



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

ESTUDIO DEL ACONDICIONAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA
MEDIANTE FOTOCATÁLISIS SOLAR EN LA ESCUELA PRIMARIA LUIS
BRAILLE, ALCALDÍA IZTAPALAPA-CDMX

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:
ADRIAN GAMA MÁRQUEZ
CINDY DAENNA SÁENZ RAMÍREZ

TUTOR:
DRA. FABIOLA MÉNDEZ-ARRIAGA
COTUTOR:
DR. RAFAEL ALMANZA SALGADO

CIUDAD DE MÉXICO, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

ESTE TRABAJO SE REALIZÓ EN LAS INSTALACIONES DE LA ESCUELA OFICIAL PRIMARIA LUIS BRAILLE DE LA ALCALDÍA DE IZTAPALAPA GRACIAS A LAS FACILIDADES OTORGADAS DE PARTE DE LA LIC. ISABEL W. FARHA DIRECTORA GENERAL DE SERVICIOS EDUCATIVOS IZTAPALAPA ASÍ COMO DEL LIC. ARTURO RIVERA Y LOS DIRECTIVOS DE DICHA INSTITUCIÓN.

DE IGUAL FORMA SE AGRADECE A LA SECRETARÍA DE CIENCIA TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN-CDMX, CONVENIOS SECITI-048/2016 Y CM-SECITI-109/2017, POR LA BECA OTORGADA A ADRIAN GAMA MÁRQUEZ Y CINDY DAENNA SÁENZ RAMÍREZ PARA LA REALIZACIÓN DE ESTA TESIS.

SE AGRADECE A LA DRA. MARISA MAZARI HIRIART DIRECTORA DEL LABORATORIO NACIONAL DE CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD, A LA DRA. ANA CECILIA ESPINOSA GARCÍA Y AL M. EN C. MARCO ANTONIO TAPIA PALACIOS POR SU APOYO PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS.

FINALMENTE, SE AGRADECE DE FORMA MUY ESPECIAL A LA DRA. FABIOLA MÉNDEZ ARRIAGA, TUTORA DE ESTE PROYECTO POR LA CONFIANZA, TIEMPO Y DEDICACIÓN A LOS AUTORES DE ESTA TESIS.

ÍNDICE

Resumen	9
Abstract	10
1. Introducción.....	11
1.1 Disponibilidad mundial de agua	11
1.2 Contaminación del agua	13
1.3 Desabasto de agua en México	14
1.3.1 Distribución desigual	15
1.3.2 Infraestructura obsoleta	15
1.3.3 Consecuencias sociales	16
1.4 Alcaldía Iztapalapa	16
1.4.1 Población vulnerable.....	17
1.4.2 Escuela primaria “Luis Braille”	17
2. Marco teórico	20
2.1 Captación de agua de lluvia; una posible solución al abastecimiento de agua.....	20
2.1.1 Disponibilidad pluvial	21
2.1.2 Microbiología del agua.....	22
2.1.2.1 Clasificación de las bacterias	24
2.1.2.2 Fases del crecimiento bacteriano.....	24
2.1.2.3 Contaminación microbiana en el agua de lluvia	25
2.1.3 Marco legal en materia de agua en México.....	28
2.1.3.1 Constitución política	28
2.1.3.2 Estándares de calidad	29
2.1.3.3 Organismos públicos	30
2.2 Alternativas en la depuración y tratamiento de agua de lluvia.....	31
2.2.1 Tecnologías de aislamiento y separación.....	32
Coagulación-floculación	32
Sedimentación	32
Filtración	33
Filtración por membrana.....	34
Ósmosis inversa (OI)	34

2.2.2 Tecnologías de oxidación química	35
Ozonización	35
Cloración	35
2.2.3 Tecnologías de degradación biológica	36
2.3 Procesos de Oxidación Avanzada	36
2.3.1 Radical \bullet OH	37
2.3.2 Clasificación de los AOPs.....	38
2.3.3 UV-H ₂ O ₂	40
2.3.4 Fenton	40
2.3.5 Fotofenton.....	40
2.3.6 Fotocatálisis heterogénea	41
2.3.7 Parámetros que influyen en la fotocatalisis heterogénea	43
2.3.8 Fotocatalizadores	44
2.3.9 Inmovilización de los catalizadores.....	46
2.4 Tecnología solar fotoquímica.....	48
2.4.1 Tipos de radiación	49
2.4.3 Colector Parabólico Compuesto CPC	50
3. Justificación	53
4. Objetivos.....	53
5. Desarrollo experimental	54
5.1 Descripción del reactor CPC.....	54
5.2 Metodología: Experimentos fotocatalíticos	57
5.2.1 Material y equipo	57
5.2.2 Reactivos	59
5.2.3 Procedimientos	60
5.3 Metodología: Evaluación microbiológica en Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad (LANCIS).....	64
5.3.1 Material y equipo	64
5.3.2 Reactivos	64
5.3.3 Procedimientos sanitarios del muestreo de agua	64

5.3.4 Procedimientos para determinación de Enterococos, E. coli y Coliformes fecales.	66
6. Resultados	69
6.1 Bloque 1 (agua potable).....	71
6.2 Bloque 2 (agua de lluvia).....	75
6.3 Bloque 3 (ausencia de radiación).....	80
7. Discusión de resultados	82
8. Conclusiones	94
9. Comentarios y recomendaciones	95
10. Bibliografía	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Niveles de acceso a agua de buena calidad en el mundo (Smart Water Magazine, 2019).....	12
Figura 2. Crecimiento de la población mundial (Córdoba Hernández, 2004).....	13
Figura 3. Escuelas en Educación Básica y Media Superior (INEGI, 2010).....	17
Figura 4. Situación en la escuela primaria Luis Braille (2018).	18
Figura 5. Infraestructura de la escuela primaria Luis Braille, información correspondiente al ciclo 2013/2014 (mejoratuescuela.org)	18
Figura 6. Vista satelital de la Escuela Primaria Luis Braille (Google Maps)	19
Figura 7. Balance de agua en México (CONAGUA, 2010).....	21
Figura 8. Precipitación de lluvia mensual promedio (Clima promedio en Iztapalapa, 2017)	22
Figura 9. Curva de crecimiento bacteriano (Benintende et al, 2018)	25
Figura 10. Coliformes fecales (LANCIS).....	26
Figura 11. E. coli (medylab.blogspot.com, 2019)	27
Figura 12. Enterococcus faecalis (LANCIS).....	27
Figura 13. Microorganismos aerobios mesófilos (LANCIS).....	28
Figura 14. Tipos de tecnologías de tratamiento de agua (Méndez-Arriaga F, 2009).....	31
Figura 15. Sistema de filtración	33
Figura 16. Esquema del proceso de ósmosis directa y ósmosis inversa	34
Figura 17. Proceso de oxidación del radical hidroxilo (Terán, 2016)	37
Figura 18. Clasificación según las condiciones de P y T, presencia o no de catalizador, agente oxidante, fuente reactiva de energía y varias de las denominaciones más comúnmente aplicadas para las AOP, (Méndez-Arriaga F, 2009).....	39
Figura 19. Esquema del proceso fotocatalítico durante la oxidación de materia orgánica empleando O ₂ como oxidante (Carbajo O, 2013).	42
Figura 20. Posición de las bandas de conducción y valencia de diferentes semiconductores junto con algunos potencial redox (Serpone, 1995)	44
Figura 21. Reacciones que ocurren durante la activación del fotocatalizador en la degradación de los contaminantes en solución acuosa (Jiménez T, 2015)	45
Figura 22. Estructura cristalina del TiO ₂ en sus diferentes fases (Candal et.al., 2001).....	46
Figura 23. Espectro electromagnético y solar	48
Figura 24. Componentes de la radiación.....	49
Figura 25. Comportamiento típico de radiación (2018).....	49
Figura 26. Radiación solar reflejada en un CPC a diferentes ángulos de incidencia.....	50
Figura 27. Transmitancia de diferentes materiales para ser usados en la fabricación de tubos para reactores solares (Jiménez T, 2015).....	51
Figura 28. Materiales para la posible fabricación de reflectores CPCs (Blanco J. et al., 2003)	51
Figura 29. Instalación del sistema	55

Figura 30. Reactor CPC, escuela primaria Luis Braille	55
Figura 31. Sistema de bombeo	55
Figura 32. Sistema de captación y filtrado	55
Figura 33. Área de captación	55
Figura 34. Equipos de medición	55
Figura 35. Diagrama de Flujo de Proceso (DFP)	56
Figura 36. Preparación de los medios de cultivo para Coliformes fecales.....	66
Figura 37. Sistema de filtración a vacío	67
Figura 38. Medios en incubación.....	68
Figura 39. Sistema con algas.....	86
Figura 40. Conteo de colonias en diferentes medios de cultivo.	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Microorganismos presentes en el agua (Andueza, 2014).	23
Tabla 2. Indicadores de calidad del agua (CONAGUA, 2017)	30
Tabla 3. Potencial de oxidación de las diferentes especies	37
Tabla 4. Métodos de inmovilización de un fotocatalizador y sustratos.....	47
Tabla 5. Principales características de Bomba centrífuga ROTOPLAS®	57
Tabla 6. Principales características de filtros jumbo ROTOPLAS®	57
Tabla 7. Principales características de Cisternas ROTOPLAS®	57
Tabla 8. Principales características del medidor de pH.....	58
Tabla 9. Principales características del medidor de conductividad	58
Tabla 10. Principales características del medidor de OD	58
Tabla 11. Principales características del medidor de temperatura.....	59
Tabla 12. Principales características del radiómetro	59
Tabla 13. Propiedades del TiO ₂ Degussa P-25	59
Tabla 14. Preparación de los medios de cultivo utilizados	66
Tabla 15. Temperaturas y tiempos en incubación para los microorganismos.....	67
Tabla 16. Fechas por lotes, bloque 1 (agua potable)	69
Tabla 17. Fechas por lotes, bloque 2 (agua de lluvia)	70
Tabla 18. Fechas por lotes, bloque 3 (agua de lluvia sin radiación).....	70
Tabla 19. Q acumulada (J/L) bloque 1	84
Tabla 20. Q acumulada (J/L) bloque 2	85
Tabla 21. Conteo de colonias lote 1	87
Tabla 22. Conteo de colonias lote 2	87
Tabla 23. Conteo de colonias lote 3	88
Tabla 24. Conteo de colonias lote 4	88
Tabla 25. Conteo de colonias lote 5	88
Tabla 26. Tasas de degradación de MAM observada en Agar m FC Difco	89
Tabla 27. Tasas de degradación de MAM observada en Agar m Enterococcus Difco	89
Tabla 28. Tasas de degradación de MAM con H ₂ O ₂ observada en Agar m FC Difco	90
Tabla 29. Tasas de degradación de MAM con H ₂ O ₂ observada en Agar m Enterococcus Difco.....	90

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Energía solar UV acumulada por volumen.....	84
---	----

Resumen

La protección y conservación de los recursos naturales constituyen hoy en día una de las principales preocupaciones sociales. Entre estos recursos, destaca en primer lugar el agua como un bien preciado y escaso, lo que conduce a su adecuado uso y reciclaje debido a que las normas legales imponen criterios cada vez más estrictos para obtener una mayor y mejor depuración de las aguas. Un ejemplo de recurso alternativo es el agua de lluvia; sin embargo la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha detectado altos niveles de Coliformes totales y Coliformes fecales, lo que evidencia la necesidad de implementar procesos de desinfección capaces de eliminar estos microorganismos que pueden causar enfermedades al ser ingerida. La fotocatalisis heterogénea, es un proceso de desinfección solar, la posibilidad de la utilización de la radiación solar como fuente primaria de energía, le otorga un importante y significativo valor medioambiental, es un proceso basado en la absorción directa o indirecta de energía radiante (visible o UV) por un sólido (fotocatalizador heterogéneo, normalmente un semiconductor con altas energías de band gap), para esta alternativa la luz y el catalizador son los elementos principales.

El presente trabajo, consiste en el tratamiento de agua de lluvia mediante fotocatalisis solar; se utilizó un reactor tipo CPC impregnado con TiO_2 Degussa-P25 como fotocatalizador, el proyecto se trabajó en 3 bloques: 1) agua potable suministrada por camiones cisterna, 2) agua de lluvia, 3) un experimento en ausencia de radiación. Para medir la calidad del agua se tomó lectura de los parámetros: radiación, temperatura, oxígeno disuelto (OD), conductividad y pH.

Al agua tratada se le realizaron pruebas microbiológicas para la identificación de Coliformes fecales, E. coli y Enterococos, obteniendo valores dentro del límite permisible por la NOM-127-SSA1-1994 (características bacteriológicas), así mismo cumplió con el estándar microbiológico de la norma NOM-041-SSA1-1993 estando por debajo de las 100 UFC (unidades formadoras de colonias) de Microorganismos Aerobios Mesófilos.

Legalmente (en México), se define como agua potable aquella que cumple con los 48 parámetros de calidad establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Debido a las características del proyecto y a los parámetros que se siguieron no es correcto otorgarle el término "potable" al agua resultante del tratamiento fotocatalítico, sin embargo si nos apoyamos en las pruebas de calidad que realiza CONAGUA, el agua tratada en el reactor fotocatalítico cae en el rango de *excelente calidad* para los parámetros de sólidos suspendidos totales, Coliformes fecales, E. coli y porcentaje de saturación de oxígeno, obteniendo así, un agua adecuada para uso humano.

Abstract

Nowadays the protection and conservation of natural resources are some of the main social concerns, among these distinguish the water as a precious and scarce resource, which leads to its proper use and recycling due to the fact that legal norms impose ever stricter criteria to obtain a greater and better purification.

An example of an alternative resource is rainwater, however the World Health Organization (WHO) has detected high levels of total Coliforms and fecal Coliforms, which demonstrates the need to implement disinfection processes capable of eliminating these microorganisms that can cause diseases when ingested. The heterogeneous photocatalysis is an alternative for solar disinfection, the possibility of use solar radiation as a primary source of energy, give it an important and significant environmental value, is a process based on the direct or indirect absorption of radiant energy (visible or UV) by a solid (heterogeneous photocatalyst, usually a semiconductor with high band gap energies), for this alternative light and catalyst are the main elements.

The present work consists in the treatment of rainwater by solar photocatalysis, in CPC reactor impregnated with TiO₂ Degussa-P25 was used as photocatalyst, the project was worked in 3 blocks: 1) potable water supplied by tankers, 2) rainwater, 3) an experiment in the absence of radiation. To measure the water quality, the parameters were recorder: radiation, temperature, dissolved oxygen (DO), conductivity and pH.

The treated water was subjected to microbiological tests for the identification of fecal Coliforms, E.coli and Enterococci, obtaining values within the limit allowed by NOM-127-SSA1-1994 (bacteriological characteristics), as well as complying with the microbiological standard by NOM-041-SSA1-1993 being below 100 CFU (colony-forming units) of mesophilic-aerobic microorganisms.

Legally (in Mexico), drinking water is defined that complies with regulations the 48 quality parameters established by the Official Mexican Standard NOM-127-SSA1-1994. Due to the characteristics of the project and the parameters that were followed it is not correct to grant the term " drinking water " to the water resulting from the photocatalytic treatment, however, if we rely on the quality tests carried out by CONAGUA, the water treated in the photocatalytic reactor falls within the range of excellent quality for the parameters of total suspended solids, fecal Coliforms, E. coli and percentage of oxygen saturation, thus obtaining an adequate water for human use.

1. Introducción

El agua es un elemento que encontramos en la naturaleza, forma parte de los ecosistemas naturales y es primordial para el mantenimiento y la reproducción de la vida en el mundo. El agua es un componente necesario para el desarrollo de los procesos biológicos que hacen posible la existencia no solo del ser humano sino de todos los seres vivos que habitamos en el planeta. Se estima que los seres vivos están constituidos aproximadamente de 70% de agua; cabe señalar que no todos tienen la misma cantidad, los vegetales tienen más agua que los animales y ciertos tejidos (por ejemplo: el tejido graso) contienen menos agua.

De la superficie de nuestro planeta, casi tres cuartas partes están cubiertas por agua (71%) y se distribuyen de la siguiente manera; el 97% de esta agua es salada y la encontramos en los océanos y solo el 3% es agua dulce. La mayor parte del agua dulce la encontramos congelada en los glaciares (polo norte y polo sur) un 30% en el subsuelo y solo un 1% en la superficie ya sea en forma de lago, pantano o río (Academia Nacional de Ciencias, 2019).

1.1 Disponibilidad mundial de agua

Uno de los problemas en relación con el agua es que su distribución en el planeta es muy desigual. Además de que las condiciones climáticas y abundancia del agua en el mundo dependen de la geología, la orografía, el tipo de suelo y la cubierta vegetal.

Estos factores en conjunto imponen variaciones en la disponibilidad del recurso, a tal grado que ocho países (Canadá, Noruega, Brasil, Venezuela, Suecia, Australia, la Comunidad de Estados Independientes y Estados Unidos) concentran prácticamente el 90% del agua dulce, mientras que otros países como Egipto, Sudáfrica y Suazilandia requieren importar este recurso de otros países. Por si fuera poco, el déficit de infraestructura adecuada para el aprovechamiento del agua aumenta las diferencias. El consumo de agua por persona en el mundo también es muy disperso, mientras que 3400 millones de personas cuentan con una dotación de apenas 50 L de agua al día, en países desarrollados este valor fácilmente sobrepasa de los 400 L por habitante por día. Este recurso es un bien necesario que podría pasar a ser objeto de peleas políticas, si se lo observa solo como un negocio.

La disponibilidad natural del agua depende fundamentalmente del balance entre el agua que entra al sistema por medio de la precipitación y de lo que se pierde por la evaporación en los cuerpos de agua y por la evapotranspiración vegetal. La diferencia entre lo que llueve y se evapora puede fluir superficialmente (en arroyos y ríos), almacenarse en los cuerpos de agua superficiales, o bien, llegar al subsuelo y recargar los acuíferos (Reyneke, 2017).

En México la disponibilidad per cápita anual también ha disminuido de manera considerable: en 1950 era de 17 742 m³, pasando a menos de la mitad en 1970 (8 000 m³) y a sólo 4 028 m³ en 2012, volumen considerado como de baja disponibilidad de acuerdo al World Resources Institute (WRI).

Esta última cifra es sustancialmente menor a la de países como Canadá (84 633 m³/hab/año), Panamá (42 577 m³/hab/año) o Estados Unidos (9 159 m³/hab/año), y en general a la de los países sudamericanos, pero ligeramente superior al promedio de muchos países europeos (FAO, 2012).

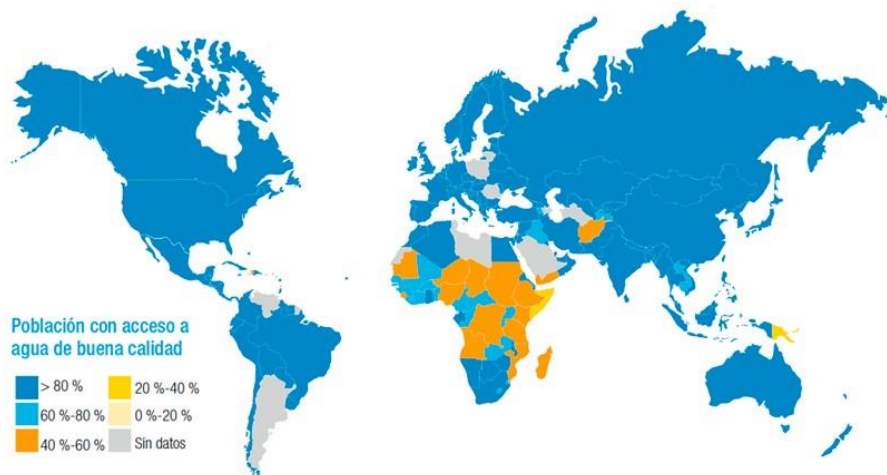


Figura 1. Niveles de acceso a agua de buena calidad en el mundo (Smart Water Magazine, 2019)

En la figura 1 observamos la situación mundial respecto al acceso a agua, es notorio que en el territorio africano es donde se concentra el mayor déficit del recurso. Hoy en día los principales factores que causan los problemas de la calidad y cantidad de agua son aumentos demográficos y cambios del estilo de vida. La población humana ha ido en constante aumento, por lo que cada año se requiere más agua con calidad suficiente para abastecer a todas las personas. Esta situación, aunada a una creciente industrialización, urbanización y a la intensificación de cultivos agrícolas está dando por resultado la actual crisis hídrica mundial.

