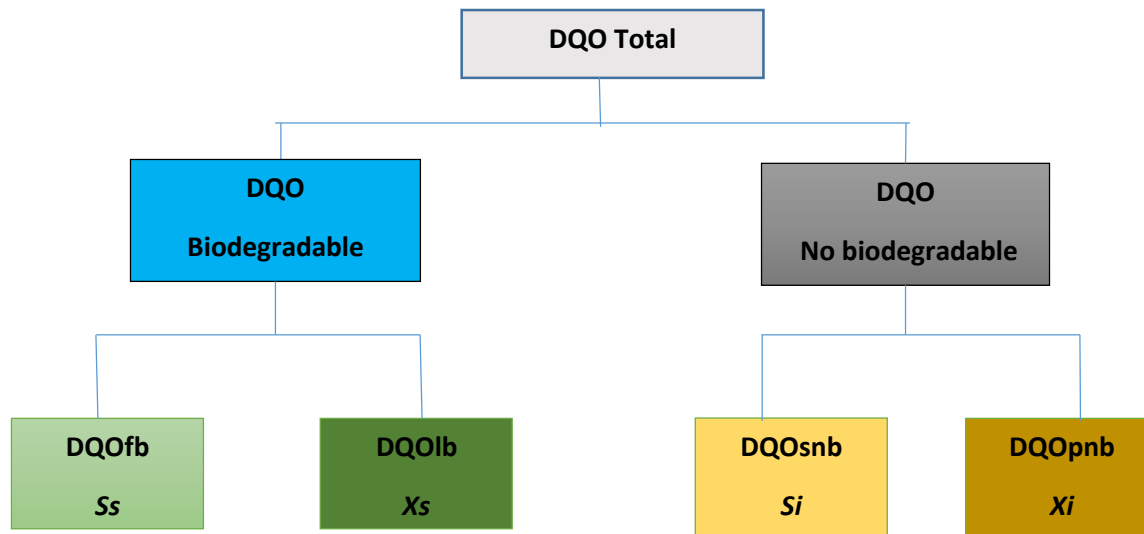
Tabla 1. Comparación de clasificación de las fracciones de DQO.

International Association on Water Quality (IAWQ)	Otros autores	
DQO fácilmente biodegradable (DQOfb)	Biodegradable soluble (BS)	DQO Soluble fácilmente biodegradable (<i>Ss</i>)
DQO lentamente biodegradable (DQOl _b)	Biodegradable particulado (BP)	DQO particulada lentamente biodegradable (<i>Xs</i>)
DQO soluble no biodegradable (DQO _{snb})	no Biodegradable soluble (nBS)	DQO soluble inerte (<i>Si</i>)
DQO particulada no biodegradable (DQOp _{nb})	no Biodegradable particulada (nBP).	DQO particulada inerte (<i>Xi</i>)

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta la figura 3, la cual muestra la clasificación de las fracciones de DQO:

Figura 3. Clasificación de las fracciones de DQO



Fuente: Elaboración propia (adaptado de Ekama et al., 1986).

1.5. Metodologías utilizadas para hallar las fracciones de DQO a nivel mundial.

Se cuentan con 2 principales metodologías para determinar las fracciones de DQO, entre ellas combinar separación física (filtración) con análisis de laboratorio estandarizados, como DQO y DBO_5 (*método físico – químico*), o utilizar métodos respirométricos.

Ahora aún no hay una metodología estandarizada y cada investigador se inclina por aquella que le brinda mayor confiabilidad, por ejemplo, para hallar las diferentes fracciones se tiene una infinidad de posibilidades, como se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2. Métodos para la caracterización de las distintas fracciones del agua residual.

Fracción	Método	Fuente
<i>S_s</i>	Filtración + respirometría	Levine et al., (1985); Spanjers y vanrolleghem (1995); Roeleved et al., (2002); Jiang et al., (2005), Lu et al., (2010)
<i>S_s</i>	Floculación+Filtración + Respirometría	Mamais et al, (1993); Lu et al., (2010)
<i>S_s</i>	Diferencia entre DQO soluble y <i>S_i</i>	Van Waverem et al, (2010)
<i>S_s</i>	Respirometría con alimentación cíclica durante 12 h al día.	Ekama y Marais (1970); Ekama et al, (1986)
<i>S_i</i>	Igual a la DQO del efluente	Ekama et al, (1986); Sperandio y Espinosa (2008)
<i>S_i</i>	90% de la DQO del efluente	Siegrist y Tschui (1992); Van Waveren et al, (1999); Jiang et al. (2005)
<i>S_i</i>	Igual al DQO inerte del efluente, restándole la DQO biodegradable que pueda quedar	Henze (1992)
<i>S_i</i>	Ensayo largo de DBO	Ekama et al, (1986); Leusouef et al, (1992)
<i>X_s</i>	Respirometría	Kappeler y Gujer (1992), Spanjers y vanrolleghem (1995); Van Waveren et al, (1999)
<i>X_s</i>	Restando el resto de fracciones a la DQO total para cerrar el balance	Ekama et al, (1986).
<i>X_i</i>	Ajuste de ratio DBO/DQO	Melcer et al, (2003).
<i>X_i</i>	Ajuste de la producción de fango en el bioreactor	Henze (1992); Lu et al. (2010)
<i>X_i</i>	Ensayo largo de DBO	Ekama et al, (1986); Leusouef et al, (1992)
<i>X_i</i>	Diferencia entre la DQO particulada y <i>X_s</i>	Van Waveren et al, (1999)

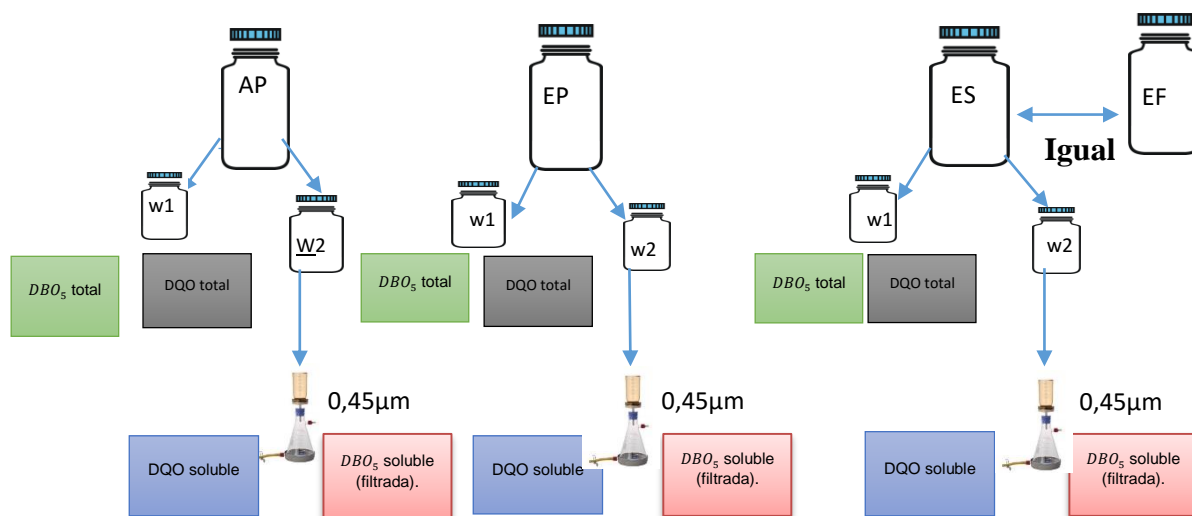
Fuente: adaptada de la tesis doctoral Modelado y simulación de sistemas de depuradoras-

Universidad de Granada-2014.

1.5.1. Método fisicoquímico:

Se compone de filtración al vacío (foto 1) y análisis de DQO (preparaciones viales para DQO en foto 2) y DBO_5 (Incubación de muestras a 20°C en oscuridad en foto 3).

Figura 4. Acondicionamiento y análisis de muestra.



Fuente: Elaboración propia

Foto 1. Papel de filtro de fibra de vidrio y sistema de filtración.



Fuente: Elaboración propia.

Foto 2. Termoreactor y preparación de viales de digestión para análisis de DQO



Fuente: elaboración propia.

Foto 3. Incubación de muestras de DBO_5 en la oscuridad a 20°C .



Fuente: elaboración propia.

- Procedimientos a realizar para el cálculo del fraccionamiento de la DQO:

- Cálculo de las fracciones de DQO:

Para el cálculo de las fracciones de DQO se parte de los análisis de las concentraciones de DQO y DBO_5 de las diferentes muestras y se clasifican de la siguiente manera:

Materia orgánica en cada muestra de agua residual corresponde a la

DQO total

La materia orgánica biodegradable es calculada por medio de la

DBO_5 Total

La DQO fácilmente biodegradable (DQOfb) corresponde a la

DBO_5
Soluble
(filtrada).

La DQO lentamente biodegradable (DQOlb), se calcula:

DBO_5 Total

Menos

DBO_5 Soluble
(filtrada).

La materia orgánica no biodegradable o inerte, se calcula:

DQO total

Menos

DBO_5 Total

La DQO soluble no biodegradable (DQOsnb), se calcula:

DQO soluble

Menos

DBO_5
Soluble

DQO particulada no biodegradable (DQOpnb), se calcula:

(DQO total Menos DBO_5 Total) - (DQO soluble menos DBO_5 Soluble)

Ósea sería La materia orgánica no biodegradable o inerte - La DQO soluble no biodegradable (DQOsnb).

Luego de clasificar las fracciones se procede a aplicar las fórmulas de la tabla 3.

Tabla 3. Fórmulas básicas para hallar las fracciones de DQO.

DQOfb =	DBO soluble				
DQOlb =	DBO_T	MENOS	DQOfb		
DQOsnb =	DQO soluble	MENOS	DBO soluble		
DQOpnb =	DQO_T	MENOS	DBO_T	MENOS	DQOsnb

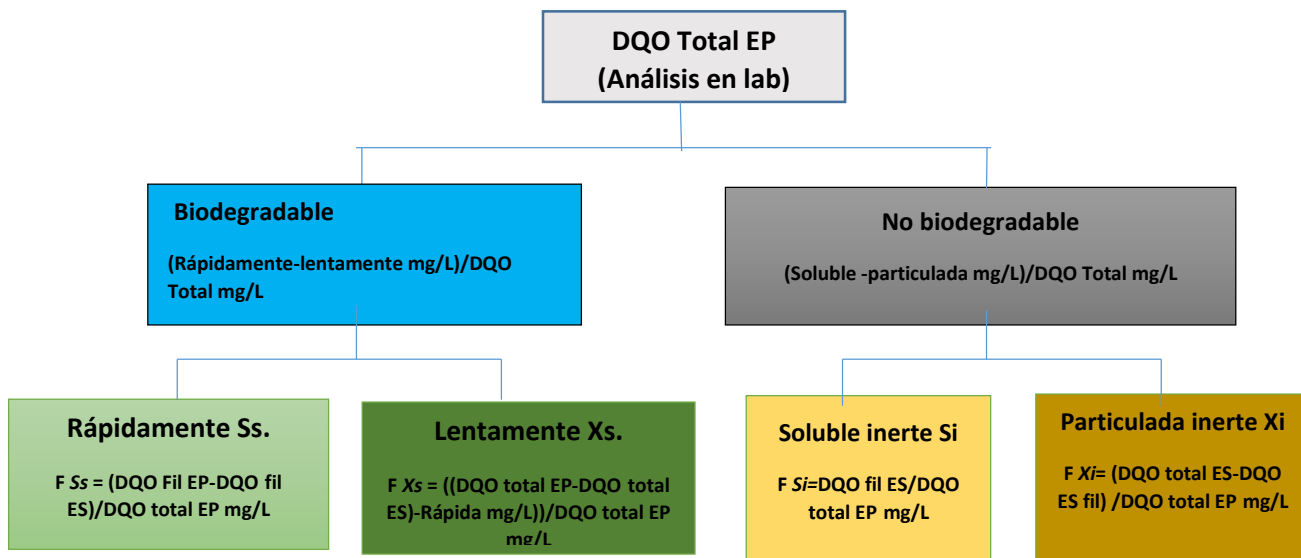
Fuente: elaboración propia.

Luego de aplicar las fórmulas, se lleva a fracción el valor obtenido, para que el resultado sea más fácil de analizar. Para llevar a fracción basta dividir el valor resultante sobre el valor de la DQO total y tener presente que la sumatoria de las fracciones debe ser = 1

1.5.1.1. Método fisicoquímico por stowa (sin DBO)

Sin DBO: Este, se compone de filtración (a 0,45 micras) y análisis de DQO y DBO_5 , algunos autores solo utilizan la DQO para hallar las fracciones de DQO. De allí, las fracciones calculadas por el protocolo de stowa (sin utilizar la DBO_5) contemplan los siguientes cálculos, como la figura 5:

Figura 5. Las fracciones de DQO por el protocolo de Stowa.



Fuente: elaboración propia.