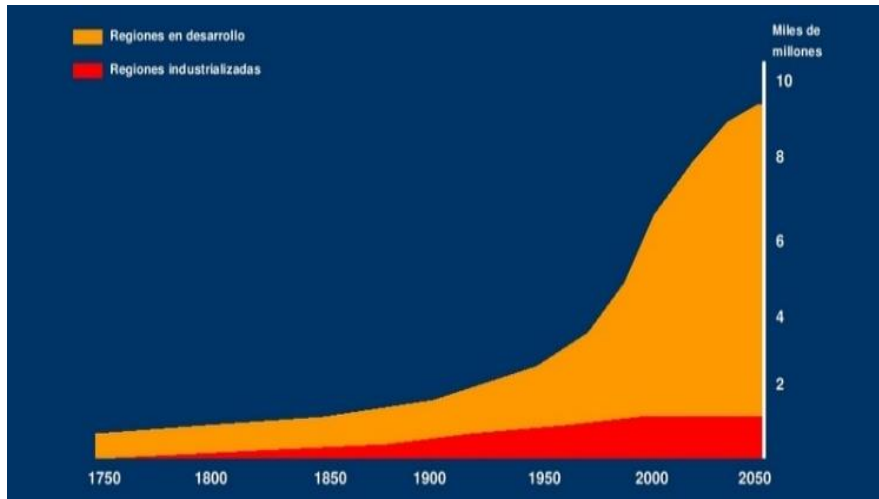


Figura 2. Crecimiento de la población mundial (Córdoba Hernández, 2004)

La figura 2 muestra cómo ha ido creciendo la población mundial a lo largo de los años, también se puede observar que diversas regiones del mundo están aún en vías de desarrollo lo que significa un aumento en consumo de agua potable.

El aumento de la población no solo ha traído consigo una mayor demanda del líquido sino también una mayor generación de aguas residuales, de las cuales gran cantidad se vierte sin tratamiento en los cuerpos de agua superficiales reduciendo la disponibilidad del líquido como resultado de su contaminación.

1.2 Contaminación del agua

El Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C. (2010) afirma que la principal fuente de contaminación del medio ambiente acuático son las aguas residuales, aunque también cabe destacar el papel de la agricultura y ganadería como fuentes de contaminación difusa de pesticidas y antibióticos. La contaminación del agua también genera algunos compuestos minerales como los metales pesados, nitratos, nitritos, elementos que afectan a las propiedades organolépticas (olor, color y sabor) del agua como por ejemplo el cobre y el hierro y elementos que proliferan el desarrollo de algas y promueven la disminución de la cantidad de oxígeno disuelto (OD) en el agua como el fósforo. Los hidrocarburos son un tipo de contaminantes que afectan a la calidad del agua de manera importante. Los derrames de petróleo, cada día son más frecuentes en los océanos, dejan estelas de contaminación de efectos a muy largo plazo. Gracias al avance tecnológico se ha permitido determinar la presencia de otros contaminantes denominados *contaminantes emergentes*, estos corresponden en la mayoría de los casos a contaminantes no regulados, que pueden ser candidatos a regulación futura dependiendo de investigaciones sobre sus efectos potenciales en la salud y los datos de monitoreo con respecto a su incidencia.

Ejemplos de los compuestos que han emergido recientemente como particularmente relevantes, son los surfactantes, productos farmacéuticos, productos para el cuidado personal, aditivos de las gasolinas, retardantes de fuego, antisépticos, aditivos industriales, esteroides, hormonas y subproductos de la desinfección del agua. Para la mayoría de estos contaminantes emergentes, la incidencia, la contribución de riesgo y los datos ecotoxicológicos, no están disponibles. Así que es difícil predecir qué efectos de salud pueden tener en seres humanos y organismos acuáticos (Barceló, 2008).

1.3 Desabasto de agua en México

El problema de desabasto de agua en la CDMX está relacionado directamente con la ubicación geográfica de la misma. En 1325 los aztecas construyeron la CDMX sobre una amplia y compleja red de lagos en un islote rodeado de extensas superficies acuíferas. La ciudad, por supuesto, no podía permanecer siempre con la misma superficie.

Y, para ganarle terreno al agua, se comenzaron a implementar rellenos de tierra y chinampas creadas con balsas de barro y caña.

El balance ecológico de una población que oscilaba en los 300 mil habitantes no duró mucho. Cuando llegaron los conquistadores españoles a Tenochtitlán, la relación que había entre la población y el agua cambió radicalmente. Los españoles implementaron su propio sistema de calles y plazas drenando los lagos y talando los bosques. Las presas y los canales de los habitantes aztecas desaparecieron y empezaron las grandes inundaciones en el centro del país. Desde entonces, los problemas de agua en la CDMX se han agravado con el crecimiento demográfico, la enorme densidad de población y la creciente demanda de agua. El principal problema es el suelo sobre el cual está construida la CDMX; actualmente, los restos del antiguo lago, que se encuentra debajo de gran parte de CDMX, están formados por niveles arcillosos con un alto contenido de agua, es decir, sobre terreno espeso con alta deformidad. Por ello, todo lo construido en esta zona, desde la época prehispánica, se hunde con el tiempo. Con los años, el subsuelo arcilloso se fue consolidando y aparentemente, el problema de hundimiento disminuyó. Pero a mediados del siglo XX, cuando la CDMX empezó a demandar más agua para sus habitantes, se provocó que el constante drenaje de agua incrementara el hundimiento a niveles preocupantes.

Se estima, por ejemplo, que la zona en donde está el Zócalo de la CDMX se había hundido 7.5 cm desde inicios del siglo XX; actualmente se hunde 8 cm al año y no hay indicios de que esto se detenga (Acosta, 2017).

El problema del hundimiento de la CDMX trae consigo grandes consecuencias, por mencionar algunas; el sistema de drenaje se ve afectado severamente, provocando fugas que generan inundaciones y desabastos, accidentes que pueden ser peligrosos y hasta mortales, como los ya conocidos socavones, levantamiento de áreas habitadas, derrumbes inesperados de edificios y canales de agua, así como la pérdida de vías de comunicación (asentadas en el subsuelo, como cables eléctricos) ya que las tuberías subterráneas son afectadas con dichos movimientos.

En la actualidad el desabasto de agua en México es un problema que se presenta en diferentes localidades, principalmente en lugares con mayor densidad de población, tal es el caso de la CDMX; la distribución desigual del agua en México se atribuye a infraestructura obsoleta, toda esta problemática trae consigo diversas consecuencias sociales.

1.3.1 Distribución desigual

La población en México es de 112, 336,538 habitantes, ocupa el 11° lugar de los países más poblados (INEGI, 2010), se estima que el 10% de la población carece de agua potable (CONAGUA, 2010) y el 43% de la población no tienen instalaciones sanitarias mínimas (INEGI, 2015). Del territorio mexicano, dos terceras partes es región árida y semiárida; y el 77% de la población vive en esta región, se genera el 79% del Producto Interno Bruto (PIB) y sólo se cuenta con el 32% del agua renovable. En la zona sur, se asienta solamente el 23% de la población, se genera el 21% del PIB y se encuentra el 68% del agua de todo el país (CONAGUA, 2010).

Mientras que la cobertura nacional de agua potable es de 91.6%, en zonas urbanas la cobertura es de 95.4%. En cuestiones de alcantarillado, la cobertura nacional es de 90.2% y en zonas urbanas de 96.4%. Cerca del 70% de la ciudad tiene menos de 12 horas de agua disponible por día. En algunas zonas de la ciudad, el 18% de la población debe esperar varios días para contar con una hora o dos de agua. En periodos de sequía, después de fenómenos naturales o durante racionamientos estratégicos del agua importada, las cosas empeoran considerablemente (Acosta, 2017).

1.3.2 Infraestructura obsoleta

La infraestructura hidráulica de la CDMX tiene malas condiciones debido a que el presupuesto asignado para esto es muy bajo. El gasto en infraestructura es ineficiente en prevención: el gasto público ejercido para el control de desastres naturales es descuidado ya que las responsabilidades están federalizadas, y las políticas de prevención están predominantemente centralizadas. Simultáneamente, el gobierno central prefiere destinar recursos a la mitigación de los efectos de los desastres que a su prevención. Asimismo, observamos que en los estados, mientras que el gasto en obra pública como porcentaje del gasto total no se ha incrementado de forma significativa con el tiempo, los recursos que se destinan para atender la supuesta mitigación sigue creciendo de forma acelerada (Agenda e incidencia de la industria de la construcción en México, 2016). Las carencias en infraestructura hidráulica generan costos económicos a la hacienda pública, deterioran el medio ambiente y ponen en riesgo a las poblaciones en zonas vulnerables a desastres naturales. La situación se complica cuando observamos que solo el 40.7% promedio nacional del agua que llega a los hogares mexicanos es de excelente calidad (Real Estate, 2018).

1.3.3 Consecuencias sociales

En la actualidad se está teniendo gran impacto social debido a diversos factores entre los que destacan: escasez, contaminación del agua, mala distribución y la ineficiencia de las redes de distribución, razón por la que en algunas alcaldías de la CDMX solo se tiene agua en determinados periodos de tiempo. En localidades en las que se tiene difícil acceso al agua algunas personas se ven obligadas a consumir agua sucia o contaminada repercutiendo en enfermedades a la población. En México el suministro del agua es subsidiado por el gobierno, por lo que se ha generado el acceso a grandes cantidades a un precio muy bajo, provocando escasez en ciertas zonas y sobreexplotación de los recursos hídricos del país; los costos varían de acuerdo al tipo de uso, que puede ser doméstico, comercial o industrial, la disponibilidad del recurso, el volumen consumido y si es administrado o no por una persona física o moral. Se estima que el subsidio que aporta el gobierno a los consumidores es entre el 60 y 90% del costo real. Sin embargo, el promedio de recaudación por este servicio en México, es sólo de 79%. (PPEF, 2018).

1.4 Alcaldía Iztapalapa

La Alcaldía Iztapalapa ubicada al oriente de la CDMX es uno de los lugares con más problemas de escasez de agua. Que van desde esperar a que se tenga agua en el grifo, comprar camión cisterna e incluso el secuestro de las mismas de una forma violenta. La distribución de agua potable en las diferentes localidades depende de la distancia que se tiene desde el sistema Cutzamala hasta la localidad específica. Esto se debe a las pérdidas de presión por fricción, fugas y fallas en las tuberías. La presión del agua de las tuberías está relacionada con el nivel de ingreso, y ambas cuestiones van a la baja entre más se aleje uno de Cutzamala. En las acaudaladas delegaciones del oeste de la ciudad, Miguel Hidalgo y Cuajimalpa, donde se ubica buena parte de los campos de golf de la ciudad, la presión del agua es de 14kg/cm^2 , suficiente para que funcionen los aspersores que riegan el pasto. Más cerca del centro de la ciudad, en las zonas comerciales de Polanco y Benito Juárez, las clases medias y altas deben arreglárselas con un nivel de presión de menos de la mitad, y en ocasiones enfrentan escasez. Sin embargo, esto no es nada en comparación con Iztapalapa, donde la presión de las tuberías es sólo de 500g/cm^2 (Watts, 2015).

SACMEX invierte más en Iztapalapa que en cualquier otra zona de la ciudad, pero lo que desborda es la escala del problema. Las autoridades explican que el desarrollo de Iztapalapa fue principalmente imprevisto. En las últimas décadas, alrededor de 1.8 millones de personas (la mayoría pobres) se han mudado a la delegación, y la infraestructura necesaria se ha construido a un paso muy lento (Watts, 2015). La Alcaldía Iztapalapa también es la alcaldía con mayor número de habitantes de la CDMX con 1, 827, 868 (INEGI, 2015).

1.4.1 Población vulnerable

El acumulado de los problemas sociales ya mencionados recae en los niños quienes son especialmente vulnerables a la contaminación del aire, las sustancias químicas peligrosas, el cambio climático y las deficiencias en el suministro de agua de calidad, el saneamiento y la higiene. De acuerdo con las proyecciones de la población del CONAPO, la población de niñas y niños en nuestro país, asciende a 26 millones 548 mil, lo que representa el 21.3 % del total de la población a nivel nacional. De esta, el 49.8 % corresponde al grupo de 0 a 5 años de edad y el 50.2 % a niñas(os) de 6 a 11 años (CONAPO, 2015). Se estima que en la alcaldía Iztapalapa habitan 389,300 niños de los cuales 193,870 tienen de 0 a 5 años y 195,430 tienen de 6 a 11 años.

1.4.2 Escuela primaria “Luis Braille”

La figura 3 muestra el número total de escuelas en la Alcaldía Iztapalapa desde el rango preescolar hasta profesional técnico; la alcaldía Iztapalapa cuenta con 1620 escuelas, un número considerable comparado con el total en la CDMX. Los problemas que enfrentan día con día debido a la escasez de agua van desde limpieza inadecuada en los baños hasta la suspensión de actividades, en algunos casos los directivos optan por permitir a los alumnos tomar el receso en casa, de esta forma se evitan enfermedades que pudieran llegar a contraer los jóvenes y niños al ingresar a baños poco higiénicos.

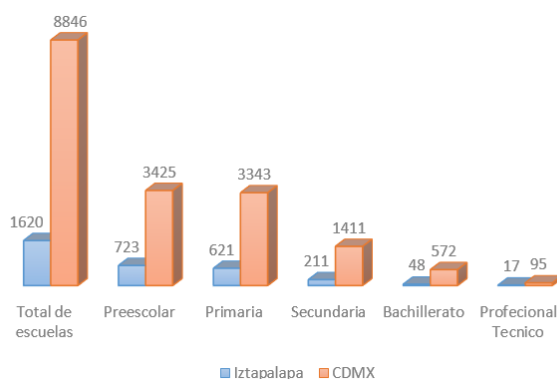


Figura 3. Escuelas en Educación Básica y Media Superior (INEGI, 2010)

Estos inconvenientes y algunos otros se observan en la escuela primaria “Luis Braille” ubicada en calle Jilguerillas N°13, Iztapalapa, ampliación Emiliano Zapata, en donde los directivos se ven en la necesidad de solicitar cubetas de agua a los padres de familia para cubrir los requerimientos básicos de higiene que deben brindar a los niños.

La figura 4 muestra un ejemplo de lo que se vive día con día en la escuela primaria Luis Braille, debido al desabasto de agua los directivos se ven obligados a solicitar cubetas de agua a los padres de familia colocando avisos en la entrada escolar.



Figura 4. Situación en la escuela primaria Luis Braille (2018).

La escuela primaria Luis Braille cuenta con los servicios que podemos observar en la figura 5, al no contar con el servicio de agua de la red pública se ven obligados a solicitar camiones cisterna, las cuales no siempre cumplen con la misión de suministrar agua, esto, debido en primer lugar al difícil acceso a la zona, aunado a la gran demanda por parte de la comunidad restante. La figura 6 muestra la ubicación y la distribución espacial de la escuela primaria Luis Braille. Como se puede entender, el problema del desabasto de agua es crítico, por lo tanto, se tienen que buscar soluciones que eliminen estas situaciones.

🔧	Servicios	En esta escuela
	Energía eléctrica	✓
	Servicio de agua de la red pública	✗
	Drenaje	✓
	Cisterna o aljibe	✓
	Servicio de internet	✓
	Teléfono	✓

Figura 5. Infraestructura de la escuela primaria Luis Braille, información correspondiente al ciclo 2013/2014 (mejoratuescuola.org)



Figura 6. Vista satelital de la Escuela Primaria Luis Braille (Google Maps)

Instituciones como la Dirección General de Servicios Educativos Iztapalapa, están conscientes de toda esta problemática que se vive en la Alcaldía Iztapalapa. Encontraron gran potencial en el proyecto presentado (SECITI-048/2016 y CM-SECITI-109/2017), por lo que accedieron a asignar una escuela que cumpliera con los requisitos técnicos para la instalación del fotorreactor, dicha escuela fue la Primaria Luis Braille.

2. Marco teórico

2.1 Captación de agua de lluvia; una posible solución al abastecimiento de agua

La lluvia se produce porque una parte del agua de nuestro planeta se evapora con el calor del sol, y al subir se condensa tanto que forma las nubes. Cuando las moléculas de agua son demasiadas, se unen unas con otras hasta pasar al estado líquido; al aumentar su peso y tamaño, se desprenden y caen al suelo provocando la lluvia (Consejo Consultativo del Agua, 2018). Según Kinkade (2007), la crisis hídrica que se vive en algunas zonas del planeta, en donde las fuentes de agua superficial y subterránea ya no son aptas para consumo humano, ya sea por contaminación y/o por escasez, ha hecho que se mire a la lluvia como una alternativa para abastecer a los poblados y a los edificios. La captación de agua de lluvia es una técnica utilizada en todo el mundo para su recolección en tejados, superficies terrestres u otras áreas artificiales para dirigir las a tanques de almacenamiento. El diseño del sistema de recolección de agua de lluvia más utilizado incluye tres componentes básicos; el área de captación, el sistema de transporte y un tanque de almacenamiento. Los factores que deben tenerse en cuenta al construir sistemas domésticos de recolección de agua de lluvia incluyen el tipo de área de captación, el material del tanque de almacenamiento, la proximidad de posibles fuentes de contaminación, la ubicación del sistema y las condiciones climáticas (Reyneke, 2017).

Aunado al problema de escasez, existe el de las inundaciones, causadas por el exceso de escurrimientos torrenciales que saturan los drenajes urbanos. Los canales y ríos que llevan el agua en época de lluvias han incrementado su volumen debido al crecimiento de las ciudades. Esto se debe a que se han impermeabilizado las superficies que antes permeaban el agua hacia el subsuelo y que se ha mezclado el drenaje de aguas pluviales con el de aguas negras; por lo tanto, ha aumentado la cantidad de agua que corre en los sistemas de drenaje, provocando que se desborden (Kinkade, 2007).

Existen numerosos ejemplos que muestran el marcado impacto que la recolección de agua de lluvia ha tenido en las regiones en desarrollo del mundo. En México por ejemplo, Isla Urbana AC realiza proyectos de inversión para el desarrollo de más sistemas de captación para hacer más eficiente su uso e instalación. Los sistemas de captación de Isla Urbana AC se han instalado en 16 estados de la República, en donde hay aproximadamente dos mil 150 sistemas en funcionamiento; estos han sido de todo tipo, desde los que se colocan en grandes viviendas hasta los que se establecen en los hogares más humildes (Lluvia para todos, 2018).

2.1.1 Disponibilidad pluvial

Para considerar el agua de lluvia como una alternativa a los problemas de desabasto, es necesario conocer la disponibilidad pluvial del lugar en donde se va a trabajar. Los recursos hidráulicos de un país se miden con base en la disponibilidad natural media de agua por habitante en un año. En la disponibilidad natural media de agua se considera únicamente el agua renovable, es decir, el agua de lluvia que se transforma en escurrimiento de agua superficial y en recarga de acuíferos. El volumen total de agua que obtiene el país por precipitación cada año es de 1 511 km³ en promedio, pero la mayor parte (73%) regresa a la atmósfera por evapotranspiración (1 084 km³). Además del agua por precipitación, México recibe 48 km³ provenientes de Guatemala y 1.8 km³ del río Colorado y, a su vez, entrega 0.44 km³ del río Bravo a Estados Unidos de acuerdo con el Tratado sobre Distribución de Aguas Internacionales firmado entre los dos países en 1944. De esta forma, el balance general muestra que la disponibilidad media natural de México es de 476 km³ de agua en promedio al año; valor superior al de la mayoría de los países europeos, pero muy inferior si se compara con Estados Unidos (2 071 km³), Canadá (2 902 km³) o Brasil (8 233 km³) (CONAGUA, 2010).



Figura 7. Balance de agua en México (CONAGUA, 2010)

En México los meses de Mayo a Octubre tiene lugar la temporada húmeda o de lluvias. Durante estos meses la ciudad recibe más del 90% de las lluvias anuales. En ocasiones van acompañadas de granizo. El resto del año las lluvias son raras de ver. En invierno las nevadas se dan de forma esporádica. A mayor altitud las precipitaciones van en aumento (Clima de México, 2013).

2.1.2 El clima promedio en Iztapalapa

Recordando el desabasto de agua que existe en Iztapalapa, la captación de agua de lluvia se ve como una posible solución para reducir los problemas ya mencionados. En Iztapalapa durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 6 °C a 26 °C y rara vez baja a menos de 3 °C o sube a más de 30 °C. Un día mojado es un día con por lo menos 1 milímetro de líquido. La probabilidad de días mojados en Iztapalapa varía muy considerablemente durante el año. La temporada más mojada dura 4.4 meses, de 28 de Mayo a 10 de Octubre, con una probabilidad de más del 41 % de que cierto día será un día mojado. La probabilidad máxima de un día mojado es del 80 % el 3 de Julio. En la figura 8 se observa que la temporada más seca dura de 6 a 7 meses, con un intervalo móvil del 10 de Octubre al 28 de Mayo. La probabilidad mínima de un día mojado es del 2 % el 8 de Diciembre (Clima promedio en Iztapalapa, 2017).

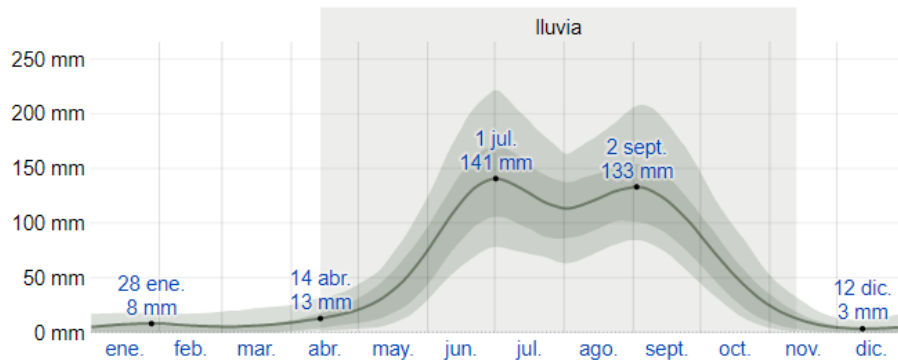


Figura 8. Precipitación de lluvia mensual promedio (Clima promedio en Iztapalapa, 2017)

Los datos anteriores muestran el clima típico en Iztapalapa, basado en un análisis estadístico de informes climatológicos históricos por hora y reconstrucciones de modelos del 1 de Enero de 1980 al 31 de Diciembre de 2016 (Clima promedio en Iztapalapa, 2017).

2.1.2 Microbiología del agua

Si se desea utilizar el agua de lluvia como alternativa al abastecimiento de agua, es necesario saber que no es 100% pura; el agua de lluvia contiene microorganismos que la hacen no apta para uso y consumo directo (Frías, 2018). Las bacterias son microorganismos procariontes, unicelulares, cuyo material genético se encuentra disperso en el citoplasma.

En el mundo hay millones de bacterias y estamos continuamente rodeados de ellas. Las hay patógenas, inocuas y también beneficiosas para nosotros y gracias a su estudio, se han llevado a cabo investigaciones en las cuales se ha descubierto la importancia que poseen en el campo del agua. El Dr. Andueza (2014) ha clasificado diferentes tipos de microorganismos que están presentes en el agua como se muestra en la tabla 1. Las bacterias tienen en el agua una vía perfecta de transmisión, por lo tanto, se han utilizado como indicadores ideales de contaminación.

Tabla 1. Microorganismos presentes en el agua (Andueza, 2014).

Bacterias	Virus	Microorganismos
Aeromonas	Enterovirus	Amoeba
Arcobacter	Hepatitis A	Cryptosporidium parvum
Campylobacter	Adenovirus	Giardia
E. coli	Coxsackie A y B	Toxoplasma gondii
Legionella	Reovirus	
Leptospira	Hepatitis E	
Mycobacterium	Norovirus	
Pseudomonas aeruginosa	Sapovirus	
Salmonella		
Shigella		
Staphylococcus aureus		
Vibrio		
Plesiomonas shigelloides		
Streptococcus		
Yersinia		
Burkholderia pseudomallei		
Acinetobacter		
Enterobacter sakazakii		
Bacillus		
Helicobacter pylori		
Klebsiella		

2.1.2.1 Clasificación de las bacterias

Según Varela (2018), de manera muy general se puede clasificar a las bacterias de la siguiente manera:

Según la forma en que usan el oxígeno

- **Aerobias:** sobreviven solo en presencia de oxígeno
- **Anaerobias:** sobreviven solo en ausencia de oxígeno
- **Facultativas:** sobreviven bajo cualquier condición

Por su respuesta a la temperatura

- **Psicrofílicas (*Pseudomonas spp*):** crecen entre 5-30 °C
- **Mesofílicos (*E. coli, Salmonella spp, etc...*):** crecen entre 25-45 °C
- **Termofílicos:** crecen entre 45-75 °C

Concentración de hidrógeno

- **Acidófilos:** crecen en pH ácidos
- **Neutrófilos:** crecen en pH neutros
- **Alcalófilos:** crecen en pH alcalinos

2.1.2.2 Fases del crecimiento bacteriano

Las poblaciones microbianas raramente mantienen un crecimiento exponencial prolongado. Si ello ocurriera en poco tiempo la tierra estaría tapada de una masa microbiana mayor que la de la tierra misma. El crecimiento está normalmente limitado por el agotamiento de nutrientes o por la acumulación de productos del mismo metabolismo microbiano, que les son tóxicos a la población. La consecuencia es que el crecimiento al cabo de un cierto tiempo llega a disminuir hasta detenerse (Benintende et al, 2018); como se observa en la figura 9.

Es posible distinguir 4 fases:

- a) Fase de retraso: el agua se contamina por primera vez con bacterias, se empiezan a aclimatar en su entorno.
- b) Fase exponencial: las células se dividen a velocidad constante por fisión binaria, existe un gran aumento del número total de células.
- c) Fase estacionaria: el crecimiento está limitado por factores como falta de espacio, agotamiento de los nutrientes esenciales para su crecimiento y acumulación de productos tóxicos.
- d) Fase de muerte: la población disminuye.

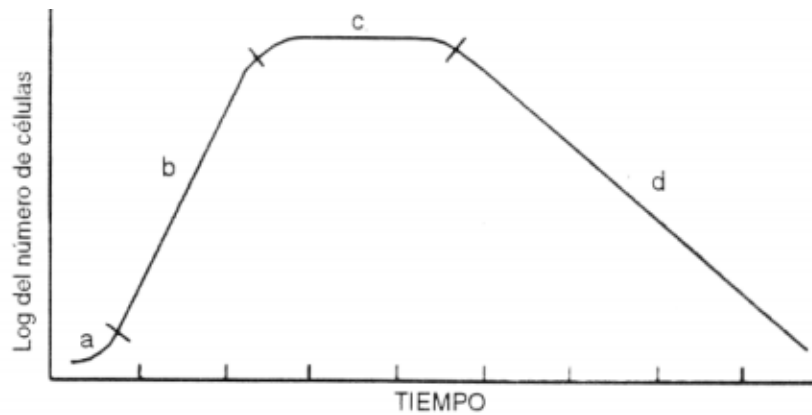


Figura 9. Curva de crecimiento bacteriano (Benintende et al, 2018)

2.1.2.3 Contaminación microbiana en el agua de lluvia

La contaminación que puede existir en el agua de lluvia comúnmente deriva de la materia fecal proveniente de varios animales y aves que acceden a la superficie de recolección y / o desechos orgánicos depositados en el techo. La lluvia arrastra del aire diferentes tipos de microorganismos y partículas es por eso que en el agua de lluvia podemos encontrar lo siguiente (Zdeb et al, 2016):

- **Algas:** Como todas las plantas, estas requieren de luz solar para hacer el proceso de fotosíntesis (absorber el dióxido de carbono y generar oxígeno). El crecimiento de algas causa una coloración verde que se observa comúnmente en el agua de lluvia almacenada. La ausencia de luz y temperaturas bajas minimizaran el crecimiento de algas, cuando estas mueren son degradadas por bacterias.
- **Materia orgánica total:** El agua de lluvia contiene moléculas orgánicas estables, esta materia es la causante del olor, sabor y color del agua. El contenido orgánico de agua se mide comúnmente utilizando TOC.
- **Bacterias:** Las bacterias son fundamentales para la descomposición de la materia biológica. No todas las bacterias son patógenas, pero el agua de lluvia que entra en contacto con materia fecal de alguna superficie que estuvo en contacto con ella se contaminará con Coliformes.

La proliferación de microorganismos patógenos en el agua de lluvia recolectada puede depender de varios factores, como la temperatura ambiente y la intensidad de la lluvia. Si bien el agua de lluvia resulta ser una alternativa para el abastecimiento del líquido, su uso es restringido a su calidad. El término calidad del agua es relativo y solo tiene importancia universal si está relacionado con el uso del recurso.

Esto quiere decir que una fuente de agua suficientemente limpia que permita la vida de los peces puede no ser apta para la natación y un agua útil para el consumo humano puede resultar inadecuada para la industria. De acuerdo con lo anterior, tanto los criterios como los estándares y objetivos de calidad de agua variarán dependiendo de si se trata de agua para consumo humano, para uso agrícola o industrial, para recreación o para mantener la calidad ambiental (Kinkade, 2007). La mayoría de los estándares sanitarios se centran en el conteo de Coliformes fecales, *E. coli*, Enterococos y Microorganismos Aerobios Mesófilos (MAM).

Los Coliformes son bacterias en forma de varillas encontradas en el intestino de seres humanos y animales de sangre caliente. Pueden multiplicarse a temperaturas por encima de 44°C y fermentar la lactosa y el azúcar, por eso también se conocen como “Coliformes termotolerantes”. Cuando estas bacterias se encuentran en el agua, indica fuertemente que el agua estaba contaminada con heces fecales o aguas negras, en los medios de cultivo el color de las colonias es azul tal y como se pueden observar en la figura 10 (Zdeb et al., 2016).

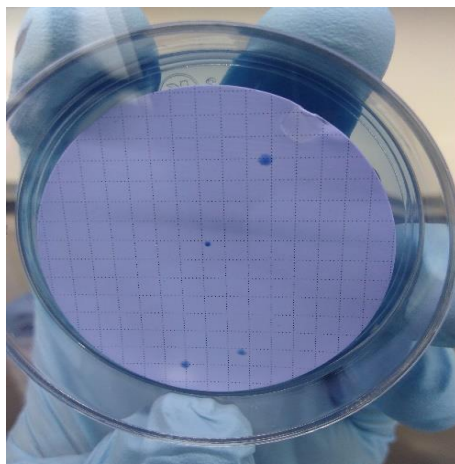


Figura 10. Coliformes fecales (LANCIS)

E. coli es un bacilo corto Gram negativo que se encuentra clasificado dentro de la familia enterobacteriaceae (bacterias entéricas), existe como comensal en el intestino delgado de humanos y animales. Sin embargo, hay algunas cepas de *E. coli* patógenas que provocan enfermedades diarreicas, estas *E. coli* se clasifican con base en las características que presentan sus factores de virulencia únicos, cada grupo provoca la enfermedad por un mecanismo diferente, forman colonias verdes en los medios de cultivo como se muestra en figura 11. (Camacho et al., 2009).

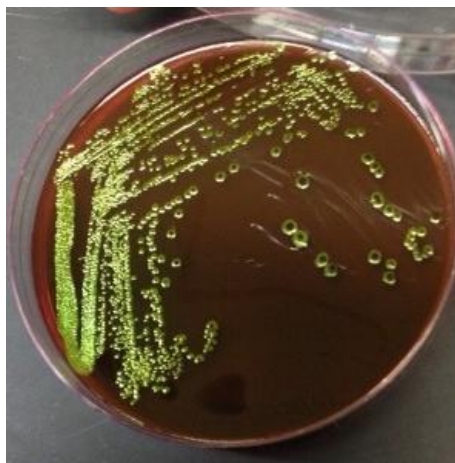


Figura 11. E. coli (medylab.blogspot.com, 2019)

Enterococcus faecalis y *Enterococcus faecium* son especies que comúnmente causan infecciones en seres humanos. Los Enterococos provocan de forma característica: Infecciones de las vías urinarias, infección cardíaca (endocarditis) y abscesos abdominales los *Enterococcus* se distinguen por formar colonias rojizas (ver figura 12).

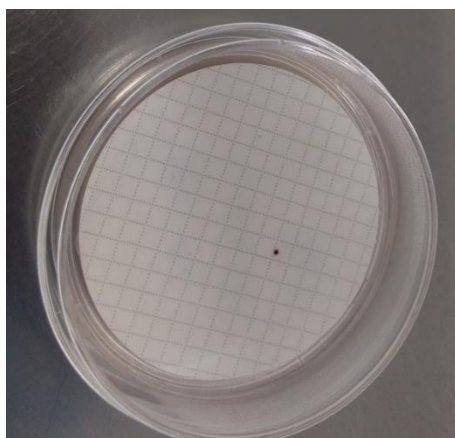


Figura 12. Formación de colonias de *Enterococcus faecalis* (LANCIS)

Los MAM incluyen todos los microorganismos, capaces de desarrollarse en presencia de oxígeno a una temperatura comprendida entre 20°C y 45°C con una óptima entre 30°C y 40°C. El recuento de MAM, en condiciones establecidas, estima la microflora total sin especificar tipos de microorganismos. El conteo de este microorganismo refleja la calidad sanitaria de los productos analizados. Un recuento bajo de MAM no implica o no asegura la ausencia de patógenos o sus toxinas, de la misma manera un recuento elevado no significa presencia de flora patógena, en los medios de cultivo se distinguen por formar colonias blancas o color crema (ver figura 13).

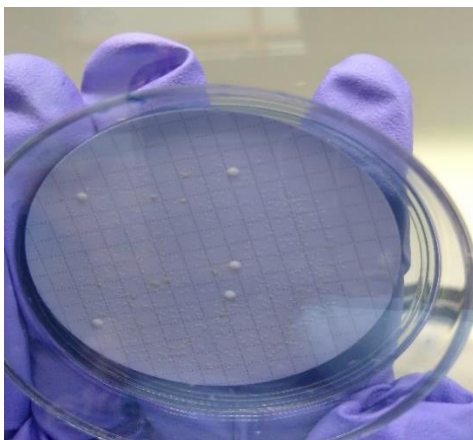


Figura 13. Formación de colonias MAM (LANCIS)

2.1.3 Marco legal en materia de agua en México

2.1.3.1 Constitución política

La gestión jurídica del agua en México tiene como fundamento lo que dictan tres artículos de la Constitución Política (4°, 27 y 115) y la Ley de Aguas Nacionales. El artículo 4° reconoce que toda persona tiene derecho al acceso, la disposición y el saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible.

El Estado debe garantizar este derecho de forma equitativa y sustentable, y establecer la participación de la Federación, los estados y la ciudadanía para conseguirlo. El artículo 27 señala que las aguas son propiedad de la Nación y sienta las bases para que el Estado regule su aprovechamiento sostenible, con la participación de la ciudadanía y de los tres niveles de gobierno. Especifica que la explotación, el uso o aprovechamiento de los recursos se realizará mediante concesiones otorgadas por el Ejecutivo Federal, con base en las leyes. El artículo 115, especifica que los municipios tienen a su cargo los servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales.

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) es el ordenamiento reglamentario del artículo 27 constitucional; regula la distribución y control del agua, y designa a la Comisión Nacional del Agua como el órgano responsable de ejercer la autoridad y administración del agua a nombre del Ejecutivo.

2.1.3.2 Estándares de calidad

Los estándares de calidad de agua varían según su uso y la región en la que nos encontremos; en el territorio mexicano algunos estándares de calidad referentes a la calidad del agua los encontramos en las NOM-127-SSA1-1994, NOM-041-SSA1-1993 y NOM-230-SSA1-2002. Los límites permisibles de calidad de agua para uso y consumo humano se encuentran postulados en la NOM-127-SSA1-1994. De acuerdo con esta norma en la parte microbiológica, debe resultar en ausencia de organismos Coliformes totales y E. coli. Las características físicas y organolépticas aceptables por la norma son: 20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto, olor y sabor agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico) y 5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método. Por último, la norma expresa que los límites permisibles de características químicas son, entre otros: pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH 6.5-8.5 y sólidos disueltos totales (TDS): 1000.00. Además, de acuerdo con la NOM-041-SSA1-1993, para agua purificada envasada es aceptable como máximo 100 unidades formadoras de colonias (UFM) por cada mililitro de agua.

Por otra parte en la NOM-230-SSA1-2002 encontramos todos los requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua, algunos de ellos son los siguientes:

- Las obras de captación, tanques de almacenamiento o regulación, plantas potabilizadoras y estaciones de bombeo, deben protegerse mediante cercas de malla de alambre o muros que impidan la introducción de desechos sólidos, líquidos y el paso de animales. La obra de captación debe mantenerse libre de malezas permanentemente.
- En función de las características de construcción las obras de captación, tanques de almacenamiento, regulación y estaciones de bombeo, deben protegerse de contaminación exterior debida a escurrimientos o infiltraciones de agua u otros vectores.
- Las áreas interiores de estaciones de bombeo y plantas potabilizadoras deben mantenerse siempre aseadas. Se deben limpiar y desinfectar con la frecuencia que determinen las condiciones del sistema, equipo y proceso de manera que se eliminen los riesgos asociados.
- Las paredes interiores de los tanques de almacenamiento o regulación, los cárcamos de bombeo, las cajas colectoras o repartidoras deben ser o estar recubiertos de material sanitario. Debe existir un programa de limpieza que garantice la preservación de la calidad del agua. La limpieza debe incluir la extracción de sólidos sedimentados y remoción de materiales incrustados. Se deben limpiar y desinfectar las paredes y piso con la frecuencia que determinen las condiciones del tanque de manera que se eliminen los riesgos asociados.

2.1.3.3 Organismos públicos

En México existen diversas dependencias e instituciones públicas que tienen a su cargo la regulación y/o el fomento del buen uso del agua, así como del cumplimiento de los estándares de calidad en su suministro tal es el caso del IMTA, COFEPRIS y CONAGUA.

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) que se aboca a enfrentar los retos nacionales y regionales asociados con el manejo del agua, y a perfilar nuevos enfoques en materia de investigación y desarrollo tecnológicos para proteger el recurso y asignarlo de manera eficiente y equitativa entre los distintos usuarios. La Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) es un órgano descentralizado, vinculada con el Departamento de Regulación y Fomento Sanitario de la Secretaría de Salud, entre otras tareas se ocupa del saneamiento básico y el análisis riesgos derivados de factores ambientales. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es un organismo administrativo desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), cuya responsabilidad es administrar, regular, controlar y proteger las aguas nacionales en México.

Tabla 2. Indicadores de calidad del agua (CONAGUA, 2017)

INDICADORES DE CALIDAD DEL AGUA				CALIFICACIÓN, CÓDIGO DE COLORES Y ESCALA DE CALIDAD DEL AGUA DEL INDICADOR				
INDICADOR	CAMPOS DE LA BASE DE DATOS	ABREVIACIÓN	UNIDADES	CUMPLIMIENTO			INCUMPLIMIENTO	
				EXCELENTE	BUENA CALIDAD	ACEPTABLE	CONTAMINADA	FUERTEMENTE CONTAMINADA
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO, 5 DÍAS	DBO_TOT	DBO	mg/L	DBO<=3	3<DBO<=6	6<DBO<=30	30<DBO<=120	DBO>120
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	DQO_TOT	DQO	mg/L	DQO<=10	10<DQO<=20	20<DQO<=40	40<DQO<=200	DQO>200
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	SST	SST	mg/L	SST<=25	25<SST<=75	75<SST<=150	150<SST<=400	SST>400
COLIFORMES FECALES	COLI_FEC	CF	NMP/100 mL	CF<=100	100<CF<=200	200<CF<=1000	1000<CF<=10000	CF>10000
ESCHERICHIA COLI	E_COLI	EC	NMP/100 mL	EC<=250	250<EC<=500	500<EC<=1000	1000<EC<=10000	EC>10000
PORCENTAJE DE SATURACIÓN DE OXÍGENO DISUELTTO	OD_%	OD	%	70<OD<=110	50<OD<=70 Y 110<OD<=120	30<OD<=50 Y 120<OD<=130	10<OD<=30 Y 130<OD<=150	OD<=10 Y OD>150
INDICADOR	CAMPOS DE LA BASE DE DATOS	ABREVIACIÓN	UNIDADES	CUMPLIMIENTO			INCUMPLIMIENTO	
				NO TÓXICO	TOXICIDAD BAJA	TOXICIDAD MODERADA	TOXICIDAD ALTA	
TOXICIDAD DAPHNIA MAGNA, 48 h	TOX_D_48_UT	TA	Unidades de Toxicidad	TA < 1	1<TA<=1.33	1.33<TA< 5	TA >= 5	
TOXICIDAD VIBRIO FISCHERI, 15 min	TOX_V_15_UT	TA	Unidades de Toxicidad	TA < 1	1<TA<=1.33	1.33<TA< 5	TA >= 5	

CONAGUA tiene diversas campañas que monitorean el nivel de la calidad del agua en toda la república mexicana, al día de hoy cuenta con más de 5,000 puntos en donde se realizan diversas pruebas de calidad. Los parámetros que analiza CONAGUA se observan en la tabla 2 (CONAGUA, 2017).