Ahora para las fracciones de DQO en el AP, se tuvieron las siguientes consideraciones:

1. En el tratamiento preliminar y primario de la PTAR (rejas, desarenadores y sedimentadores primarios), generalmente la degradación biológica es baja o nula.
1. Estos cálculos se hacen bajo la suposición que la remoción de DQO en tratamiento primario es sólo material particulado (no soluble), y se distribuye de la misma manera

que la proporción de material particulado biodegradable y no biodegradable que hay en el afluente secundario. En general, bajo las siguientes premisas:

- En promedio se remueve el 40% de la DQO particulada durante el tratamiento primario
- Los valores de remoción de DQO soluble en el tratamiento primario son despreciables (ver valores entre -0,1y 0,2%) despreciables
- Se estiman los valores para el AP suponiendo que en el tratamiento primario se remueve por igual, Material biodegradable y no biodegradable.

1.5.1.2. El protocolo de stowa utilizando la DQO, DBO₅ y DBO_u

Con este protocolo se hallaron las fracciones de esta investigación y se utiliza las siguientes formulas:

Suma de las fracciones de DQO por definición

$$DQO \text{ total} = S_i + S_s + X_s + X_i$$

Determinación de la fracción S_i

$$S_i = \text{DQO soluble efluente}$$

Determinación de la fracción S_s

$$S_s = \text{DQO soluble afluente} - S_i$$

Determinación de la fracción X_s

$$DBO(t) = DBO_u (1 - e^{-KBOD*t})$$

$$DQO \text{ b} = \frac{1}{1-f_{DBO}} DBO_u$$

$$DQO \text{ b} = S_s + X_s$$

$X_s = DQO \text{ b} - S_s$, $(1 - e^{-KBOD*t})$ está expression no se utilizó para efectos de cálculo, ya

Que no se realizó la gráfica de DBO en función del tiempo, sino que se halló la DBO_u (32 días)

Por respirometria con Oxitop.

Donde:

DQO total: DQO total del afluente

S_i : DQO soluble inerte

S_s : DQO soluble fácilmente biodegradable

X_s : DQO particulada lentamente biodegradable

X_i : DQO particulada inerte

DBO(t): gráfica de DBO en función del tiempo

DBOu: DBO última,

k_{DBO} : Constante cinética de orden 1.

DQO b: DQO biodegradable total

f_{DBO} : Factor de corrección=0.15 (dato teórico).

Determinación de la fracción X_i

$$X_i = \text{DQO total} - (S_i + S_s + X_s)$$

Para efectos de cálculo y llevar a fracción, basta dividir el valor resultante sobre el valor de la DQO total y tener presente que la sumatoria de las fracciones debe ser = 1.

Ejemplo para hallar las fracciones de DQO en el AP tenemos:

Datos AP: DQO total= 713 mg/L, DQO soluble=214 mg/L, DBO5=271 mg/L, DBO5 soluble=99 mg/L.

DQO soluble efluente= 37 mg/L

Para hallar la DBOu realizamos una DBO32 por respirometria(solo se realizó una para el AP,EP,ES y EF) y nos arroja unos resultados de DBO5= 218 mg/L y DBO32=278, con estos 2 datos hallamos

La relación $DBO_5/ DBO_{32}=0,784$.

Con esta relación llevamos las DBO_5 iniciales a DBO_u :

$DBO_5=271/0,784= 346$ y la DBO_5 soluble= $99/0,784= 126$. Ahora procedemos a aplicar las formulas:

$$1-S_s=DQO \text{ soluble afluente}-S_i$$

$$S_s=214/713=0,30-0,05=0,25$$

$$2-S_i=DQO \text{ soluble efluente}= 37/713=0,05$$

$$3- X_s = DQO b - S_s.$$

$$DQO b = \frac{1}{1-f_{DBO}} DBO_u, \text{ tenemos: } DQO b = \frac{1}{1-0,15} \times 346=407$$

$$X_s = DQO b - S_s = \frac{407}{713} = 0,57 - 0,25 = 0,32$$

$$4- X_i = DQO \text{ total} - (S_i + S_s + X_s) = 1 - (0,05 + 0,25 + 0,32) = 0,38.$$

Verificar que la sumatoria de las 4 fracciones sea 1.

1.5.1.3 Método fisicoquímico sugerido por una empresa mexicana.

De los componentes que intervienen en los procesos se dividirán en particulada ($> 0,45 \text{ micras}$) (X) y soluble ($< 0,45 \text{ micras}$). También se puede dividir en dos grupos la materia orgánica: biodegradable (S) y no biodegradable (I).

Las bacterias heterótrofas convierten la materia lentamente biodegradable en un sustrato asimilable por medio del hidrolisis por lo que X_s es convertido en S_s . El S_s puede dividirse a su vez en SF (Sustrato Fermentable), SA (Ácidos grasos volátiles), SPRO (ácido propionico), entre otros, y estos compuestos son tomados como alimento por las bacterias heterótrofas. La X_s

restante y X_i serán eliminados del sistema por medio de la sedimentación en el clarificador secundario. La fracción S_i no podrá ser eliminada y se considera que como entra sale.

Para calcular las fracciones se puede optar:

1. Obtener la DQO de la muestra del agua residual y la DQO de la muestra del agua filtrada con un filtro de 0,45 micras (Con el mismo equipo que se filtra la muestra para el cálculo de SST).
2. Obtener la DBO_5 de la muestra de agua residual y la DBO_5 soluble, igual al punto anterior. La DBO nos da la fracción biodegradable de la DQO.
3. Considerar el cálculo de la DBO limite dividiendo por 0,8 (relación DBO_5/DBO ultima)

Esta relación de 0,8(depnde de cada PTAR) debe revisarse en el laboratorio preferiblemente con el equipo Oxitop.

4. La DBO limite (DBO L) soluble nos dará el valor de S_s (Sustrato fácilmente biodegradable), la diferencia de la DBO L total menos la DBO L soluble nos dará la DBO L particulada X_s (Sustrato lentamente biodegradable).
5. La DQO soluble menos la DBO L soluble nos dará el S_i (Sustrato no biodegradable soluble) y la DQO particulada menos la DBO limite particulada nos dará el X_i .

Para realizar los cálculos por este método se utilizan las siguientes formulas:

$$S_s = DBO \text{ lim soluble}$$

$$X_s = DBO \text{ lim total} - DBO \text{ lim soluble} = DBO \text{ lim particulada}$$

$$S_i = DQO \text{ soluble} - DBO \text{ l soluble}$$

$$X_i = DQO \text{ particulada} - DBO \text{ L particulada}$$

1.5.1.4. Método por DBO_{32} por Respirimetria con Oxitop.

Para realizarlo se procede:

1. Para este método se toman las cuatro muestras de la PTAR (AP, EP, ES y EF) y se analiza la DQO de la muestra del agua residual y la DQO de la muestra del agua filtrada con un filtro de 0,45 micras (Con el mismo equipo que se filtra la muestra para el cálculo de SST).
2. Se monta la muestra original a un análisis de DBO_{32} .

Foto 4. Muestra de EP para análisis DBO_{32} por Respirimetria con Oxitop



Fuente: elaboración propia.

3. Al pasar los 32 días se lee la DBO_{32} con el control del Oxitop y se bajan los datos al computador (arroja los datos de DBO día a día y el tiempo transcurrido).

Foto 5. Lectura de DBO_{32} por Respirimetria con el control del Oxitop.



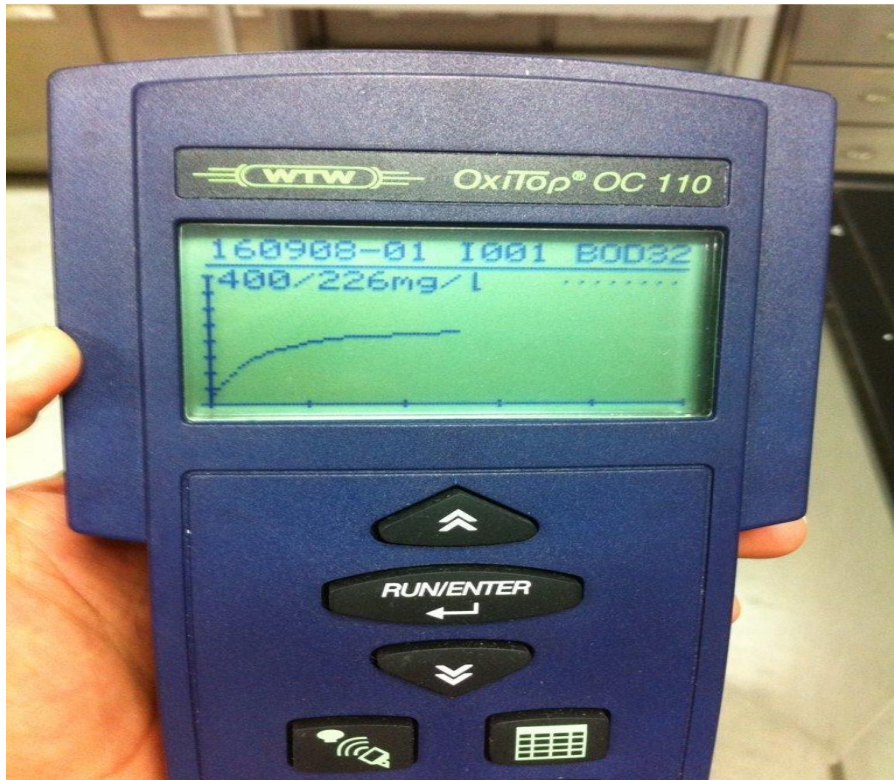
Fuente: elaboración propia.

4. Se toma la muestra que quedo en el frasco de Oxitop transcurridos los 32 días y se analiza la DQO de la muestra del agua residual y la DQO de la muestra del agua filtrada con un filtro de 0,45 micras (Con el mismo equipo que se filtra la muestra para el cálculo de SST).

En base a lo anterior, con los datos iniciales de DQO de la muestra del agua residual y la DQO de la muestra del agua filtrada y los datos finales (después de los 32 días) de DQO de la muestra del agua residual y la DQO de la muestra del agua filtrada, se procede a realizar los cálculos con el método de stowa.

De igual manera, se aprovecha también para hallar la relación (relación DBO_5/DBO última) en cada uno de las diferentes unidades de tratamiento de la PTAR.

Foto 6. Lectura de DBO del EP expresada en mg/L



Fuente: elaboración propia.

1.6. Principios básicos del proceso biológico del tratamiento de aguas residuales y su interacción con la materia orgánica.

En relación al tratamiento de aguas residuales, el metabolismo microbiano se desarrolla en varias etapas:

1. La materia orgánica rápidamente biodegradable, es decir, soluble y constituida

por moléculas simples, pasa directamente a través de la membrana celular y se metaboliza a alta velocidad.

2. La materia orgánica en suspensión y coloidal, que representa la mayor parte de la materia orgánica lentamente biodegradable, es adsorbida sobre la membrana citoplasmática de la célula y sufre un proceso de hidrólisis por acción enzimática para transformarse en un sustrato que sea fácilmente asimilable. Esto significa que esta fracción de la materia orgánica debe transformarse en moléculas más simples gracias a las enzimas extracelulares segregadas por las bacterias y, una vez transformada en sustrato asimilable, podrá metabolizarse igual que la fracción rápidamente biodegradable. Sin embargo, esta transformación es relativamente lenta y constituye la etapa limitante de la reacción global de síntesis celular.

3. Una fracción de materia orgánica metabolizada se transforma en material del nuevo protoplasma celular (anabolismo), mientras que la fracción que queda se utiliza para la producción de la energía necesaria para la síntesis (catabolismo).

4. De forma simultánea a la oxidación y producción de energía, hay una pérdida neta de masa activa por endogénesis en la que una parte de la materia asimilada queda completamente oxidada dando como productos finales CO₂ y agua y la parte restante, que

no es degradable, queda como residuo inerte, durante esta fase, el número de células viables disminuye con el tiempo.

En resumen, se puede decir que, en presencia de oxígeno disuelto, los microorganismos metabolizan la materia orgánica biodegradable, las reacciones bioquímicas que conllevan esta actividad metabólica se resumen en reacciones de síntesis de nuevos organismos, reacciones de producción, reacciones de producción de energía para el desarrollo de su actividad y reacciones de degradación de los propios microorganismos, consumiendo estas tres reacciones oxígeno hasta que el sustrato disponible se agota (Orhon & Artan, 1994) .

1.7. Sobre procedimientos para determinar las fracciones de DQO.

Desde que se publicó el primer modelo de fangos activos se seleccionó la concentración de DQO para caracterizar el influente, ya que permite establecer una equivalencia entre el sustrato, biomasa y consumo de oxígeno (Dold, Ekama, & Marais, 1980).