2.2 Alternativas en la depuración y tratamiento de agua de lluvia

Para que el agua de lluvia cumpla con los criterios de calidad que establece la normatividad es necesario darle un tratamiento. Durante la depuración, los contaminantes atraviesan por diferentes etapas o procesos físicos y químicos. De forma muy general, las tecnologías de tratamiento de agua se pueden dividir en procesos de aislamiento, separación y transformación, como se muestra en la figura 14.

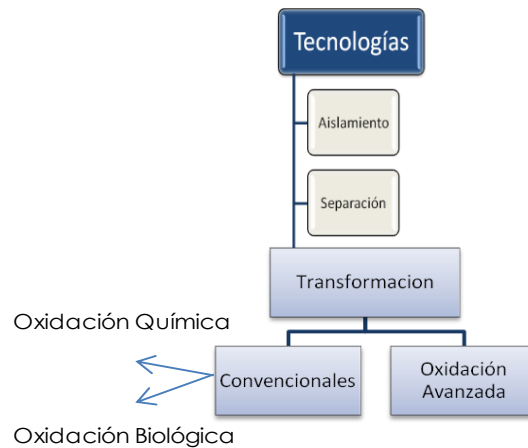


Figura 14. Tipos de tecnologías de tratamiento de agua (Méndez-Arriaga F, 2009)

Los dos primeros utilizan métodos físicos que no alteran la estructura de la molécula. Son ampliamente aplicados en combinación consecutiva o paralela y normalmente requieren etapas combinadas de tratamiento. Entre ellos se pueden mencionar: destilación, coagulación, floculación y sedimentación, adsorción en carbón activo y procesos de membrana controlados por presión como la ósmosis inversa. Las técnicas de transformación son las que convierten y no solo transportan la materia orgánica contenida en los influentes contaminados.

Los procesos de transformación se dividen en convencionales y avanzados. Dentro de los convencionales se encuentran las técnicas de oxidación química (O_3 , H_2O_2 , permanganato, ácido hipocloroso, cloro, etc.) y de degradación biológica (aerobia, anóxica y anaerobia). Sobre las técnicas de oxidación avanzadas se abundará de manera especial más adelante. A continuación se explicaran de forma breve algunas de las tecnologías mencionadas con anterioridad.

2.2.1 Tecnologías de aislamiento y separación

Coagulación-floculación

Las aguas provenientes de diversas fuentes de abastecimiento, así como las aguas residuales contienen partículas orgánicas e inorgánicas. Las partículas inorgánicas pueden ser barro, cieno y óxidos de minerales. Las partículas orgánicas pueden incluir virus, bacterias, algas, protozoarios y demás microorganismos que se han incorporado en las corrientes de agua. Las aguas residuales o superficiales contienen partículas muy finas de material coloidal o suspendido que requieren de un tratamiento para obtener un agua con niveles aceptables de calidad. Es necesario remover las partículas para:

- 1) Disminuir la turbiedad del agua a niveles aceptables
- 2) Eliminar agentes infecciosos del agua
- 3) Eliminar compuestos tóxicos que pudieron adsorberse sobre las partículas coloidales. El método fisicoquímico más utilizado para remover partículas coloidales, suspendidas y disueltas del agua es la coagulación-floculación.

Los coloides y una gran parte de las partículas finas no sedimentan en los procesos físicos convencionales. Por ello, la *coagulación-floculación* es aplicada con los siguientes objetivos:

- Remoción de materia en estado coloidal y en suspensión de las aguas residuales
- Remoción de turbiedad orgánica e inorgánica que no puede sedimentar rápidamente
- Remoción de color
- Eliminación de bacterias y microorganismos patógenos susceptibles a ser separados por coagulación-floculación
- Destrucción de algas y plantas
- Como ayudante a los procesos de sedimentación y filtración

Sedimentación

Consiste en la separación por la acción de la gravedad de las partículas en suspensión cuyo peso específico es mayor que el del agua. Los decantadores se emplean para eliminar los floculos químicos formados en las etapas de coagulación y floculación del tratamiento terciario. El objetivo principal es obtener un efluente clarificado y transparente. Para mejorar el rendimiento de la sedimentación se han diseñado los decantadores lamelares. Los decantadores lamelares son los que más se utilizan en tratamientos terciarios, ya que presentan mejor rendimiento para un área determinada y por lo tanto ahorran espacio.

El inconveniente práctico que presentan es la aparición potencial de olores debido al crecimiento biológico, la acumulación de aceites y su obturación. Los decantadores lamelares son tanques de poca profundidad que contienen unos dispositivos constituidos por paquetes de placas paralelas o de pequeños tubos de plástico de diferentes formas. En algunos casos la sedimentación es el único tratamiento al que se somete el agua residual. La sedimentación puede producirse en una o varias etapas o en varios puntos del proceso de tratamiento. En una planta de tratamiento de agua potable se utiliza en los clarificadores o sedimentadores primarios después de un tratamiento de floculación y previo a la filtración y desinfección. La eliminación de partículas también se puede llevar a cabo en un campo de aceleraciones variable como la acción de la fuerza centrífuga. En este caso se denomina sedimentación acelerada.

Filtración

El proceso de filtración es aquella operación de separación sólido fluido en la que se produce la separación de partículas sólidas o gotas de líquidos o gases a través de un medio filtrante, aunque a veces se utiliza en otros procesos de separación. La filtración de aguas residuales adopta diseños especiales debido a las características físicas y químicas del agua. En general, los filtros utilizados en los tratamientos terciarios, reciben partículas de mayor tamaño y más variable, de mayor peso y con cargas de sólidos más variables.

El proceso es muy simple, como se muestra en la figura 15; consiste en pasar el agua que se quiere tratar por un lecho filtrante o por una membrana y se obtiene un permeado y un rechazo de sólidos, al final empieza a aumentar el contenido de sólidos en suspensión en el efluente hasta alcanzar un nivel máximo aceptable, o cuando se produce una pérdida de carga prefijada en el interior del filtro. Una vez alcanzada cualquiera de estas dos condiciones, se termina la fase de filtración, y se procede a lavar el filtro a contracorriente para eliminar la materia en suspensión que se ha acumulado en el interior del lecho filtrante.

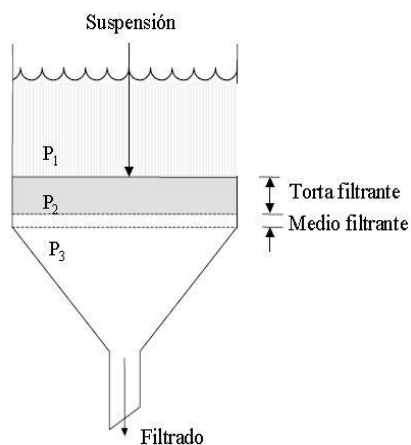


Figura 15. Sistema de filtración

Filtración por membrana

Es una operación que emplea membranas especiales en diferentes tipos de arreglos para separar macromoléculas en solución de contaminantes más pequeños, por medio de un gradiente de presión. Principalmente existen dos tipos de filtración con membranas; la microfiltración (MF) y la ultrafiltración (UF). El principio de la micro y ultrafiltración es la separación física. El tamaño de poro de la membrana es un factor importante para determinar qué sólidos suspendidos o disueltos y qué microorganismos pueden pasar y cuales son retenidos. Las sustancias de mayor tamaño que los poros de la membrana son retenidas totalmente. Algunas sustancias más pequeñas que los poros de la membrana pueden ser retenidas (total o parcialmente), dependiendo de la selectividad de las membranas.

Ósmosis inversa (OI)

La OI es usada principalmente para desalación (Voutchkov, 2013). En tratamiento de aguas, la OI es usada para la remoción de constituyentes disueltos del agua residual, remanentes del tratamiento avanzado con filtración o microfiltración. Estas membranas excluyen iones, pero requieren altas presiones para producir agua desionizada. El origen de la ósmosis inversa está basado en la ósmosis, el cual es un fenómeno natural que se produce en las células de los seres vivos, donde dos soluciones de distinta concentración salina puestas en contacto a través de una membrana semipermeable tienden a igualar sus concentraciones (Medina San Juan, 2000). Para ello se produce un movimiento desde la solución más diluida hacia la más concentrada, que se detiene cuando se alcanza un equilibrio entre ambas concentraciones. La fuerza que provoca ese movimiento se conoce como presión osmótica y está relacionada con la concentración de sales en el interior de ambas soluciones. Cuando dos soluciones de diferente concentración o salinidad están colocadas en dos recipientes separados por una pared impermeable, cada una de ellas alcanza en el depósito correspondiente una altura que es función únicamente del volumen de la solución y del diámetro del depósito. La OI es el paso forzado de agua a través de una membrana en contra de la presión osmótica natural con el objeto de separar iones. Este proceso se ilustra en la figura 16, donde una capa delgada separa dos soluciones.

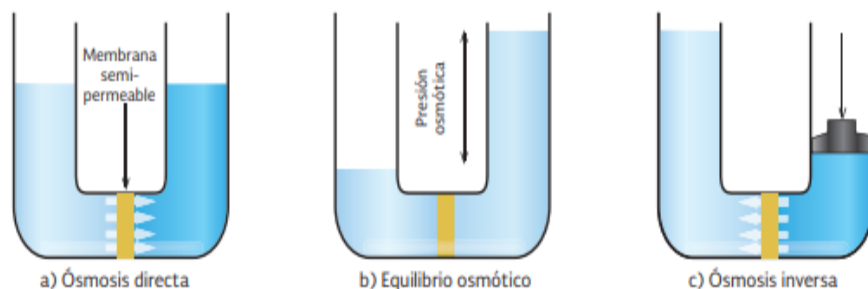


Figura 16. Esquema del proceso de ósmosis directa y ósmosis inversa

2.2.2 Tecnologías de oxidación química

Ozonización

El ozono es un gas fuertemente oxidante que reacciona con la mayoría de las moléculas orgánicas así como con muchas inorgánicas y se produce por la acción de un campo eléctrico sobre el oxígeno. El ozono es más reactivo que el cloro y sus reacciones son rápidas al inactivar microorganismos, oxidar hierro, manganeso, sulfuros y nitritos, mientras que oxida lentamente compuestos orgánicos, pesticidas y compuestos orgánicos volátiles. A diferencia del cloro, el ozono no reacciona con el agua para formar especies desinfectantes, sino que se descompone en oxígeno y radicales hidroxilos libres, teniendo una vida media en agua de aproximadamente 10 a 30 minutos, siendo menor a pH's mayores a 8 unidades, por lo cual debe ser generado in situ. Generalmente el ozono se aplica junto con otro desinfectante debido al alto costo comparado con el cloro y en la mayoría de los casos se aplica con fines adicionales a la desinfección como son el control de olor, color y sabor, la oxidación de precursores de los trihalometanos y la desestabilización de coloides. Los únicos subproductos que se han identificado con la ozonización del agua son los aldehídos. En solución acuosa, el ozono puede actuar en forma directa con el ozono molecular, con especies de radicales formados cuando el ozono es descompuesto en agua.

Cloración

La cloración se emplea en la potabilización para destruir patógenos, controlar problemas de olor, remover hierro y manganeso y para eliminar nitrógeno amoniacal. El cloro tiene una fuerte afinidad por varios compuestos y elementos, particularmente por los agentes reductores, pues tiene una gran tendencia a ganar electrones y formar ión cloruro o compuestos organoclorados. Las sustancias con las cuales el cloro reacciona frecuentemente son Fe, Mn, NO₂, H₂S, así como con la mayor parte de los compuestos orgánicos presentes. Las reacciones con los compuestos inorgánicos en general son rápidos, mientras que las que se llevan a cabo con los orgánicos son muy lentas y su grado de desarrollo depende de la cantidad de cloro disponible. La aplicación más común del cloro es para desinfectar. Esta acción ocurre como producto de la reacción entre el HOCl y las estructuras de las bacterias y virus, que inactiva procesos básicos para la vida. La tasa de desinfección depende de la concentración y forma en que se encuentre el cloro disponible, el tiempo de contacto, el pH, temperatura y otros factores.

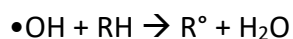
2.2.3 Tecnologías de degradación biológica

Los procesos de degradación biológica son capaces de tratar volúmenes considerables de agua; utilizan microorganismos que absorben los contaminantes orgánicos llevando a cabo reacciones bioquímicas, oxidándolos y promoviendo su mineralización. Sin embargo, cuando los influentes contienen compuestos como los farmacéuticos los fangos disminuyen su efectividad pues, más que como fuente de carbono, actúan como sustancias tóxicas en los microorganismos que inhiben la actividad de asimilación y provocan ineficiencia del proceso en general.

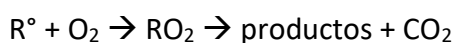
2.3 Procesos de Oxidación Avanzada

Los procesos de oxidación avanzada (AOPs por sus siglas en inglés *Advanced Oxidation Processes*) son una alternativa no convencional para el tratamiento de contaminantes persistentes, disminuye la concentración de dichos compuestos, logrando un grado de mineralización mayor; o bien generando productos de degradación menos tóxicos que los originales. Esta familia de técnicas para el tratamiento de contaminantes ha sido incorporada recientemente y aún existen ligeras diferencias en su definición. Los AOPs son procesos de oxidación aplicados a la degradación de contaminantes orgánicos presentes en aire, suelo o aguas basados en la presencia del radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) en condiciones normales o subcríticas de presión y temperatura con o sin catalizador, con o sin un medio oxidante y/o en presencia o ausencia de una fuente energía químicamente reactiva (fotónica, ultrasónica o eléctrica) (Méndez-Arriaga F. 2009). Los AOPs son procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes. El concepto fue inicialmente establecido por Glaze y colaboradores (1987), quienes definieron los AOPs como los procesos que involucran la generación y uso de especies transitorias poderosas, fundamentalmente el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) altamente reactivo ya que presenta un elevado potencial de oxidación ($E^\circ = 2.8 \text{ V}$), característica que lo hace de gran efectividad para el proceso de oxidación de compuestos orgánicos principalmente por abstracción de hidrógeno; es decir, se generan radicales orgánicos libres (Reacción 1), los cuales pueden reaccionar con oxígeno molecular para formar peroxiradicales (Reacción 2).

Reacción 1:



Reacción 2:



El poder de oxidación de este radical ocupa el segundo lugar de las especies químicas altamente oxidantes (ver tabla 3); es únicamente superado por el del flúor.

Tabla 3. Potencial de oxidación de las diferentes especies

Especies	Potencial de oxidación E° (V, 25°C)
Flúor (F)	3.03
Radical hidroxilo (•OH)	2.80
Oxígeno atómico (O ₂)	2.42
Ozono (O ₃)	2.07
Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂)	1.78
Radical perhidroxilo (HO ₂)	1.70
Permanganato (MnO ₄)	1.68
Dióxido de cloro (HClO)	1.57
Ácido hipocloroso (HClO)	1.49)
Cloro (Cl ₂)	1.36
Bromo (Br ₂)	1.09
Yodo (I ₂)	0.59

2.3.1 Radical •OH

Los radicales hidroxilos (•OH) se pueden formar a partir del oxígeno, del peróxido de hidrógeno e incluso sólo a partir del agua. Una vez formado el radical hidroxilo, y en ausencia de materia orgánica, cuando reacciona se reduce a agua.

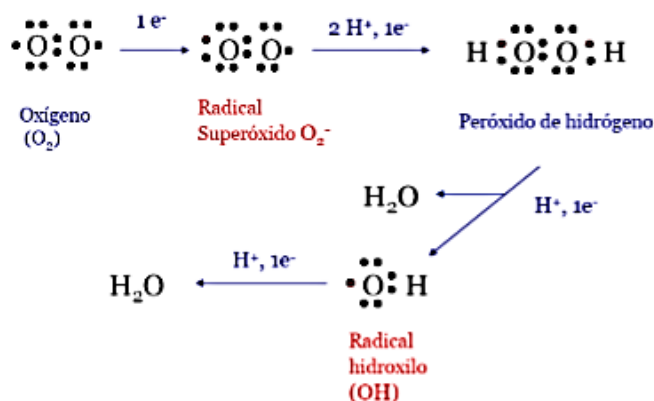


Figura 17. Proceso de oxidación del radical hidroxilo (Terán, 2016)

2.3.2 Clasificación de los AOPs

Las AOP pueden ser divididas según las condiciones de presión y temperatura en que se desarrollen (ambiente o subcríticas). Ambas pueden ser empleadas con el uso o sin el uso de catalizadores (en fase homogénea o heterogénea) y con la presencia o no de agentes oxidantes diferentes al oxígeno, como el H_2O_2 o el O_3 . Además pueden llevarse a cabo mediante la aplicación de fuentes reactivas de energía como la electroquímica, electromagnética lumínica ultravioleta-visible (UV-Vis), gamma o ultrasonora (US) (Méndez-Arriaga F, 2009).

En la figura 18 se esquematizan las variantes en que se pueden presentar las AOPs junto con las denominaciones más comúnmente empleadas. Esta clasificación se basa en los procesos más ampliamente hallados en la literatura junto con los catalizadores o semiconductores frecuentemente usados dentro de aplicaciones medioambientales.