Desde entonces se han descrito diversos procedimientos para determinar las fracciones de DQO que componen el agua residual, pero ninguno de ellos se ha convertido en un procedimiento estandarizado. La mayoría de métodos son físico-químicos (Roeleveld, & Loosdrecht., 2002) (Roeleveld, & Loosdrecht., 2002), (Delrue, y otros, 2010) , biológicos (Ekama & Marais, 1986), (Ginestet, Maisonnier, & Spérandio , 2002), (Zhou, Wu, Wang, Tang, & Gu, 2010) o bien una combinación de ambos (Jiang, Liu, Kennedy, Schippers, & Vanrolleghem, 2005), (Lu, Zhang, & Zhang, 2010). Esta gran variedad dificulta en gran medida la comparación de resultados de distintos estudios llevados a cabo con ASMs (Lu, Zhang, & Zhang, 2010)

De lo anterior, la manera tradicional de analizar la composición del agua se basa en métodos físico-químicos relativamente simples que no están relacionados con el proceso biológico, por lo

que no son capaces de diferenciar las distintas fracciones en función de su biodegradabilidad y su velocidad de biodegradación (Brouwer, Klapwijk, & Keesman, 1998). Esto hace que la caracterización físico-química no sea apropiada (Peterson, Gernaey, Henze, & Vanrolleghem, 2003). Por otro lado, los resultados de respirometría dependen mucho de las condiciones experimentales (Orhon, D., Insel, G., Karahan, O., 2007) y pueden subestimar las fracciones biodegradables (Sollfrank, U., Kappeler, J., Gujer, W., 1992) ya que no miden el contenido total de DQO lentamente biodegradable (X_s) sino que únicamente son capaces de cuantificar el sustrato biodegradable rápidamente hidrolizable (Gatti, M., Garcia-Usach, F., Seco, A. and Ferrer, J., 2010). Es por ello que la selección del método a utilizar para caracterizar el agua residual depende de cada de investigador y de los recursos disponibles.

Asimismo, la determinación de S_s a partir de la separación de la DQO soluble depende mucho del tamaño de poro del filtro utilizado (Peterson, B., Gernaey, K., Henze, M. and Vanrolleghem, P. A., 2003) ya que es posible que parte del sustrato particulado retenido sea en realidad fácilmente biodegradable o que parte de la DQO soluble que pasa a través del filtro sea en realidad lentamente biodegradable (Sollfrank, U. and Gujer, W., 1991). Generalmente se lleva a cabo la separación soluble/particulada mediante filtros de tamaño de poro de $0.45 \mu\text{m}$ (Hocaoglu, S., Atasoy, E., 2013) y se han llevado a cabo estudios sobre este tema que han dado lugar a conclusiones contradictorias, ya que autores como (Lu, P., Zhang, X. and Zhang, D., 2010) obtuvieron valores similares de DQO con independientemente del tamaño del poro seleccionado ($0.45 \mu\text{m}$ o $0.1 \mu\text{m}$) o de la adición de una floculación previa, mientras otros autores como (Melcer, H., Dold, P., 2003) obtuvieron diferencias de más del 16 % cuando compararon los resultados del influente filtrado por $0.1 \mu\text{m}$ e influente previamente floculado. Según (Levine, A., Tchobanoglous, G., and Asano, T., 1985) el tamaño del material coloidal se encuentra entre 0.1 y $50 \mu\text{m}$, por lo que parte de esta materia atraviesa los filtros $0.45 \mu\text{m}$. Es por ello que

estos autores proponen un tamaño de poro de 0.1 μm para asegurar una correcta separación de la fracción realmente soluble.

Al respecto, (Jiang,T.,Liu,X, 2005) Compararon dos métodos de caracterización del agua residual para calibrar el Activated Sludge Model No. 1(ASM1) en un bioreactor aeróbico de membrana (MBR), por un lado, emplearon un método químico -biológico que combina separación física (filtración por 0.45 μm) para cuantificar la DBO soluble y la particulada y respirometria para determinar las fracciones biodegradables (X_s y S_s). Asumiendo además que, S_i se corresponde al 90 % de la DQO del efluente, X_i se determina por la diferencia entre DQO total y las fracciones S_s , X_s y S_i . Por otro lado, utilizaron el método físico-químico de STOWA (acrónimo holandés de la Fundación para la investigación Aplicada del Agua) (Van Waveren, 1999), que combina la separación química (filtración 0.45 μm) con análisis de DBO. Si se calcula también como el 90% de la DQO del efluente y S_s como la diferencia entre la DQO total soluble y S_i .

Ahora bien, la DQO total biodegradable se calcula a partir del valor de DBO y X_s se corresponde con la diferencia entre la DQO biodegradable y S_s . Finalmente, X_i se calcula como la diferencia entre la DQO total del influente y las tres fracciones determinadas anteriormente. La diferencia más significativa entre estos dos métodos es el valor de X_i considerablemente mayor cuando utilizan métodos físico-químico y que da diferencias considerables en la concentración de TSS (Sólidos suspendidos totales) en el biorreactor.

Por lo que, para la determinación de X_s , (Ginestet P. , 2002) afirmaron que no es apropiado utilizar ensayos respirométricos puesto que no son capaces de medir el contenido total de X_s y miden únicamente el sustrato biodegradable rápidamente hidrolizado. Por esta razón. Algunos autores han preferido centrarse en determinar la fracción X_i mediante el ajuste de la ratio DBO/DQO (Melcer,H.,Dold,P, 2003).

2. Metodología.

Para fines del proyecto, la metodología se realizó en tres fases principales:

2.1. Recopilación de información en fuentes secundarias.

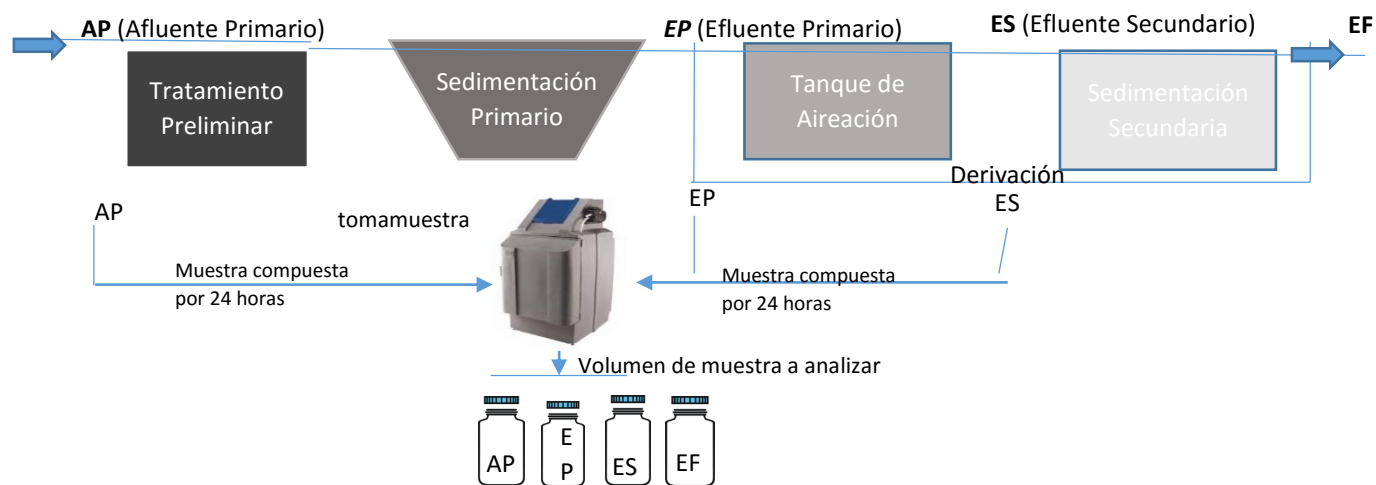
Se determinó las diferentes fracciones de DQO utilizadas a nivel mundial, igualmente sobre las diferentes metodologías para determinar las fracciones de DQO en una muestra obtenida de una PTAR, además de la influencia y la dinámica de las fracciones de materia orgánica en las etapas de la línea líquida en un proceso de tratamiento de agua residual.

2.2. Muestreos y análisis de muestras.

Los muestreos y análisis de muestras se llevarán a cabo por laboratorios acreditados por el IDEAM. Las muestras a analizar corresponden al Afluente Primario (**AP**), Efluente Primario (**EP**), Efluente Secundario (**ES**) y (**EF**) de la PTAR.

A continuación, se muestra una figura que representa el diagrama de flujo:

Figura 6. Diagrama de flujo y de toma de muestras de la PTAR.



Fuente: Elaboración propia

2.2.1 Toma de muestras.

La PTAR contrato un laboratorio certificado en toma de muestras para garantizar representatividad en todas las etapas donde se realizó el cálculo de las fracciones de DQO. Para realizar el muestreo se procedió de la siguiente manera:

Se determinaron 61 días (en un lapso de tiempo de 6 meses, según calendario de toma de muestras anual de la PTAR) para realizar muestreos compuestos (es una combinación de muestras individuales de agua residual tomadas a intervalos predeterminados a fin de minimizar los efectos de variabilidad de la muestra individual) de 24 horas, con una frecuencia de toma de muestra (de cada 20 minutos) y un volumen equivalente a 100 ml, los cuales fueron llevados a refrigeración (4°C).

Se obtuvo la muestra compuesta mezclando en un balde con llave los volúmenes de cada porción necesarios según la siguiente fórmula:

$$V_i = \frac{V \times Q_i}{n \times Q_p} \text{ donde:}$$

V_i = volumen de cada alícuota

V = volumen total a componer

Q_i = caudal instantáneo de cada muestra (PTAR)

Q_p = caudal promedio durante el muestreo (PTAR)

n = número de muestras tomadas

De igual manera, se cuenta con un cronograma de toma de muestras en la PTAR, en el cual se indica los días en los cuales se van a realizar los diferentes muestreos. Para el caso de las

fracciones de DQO corresponden los días en color amarillo de las diferentes semanas del año en curso, azul (grasas y aceites), naranja (sustancias de interés sanitario) y verde (otros muestreos de interés).

El muestreo se realizó entre el 28 de marzo hasta el 29 septiembre de 2016.

Figura 7. Cronograma de toma de muestras para fracciones de DQO (2016).

I ENERO								II FEBRERO								III MARZO								IV ABRIL									
SEM	L	M	W	J	V	S	D	SEM	L	M	W	J	V	S	D	SEM	L	M	W	J	V	S	D	SEM	L	M	W	J	V	S	D		
53	28	29	30	31	1	2	3	5	1	2	3	4	5	6	7	9	29	1	2	3	4	5	6	13	28	29	30	31	1	2	3		
	312	231	131	123	323	312	212		123	312	212	231	131	123	323		312	231	131	123	323	312	212		231	123	323	312	212	231	131		
1	4	5	6	7	8	9	10	6	8	9	10	11	12	13	14	10	7	8	9	10	11	12	13	14	4	5	6	7	8	9	10		
	231	123	323	312	212	231	131		312	231	131	123	323	312	212		231	123	323	312	212	231	131		123	312	212	231	131	123	323		
2	11	12	13	14	15	16	17	7	15	16	17	18	19	20	21	11	14	15	16	17	18	19	20	15	11	12	13	14	15	16	17		
	123	312	212	231	131	123	323		231	123	323	312	212	231	131		123	312	212	231	131	123	323		312	231	131	123	323	312	212		
3	18	19	20	21	22	23	24	8	22	23	24	25	26	27	28	12	21	22	23	24	25	26	27	16	18	19	20	21	22	23	24		
	312	231	131	123	323	312	212		123	312	212	231	131	123	323		312	231	131	123	323	312	212		231	123	323	312	212	231	131		
4	25	26	27	28	29	30	31	9	29	1	2	3	4	5	6	13	29	30	31	1	2	3	17	25	26	27	28	29	30	1			
	231	123	323	312	212	231	131		312	231	131	123	323	312	212		123	323	312	212	231	131	123		123	312	212	231	131	123	323		
V MAYO								VI JUNIO								VII JULIO								VIII AGOSTO									
SEM	L	M	W	J	V	S	D	SEM	L	M	W	J	V	S	D	SEM	L	M	W	J	V	S	D	SEM	L	M	W	J	V	S	D		
17	25	26	27	28	29	30	1	22	30	31	1	2	3	4	5	26	27	28	29	30	1	2	3	31	1	2	3	4	5	6	7		
	123	312	212	231	131	123	323		231	123	323	312	212	231	131		123	312	212	231	131	123	323		231	123	323	312	212	231	131		
18	2	3	4	5	6	7	8	23	6	7	8	9	10	11	12	27	4	5	6	7	8	9	10	32	8	9	10	11	12	13	14		
	312	231	131	123	323	312	212		123	312	212	231	131	123	323		312	231	131	123	323	312	212		123	312	212	231	131	123	323		
19	9	10	11	12	13	14	15	24	13	14	15	16	17	18	19	28	11	12	13	14	15	16	17	33	15	16	17	18	19	20	21		
	231	123	323	312	212	231	131		312	231	131	123	323	312	212		231	123	323	312	212	231	131		312	231	131	123	323	312	212		
20	16	17	18	19	20	21	22	25	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	18	19	20	21	22	23	24	34	22	23	24	25	26	27	28
	123	312	212	231	131	123	323		231	123	323	312	212	231	131		123	312	212	231	131	123	323		231	123	323	312	212	231	131		
21	23	24	25	26	27	28	29	26	27	28	29	30	1	2	3	30	25	26	27	28	29	30	31	35	29	30	31	1	2	3	4		
	312	231	131	123	323	312	212		123	312	212	231	131	123	323		312	231	131	123	323	312	212		123	312	212	231	131	123	323		
IX SEPTIEMBRE								X OCTUBRE								XI NOVIEMBRE								XII DICIEMBRE									
SEM	L	M	W	J	V	S	D	SEM	L	M	W	J	V	S	D	SEM	L	M	W	J	V	S	D	SEM	L	M	W	J	V	S	D		
35	29	30	31	1	2	3	4	39	26	27	28	29	30	1	2	44	31	1	2	3	4	5	6	48	28	29	30	1	2	3	4		
	123	312	212	231	131	123	323		312	231	131	123	323	312	212		123	312	212	231	131	123	323		312	231	131	123	323	312	212		
36	5	6	7	8	9	10	11	40	3	4	5	6	7	8	9	45	7	8	9	10	11	12	13	49	5	6	7	8	9	10	11		
	312	231	131	123	323	312	212		231	123	323	312	212	231	131		312	231	131	123	323	312	212		231	123	323	312	212	231	131		
37	12	13	14	15	16	17	18	41	10	11	12	13	14	15	16	46	14	15	16	17	18	19	20	50	12	13	14	15	16	17	18		
	231	123	323	312	212	231	131		312	231	131	123	323	312	212		231	123	323	312	212	231	131		123	312	212	231	131	123	323		
38	19	20	21	22	23	24	25	42	17	18	19	20	21	22	23	47	21	22	23	24	25	26	27	51	19	20	21	22	23	24	25		
	123	312	212	231	131	123	323		312	231	131	123	323	312	212		123	312	212	231	131	123	323		312	231	131	123	323	312	212		
39	26	27	28	29	30	1	2	43	24	25	26	27	28	29	30	48	28	29	30	1	2	3	4	52	26	27	28	29	30	31	1		
	312	231	131	123	323	312	212		231	123	323	312	212	231	131		312	231	131	123	323	312	212		231	123	323	312	212	231	131		

Fuente: elaboración propia.


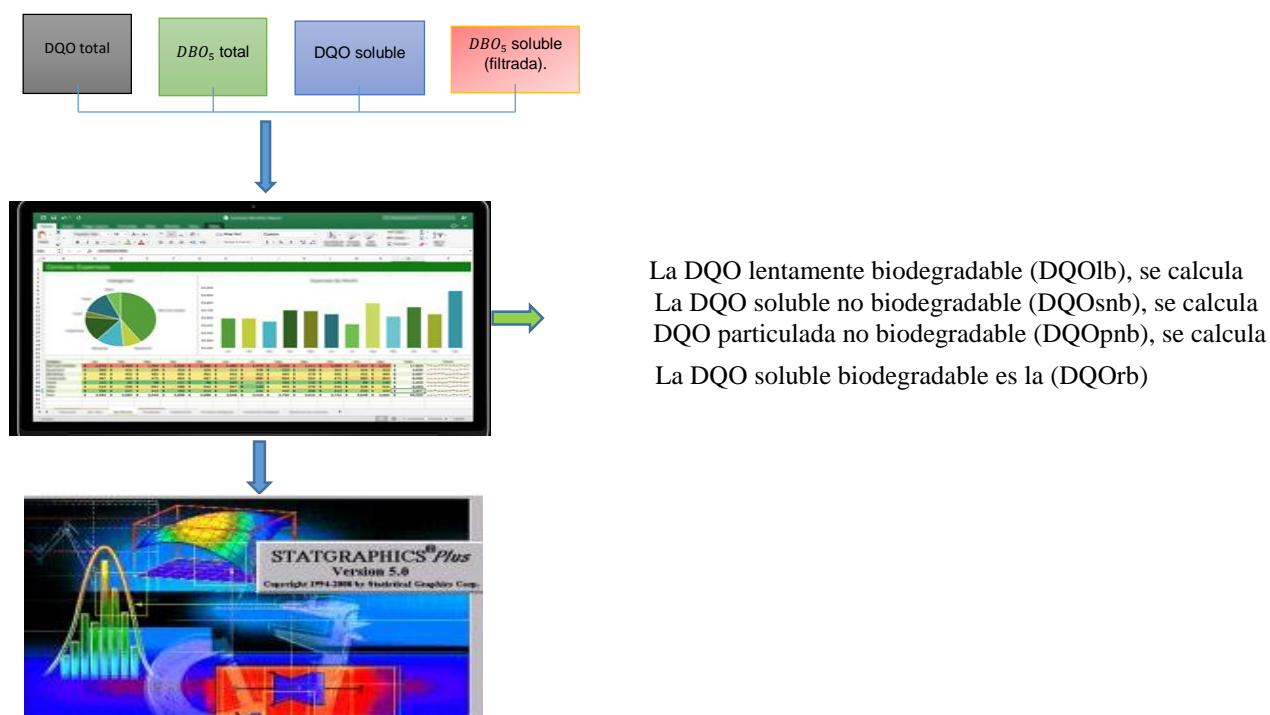
 Periodo de toma de muestra

Figura 8. Recopilación de datos, cálculos de fracciones.



Fuente: Elaboración propia

2.2.2 Análisis de muestras.

La PTAR cuenta con el servicio de un laboratorio de Control Calidad de Aguas (LCCA) quienes aplican el Sistema de Gestión de la Calidad bajo la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO-IEC 17025. Tienen, además, la acreditación de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC).

2.2.2.1. Análisis de laboratorio utilizados para obtener las fracciones de DQO:

Se realizó una separación física por filtración (filtro de fibra de vidrio de 0,45 micras y sistema con bomba de vacío) y 3 análisis fisicoquímicos.

Para hallar las fracciones de DQO de la PTAR se utilizaron los análisis siguientes:

-Separación física por filtración al vacío.

- Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

-Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO_5 (winkler) incubación a cinco días y electrodo de luminiscencia.

- Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO_{32} empleando el método respirometrico para analizar la DBO última

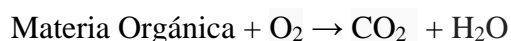
2.2.2.1.1. Separación física por filtración al vacío.

Para la separación física de las muestras de agua residual se utilizó un sistema compuesto por papel de filtro de fibra de vidrio (0,45 micras, marca ADVANTEC) y un sistema de filtración al vacío que consta de un embudo büchner, un matraz kitasato, un adaptador de goma y una trampa de líquidos, los cuales nos permitieron separar las fracciones solubles y de las particuladas.

2.2.2.1.2. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Para analizar las fracciones de DQO es importante establecer los principios del método para la determinación de la Demanda Química de Oxígeno en aguas, para esta investigación se utilizó el método de reflujo cerrado y colorimétrico de acuerdo con el Método 5220 D del “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 22 Ed” en muestras de agua.

La demanda química de oxígeno(DQO) determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo dando lugar a la formación de dióxido de carbono y agua, como se indica en la siguiente ecuación:



Las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables presentes en la muestra, se oxidan mediante reflujo en solución fuertemente ácida (H_2SO_4 al 98%) con un exceso conocido de dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, 0.25N). El método colorimétrico mide la absorbancia del excedente de Cr^{6+} (el que queda sin reaccionar, color amarillo); este absorbe a una longitud de onda de 420nm.

Colectar las muestras preferiblemente en botellas de vidrio si el análisis de la muestra no se realiza inmediatamente, esta debe ser preservada a pH menor a 2 por adición de H_2SO_4 conc (generalmente 1ml de H_2SO_4 conc. /L de muestra); la muestra preservada puede analizarse dentro un periodo de máximo de 28 días.

2.2.2.1.3. Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO_5 (winkler)

incubación a cinco días y electrodo de luminiscencia.

Para analizar las fracciones de DQO es importante establecer los principios del método para la determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en aguas por el método de DBO_5 días de acuerdo con el Método 5210 B del “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 22 Ed” en muestras de agua.

La DBO_5 es un test empírico para determinar los requerimientos relativos de oxígeno en aguas industriales, Efluentes y aguas poluidas, utilizando métodos estandarizados de laboratorio. El test tiene una amplia gama de aplicación en mediciones de desechos en plantas de tratamiento y en evaluaciones de la eficiencia de la remoción de DBO_5 .

La ecuación más pertinente es:

Materia Orgánica + O_2 --Bacterias→ Células nuevas + CO_2 + H_2O + Residuos biodegradables

La prueba de la DBO es un procedimiento experimental, tipo bioensayo, que mide el oxígeno requerido por los microorganismos en sus procesos metabólicos al consumir la materia orgánica presente en las aguas residuales o naturales.

Las condiciones estándar del ensayo incluyen incubación en la oscuridad a 20 °C por un tiempo determinado, generalmente 5 días. Las condiciones naturales de temperatura, población biológica, movimiento de agua, luz solar y la concentración de oxígeno no pueden ser reproducidas en el laboratorio.

Los resultados obtenidos deben tener en cuenta los factores anteriores para lograr una adecuada interpretación.

Las muestras de aguas residuales o una dilución conveniente de las mismas, se incuban por cinco días a 20 °C en la oscuridad. La disminución de la concentración de oxígeno disuelto, medido por el método del electrodo o por método Winkler o una modificación del mismo, durante el periodo de incubación, produce una medida de DBO.

Un porcentaje razonablemente grande de DBO total (70%-80%) se logra en 5 días, por esto se analiza la DBO₅.

2.2.2.1.4. Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO₃₂ empleando el método respirometrico para analizar la DBO última.

El método respirométrico proporciona una medida directa del oxígeno consumido por los microorganismos a partir del aire, ambiente o de un medio enriquecido con oxígeno en un recipiente cerrado bajo condiciones de temperatura y agitación constantes.

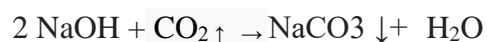
La respirometría mide el consumo de oxígeno más o menos continuamente en el tiempo. El método respirometrico es útil para evaluar la biodegradación de sustancias químicas.

La medición respirométrica es una medida de presión. Si el oxígeno es consumido en una botella cerrada a temperatura constante, se desarrolla una presión negativa, este es el caso de los respirometros manométricos.

El sistema respirometrico es un reactor donde se produce la siguiente reacción a 20 °C por 5 días:

Materia Orgánica + O₂ --Bacterias→ Células nuevas + CO₂ + H₂O + Residuos biodegradables

La muestra en constante agitación, va consumiendo gradualmente el oxígeno del medio, mientras que el dióxido de carbono producido, se va neutralizando en hidróxido de sodio:



El decaimiento del oxígeno en el sistema, lo sensa el equipo en términos de presión negativa, el cual, se traduce en concentración de oxígeno consumido por la muestra al cabo de 5 días.

Durante el tiempo que dura el análisis, presión del oxígeno en fase acuosa y fase gaseosa, se equilibran permanentemente.

Las mediciones para hallar la DBO última (32 días) se realizaron mediante sistemas cerrados con Oxitop®-C y el controlador OC 110.

2.3.Resultados:

A continuación, se presentan los resultados de las fracciones de DQO durante todo el tren de tratamiento de la PTAR.

Tabla 4. Fracciones de DQO promedio en el AP.

S_s (DQO rb)	X_s (DQO Lb)	S_i (DQOnbs)	X_i (DQOnbp)
0,22	0,39	0,08	0,31
0,11-0,33	0,16-0,63	0,02-0,13	0,14-0,49

Variación diaria.

Tabla 5. Fracciones de DQO promedio en el EP.

S_s	X_s	S_i	X_i
0,29	0,32	0,11	0,28

Tabla 6. Fracciones de DQO promedio en el AP y valores típicos

	S_s (DQO rb)	X_s (DQO Lb)	S_i (DQOnbs)	X_i (DQOnbp)
	0,22	0,39	0,08	0,31
Valores típicos	0,05-0,25	0,4-0,80	0,04-0,16	0,07-0,22

Fuente: extraído de Typical Municipal Wastewater Characteristic Parameter Values (Methods for Wastewater Characterization in activated Sludge Modeling, pág 4-17)

Tabla 7. Fracciones AP por Respirometria Oxitop.

S_s	X_s	S_i	X_i
0,12	0,55	0,15	0,17

Tabla 8. Fracciones de DQO promedio en el ES.

S_s	X_s	S_i	X_i
0,09	0,18	0,49	0,23

Tabla 9. Fracciones de DQO promedio en el EF.

S_s	X_s	S_i	X_i
0,15	0,32	0,28	0,24

2.4. Análisis de resultados.

Es importante tener presente para efectos de cálculos de las fracciones de las DQO de la PTAR, las concentraciones obtenidas en los análisis y las remociones de DQO y DBO de los diferentes procesos y/o operaciones, para cuando obtengamos los valores de las fracciones de la DQO podamos dimensionar un valor respecto a la concentración de cada una de las etapas del proceso.