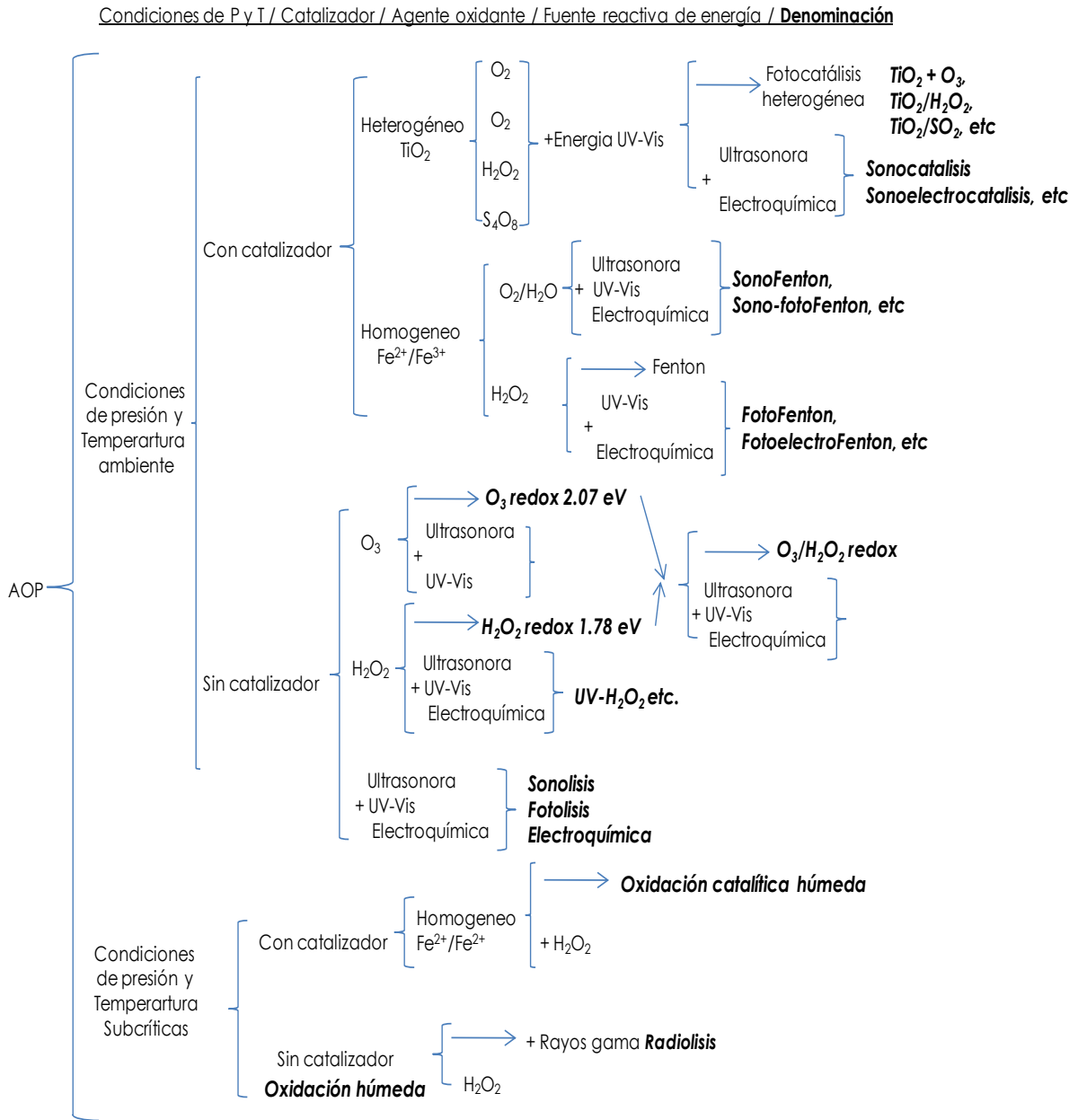


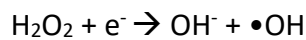
Figura 18. Clasificación según las condiciones de P y T, presencia o no de catalizador, agente oxidante, fuente reactiva de energía y varias de las denominaciones más comúnmente aplicadas para las AOP, (Méndez-Arriaga F, 2009).

Como se puede observar el campo de estudio de los AOPs es muy amplio, a continuación se hablará de algunos ejemplos de estos.

2.3.3 UV-H₂O₂

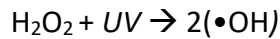
El peróxido de hidrógeno (H₂O₂), es un compuesto químico con características de un líquido altamente polar, fuertemente enlazado con el hidrógeno tal como el agua, que por lo general se presenta como un líquido ligeramente más viscoso que éste, es inestable y se descompone rápidamente a oxígeno y agua con liberación de calor. Aunque no es inflamable, es un agente oxidante potente que puede causar combustión espontánea cuando entra en contacto con materia orgánica o algunos metales, como el cobre, la plata o el bronce. El H₂O₂ ha demostrado que mejora el rendimiento de la fotocatalisis (ver más adelante) como aceptador de electrones para evitar la recombinación de e⁻/h⁺ (*Reacción 3*).

Reacción 3



La radiación UV (254 nm) presente en la fracción del espectro electromagnético que emite el sol (ver sección 2.4) es capaz de romper la molécula generando $\bullet\text{OH}$ (*Reacción 4 y 5*)

Reacción 4



Reacción 5



2.3.4 Fenton

La reacción de Fenton es un proceso de oxidación propuesto por H. J. H Fenton (1894) para la oxidación de ácido tartárico. El método se basa en la generación de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) por la adición de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) a sales metálicas de hierro (Fe⁺²) en disolución, obteniendo mejores resultados a valores de pH = 3,0.

2.3.5 Fotofenton

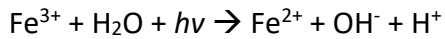
Consiste en la descomposición del peróxido de hidrógeno a partir de un catalizador como es el Fe⁺², donde a partir de la radiación luminosa se consigue mineralizar el contaminante en la mayoría de los casos y con menor tiempo que si se hace con el proceso Fenton. En estas condiciones, la fotólisis de compuestos de Fe⁺³, permite la regeneración de la forma reducida del catalizador favoreciendo el ciclo catalítico (Terán, 2016).

Las siguientes reacciones describen el proceso:

Reacción 6

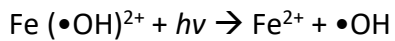


Reacción 7



Los métodos tipo Foto-Fenton producen una mayor degradación de compuestos contaminantes de aguas ya que en estos métodos se utiliza radiación UV que produce una generación adicional de radicales hidroxilo. La fotólisis de hidroxocomplejos de Fe^{3+} genera radicales hidroxilo e iones Fe^{2+} que reaccionaran dando lugar a más radicales hidroxilo (Reacción 8) (Sánchez, 2010).

Reacción 8



2.3.6 Fotocatálisis heterogénea

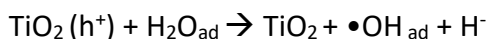
La energía solar puede ser utilizada en la desinfección de agua, puesto que la inactivación de los microorganismos se alcanza, ya sea que el agua se caliente alcanzando temperaturas por arriba de 70°C, o exponiéndola al intervalo UV (300-400nm) del espectro electromagnético (Rodríguez *et al.*, 2007). La fotocatálisis homogénea es un proceso de oxidación avanzada que utiliza la radiación solar para la producción de radicales hidroxilo (Malato *et al.*, 2002) y principalmente utiliza como fotocatalizador el dióxido de titanio (TiO_2) aunque pueden emplearse otros materiales (ver sección 2.3.8). El proceso fotocatalítico heterogéneo está basado en la excitación de un sólido-catalítico, normalmente un semiconductor, mediante la absorción de la luz. Uno de los principales usos de esta tecnología está en el tratamiento microbiológico de agua, dado su efecto bactericida (De la Hoz *et al.*, 2009). El mecanismo global del proceso fotocatalítico heterogéneo tiene lugar en una partícula de TiO_2 suspendida en una fase acuosa con un contaminante orgánico, empelando oxígeno como agente oxidante. El proceso surge partir de la irradiación del TiO_2 con luz de una energía suficiente como para igualar o superar el band-gap del semiconductor, produciendo la excitación de un electrón de la banda de valencia (BV) a la banda de conducción (BC) del dióxido de titanio. De esta modo se crean pares electrón-hueco (e^-/h^+) (Reacción 9).

Reacción 9



Los huecos (estados vacíos) que se forman en la banda de valencia del sólido, reaccionan cuando una molécula de agua es adsorbida (ad) en la superficie del catalizador o por oxidación de los iones oxidrilo, generando los $\bullet\text{OH}$ principales responsables de la degradación de la materia orgánica (Reacción 10 y 11).

Reacción 10:



Reacción 11:

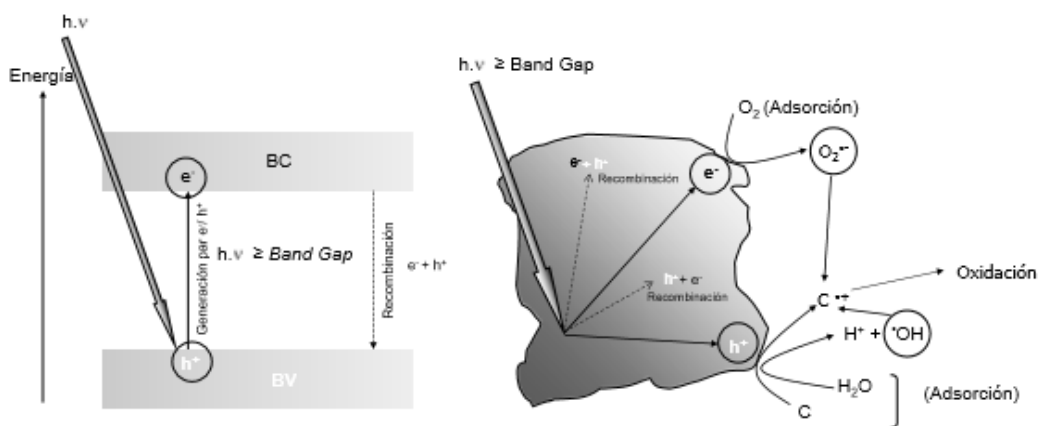
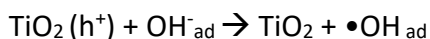
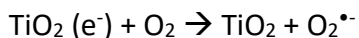


Figura 19. Esquema del proceso fotocatalítico durante la oxidación de materia orgánica empleando O_2 como oxidante (Carbajo O, 2013).

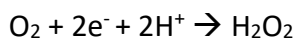
En la figura 19 del lado izquierdo, se observa un diagrama de energía de la banda de valencia (BV) y conducción (BC) de un semiconductor y del lado derecho observamos la partícula de TiO_2 .

A su vez, los electrones que llegan a la banda de conducción, pueden reducir el oxígeno para generar radicales superóxido que pueden ser parcialmente protonados (Reacción 12).

Reacción 12:

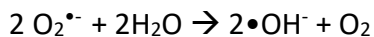


Reacción 13:

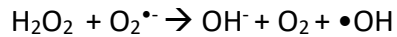


A partir del peróxido de hidrógeno y del radical superóxido también se generan radicales libres (Reacción 14 y 15).

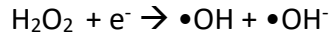
Reacción 14:



Reacción 15:



Reacción 16:



Siendo esto, la desinfección tendrá lugar cuando los microorganismos sean atacados por los radicales $\bullet\text{OH}$ y $\text{O}_2^{\bullet-}$ conocidas como especies reactivas de oxígeno. Dado que los radicales producidos son de alto poder oxidante y son no selectivos, poseen el potencial de eliminar la mayoría de los microorganismos y de degradar o mineralizar la mayoría de los contaminantes orgánicos presentes en el agua (De la Hoz *et al.*, 2007).

2.3.7 Parámetros que influyen en la fotocatalisis heterogénea

Para la eficiencia global de la reacción existen muchos parámetros que influyen tanto cuantitativamente como cualitativa en el proceso de fotocatalisis.

- Catalizador:

Un área superficial grande para la adsorción y degradación, usencia de porosidad interna, una distribución uniforme de tamaño de partícula, la forma esférica de las partículas y la masa optima que ha de ser elegida de forma que se evite un exceso de catalizador, para asegurar la total absorción de los fotones en el menor tiempo posible, sabiendo que cuanto mayor sea la dosis del catalizador, mayor será en principio la eficiencia obtenida. Sin embargo, la turbidez dificulta la difusión de la luz, siendo esto una desventaja.

- Radiación:

El TiO_2 absorbe radiación del ultravioleta cercano (alrededor de los 360-365 nm), cualquier radiación de estas características tendrá la capacidad de generar en el semiconductor pares de electrón-hueco; por ello, la fotocatalisis heterogénea puede emplear la luz solar. Para un rango de intensidad de radiación la velocidad de reacción es proporcional a ésta; pero para intensidades grandes no guarda la misma proporcionalidad (Blesa y Sánchez, 2004).

- pH:

El pH afecta el tamaño de las partículas, las posiciones de los máximos y mínimos de las bandas del TiO_2 debido a su carácter anfotérico y la carga superficial.

- Temperatura:

La temperatura no afecta significativamente la velocidad de reacción, debido a la activación fotónica los procesos fotocatalíticos no requieren calor para su activación, por lo tanto estos procesos pueden operar a temperatura ambiente.

- Presencia de oxígeno:

El oxígeno es uno de los oxidantes más importantes además el más empleado ya que es barato y no compite con el sustrato en el proceso de adsorción, una aireación controlada por otro lado, permite la continua suspensión de catalizador en una disolución, favoreciendo una degradación más homogénea.

- Calidad del agua a tratar:

La presencia de sólidos suspendidos, materia orgánica e inorgánica y la turbidez en el agua a tratar mediante fotocatalisis pueden restar eficiencia a la oxidación fotocatalítica.

- Diseño del reactor:

Algunos factores derivados del diseño y del tipo de reactor influyen sobre el rendimiento final, por ejemplo la óptica, la geometría, la distribución de la luz y el tipo de flujo.

2.3.8 Fotocatalizadores

Existen diversos materiales con propiedades idóneas para actuar como catalizadores y llevar a cabo reacciones fotosensibilizadas como, por ejemplo, TiO_2 , ZnO , CdS , WO_3 , ZnS , ZnO , CeO_2 , ZrO_2 , SnO_2 , Sb_2O_4 , CdS , etc. Los fotocatalizadores son compuestos que toman ventaja de su cualidad semiconductor, es decir, son capaces de transportar electrones toda vez que han sido excitados por alguna fuente de energía como la luz ultravioleta o solar. Este tipo de compuestos han sido estudiados desde hace algunos años, en especial para el caso del TiO_2 . (Barrios, E. 2016). La eficiencia de estos viene determinada, principalmente, por la separación energética existente entre la banda de valencia y la de conducción (band gap) (Domínguez, 2012). La posición de las bandas de conducción y valencia se pueden observar en la figura 20.

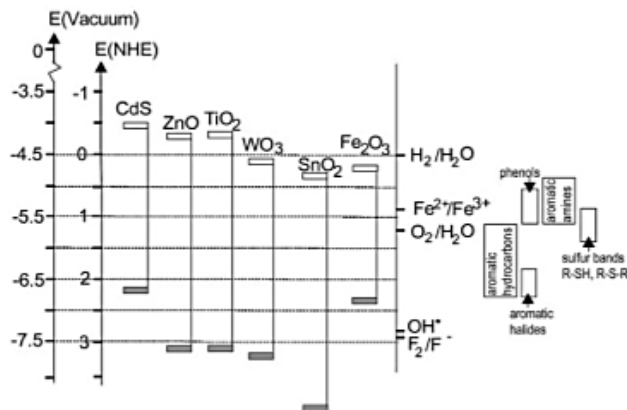


Figura 20. Posición de las bandas de conducción y valencia de diferentes semiconductores junto con algunos potencial redox (Serpone, 1995)

Los semiconductores más usuales presentan bandas de valencia con potencial oxidante (+ 1 a + 3.5 V) y bandas de conducción moderadamente reductoras (+ 0.5 a – 1.5 V) (Blesa & Sánchez, 2004). En presencia de especies redox adsorbidas en la partícula de semiconductor y baja iluminación, ocurren simultáneamente reacciones de oxidación y de reducción en la superficie del semiconductor (Domínguez, 2012). En el caso de la fotocatalisis heterogénea, existen referencias de aplicaciones con múltiples semiconductores como Al_2O_3 , ZnO , Fe_2O_3 y TiO_2 . Sin embargo, el más utilizado TiO_2 , ya que presenta una mayor actividad fotocatalítica, no es tóxico, es estable en soluciones acuosas y no es costoso, habiéndose evaluado diferentes estructuras del mismo (Garcés et al. 2004)

El titanio en su forma más estable como óxido, puede encontrarse en tres formas cristalinas diferentes que son brookita (estructura ortorrómbica), rutilo (estructura tetragonal) y anatasa (estructura octaédrica), estos dos últimos son producidos a gran escala de forma industrial y tienen como principal usos actuar como catalizadores o pigmentos para superficies. En general, existen dos formas de utilizar el TiO_2 , la primera es en partículas finas dispersas o suspendidas en un medio líquido y la otra es inmovilizada en diversos materiales en capas finas. Cuando el TiO_2 se aplica en suspensión, su actividad fotocatalítica es máxima debido a que tiene un área superficial suficiente para favorecer la transferencia de masa, lo que beneficia la interacción de los contaminantes con la superficie del catalizador, los cuales pueden ser degradados mediante diferentes mecanismos de reacción (Feigelson et. al., 2000).

Sin embargo el TiO_2 en suspensión tiene la desventaja de permanecer en el agua tratada, es necesario removerlo por medio de filtros, a nivel laboratorio resulta sencillo, no obstante a una escala mayor resulta complicado remover el TiO_2 , es por ello que en la actualidad se están investigando y desarrollando tecnologías que inmovilicen el TiO_2 (Jiménez, 2015).

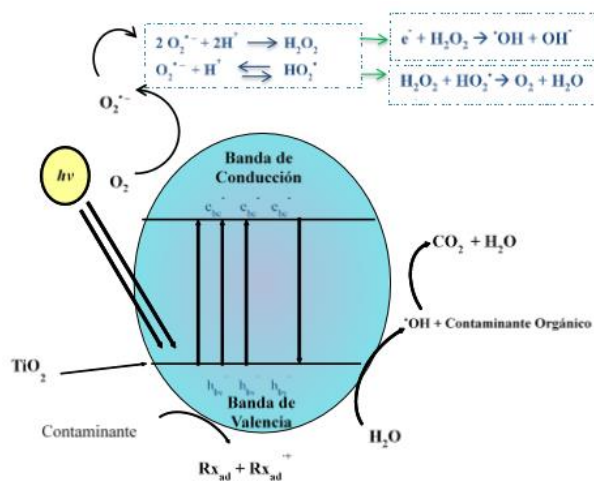


Figura 21. Reacciones que ocurren durante la activación del fotocatalizador en la degradación de los contaminantes en solución acuosa (Jiménez T, 2015)

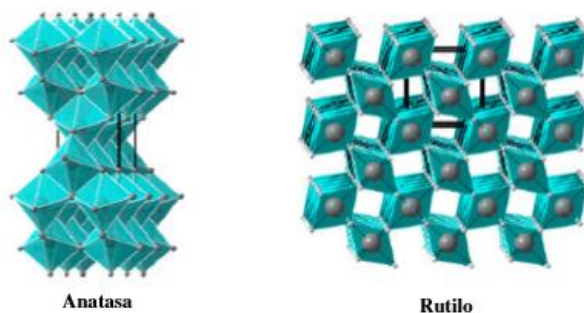


Figura 22. Estructura cristalina del TiO_2 en sus diferentes fases (Candal et.al., 2001)

La anatasa y el rutilo presentan diferente energía del band gap. La anatasa presenta una energía de 3,23 eV, mientras que el rutilo presenta una energía de 3,02 eV. Aunque esta energía es mayor para la anatasa, se ha descrito que esta fase presenta mayor actividad fotocatalítica que el rutilo (Sánchez, 2010). La fase rutilo es la única termodinámicamente estable, pero con baja actividad fotocatalítica. La anatasa, por el contrario es metaestable y se transforma irreversiblemente en rutilo por calentamiento, las estructuras del TiO_2 se observan en la figura 22 en sus diferentes fases. La transformación anatasa-rutilo tiene lugar a temperaturas entre 400 y 1000 °C, dependiendo de la microestructura de los polvos de anatasa, el contenido de impurezas o el tamaño de la partícula. Esta transformación involucra ruptura de energía de enlaces, apareciendo por tanto fenómenos de nucleación y crecimiento. Algunos autores han propuesto que una estructura bicristalina, que contenga anatasa y rutilo, tendrá mayor actividad fotocatalítica que las fases puras cristalinas (Mendoza-Anaya et. al., 2004).

Ventajas del TiO_2 respecto a otros fotocatalizadores (Sánchez, 2010):

- Facilidad de producción
- Fuerte resistencia a distintas sustancias químicas
- Fuerte resistencia a la corrosión
- Bajo costo
- Fuerte poder oxidante
- Abundante en la naturaleza (rutilo en configuración termodinámica estable y anatasa en configuración metaestable)
- Biocompatible y no tóxico
- Tiene propiedad hidrofílica
- Alto índice de refracción

2.3.9 Inmovilización de los catalizadores

En la inmovilización se han utilizado arcillas mesoporosas como montmorillonita, zeolita o kaolinita.

Sin embargo, no se recomienda el uso de las arcillas naturales directamente para inmovilizar el fotocatalizador debido a la posible presencia de impurezas que tienden a alterar la fotoactividad. Alternativamente se han estudiado soportes del tipo fibras de vidrio y carbón, en forma de nanotubos, nanofibras o nanobarras. En general para estos sistemas, no existen problemas de transferencia de masa, sin embargo el recubrimiento de cristales del catalizador puede desgastarse conduciendo a una pérdida de fotoactividad; una desventaja de trabajar con TiO_2 inmovilizado, es que se encuentran restringidas, hasta cierto punto, las cantidades del catalizador que se pueden manejar en un sistema determinado. Sin embargo lo práctico que resulta el manejo del material inmovilizado debe ser valorado en su justa dimensión, pues de esta manera el sistema no genera lodos o residuos que después requieran algún tratamiento y el sistema fotocatalítico puede en principio trabajar de manera continua o al menos semicontinua (Gelover, 2008).

Numerosas técnicas han sido desarrolladas posteriormente para lograr el depósito de películas uniforme y firmemente adheridas a diversas superficies. Entre ellas están: el rocío pirolítico (Martínez et al., 2003), el bombardeo iónico por magnetron de Radio Frecuencia en inglés RF magnetron sputtering, el depósito por centrifugación (spin coating), el depósito sol-gel por inmersión o dip coating, el depósito electroforético, y el depósito en capa atómica (Atomic Layer Deposition), entre otros (Gelover, 2008) como los que se mencionan en la tabla 4.

Tabla 4. Métodos de inmovilización de un fotocatalizador y sustratos

Método de inmovilización	Sustrato recubierto
Dip-coating en suspensión	Esferas de vidrio Tubos de vidrio Discos de vidrio Láminas de óxido recubiertas Vidrio Sílica gel Arena
Sol-gel	Cuero Fibras ópticas Esferas de vidrio Sílica Gel Discos de vidrio Láminas de óxido recubiertas Vidrio
Térmica	Titanio Aleaciones de titanio
Anodización de $TiCl_3$	Láminas de óxido recubiertas Vidrio, Ti, Pt y Au.
Recubrimiento electroforético	Acero inoxidable
Plasma spray	Aleación de titanio.
Recubrimiento en aerosol	Vidrios huecos
Sputtering	Vidrio Cuero
Deposición en fase líquida	Discos de vidrio

2.4 Tecnología solar fotoquímica

A la hora de plantearnos la eficiencia de una energía debemos estudiar los costos que supone y el beneficio que adquirimos, para muchas personas existe un beneficio adicional a tener en cuenta: la protección del medio ambiente. La creciente revolución tecnológica hace que el hombre mire al Sol con nuevos ojos: sería poco racional no intentar aprovechar, por todos los medios técnicamente posibles, esta fuente energética aparentemente inagotable, gratuita y limpia que puede cubrir todas nuestras necesidades. Es por eso que en los últimos años los investigadores han hecho énfasis en el estudio de las energías renovables tal como la energía solar. Para el aprovechamiento de la energía solar se han implementado diversos equipos, según la aplicación en dispositivos fototermicos, fotovoltaicos o fotoquímicos. El uso de la energía solar en procesos de desinfección, resulta muy atractivo por la disponibilidad de esta fuente, la radiación provoca daños en diversos componentes celulares y en la estructura genética de los microorganismos patógenos, inhibiendo su reproducción. Como se mencionó anteriormente, la fotocatalisis hace uso de la radiación electromagnética generada por reacciones de fusión nuclear que se desarrollan en todo el cuerpo solar, estas ondas no necesitan un medio material para propagarse por lo que pueden atravesar el espacio y llegar a la Tierra desde el Sol. Todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad de 299.792 Km/s. (Echeverría, 2011). Las ondas electromagnéticas tienen diferentes longitudes de onda, el conjunto de todas las longitudes de onda se denomina espectro electromagnético, por otra parte el conjunto de las longitudes de onda emitidas por el Sol se denomina espectro solar; mostradas en a figura 23. La proporción de la radiación solar en las distintas regiones del espectro es aproximadamente: 7% ultravioleta, 43% luz visible, 49% infrarrojo y 1% el resto (Agencia Estatal de Meteorología, 2018).

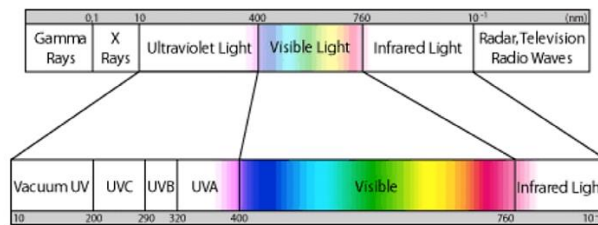


Figura 23. Espectro electromagnético y solar

La radiación ultravioleta es emitida por el Sol en longitudes de onda que van aproximadamente desde los 150 nm (1500 Å), hasta los 400 nm (4000 Å), en las formas UV-A, UV-B y UV-C, pero a causa de la absorción por parte de la atmósfera terrestre, el 99 % de los rayos ultravioletas que llegan a la superficie de la Tierra son del tipo UV-A.

2.4.1 Tipos de radiación

Existen dos tipos de radiación: directa y difusa, en conjunto se denominan radiación global. La radiación directa es la que pasa en línea recta desde el Sol a través de la atmósfera hasta un punto receptor. Por otra parte, la radiación difusa llega a la superficie de la tierra con un cambio de dirección al pasar por la atmósfera terrestre, este desvío de los rayos solares, se produce por el choque directo con ciertas moléculas y partículas contenidas en el aire, por este motivo, es radiación difusa la que se recibe a través de las nubes, también la que es reflejada a consecuencia del rebote en superficies como por ejemplo en el suelo.

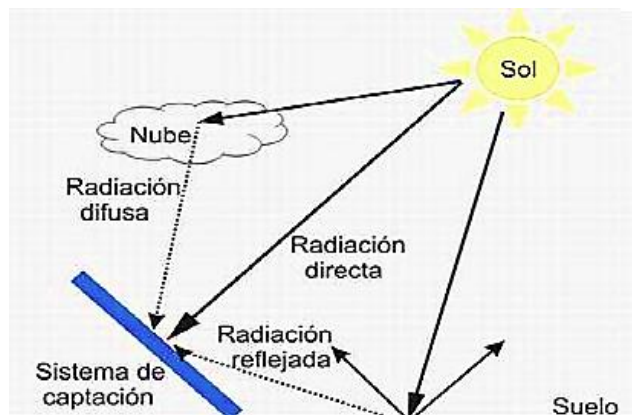


Figura 24. Componentes de la radiación

La figura 25 muestra el comportamiento de la radiación en un día común en la CDMX en donde vemos como se incrementa a lo largo del día hasta llegar a un punto máximo y luego esta comienza a descender, se observa cómo la radiación total es afectada por la presencia de nubes, este fenómeno implica subidas y bajadas adicionales al comportamiento real.

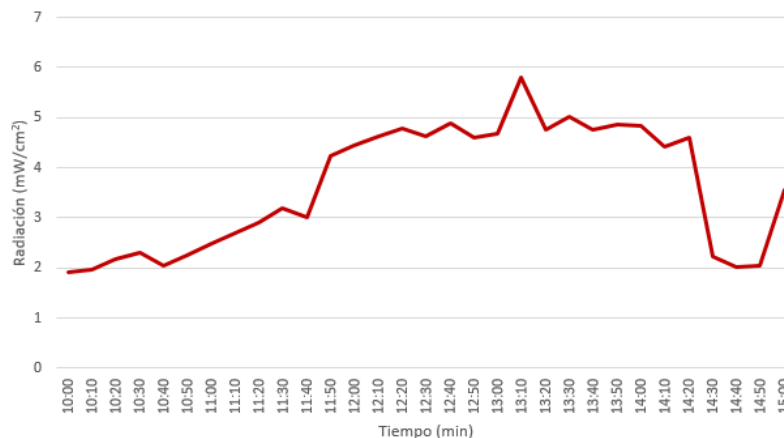


Figura 25. Comportamiento típico de radiación en la CDMX (2018)

2.4.3 Colector Parabólico Compuesto CPC

Una de las tecnologías que hace uso de la radiación solar es el CPC. La idea del CPC fue concebida por Hinterberguer y Winston en 1966 en USA. En 1974 Winston mostró que el CPC tiene la máxima concentración teórica posible para ser usado en dispositivos solares. Los captadores parabólicos compuestos (CPC), ofrecen muy buenas condiciones ópticas para aplicaciones fotocatalíticas de baja concentración, por eso han resultado ser una de las mejores opciones tecnológicas en los tratamientos mediante fotocatalisis solar.

Los CPCs son captadores estáticos y la estructura suele estar constituida por un marco que a su vez, sirve de soporte para interconectar los tubos que componen el fotorreactor, los CPCs cuentan con una superficie reflectante comúnmente de aluminio, en donde se obtiene la mayor concentración de radiación, esta superficie reflectante que dirige la radiación desde la apertura hasta el reactor tubular cilíndrico, normalmente de vidrio, situado en el eje central por donde circula el fluido. El reactor fotocatalítico es tubular con lo que el agua puede ser fácilmente impulsada.

Estos sistemas son de baja concentración, su factor de concentración (FC, relación entre la apertura del captador y el perímetro del tubo) tiene un valor de entre 1-1.5. Si el ángulo de aceptación es de 90° , el factor de concentración es uno y se trata de un sistema no concentrador, es decir, toda la radiación que incide en el sistema alcanza el área de apertura, y es recogida y redistribuida en la parte del tubo que no se encuentra directamente irradiado. El aprovechamiento de la radiación capturada es mayor en este tipo de captadores gracias al gran ángulo de aceptación que tiene valores de entre 60 y 90 grados, este amplio ángulo puede capturar tanto la radiación UV difusa como la directa, la radiación UV reflejada por la superficie reflectante es distribuida alrededor del reactor tubular cilíndrico de forma más o menos homogénea, gracias a su diseño, casi toda la radiación que llega al área de apertura del captador puede ser recogida y estar disponible para el proceso fotocatalítico en el reactor, en la figura 28 se muestra la radiación reflejada a diferentes ángulos de incidencia. La máxima eficiencia anual de un CPC se puede conseguir con un ángulo de inclinación del sistema sobre la horizontal semejante a la latitud del lugar donde se colocará, orientando la estructura hacia el ecuador (Jiménez, 2015).

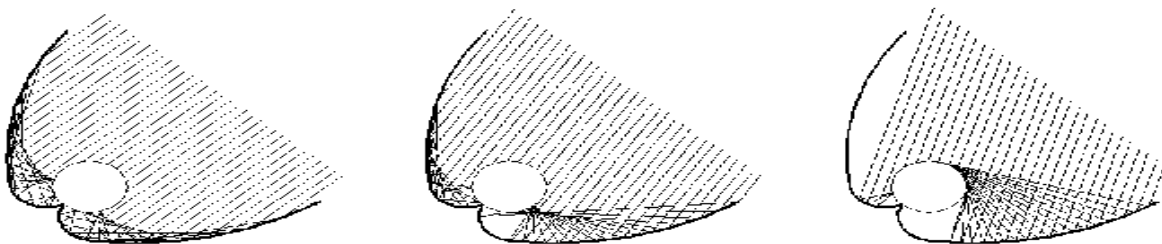


Figura 26. Radiación solar reflejada en un CPC a diferentes ángulos de incidencia.

Los materiales más comunes para la elaboración de un CPC con aplicaciones fotocatalíticas deben proporcionar una transferencia de masa bastante buena entre el contaminante a degradar y el catalizador, deber tener alta resistencia a la presión generada y al flujo turbulento. Se debe tener en cuenta que el material empleado para el reactor tubular cilíndrico no debe reaccionar con el catalizador, ni con los contaminantes a tratar, debe soportar temperaturas ligeramente altas sin alterar sus propiedades y debe de resistir valores de pH ácidos.

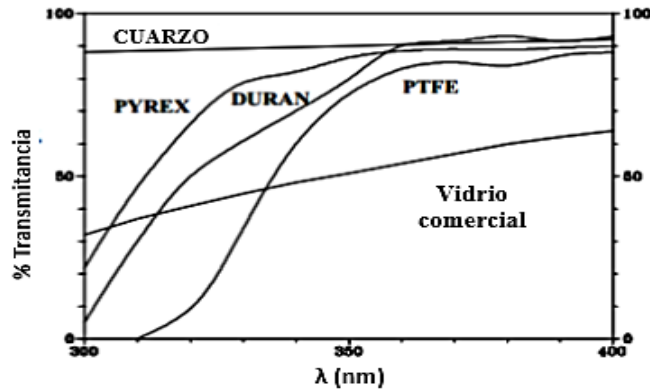


Figura 27. Transmitancia de diferentes materiales para ser usados en la fabricación de tubos para reactores solares (Jiménez T, 2015).

En la figura 29 se puede observar desde el punto de vista de su transparencia en el rango UV que el mejor material es el cuarzo, pero su elevado costo lo hace poco viable a ser utilizado en los tubos; es por eso que el PYREX es la mejor opción, permitiendo que se absorban longitudes de onda inferiores a los 400nm.

Para el caso de la superficie reflectante, se debe de optar por un material de alta reflectividad y que además sea resistente a la radiación solar y las condiciones meteorológicas, además de su bajo costo; en la figura 30 se observa que el aluminio cuenta con una reflectancia alta.

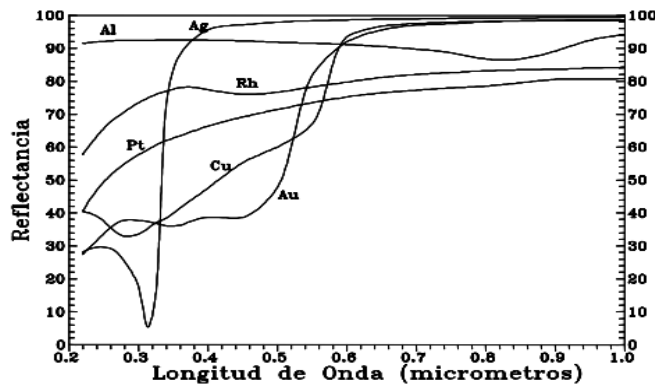


Figura 28. Materiales para la posible fabricación de reflectores CPCs (Blanco J. et al., 2003)

Algunas ventajas que presentan los CPC contra otros sistemas solares son (Blanco et. al., 2003):

- Aprovechan la radiación difusa.
- Permiten la orientación asimétrica de la fuente y la apertura (para diseños de colectores que presentan variaciones estacionales).
- La concentración es independiente de la forma del absorbente, ya que depende del perímetro y ángulo de aceptación de éste.
- Si se usa un absorbente de forma tubular, la radiación UV es distribuida alrededor de la parte trasera del tubo y como resultado la mayoría de la circunferencia del tubo es iluminada.
- Tiene elevado rendimiento y eficiencia fotónica.
- Calentamiento del agua muy limitado.
- Simples, fáciles de manejar y requieren una inversión inicial moderada.

3. Justificación

La escasez y la contaminación del agua son problemas que el hombre ha ido generando en el transcurso del tiempo; según la OMS, la escasez ya afecta a 4 de cada 10 personas en el mundo. Se dice que el agua está contaminada cuando los agentes contaminantes repercuten negativamente en su calidad para el consumo humano, para usos posteriores o para el bienestar de los ecosistemas (Carta del agua, Consejo de Europa, 1968). Los factores que provocan la contaminación del agua son, por ejemplo los desechos industriales por la falta de normativas para el tratamiento de su agua de proceso, la contaminación agrícola, que es una de las principales fuentes de contaminación por la producción intensiva que necesita cantidades importantes de fertilizantes y de productos fitosanitarios para aumentar los rendimientos, la industria petrolera y la contaminación doméstica que, por ejemplo, pueden ser los productos de limpieza (detergentes, jabones, etc.) son solo algunos ejemplos de esta. En México, la población ha ido en constante aumento, por lo que cada año se requiere más agua con calidad suficiente para abastecer a todas las personas. Iztapalapa es la alcaldía con más población de la CDMX, también es una de las comunidades con más problemas en la red de distribución de agua, la contaminación y su gran falta de este recurso natural esencial para cualquier ser vivo.

4. Objetivos

Objetivo general:

Acondicionar agua de lluvia mediante fotocatalisis solar en la escuela primaria “Luis Braille”, situada en la Alcaldía Iztapalapa, CDMX.

Objetivos específicos:

- * Captar agua de lluvia como fuente de abastecimiento de nuestro sistema.
- * Conocer los datos de pH, oxígeno disuelto, temperatura y conductividad del agua de lluvia tratada por fotocatalisis solar, así como la radiación incidida en el reactor.
- * Identificar la presencia de microorganismos del tipo Enterococos, Coliformes fecales y E. coli en el agua de lluvia tratada.
- * Medir índice de degradación de los microorganismos Enterococos, Coliformes fecales y E. coli.

5. Desarrollo experimental

5.1 Descripción del reactor CPC

En este proyecto se utilizó un reactor fotocatalítico CPC impregnado con TiO_2 de la marca Degussa-P25, con un porcentaje de Anatasa:Rutilo 80-20, soportado por un marco metálico que interconecta los tubos que componen el fotorreactor. El reactor fotocatalítico está compuesto por 10 módulos que tienen su respectiva tapa protectora metálica, cada módulo contiene 6 tubos de vidrio PYREX cilíndricos de 2 pulgadas de diámetro y una longitud de 140 cm de largo. El material de la superficie reflectante del reactor es aluminio con 98% de pureza; está orientado al sur con una inclinación correspondiente a la latitud del lugar (19.3°).

Para la captación de agua de lluvia se utilizó el techo del patio escolar, el cual cuenta con 17.30 m de largo y 12.80 m de ancho dando como resultado un área de 220 m^2 . El agua de lluvia captada pasa por 3 filtros que remueven partículas grandes, posteriormente el flujo se dirige a la Cisterna (CA-101) que tiene capacidad de 10, 000 L, el transporte del agua captada hasta la Cisterna (CA-101) se da por gravedad. La Cisterna (CA-101) esta interconectada con una segunda Cisterna (CA-102) con capacidad de 700 L, en la Cisterna (CA-102) se lleva a cabo la recirculación del agua, el sistema opera con un caudal de 2.25 L/s y un tiempo de residencia total del 88.30 segundos. El sistema operó con un volumen de 500 L en circulación, de estos el volumen irradiado es de 164.93 L y el volumen no irradiado es de 335.07 L. Una vez concluido el tratamiento, el agua es almacenada en una tercera Cisterna (CA-103) con capacidad de 10, 000 L, por gravedad esta agua es dirigida a una serie de llaves multiuso (Ver DFP).

La instalación del reactor se llevó a cabo por ingenieros asesorados por la Dra. Fabiola Mendez-Arriaga, (ver figura 29). En la figura 30 se aprecia el reactor fotocatalítico de la escuela Luis Braille, en donde se observan los 10 módulos del reactor con sus respectivos tubos de vidrio cilíndricos. En la figura 31 se muestra el sistema de bombeo que abastece al reactor fotocatalítico y al CA-103. En la figura 32 se aprecia la tubería que dirige el agua desde el área de captación (techo escolar, figura 33) hacia el tanque de almacenamiento CA-101 pasando por el sistema de filtrado. La figura 34 muestra la caja de control con los equipos utilizados para la lectura de parámetros.