Asimismo, las concentraciones y remociones promedio de DQO y DBO de las muestras utilizadas para calcular las fracciones de DQO en las diferentes etapas de tratamiento de la PTAR en los meses de marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre 2016

Tabla 10. Resultados análisis LCCA

DQO _{T AP} mg/L	DBO _{T AP} mg/L	DQO _{T EP} mg/L	DBO _{T EP} mg/L	DQO _{T ES} mg/L	DBO _{T ES} mg/L	DQO _{T EF} mg/L	DBO _{T EF} mg/L
713,00	271,00	514,00	197,00	98,00	18,00	201,00	64,00

DQO

DQO _{T AP} mg/L	DQO _{T EP} mg/L	DQO _{T ES} mg/L	DQO _{T EF} mg/L
713,00	514,00	98,00	201,00
100%	27,91%	86,26%	71,81%

DBO

DBO _{T AP} mg/L	DBO _{T EP} mg/L	DBO _{T ES} mg/L	DBO _{T EF} mg/L
271,00	197,00	18,00	64,00
100%	27%	93,36%	76,38%

Fuente: elaboración propia.

2.4.1. Resultado relación DBO₅: DQO.

De acuerdo a los valores generados en los 6 meses, se tiene una relación de DBO₅: DQO de 0,38:1,0 que es más baja que 0,44:1,0 (que era la del proceso de diseño de la PTAR, años 1993 y 1994). De allí, se puede ver que por cada 1 Kilogramo de DQO que ingresan a la PTAR hay 0,38 Kg de DBO₅, ahora con los años transcurridos el agua residual del AP a la PTAR es de una composición menos biodegradable (Observar Gráfica 1).

Gráfica 1. Relación DBO₅/ DQO durante los 6 meses.

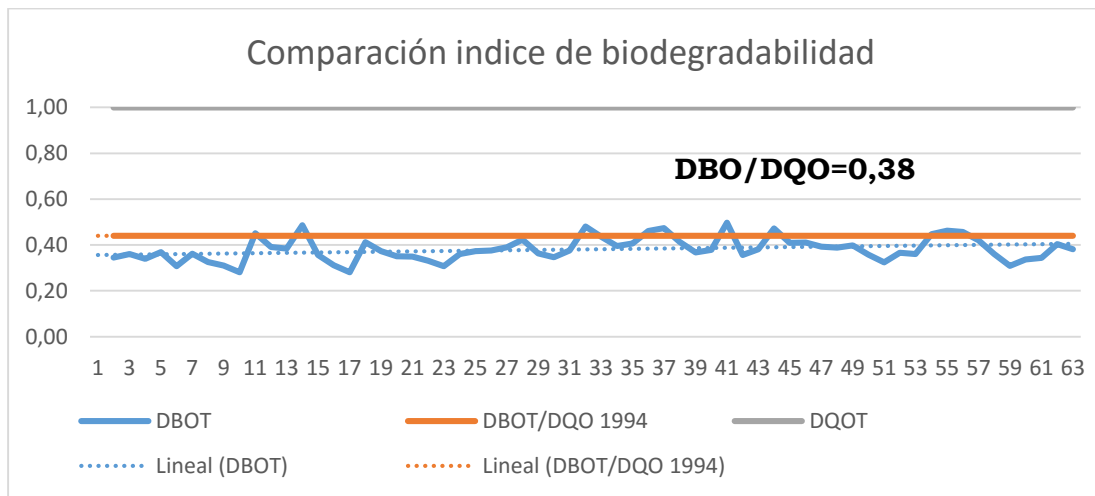


Tabla 11. Rango de biodegradabilidad.

Rango	Relación
0,0-0,2	Baja
0,2-0,4	Media
0,4-1,0	Alta

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12. Valores para la relación DBO: DQO en AP encontrados en la bibliografía.

Autor	DBO: DQO
Orhon y col.,1999	0,5
Orhon y col.,1996	0,41-0,63
Eliosov y Argaman.,1995	0,51
Este estudio	0,38

Fuente: elaboración propia.

El valor reflejado evidencia que, de 0,38 existe una elevada DQO (713mg/l) y un valor bajo de DBO (274 mg/l), esto es típico en aguas residuales con un carácter industrial o con grasas. Cuando menor es este índice mayor es la fracción de componentes difícilmente biodegradables.

Tabla 13. Valores medios de la DQO encontrados en bibliografía y comparados con el valor medio obtenido en este estudio.

Autor	DQO (mg/l)
Orhon y col.,1996	450-670
Barbosa y Sant, 1989	689

Orhon y col., 2004	605
Eliosov y Argaman, 1985	635
Seco y col., 1995	715
Este estudio	713

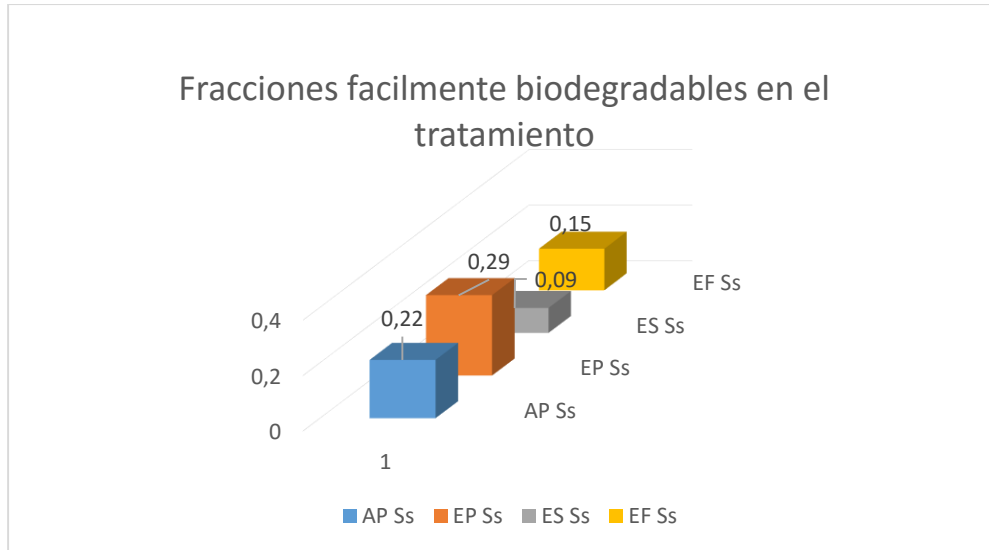
Fuente: elaboración propia.

Tabla 14. Valores medio del % DQO soluble en la bibliografía comparados con el valor medio obtenido en este estudio.

Autor	DQO sol (%)
Orhon y col., 1996	47
Sanz y Polanco, 1990	54
Orhon y col., 2001	34
Este estudio	30

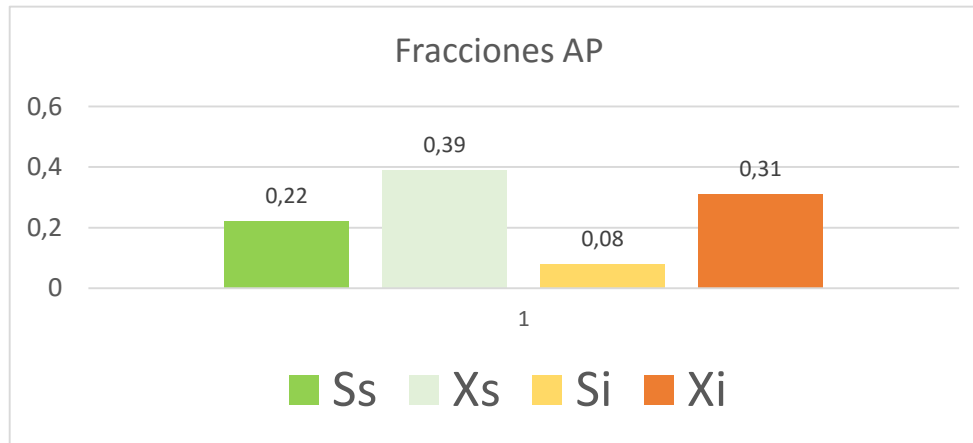
2.5. Análisis de las Fracciones de DQO en el Tratamiento AP.

Grafica 2. DQO fb en todo el tratamiento

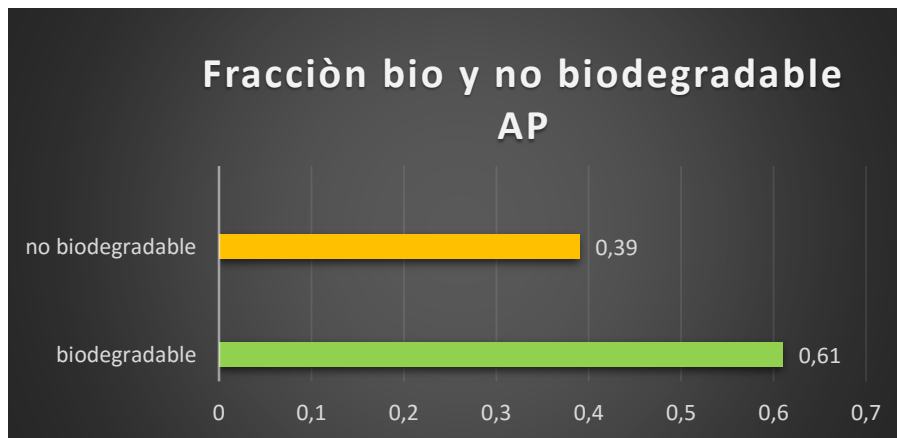


Fuente: elaboración propia.

Se observa las fracciones de DQO Ss en todo el tratamiento de la PTAR, el color azul corresponde a la entrada (AP) y el color naranja al EP (esta es mayor ya que el sedimentador primario permitió que un porcentaje de material no biodegradable fuera removido, aumentándose así el Ss para el ingreso al reactor biológico). Ahora para el EF aumenta la DQO Ss por el aporte del agua del Bypass (que no recibe tratamiento biológico). también podemos verificar que no toda la fracción de DQO Ss se remueve en el reactor aerobio.

Gráfica 3. Fracciones de DQO en el AP

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 4. DQO biodegradable vs DQO no biodegradable AP.

Fuente: elaboración propia.

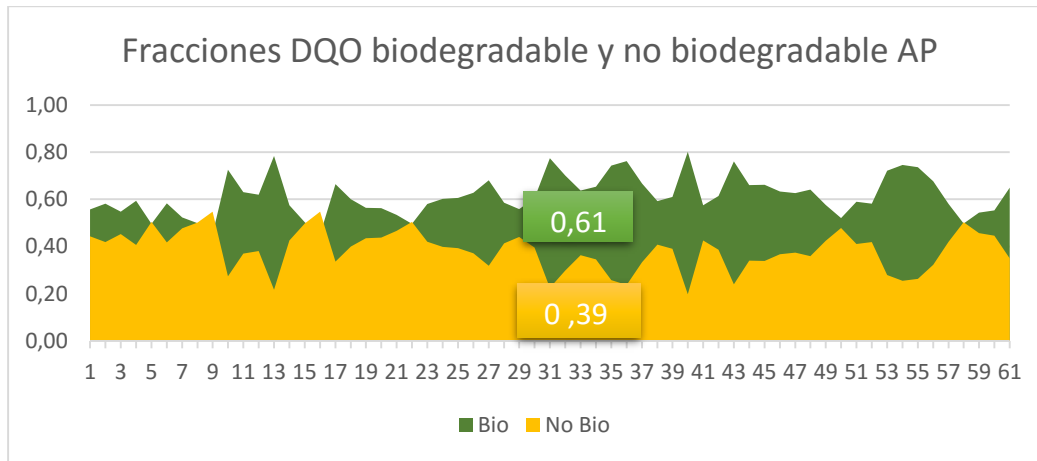
Análisis.

Se observa el área correspondiente a cada fracción de DQO en el AP de la PTAR, el área verde oscuro corresponde a la fracción de DQO S_s , luego en mayor magnitud continua la fracción de DQO X_s y la X_i con un promedio de 35 %, ahora el área que corresponde a un 8 % es la fracción de DQO S_i , la cual como entra en la PTAR sale

La Fracción de DQO no biodegradable equivale al 0,39, mientras la fracción de DQO biodegradable corresponde al 0,61 en el Afluyente Primario de la PTAR.

En estas condiciones con una DQO biodegradable mayor de la materia orgánica se puede pensar que el tratamiento biológico es la mejor opción (pero hay que esperar la dinámica de estas fracciones de DQO durante el tratamiento de la PTAR)

Gráfica 5. DQO biodegradable vs DQO no biodegradable en el AP.

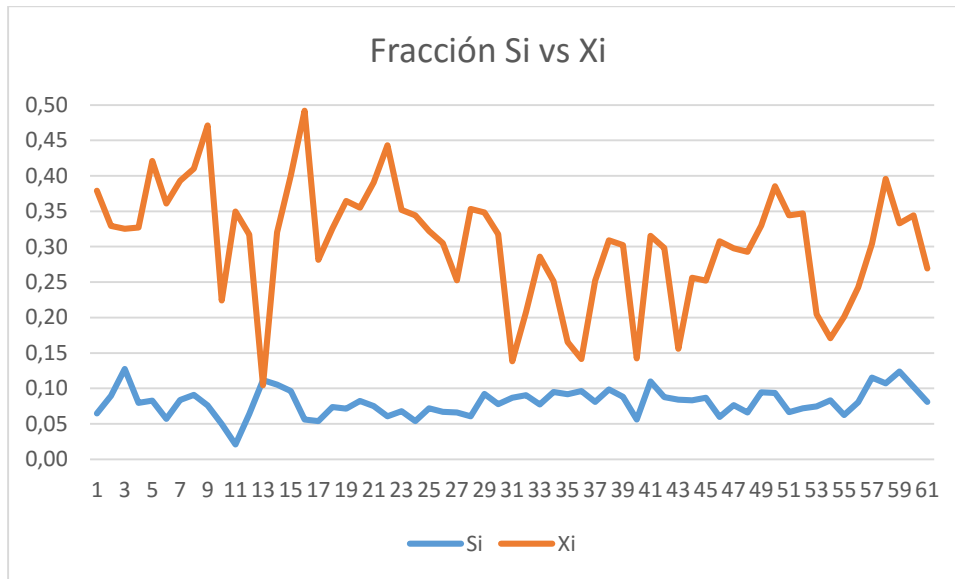


Análisis.

Como se puede observar en las fracciones de DQO en el AP, la mayor barra corresponde a la porción biodegradable y en un menor valor la fracción no biodegradable.

Para los primeros 9 días de muestreo las composiciones bioquímicas de las fracciones son muy similares, luego se observa como la fracción biodegradable empieza a aumentar, debido al cambio en la composición de la materia orgánica que está llegando a la PTAR.

Gráfica 6. DQO Xi (pnb) Vs DQO Si (snb) en el AP

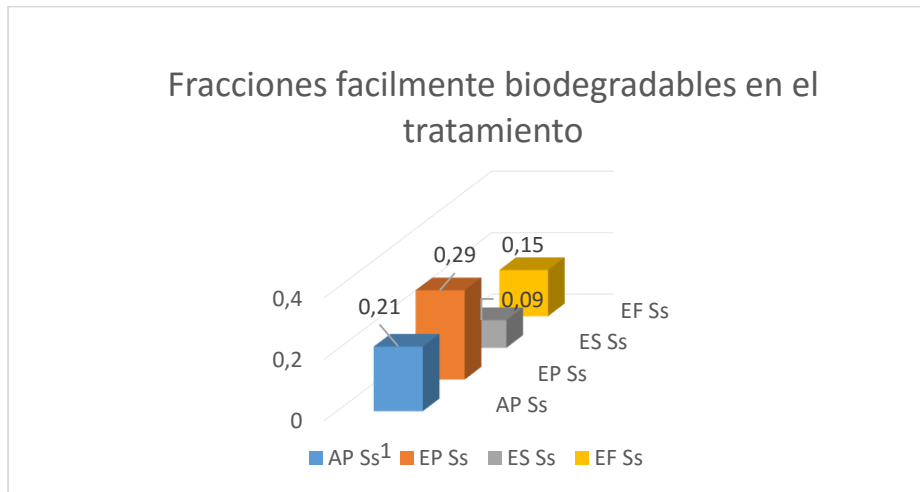


Fuente: elaboración propia.

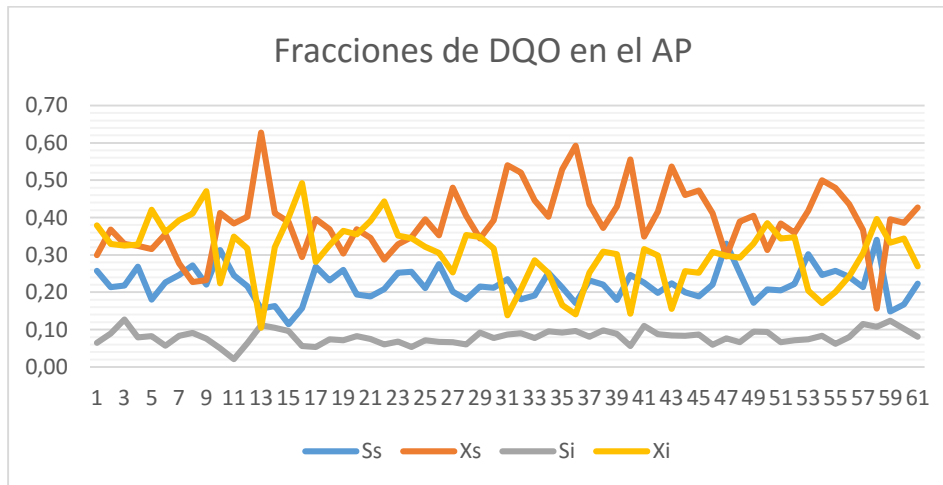
Análisis.

De las fracciones de DQO que representan las composiciones no biodegradables podemos decir que, en el AP, el mayor % corresponde a la DQO *Xi*, con un promedio de (31%), mientras la porción de DQO *Si* es del 8 % solamente.

Se espera en el tratamiento primario una reducción significativa de la fracción de DQO *Xi*, ya que está asociado igualmente al % de remoción de SST (que esta entre 40-60%). De la fracción de DQO *Si* no se espera una reducción significativa por el tamaño de partícula.

Gráfica 7. DQOfb en todo el tratamiento.

Fuente: elaboración propia.

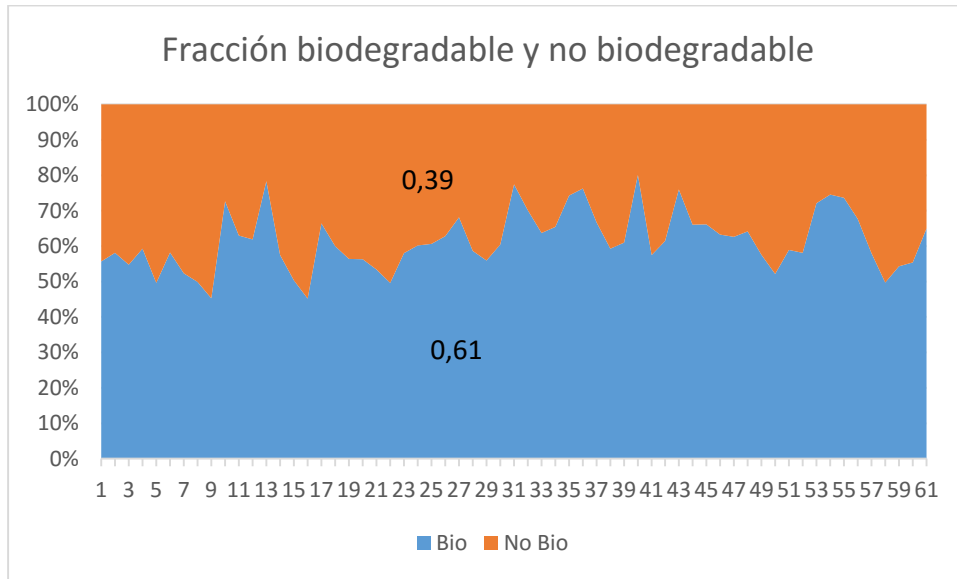
Gráfica 8. Fracciones de DQO en el AP.

Fuente: elaboración propia.

Se observa las fracciones de DQO S_s en todo el tratamiento de la PTAR, el color azul corresponde a la entrada (AP) y el color naranja al EP, esta es mayor ya que el sedimentador primario permitió que un porcentaje de material no biodegradable fuera removido, aumentándose así el % S_s para el ingreso al reactor biológico. Ahora para el EF aumenta la DQO S_s por el aporte del agua del Bypass (que no tiene tratamiento biológico).

Se observa las líneas correspondientes a cada fracción de DQO en el AP de la PTAR, el área amarilla corresponde a la fracción de DQO X_i (en promedio un 0,34), luego en mayor magnitud continua la fracción de DQO X_s con un promedio de 0,36(naranja), ahora la línea que corresponde a un 0,21 es la fracción de S_s (azul) y la fracción más pequeña es la de la DQO S_i con un 0,09(color gris).

Gráfica 9. DQO biodegradable vs DQO no biodegradable en el AP

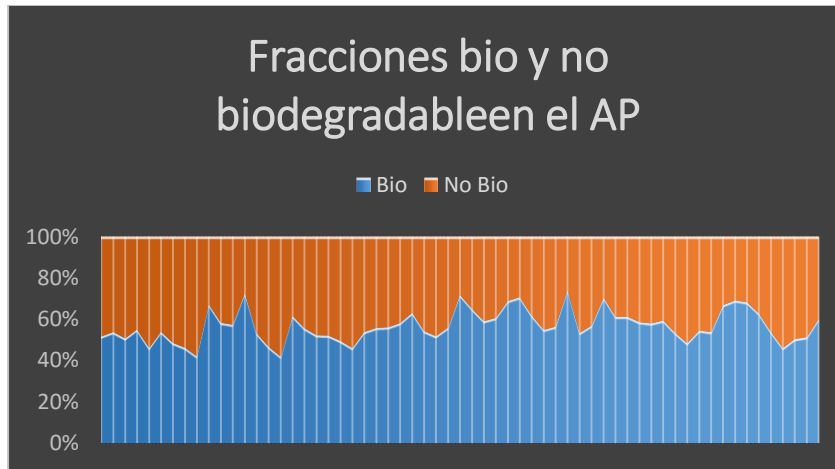


Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en las fracciones de DQO en el AP, la mayor área corresponde a la porción biodegradable y en un menor valor la fracción no biodegradable

Se puede apreciar la dinámica en cada día de muestreo, ya que al principio las 2 áreas son muy similares.

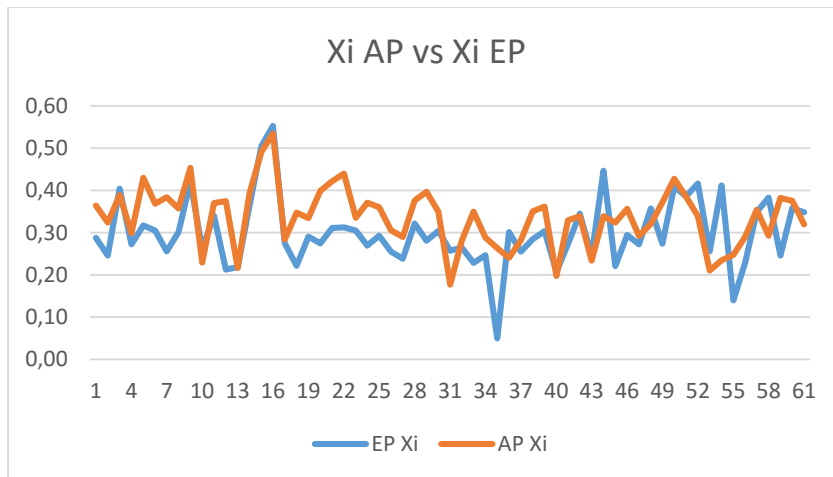
Gráfica 10. % de DQO biodegradable vs % de DQO no biodegradable en AP



Fuente: elaboración propia.

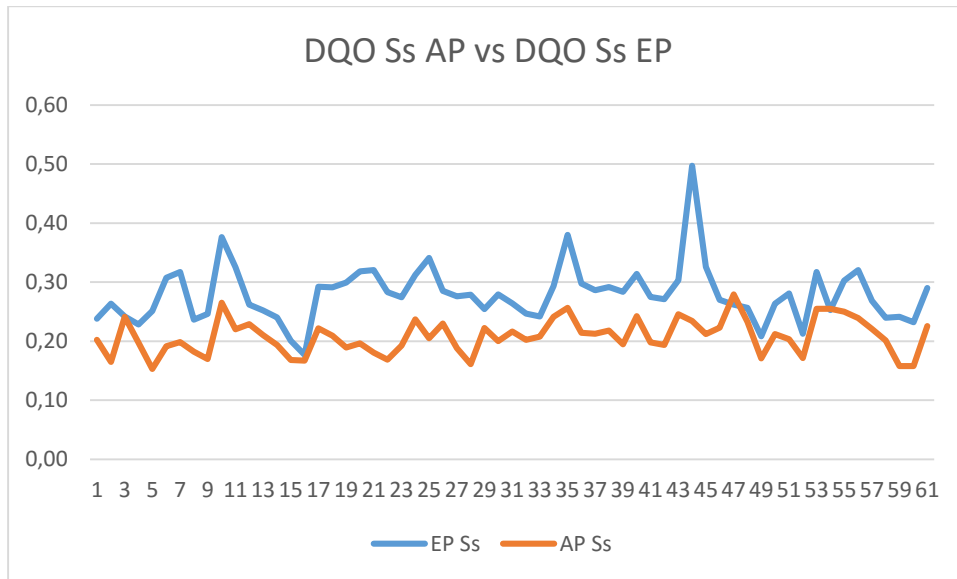
El % de Fracción de DQO biodegradable equivale al 61 %, mientras la fracción de DQO no biodegradable corresponde al 39 % en el Afluyente Primario de la PTAR.

Gráfica 11. Xi AP vs Xi EP



Observando la gráfica se puede deducir la poca influencia del tratamiento primario sobre la fracción de DQO X_i , ya que en promedio paso de un % de 34 a 30 (remoción de 12%), arrojando una remoción mínima de esta fracción en esta operación.