Figura 29. Instalación del sistema



Figura 30. Reactor CPC, escuela primaria Luis Braille



Figura 31. Sistema de bombeo



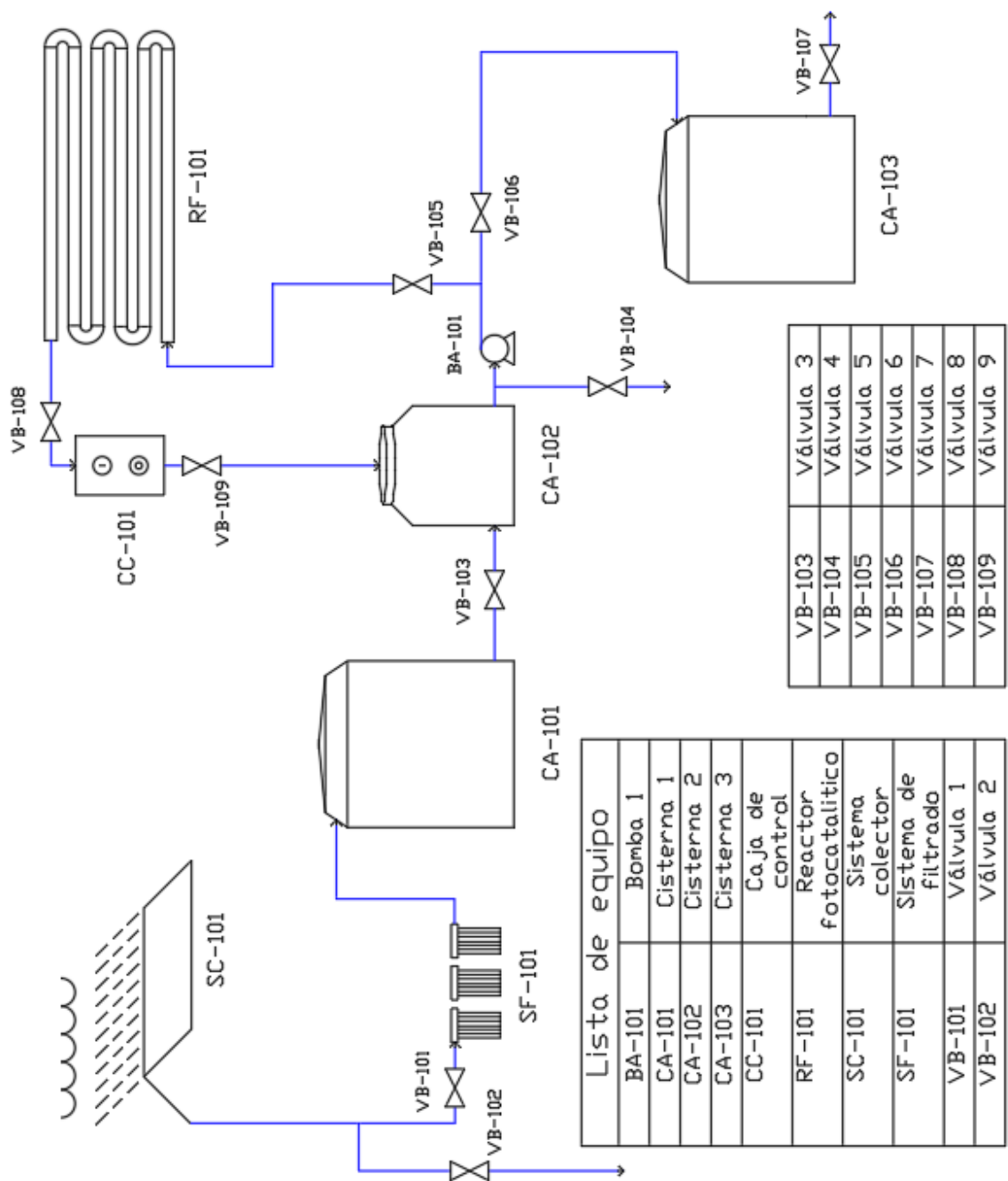
Figura 32. Sistema de captación y filtrado



Figura 33. Área de captación



Figura 34. Equipos de medición



VB-103	Válvula 3
VB-104	Válvula 4
VB-105	Válvula 5
VB-106	Válvula 6
VB-107	Válvula 7
VB-108	Válvula 8
VB-109	Válvula 9

Lista de equipo	
BA-101	Bomba 1
CA-101	Cisterna 1
CA-102	Cisterna 2
CA-103	Cisterna 3
CC-101	Caja de control
RF-101	Reactor fotocatalítico
SC-101	Sistema colector
SF-101	Sistema de filtrado
VB-101	Válvula 1
VB-102	Válvula 2

Figura 35. Diagrama de Flujo de Proceso (DFP)

5.2 Metodología: Experimentos fotocatalíticos

5.2.1 Material y equipo

- Pipeta 10 mL
- Laptop
- Malla retenedora de sólidos 50 micras
- 1 Cisterna Khardyplas con capacidad de 750 L
- Reactor fotocatalítico 10 x 6
- Bomba centrífuga ROTOPLAS®

Tabla 5. Principales características de Bomba centrífuga ROTOPLAS®

Temperatura máxima del líquido bombeado (°C)	Altura máxima de descarga (m)	Caudal máximo (LPM)	Potencia (HP)
50	22	105	1/2

- 3 filtros jumbo ROTOPLAS®

Tabla 6. Principales características de filtros jumbo ROTOPLAS®

Retención de partículas (%)	Filtración (L/min)	Altura (cm)	Diámetro tapa (cm)
90	56	34.33	18.45

- 2 Cisternas ROTOPLAS® de material PEAD (Polietileno de alta densidad) de color azul por fuera y blanco por dentro

Tabla 7. Principales características de Cisternas ROTOPLAS®

Capacidad (L)	Diámetro (m)	Altura con tapa (m)	Diámetro tapa (m)
10 000	3.28	2.43	0.60

- Medidor de pH:

Se utilizó un medidor de pH HANNA Instruments HI5522 de mesa grado investigación para realizar las mediciones en tiempo real de cada uno de los lotes que se trataron a lo largo del proyecto.

Tabla 8. Principales características del medidor de pH

Especificaciones	Intervalo	Compensación de temperatura
pH	-2.000 a 20.000 pH	Automática o manual de -20.0 a 120.0 °C / -4.0 a 248.0° / 253.15 a 393.15 K

- Medidor de conductividad eléctrica:

Se utilizó un medidor de conductividad HANNA Instruments HI5522 de mesa grado investigación para realizar las mediciones en tiempo real de cada uno de los lotes que se trataron a lo largo del proyecto.

Tabla 9. Principales características del medidor de conductividad

Especificaciones	Intervalo	Temperatura de referencia
CE	0 a 9.999 μ S/cm; 10.00 a 99.99 μ S/cm; 100.0 a 999.9 μ S/cm; 1.000a 9.999 mS/cm; 10.00 a 99.99 mS/cm; 100.0 a 1000.0 mS/cm	5.0 a 30.0°C

- Medidor de oxígeno disuelto:

Se utilizó el modelo HI5421 de HANNA Instruments, es un medidor de mesa para oxígeno disuelto de grado investigación con amplias capacidades para medir el oxígeno disuelto para realizar las mediciones en tiempo real de cada uno de los lotes que se trataron a lo largo del proyecto.

Tabla 10. Principales características del medidor de OD

Especificaciones	Intervalo
OD	0.00 a 90.00 ppm (mg/L); 0.00 a 60.00 % de saturación.

- Medidor de temperatura:

Se utilizó un medidor de temperatura HANNA Instruments HI5222 de mesa grado investigación para realizar las mediciones en tiempo real de cada uno de los lotes que se trataron a lo largo del proyecto.

Tabla 11. Principales características del medidor de temperatura

Especificaciones	Intervalo
Temperatura	-20.00 a 120 °C; -4.0 a 248.0 °F; 253.15 a 393.15 K

- Radiómetro:

Para medir la radiación se utilizó un radiómetro modelo YK-35UV de la marca UV Light-meter, el instrumento sirve para medir la radiación solar de forma global, es decir, la directa más la difusa.

Tabla 12. Principales características del radiómetro

Especificaciones	Espectro detector UV	Rangos
Radiómetro	290 nm a 390 nm	2 mW/cm ² ; 20 mW/cm ²

5.2.2 Reactivos

- H₂O₂ al 30%
- TiO₂ Degussa-P25, Anatasa:Rutilo 80-20.

Tabla 13. Propiedades del TiO₂ Degussa P-25

Propiedad	Valor
Longitud de onda umbral	387 nm
Energía de ancho de banda	3.2 eV
Densidad	3.5 g/cm ³
Constante dieléctrica relativa	10
Área BET (Brunauer-Emmett-Teller)	(50±15) m ² /g
Índice de refracción (Anatasa/Rutilo)	2.5-3/3.87
Tamaño medio de la partícula (TEM)	20-40 nm
Proporción Anatasa:Rutilo	80 : 20

5.2.3 Procedimientos

Al comenzar el proyecto no existían procedimientos prediseñados para operar el equipo, al ser un proyecto de investigación y trabajar con un equipo en desarrollo fue necesario que se generaran.

A continuación se describen los pasos que se siguieron en cada una de las etapas del proyecto:

Puesta en marcha del sistema

1. Inspección a cada uno de los componentes y accesorios del sistema (llaves, válvulas, uniones y codos)
2. Prueba hidráulica en el sistema para corroborar la inexistencia de fugas; se hizo fluir mediante el sistema de bombeo un lote de prueba a través del sistema.
3. Se realizaron las adecuaciones pertinentes hasta que el sistema quedó en óptimas condiciones.

Prueba de control del sistema fotocatalítico con agua potable

Para estudiar el comportamiento hidráulico inicial del reactor se trabajó con agua potable suministrada por 2 camiones cisterna. Los procedimientos en esta etapa fueron los siguientes:

1. Válvulas

Corroborar la posición de las válvulas y orientarlas para dirigir el flujo de la manera deseada

2. Volumen de control

Medir 500L de agua en CA-102

3. Bomba

Encender la bomba

4. Control y medición

Encender los equipos de medición y captura de datos.

5. Homogenización

Recircular el lote 20 minutos sin la intervención de los rayos UV.

6. Reacción

Levantar las tapas del reactor, para que los rayos del sol incidan en el sistema. En cuanto la radiación UV incida sobre el sistema, el TiO_2 se activa y a su vez iniciará la degradación de eventuales contaminantes presentes en el agua potable de camión cisterna.

7. Finalización

Al finalizar la corrida del día, apagar los equipos de medición y captura, luego guardar los datos obtenidos, apagar la bomba y bajar tapas del reactor.

Operación del sistema con agua de lluvia en ausencia de radiación solar

1. Válvulas

Corroborar la posición de las válvulas y orientarlas para dirigir el flujo de la manera deseada

2. Volumen de control

Medir 500L de agua en el CA-102

3. Bomba

Encender la bomba

4. Control y medición

Encender los equipos de medición y captura de datos.

5. Finalización

Al finalizar la corrida del día, apagar los equipos de medición y captura, luego guardar los datos obtenidos y apagar la bomba.

Operación del sistema fotocatalítico con agua de lluvia

1. Válvulas

Corroborar la posición de las válvulas y orientarlas para dirigir el flujo de la manera deseada

2. Volumen de control

Medir 500L de agua en CA-102

3. Bomba

Encender la bomba

4. Control y medición

Encender los equipos de medición y captura de datos.

5. Homogenización

Recircular el lote 20 minutos sin la intervención de los rayos UV.

6. Recolección de muestras iniciales *

Tomar muestras del agua inicial en botes esterilizados. Es necesario tomar la muestra 3 veces (replicas) para tener un resultado más exacto. Las muestras se deben mantener a 4°C.

7. Reacción

Levantar las tapas del reactor, para que los rayos del sol incidan en el sistema. En cuanto la radiación UV incida sobre el sistema comenzará a reaccionar el TiO_2 y a su vez iniciará la degradación de los contaminantes presentes en el agua.

8. Recolección de muestras finales *

Tomar muestras de agua al final del proceso en botes esterilizados. Es necesario tomar la muestra 3 veces (replicas) para tener un resultado más exacto. Las muestras se deben mantener a 4°C.

9. Finalización

Al finalizar la corrida del día, apagar los equipos de medición y captura, luego guardar los datos obtenidos, apagar la bomba y bajar tapas del reactor.

10. Análisis **

Analizar la evolución del proceso de desinfección con la ayuda de los parámetros obtenidos en la corrida

Operación del sistema fotocatalítico $\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$ con agua de lluvia

1. Válvulas

Corroborar la posición de las válvulas y orientarlas para dirigir el flujo de la manera deseada

2. Volumen de control

Medir 500L de agua en el CA-102

3. Bomba

Encender la bomba

4. Control y medición

Encender los equipos de medición y captura de datos.

5. Homogenización

Recircular el lote 20 minutos sin la intervención de los rayos UV.

6. Recolección de muestras iniciales *

Tomar muestras del agua inicial en botes esterilizados. Es necesario tomar la muestra 3 veces (replicas) para tener un resultado más exacto. Las muestras se deben mantener a 4°C.

7. Agrega H₂O₂

Agregar 5 ml de H₂O₂ al 30% a la Cisterna con recirculación (CA-102) cada 30 minutos.

8. Reacción

Levantar las tapas del reactor, para que los rayos del sol incidan en el sistema. En cuanto la radiación UV incida sobre el sistema comenzará a reaccionar el TiO₂ y el H₂O₂ a su vez iniciará la degradación de los contaminantes presentes en el agua.

9. Recolección de muestras finales *

Tomar muestras de agua al final del proceso en botes esterilizados. Es necesario tomar la muestra 3 veces (replicas) para tener un resultado más exacto. Las muestras se deben mantener a 4°C.

10. Finalización

Al finalizar la corrida del día, apagar los equipos de medición y captura, luego guardar los datos obtenidos, apagar la bomba y bajar tapas del reactor.

11. Análisis **

Analizar la evolución del proceso de desinfección con la ayuda de los parámetros obtenidos en la corrida.

Cabe mencionar que si se apaga la bomba antes que los equipos de medición se observarán perturbaciones en los valores finales.

Nota:

**Estos puntos solo se llevan a cabo cuando se hace un análisis microbiológico.*

***Los parámetros obtenidos en la corrida se graficaban día con día, se analizaba el comportamiento y se decidía si se pasaba a un lote nuevo o se le daba un segundo tratamiento. A lo largo del proyecto se trabajaron diversas situaciones; lotes con un, dos, tres e incluso más de 5 días de tratamiento.*

5.3 Metodología: Evaluación microbiológica en Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad (LANCIS)

Se realizaron los análisis microbiológicos en el Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad (del Instituto de Ecología, UNAM), ubicado en Circuito Exterior S/N anexo Jardín Botánico exterior Ciudad Universitaria, CDMX, C.P. 04500.

5.3.1 Material y equipo

- Mechero Meker-Fisher
- Gradilla metálica
- Balanza analítica
- Pipeta 10 mL
- Microscopio óptico
- Incubadora
- Botes boca ancha esterilizados 500 mL
- Membrana de filtrado S-Pak poro 0.45 μm , diámetro 47 mm
- Cajas de Petri estériles
- Sistema de filtración a vacío
- Pinzas metálicas pequeñas
- Embudo de cristal para filtrado
- Base de filtro con esmeril

5.3.2 Reactivos

- Agar m Enterococcus (Difco™)
- Agar m FC (Difco™)
- Agar E. coli (CHROMagar™)

5.3.3 Procedimientos sanitarios del muestreo de agua según la NOM-230-SSA1-2002

La NOM-230-SSA1-2002 establece los procedimientos sanitarios del muestreo de agua para uso y consumo humano en los sistemas de abastecimiento así como criterios para el manejo, preservación y transporte de muestras. A continuación se muestran algunos de los procedimientos utilizados en el proyecto.

Material, reactivos y equipo de muestreo; envases para toma de muestra.

- Para análisis microbiológico: Frascos de vidrio con tapón esmerilado, frascos estériles desechables o bolsas estériles con cierre hermético y capacidad de 125 o 250 ml.
- Hielera con tapa.
- Bolsas refrigerantes o bolsas con hielo cerradas.

Preparación de envases para toma de muestras

Los recipientes para la toma de muestras deberán ser proporcionados con hoja de cadena de custodia por el laboratorio responsable del análisis, para análisis microbiológico o físico y químico, ya que deberá ser lavado y con la preparación adecuada para el análisis general o particular de los parámetros seleccionados.

Procedimiento para toma de muestra

Para análisis microbiológico utilizar frascos de vidrio, frascos estériles o bolsas estériles con cierre hermético y capacidad de 125 ml o 250 ml.

El agua de los grifos o válvulas debe provenir directamente del sistema de distribución. No debe efectuarse toma de muestra en grifos o válvulas que presenten fugas entre el tambor y el cuello, ya que el agua puede correr por la parte exterior del grifo o válvulas y contaminar la muestra. Deben removerse los accesorios o aditamentos externos como mangueras, boquillas y filtros de plástico o hule antes de tomar la muestra. Si la limpieza del grifo o válvulas seleccionada es dudosa, elegir otro grifo o válvula. Si se requiere tomar la muestra en el grifo o válvulas de dudosa limpieza por propósitos especiales del muestreo, debe limpiarse el orificio de salida con una gasa estéril o torunda de algodón impregnada de solución de hipoclorito de sodio con una concentración de 100 mg/L. Adicionalmente cuando el material y las condiciones del punto del salida lo permitan se podrá calentar a flama directa y posteriormente limpiarse con alcohol.

Debe dejarse correr el agua aproximadamente 3 minutos hasta asegurarse que el agua que contenían las tuberías ha sido renovada o que la temperatura del agua sea estabilizada antes de tomar la muestra. Reducir el volumen de flujo para permitir el llenado del frasco sin salpicaduras. Proceder a tomar la muestra sin pérdida de tiempo y sin enjuagar el frasco; se debe dejar el espacio libre requerido para la agitación de la muestra previa al análisis (aproximadamente 10% de volumen del frasco). Efectuada la toma de muestra, deben colocarse el tapón con el papel de protección o la tapa al frasco; en el caso de las bolsas proceder al cerrado hermético.

Manejo de muestras

Las muestras tomadas deben colocarse en hielera con bolsas refrigerantes o bolsas de hielo cerradas para su transporte al laboratorio, a una temperatura entre 4 y 10°C, cuidando de no congelar las muestras. El período máximo que debe transcurrir entre la toma de muestra y el inicio del análisis es para análisis microbiológico en óptimas condiciones de preservación y transporte hasta 6 horas.

5.3.4 Procedimientos para determinación de Enterococos, E. coli y Coliformes fecales.

1. Medios de cultivo

Prepar como mínimo 2 hrs. antes de su utilización el medio de cultivo (agar) en cajas de Petri correspondiente al microorganismo que se quiere identificar y cuantificar. Marcar las cajas de Petri identificando volumen filtrado y replica.

Tabla 14. Preparación de los medios de cultivo utilizados

Enterococos	E. coli	Coliformes Fecales
<ul style="list-style-type: none"> * Agregar 42 g de Agar m Enterococcus (Difco™ m DF Agar) en 1 L de agua purificada. * Mezclar bien. * Calentar con agitación constante y hervir por 1 minuto para disolver completamente el polvo. * Verter en cajas de Petri. 	<ul style="list-style-type: none"> * Agregar 30.8 g de Agar E. coli (CHROMagar™) en 1 L de agua purificada. * Mezclar bien. * Calentar con agitación constante y hervir por 1 minuto para disolver completamente el polvo. * Verter en cajas de Petri. 	<ul style="list-style-type: none"> * Agregar 52 g de Agar m FC (Difco™) en 1 L de agua purificada. * Mezclar bien. * Calentar con agitación constante y hervir por 1 minuto para disolver completamente el polvo. * Agregar 10 mL de un 1% de ácido rosólico en 0.2 N NaOH. * Continúe calentando por 1 min. * Verter en cajas de Petri.

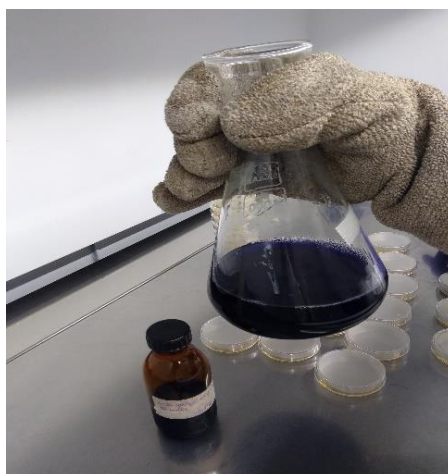


Figura 36. Preparación de los medios de cultivo para Coliformes fecales

2. Desinfección del área de trabajo

Limpiar con alcohol el área de trabajo y los botes de boca ancha que contienen la muestra de agua proveniente del reactor catalítico para evitar que se contaminen las muestras.

3. Ensamblado del sistema de filtración

Armar el sistema de filtración a vacío; colocar las bases de filtro con esmeril en el tren de filtrado, enseguida colocar el embudo de cristal sobre cada base de filtrado.



Figura 37. Sistema de filtración a vacío

4. Celda convectiva

Prender 2 mecheros Meker-Fisher dejando una distancia de separación del tren de filtrado de 15 cm por lado para mantener el área de filtrado inerte.

5. Filtración

Agregar 10 mL de la muestra de agua al embudo de cristal y empezar a filtrar.

6. Siembra de microorganismos

Colocar la membrana de filtrado S-Pak en las cajas de Petri correspondientes.

7. Incubación

Meter las cajas de Petri ya sembradas a incubación.

Tabla 15. Temperaturas y tiempos en incubación para los microorganismos

Microorganismo	Enterococos	E. coli	Coliformes fecales
Tiempo de incubación (hrs)	48	24	24
Temperatura °C	35	37	44.5



Figura 38. Medios de cultivo en incubación

8. Identificación y cuantificación

Sacar las cajas de Petri de la incubadora dependiendo de su tiempo de incubación. Identificar y cuantificar los microorganismos presentes en el medio de cultivo.