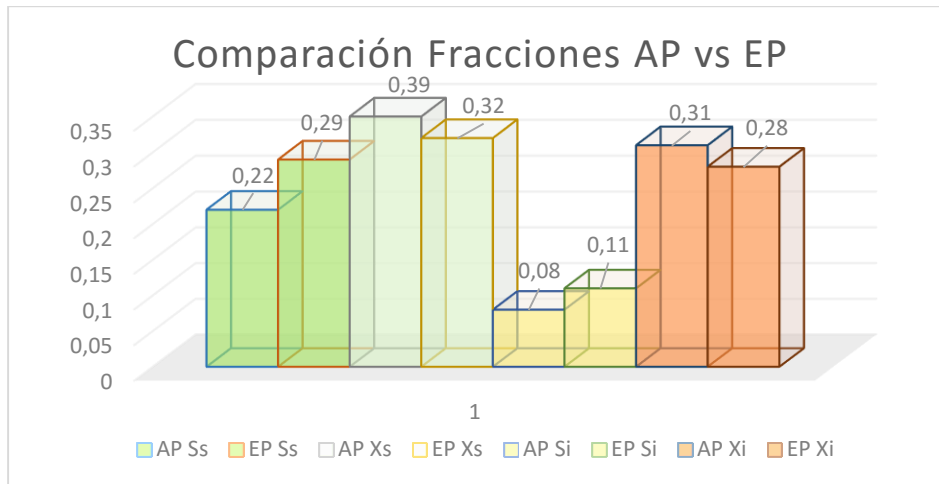
Ahora no se puede desconocer fenómenos asociados a poca extracción de lodos primarios que pueden incidir en la poca remoción.

Grafica 12. DQO Ss AP vs DQO Ss EP

En la medida que se trabaje en una mayor efectividad en el tratamiento primario, se podrá ver un incremento más notorio de la fracción de DQO Ss que sale del mismo, lo cual nos traerá mayores beneficios para el tratamiento en el reactor secundario.

Fuente: elaboración propia.

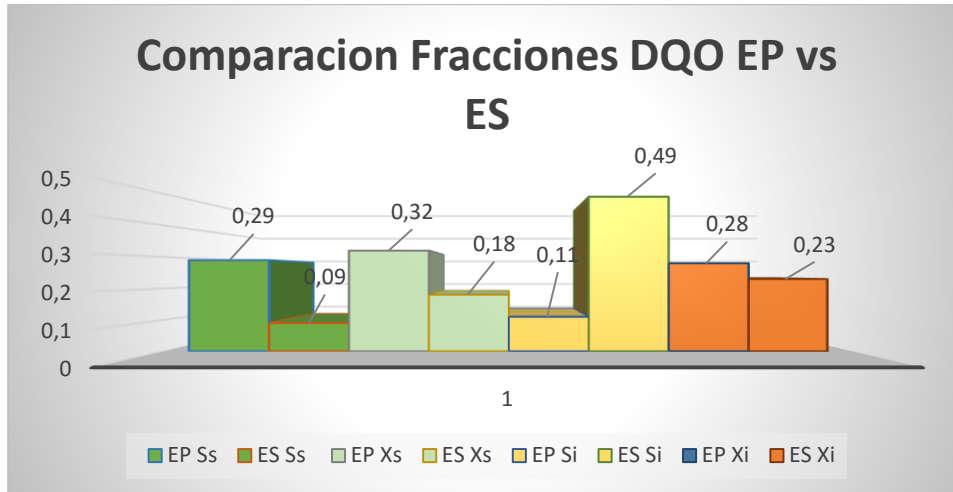
Grafica 13. Comparación fracciones de DQO AP vs EP



Se esperaba que las fracciones particuladas (X_s , X_i) se sedimentaran en mayor medida en el tratamiento primario y así favorecer las fracciones más solubles y en especial la S_s , la cual es más fácil de asimilar por los microorganismos.

Fuente: elaboración propia.

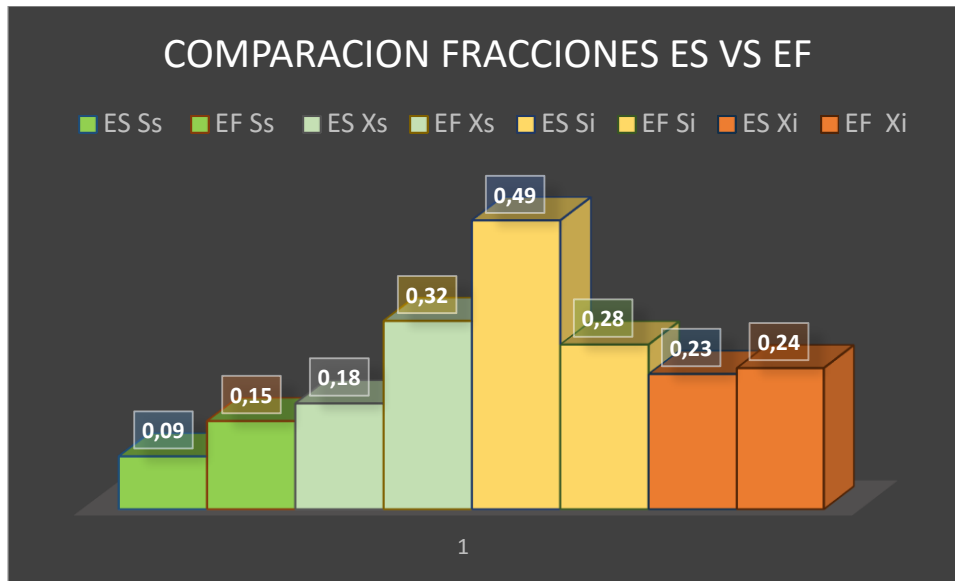
Grafica 14. Comparación fracciones DQO del EP vs ES.



Se observa como desciende la fracción *Ss* en el reactor aerobio por el trabajo realizado por los microorganismos, igualmente sucede con la fracción *Xs* (pero en menor cuantía), la fracción *Si* se incrementa, ya que los desechos residuales del trabajo de los microorganismos hacen parte del material soluble inerte.

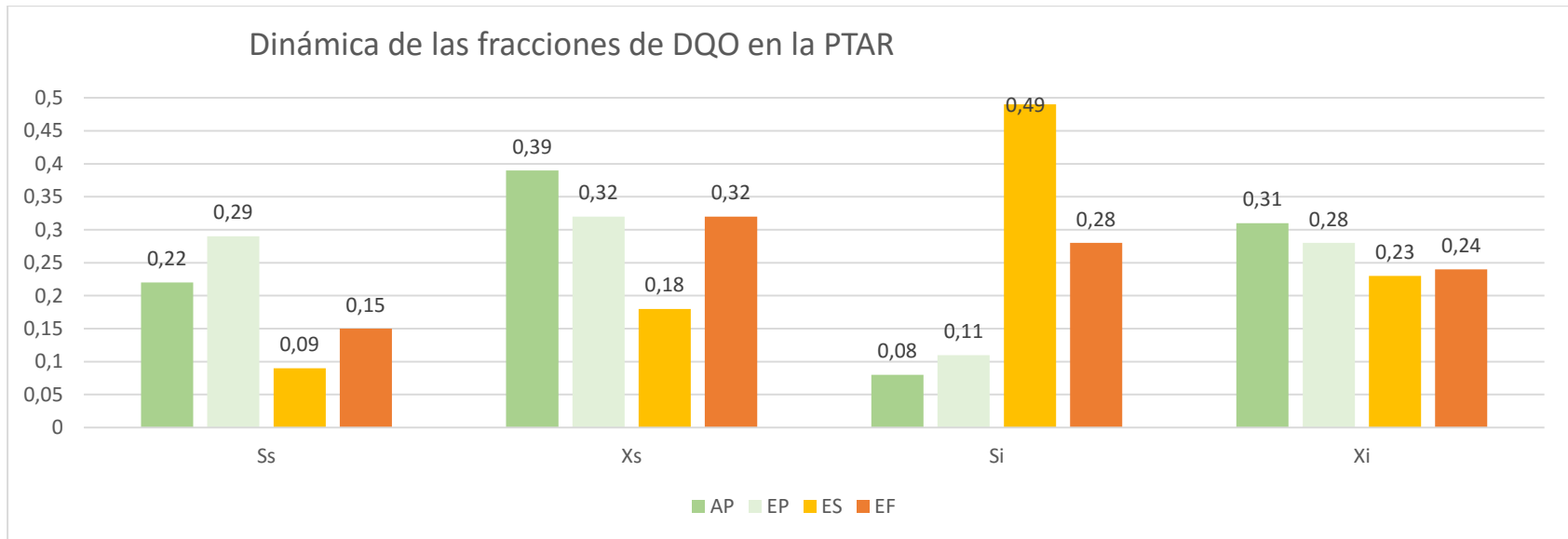
Fuente: elaboración propia.

Grafica 15. Comparación fracciones DQO del ES vs EF



Fuente: elaboración propia

Se observa cómo afecta no tratar toda el agua por el reactor aerobio, se evidencia en el incremento de los valores de todas las fracciones de DQO, exceptuando *Si* (que se ve con mayor valor en el ES, por los desechos del trabajo de los microorganismos).

Gráfica 16. Dinámica de las fracciones de DQO en la PTAR

Para efectos de análisis de las fracciones de las DQO de la PTAR, es importante considerar las concentraciones obtenidas en los análisis y las remociones de DQO y DBO de los diferentes procesos y/o operaciones, para cuando obtengamos los valores de las fracciones de la DQO podamos dimensionar un valor respecto a la concentración de cada una de las etapas del proceso.

Al observar la gráfica de la dinámica de las fracciones de DQO en el tratamiento de la PTAR vemos que los tamaños de las partículas en las fracciones de la PTAR en el AP nos muestran el mayor porcentaje de materia particulada (0,70), en cuanto a la composición de las fracciones en el EP, que no alcanzaron cambios muy significativos, pero si nos remitimos a las remociones de DQO y DBO para este periodo nos arrojan unas remociones del 28 y 27 % respectivamente.

Es por ello que el grafico es muy diciente, pero a la hora de comparar entre etapas de tratamiento no debemos perder la perspectiva de la remoción que se está dando en cada etapa y no concentrarnos solo en las fracciones.

De igual manera, para la etapa de tratamiento secundario se observa un incremento en la proporción de la fracción de DQO Si y coincide con la afirmación de los autores (Orhon & Cojgor, 1997) que afirma que, en sistemas biológicos, los compuestos solubles no biodegradables abandonan el sistema sin ser transformados y que, por el contrario, es posible que se generen producto de la actividad microbiológica, ahora en cuanto a remociones de DQO y DBO para este periodo nos arrojan unas remociones del 86 y 93 % respectivamente.

En ese sentido, para el EF las remociones de DQO y DBO para este periodo nos arrojan unas remociones del 72 y 76 % respectivamente.

Por lo que, los resultados mostraron que la fracción biodegradable represento 61% de la DQO del Afluente, mientras que la fracción no biodegradable significo el 39%.

En cuanto a la sedimentación primaria se sabe que puede remover 33% de DBO_5 (del 20-35%) y 56% de los SST (del 40-60%), para efectos de esta investigación la remoción en el periodo de muestreo de la DBO_5 fue del 27%, en cuanto a los SST fue de 53,72%, en este orden de ideas la sedimentación primaria está realizando un buen trabajo.

Ss (Materia orgánica biodegradable soluble-rápidamente biodegradable).

La fracción Ss ingresa a la PTAR con una magnitud de 0,22, luego pasando por tratamiento primario su magnitud se incrementa pasando a 0,29 (contribuyendo al beneficio de los microorganismos del reactor biológico), mostrando el trabajo realizado por esta operación al sedimentar las fracciones particuladas (X_s y X_i), después de pasar por los aireadores esta fracción sale con un valor de 0.09 (ya que esta fracción se absorbe y se metaboliza rápidamente), teóricamente no debería de salir nada de esta fracción, ya para la salida del EF.

En ese sentido, la fracción de materia orgánica biodegradable soluble en el Afluente primario represento 0.22 de la materia orgánica, mientras que en el efluente primario fue del 0,29, este incremento es debido a reducción de la materia orgánica particulada (por su tamaño alcanzo velocidades de sedimentación)

Comparando la concentración promedio de fracción Ss entre el Afluente (145 mg/L) y el efluente primario (140mg/L), se observa que el tratamiento primario no tuvo influencia sobre este tipo de materia orgánica y la pequeña diferencia debe ser por comportamiento hidráulico.

Para el tratamiento biológico es ideal que la fracción Ss sea la mayor proporción, ya que por el tamaño de partícula el requerimiento energético para atravesar la pared celular de las bacterias es mínimo. En el tratamiento primario la fracción biodegradable total represento 0.61.

Esta fracción S_s baja significativamente a 0.09, dando cuenta de la eficiencia del tratamiento biológico, sin dejar de pensar que la condición ideal debiera ser, de remover toda esta fracción en este tratamiento.

Por consiguiente, en el Efluente final esta fracción S_s aumenta al 0,15, debido que una proporción del agua residual del Efluente Primario es derivada y no obtiene el tratamiento secundario y por ende su incremento.

X_s (Materia orgánica biodegradable particulada-lentamente biodegradable).

Esta fracción X_s represento en el AP un valor de 0.39 del total de la materia orgánica y en el EP es del 0,32, logrando una remoción solamente del 18 %, lo cual nos lleva a deducir que los SST removidos (fue del 47%) en el tratamiento primario no corresponden significativamente a esta fracción X_s .

Para la salida del tratamiento biológico la fracción X_s corresponde a un valor de 0.18, lo cual muestra la dificultad de los microorganismos para realizar procesos de hidrolisis a sustratos más lentamente biodegradables. Ahora el sedimentador secundario también permite la separación sólido-liquido de esta fracción.

Ya para el Efluente Final se incrementa esta fracción de X_s a 0,32, debido al porcentaje de agua residual del EP que no se le realiza tratamiento secundario. se podría pensar en un tratamiento terciario para terminar de remover esta fracción.

S_i (Materia orgánica no biodegradable soluble).

La fracción S_i del AP corresponde a 0.08 y en el EP es igual a 0.11, hay un poco de incremento y se puede deber a procesos de acumulación e hidráulicos de la unidad de tratamiento primario. Ahora por el tamaño de partícula no se esperaba tampoco una remoción en este sistema.

Ya para el tratamiento biológico, el ES presenta un considerable incremento de la fracción S_i en un valor de 0,49 y siendo consecuentes con las afirmaciones de que, en los sistemas biológicos, compuestos solubles no biodegradables abandonan el sistema sin ser transformados y que, por el contrario, es posible que se generen producto de la actividad microbiana.

La fracción S_i presento durante todo el tren de tratamiento un incremento, este se debe a la disminución de las fracciones S_s y X_s hasta el tratamiento aeróbico.

Es importante también tener presente la sedimentación químicamente asistida para la reducción de esta fracción.

***Xi* (Materia orgánica no biodegradable particulada).**

En el AP esta fracción X_i corresponde al 0,31, ya pasando el agua residual por el tratamiento primario se reduce a 0,28, este comportamiento de la reducción del tratamiento primario es bajo, removiendo solamente el 9.6%, ahora se deduce que el material sedimentable está compuesto principalmente por fracción X_s .

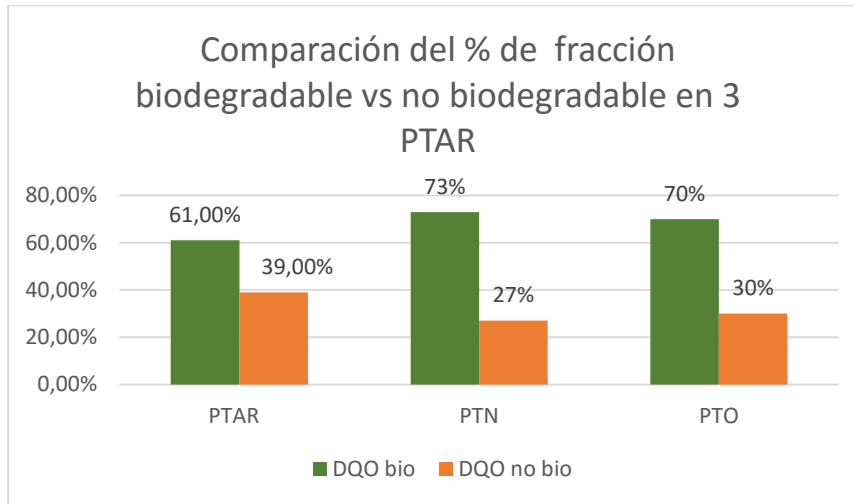
De lo anterior, no se debe olvidar que la remoción de SST en el tratamiento primario fue del 47% y la remoción de DBO 5 del 27%.

Ahora bien, para la salida del reactor aerobio se reduce esta fracción a 0,23, obedeciendo a la capacidad de algunas de estas partículas de sedimentar conjuntamente con los lodos.

La caracterización de las fracciones de DQO facilita el uso de la modelación dinámica y de los simuladores de las PTAR

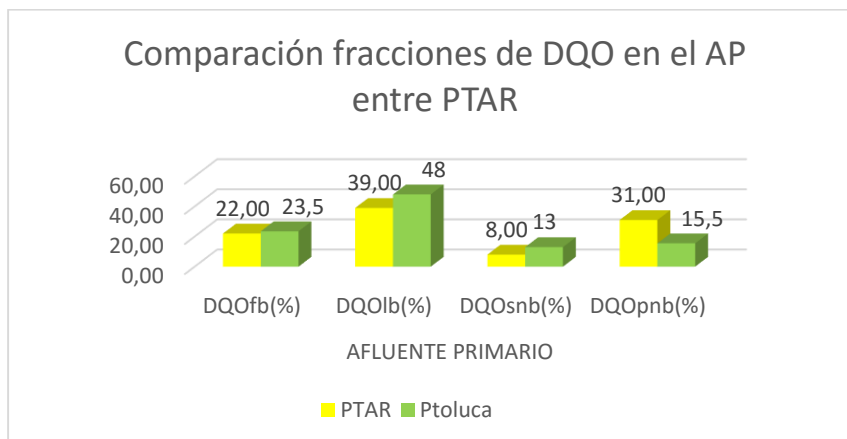
2.6. Comparación con otras plantas.

Gráfica 17. Comparación del % de la fracción vs no biodegradable en el AP de varias PTAR: PTAR, Toluca Norte (PTN), Planta Toluca Oriente (PTO).



Se observa como las PTAR de Toluca presentan aguas en el Afluente con mayor biodegradabilidad y obedece a las características de las aguas residuales de la zona de influencia de dichas plantas.

Gráfica 18. Comparación fracciones de DQO en el AP de las PTAR



Acá más específicamente se observa las diferencias del promedio de las fracciones de las plantas mexicanas comparadas con la PTAR, no cabe duda que las diferencias son asociadas a las aguas características específicas de los sistemas de alcantarillado que alimentan las plantas, la diferencia más relevante es la DQO pnb.

Capítulo III

3. Conclusiones y recomendaciones.

3.1. Conclusiones.

No cabe duda que las aguas que llegan a la PTAR cada día son menos biodegradables y se refleja en el índice de biodegradabilidad que pasó de 0.44 en los años 90 a 0,38 en el 2016.

Los resultados mostraron que la fracción biodegradable represento 61% de la DQO del Afluente, mientras que la fracción no biodegradable significo el 39%, en cuanto a la sedimentación primaria se sabe que puede remover 33% de DBO₅ (del 20-35%) y 56% de los SST (del 40-60%), para efectos de esta investigación la remoción en el periodo de muestreo de la DBO₅ fue del 27%, en cuanto a los SST fue de 53,72%, en este orden de ideas la sedimentación primaria está realizando un buen trabajo, aunque se puede optimizar más para que aumente la fracción S_s que va para el reactor aerobio.

Las fracciones de la PTAR en el AP nos muestran el mayor porcentaje de materia particulada (0,70), en cuanto a la composición de las fracciones en el EP, no alcanzaron cambios muy significativos, pero si nos remitimos a las remociones de DQO y DBO₅ para este periodo nos arrojan unas remociones del 28 y 27 % respectivamente.

Realmente el tratamiento biológico realizo el mejor trabajo en la línea de tratamiento llevando la fracción S_s de 0,22 a 0.09 y la X_s de 0,39 a 0.18, pero queda por mejorar en cómo realizar tratamiento secundario a toda el agua, ya que en el EF estas fracciones se incrementan.

Los métodos fisicoquímicos son utilizados de manera tradicional para analizar la composición del agua, pero hay que complementarlos con procesos biológicos para hallar las fracciones DQO y así no sobreestimar las fracciones biodegradables.

El método para hallar las fracciones de DQO en la PTAR por el método de Stowa utilizando los análisis de DQO y DBO₅ es el más pertinente de utilizar, ya que algunos métodos mostraban un agua en el AP muy biodegradable y era incoherente con el índice de biodegradabilidad obtenido.

Fue importante obtener una línea base de estas fracciones de DQO en la PTAR y poder utilizarlas como insumo para la simulación en la PTAR y a futuro comparar como ha sido la dinámica de las aguas residuales municipales conforme a la legislación vigente.

Es la primera vez que se realiza un análisis de fracciones de DQO en la PTAR y esperábamos un incremento en las aguas residuales no domésticas, por la complejidad que algunas veces se presentan para tratar las aguas residuales.

3.2. Recomendaciones.

Es importante utilizar un solo método para hallar las fracciones de DQO, para realizar comparaciones confiables a futuro.

Sería interesante contar con un analizador de respirometría y poder así realizar estudios de las fracciones de DQO y determinar la biodegradabilidad o la toxicidad en las aguas residuales, además para optimizar parámetros de operación de la PTAR, mediante cambios en el suministro de oxígeno en el reactor aerobio y calcular la capacidad de biodegradación de los microorganismos presentes en la biomasa.

Se debe implementar un mejoramiento continuo del tratamiento primario, ya que debemos lograr el incremento de la fracción S_s y así obtener mejor remoción de DQO en el reactor aerobio, además es necesario incrementar la cantidad de agua con tratamiento secundario en la PTAR, para entregar una agua tratada de mejores características al río Medellín.

El compromiso no solo es nuestro, debe ser de cada industrial que con responsabilidad realice descargas conforme a ley.

3.3. Bibliografía

- Brouwer, H., Klapwijk, A., & Keesman, K. (1998). Identification of activated sludge and wastewater characteristics using respirometric batch experiments. *Water Research* 32(4), 1240-1254.
- Delrue, F., Choubert, J. M., Stricker, A. E., Spérandio, M., Mietton-Peuchot, M., & Racault, Y. (2010). Modelling a full scale Membrana Bioreactor using Activated Sludge Model No.1: Challenges and solutions. *Water Sciencia and Technology* 62(10), 2205-2217.
- Dold, P. L., Ekama, G. A., & Marais, G. R. (1980). *A general model for the activated sludge process*. Progress in Water Technology.
- Dulekgurgen, E., Dogruel, S., Karahan, Ö., & Orhon, D. (2006). Size distribution of wastewater COD fractions as an index for biodegradability. *Water Res* 40, 273-282.
- Ekama, G. A., & Marais, G. R. (1986). Procedures for determining COD fractions and the maximum specific growth rate of heterotrophs in activated sludge systems. *Water Science and Technology* 18(6), 91-114.
- Ginestet, P., Maisonnier, A., & Spérandio, M. (2002). Wastewater COD characterization: biodegradability of physic-chemical fractions. *Water Science and Technology* 45(6), 89-97.
- Gujer, W., Henze, M., T., Matsuo, T. M., & Marais, G. (1995). The activated sludge model No 2: Biological phosphorus removal. *Wat,Sci.Tech.* 31, 1-11.
- Jiang, T., Liu, X., Kennedy, M., Schippers, J., & Vanrolleghem, P. (2005). Calibrating a side-stream membrana bioreactor using Activated Sludge Model No 1. *Water Science and Technology* 52(10-11), 359-367.
- Lozano-Rivas, W. (2012). *Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Módulo didáctico*. Bogotá: Universidad Nacional Abierta y a Distancia-UNAD.
- Lu, P., Zhang, X., & Zhang, D. (2010). An integrated system for wastewater COD characterization and a case study. *Water Science and Tecnology* 62(4), 866-874.
- Mathieu, S., & Etienne, P. (2000). Estimation of wastewater biodegradable COD fractions by combining respirometric experiments in varios So/Xo. *Water Res.* 34, 1233-1246.
- Orhon, D., & Artan, N. (1994). *Modelling of activated sludge systems*. Technomic Publishing Company.
- Orhon, D., & Cojgör, E. (1997). COD Fractionation in Wastewater Characterization. *The State of the Art. J. Chem. Technol. Biot* 68, 283-293.
- Park, J., & Novotny, G. (1997). *Wastewater characterization for evaluation of biological phosphorus removal*. Wisconsin Department of Natural Resources, Res.Report 174.

- Peterson, B., Gernaey, K., Henze, M., & Vanrolleghem, P. (2003). Calibration of Activated Sludge Models: A critical review of experimental designs. *Biotechnology for the Environmental: Wastewater Treatment and Modelling. Waste Gas Handling Focus on Biotechnology 3C*, 101-186.
- Rodriguez, J., Mañunga, T., & Cárdenas, C. (2012). Influencia de las fracciones de materia orgánica sobre el desempeño de un sistema de tratamiento de agua residual de una industria papeler. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 448.
- Roeleveld, P. J., & Loosdrecht, M. M. (2002). Experience with guidelines for wastewater characterization in the Netherlands. *Water Sciencia and Technology 45(6)*, 77-87.
- Vasquez, G., Ortega, R., E. M., & Falla, C. (2012). Fraccionamiento de la DQO del agua residual de Toluca por el protocolo STOWA. *Tecnología y Ciencia del Agua, IV(2)*, 21-35.
- Wentzel, M., Mbewe, A. M., & Ekama, G. (1999). *Batch test for characterization of the carbonaceous in municipal wastewater S.A.*
- Zhou, Z., Wu, Z., Wang, Z., Tang, S., & Gu, G. (2010). Activated sludge model based COD fractionation wastewater characterization. *Environmental Science 31(6)*, 1478-1482.