9. Desechar

Llevar la caja de Petri al área designada para su correcto tratamiento.

6. Resultados

En la siguiente sección del trabajo se muestran gráficamente los parámetros que se midieron a lo largo del proyecto: radiación, temperatura, oxígeno disuelto (OD), conductividad y pH.

Con excepción de la radiación, dichos parámetros fueron grabados automáticamente cada 10 segundos en una laptop, la radiación fue tomada de manera manual a lapsos de 10 min. A lo largo del proyecto se trabajó dentro del horario 9:00 am a 15:00 pm, con tiempos de operación mínimos de 4 horas por día; el proceso se llevó a cabo de forma intermitente (modo batch).

Existen 3 bloques los cuales representan las etapas en las que se dividió el proyecto:

- Bloque 1 del 15/Marzo/18 a 27/Abril/2018; etapa en la que se trabajó con agua potable (suministrada por camión cisterna).
- Bloque 2 del 02/Mayo/18 a 04/Octubre/2018; etapa en la que se trabajó con agua de lluvia.
- Bloque 3 del 17/Octubre/18 a 19/Octubre/2018; etapa en la que se trabajó con agua de lluvia en ausencia de radiación.

Tabla 16. Fechas por lotes, bloque 1 (agua potable)

Número de lote	Fechas comprendidas por lotes
Prueba hidráulica	15-Marzo
Prueba hidráulica	20-Marzo
1	22-Marzo
2	23-Marzo
3	26-Marzo
4	27-Marzo
5	28-Marzo
6	2 y 3-Abril
7	04-Abril
8	5 y 6-Abril
9	9 y 10-Abril
10	11 y 12-Abril
11	13-Abril
12	16,17,18 y 19-Abril
13	20,23,24 y 25-Abril
14	27-Abril

Tabla 17. Fechas por lotes, bloque 2 (agua de lluvia)

Número de lote	Fechas comprendidas por lotes
1	2-Mayo
2	3 y 4-Mayo
3	7 y 8-Mayo
4	9 y 1-Mayo
5	16 y 17-Mayo
6	18-Mayo
7	21,22,23 y 24-Mayo
8	28,29 y 30-Mayo
9	31-Mayo
10	4 y 5-Junio
11	6,7 y 8-Junio
12	11,12 y 13-Junio
13	14 y 15-Junio
14	18, 19 y 2-Junio
15	21-Junio
16	22,25 y 26-Junio
17	27,28 y 29-Junio
18	3,4,5-Julio
19	9-Julio
20	10,11,12 y 13-Julio
21	7,8,9,10,14,15,16,17-Agosto
22	20,21 y 22-Agosto
23	27,28 y 29-Agosto
24	3,4 y 5-Septiembre
25	10,11 y 12-Septiembre
26	17,18 y 19-Septiembre
27	23,24,25,26 y 27-Septiembre
28	2,3 y 4-October

Tabla 18. Fechas por lotes, bloque 3 (agua de lluvia sin radiación)

Número de lote	Fechas comprendidas por lotes
1	17,18 y 19-October

Las siguientes gráficas muestran el comportamiento de los parámetros medidos, los lotes están representados por un color diferente cada uno. Se podrán observar fechas marcadas en rojo, que representan días en los que en el sistema de captura de datos se generó un error de lectura o de almacenamiento para algún parámetro en particular.

6.1 Bloque 1 (agua potable)

En este bloque se trabajaron dos calidades de agua de igual tipo (potable), a partir del 9 de abril se trabajó con carro cisterna 2, el agua del carro cisterna 1 fue utilizada para acondicionamiento.

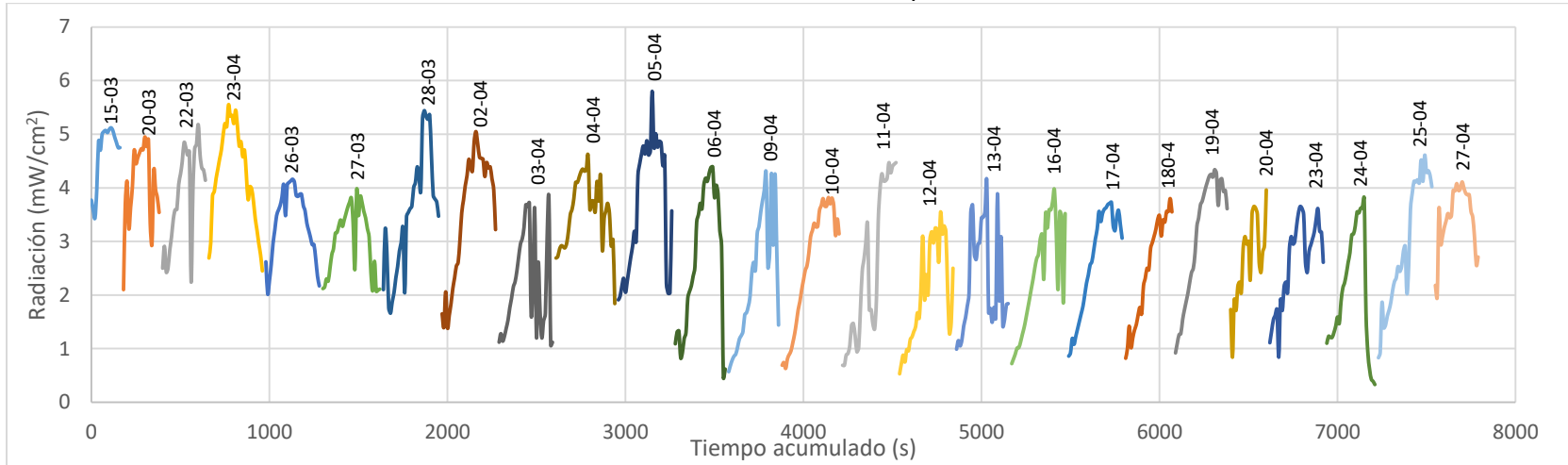
El día con mayor radiación fue el 05/Abril seguido por el 28/Marzo, mientras que el día con menos radiación UV fue el 12/Abril. Se observó que la temperatura más alta en este bloque se encuentra el día 19/Abril con 48.9 °C y la más baja el día 15/Marzo con 38 °C, en promedio la temperatura final del agua tratada alcanza los 40°C. Cabe señalar que la temperatura no depende de la radiación, se puede tener un día caluroso pero si existen nubes, estas interferirán con la radiación que llega al sistema. La velocidad de las reacciones fotocatalíticas no se ve afectada notablemente con la variación de la temperatura del sistema.

En la gráfica 3 se observa el comportamiento más estable trabajando con el agua del carro cisterna 2; la mayoría de los valores iniciales de OD oscilan en 3 y 4.5 *mg/L* y terminan alrededor de 2.5 *mg/L*, el consumo del oxígeno disuelto está íntimamente relacionado con la producción de radicales hidroxilo; el oxígeno interactúa con el TiO₂, el par electrón hueco (que salta a su banda de conducción por la irradiación) y las moléculas de agua generando el O₂• y H₂O₂ quienes a su vez interactúan entre sí y con el medio para formar •OH, la tasa de consumo de OD en este bloque es de 1.20 E-4 ± 2.50 E-5 (*mg/L s*).

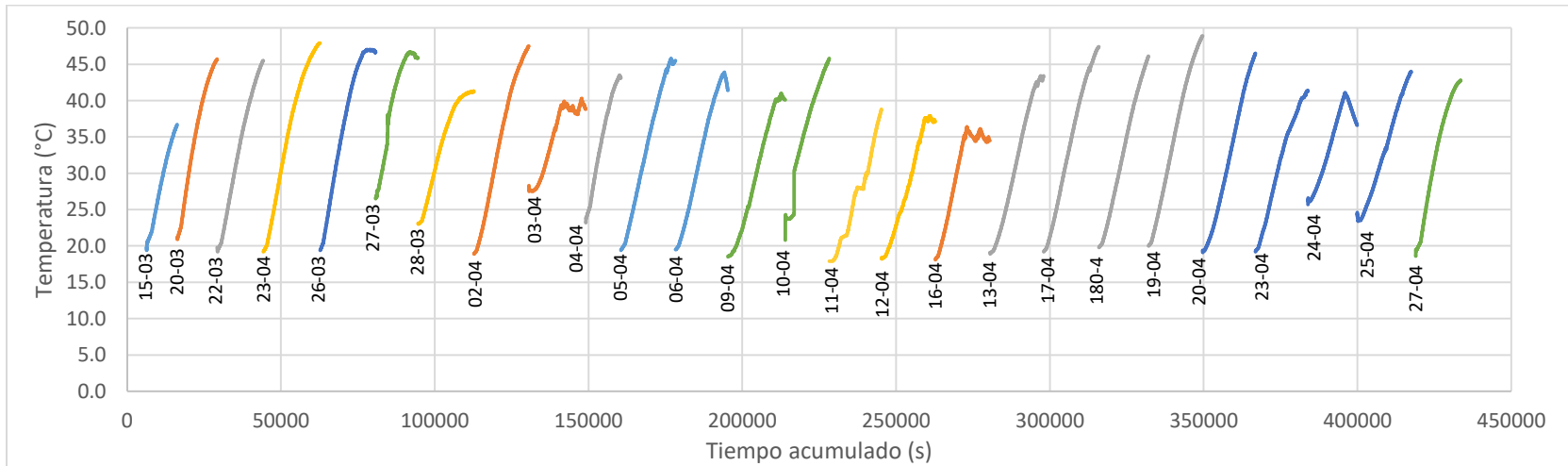
En soluciones acuosas la conductividad eléctrica es directamente proporcional a la concentración de sólidos totales disueltos (TDS), por lo tanto cuanto mayor sea el valor de TDS, mayor será la conductividad. Al degradar TDS la conductividad es reducida, en este bloque se observa que los valores iniciales de conductividad van desde 1.10 E-2 hasta 1.00 E-2 mS/cm y finales de 8.00 E-3 hasta 7.00 E-2 mS/cm; como se observa en la gráfica 4; la tasa con la que disminuye la conductividad en este bloque es de 2.60 E-7 ± 8.00 E-8 (*mS/cm s*).

La gráfica 5 muestra los valores de pH que fueron medidos en cada una de las corridas, en la mayoría de los casos se observa un descenso de al menos 0.1 sin embargo también existieron incrementos en la misma magnitud, al tratarse de un agua potable el pH no se vio tan influenciado por el proceso fotocatalítico.

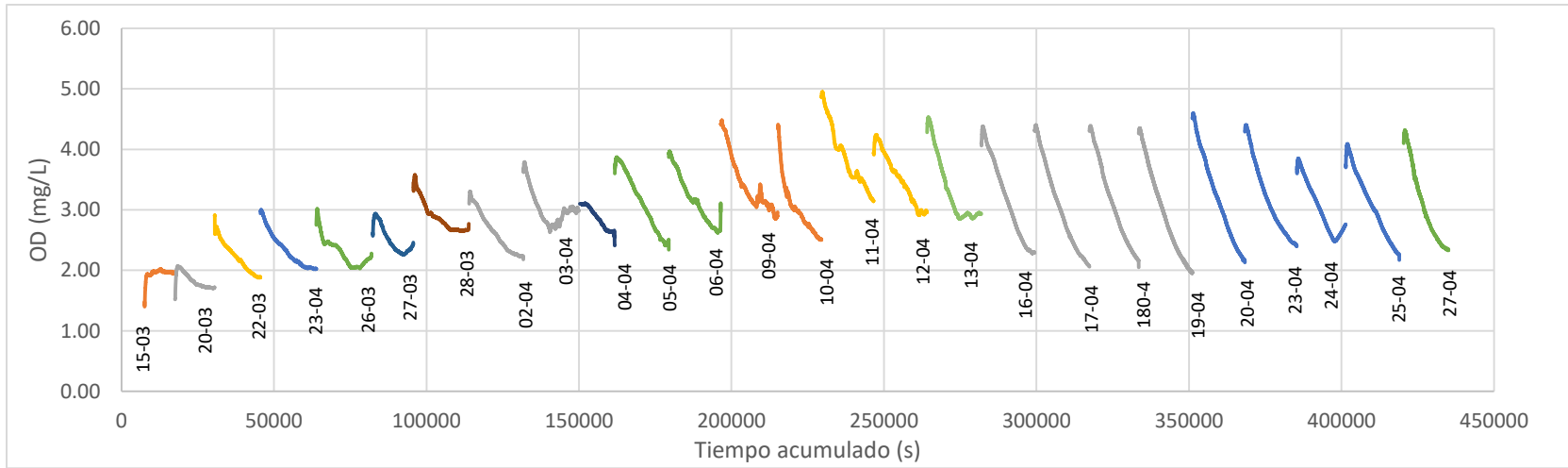
Gráfica 1. Radiación bloque 1



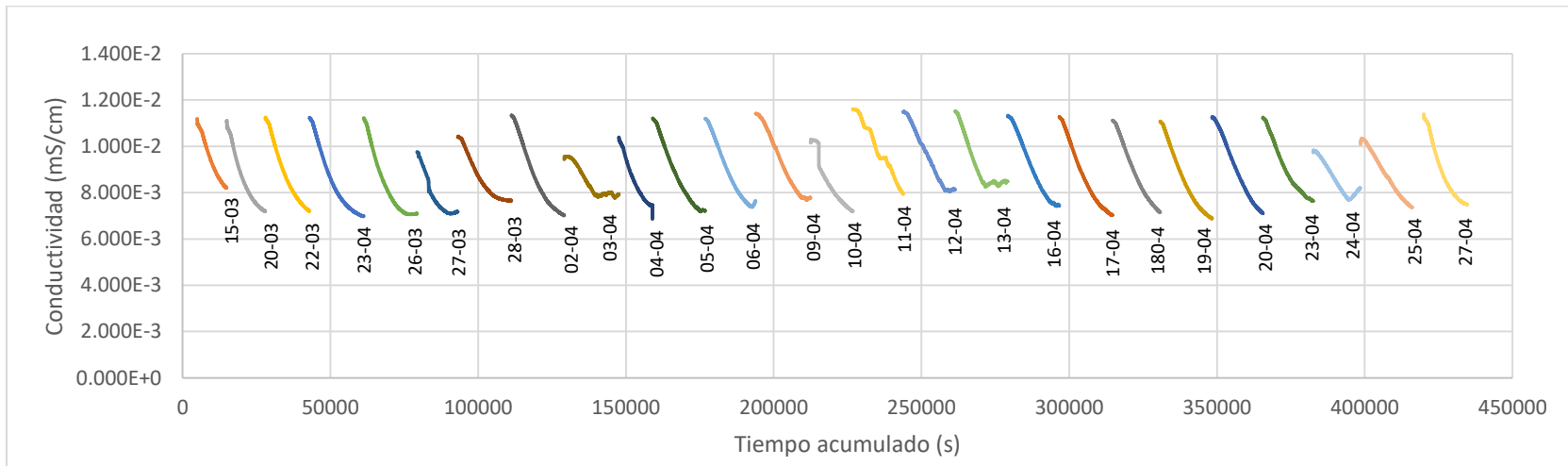
Gráfica 2. Temperatura bloque 1



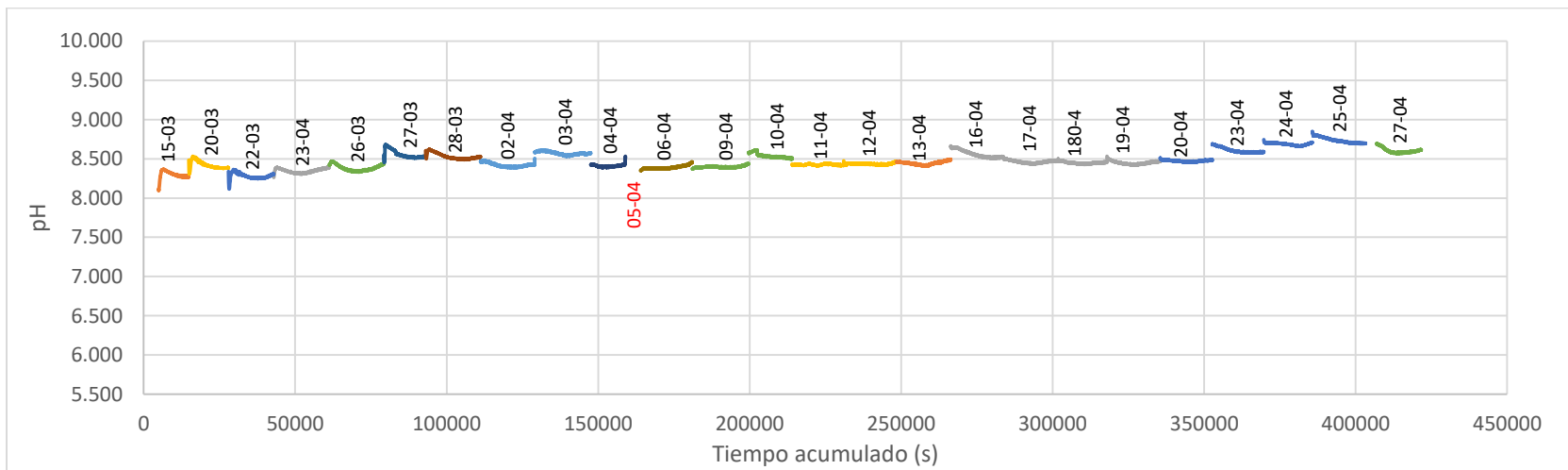
Gráfica 3. OD bloque 1



Gráfica 4. Conductividad bloque 1



Gráfica 5. pH bloque 1



6.2 Bloque 2 (agua de lluvia)

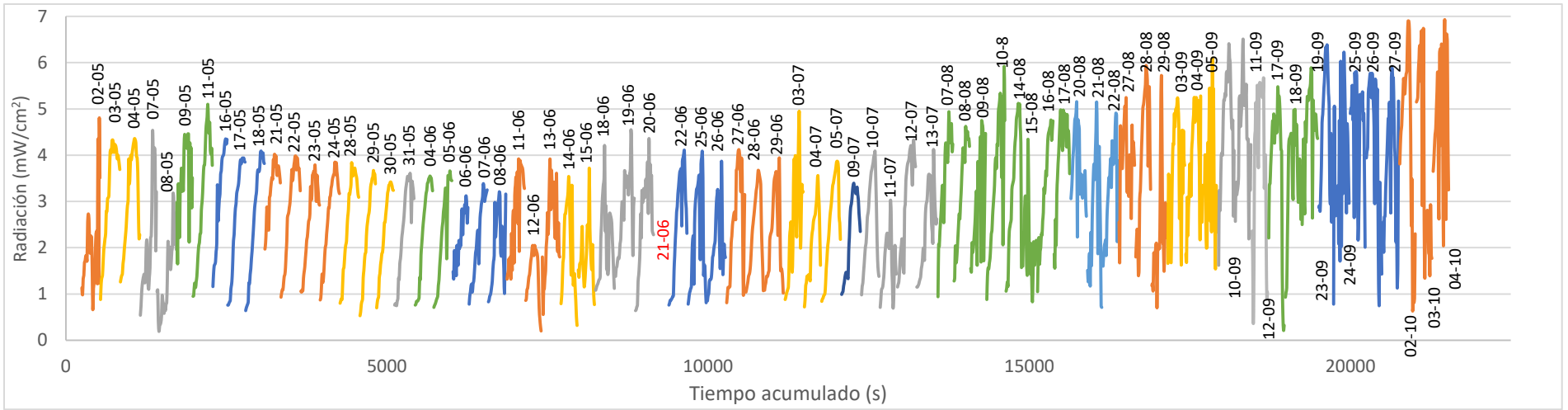
En la gráfica 6 se observa que desde el mes de Agosto hubo un incremento en la cantidad de radiación suministrada al sistema, el día 02/Octubre se encontró el punto de mayor radiación del periodo, dicho punto se encuentra en 7.27 mW/cm^2 . El día 21/Junio se encuentra el día con menor radiación registrada a lo largo del proyecto, ese día solo se alcanzó un máximo 1.69 mW/cm^2 , fue un día muy nublado en el que incluso se presentó lluvia intermitente desde el amanecer.

En la gráfica 8 podemos observar un patrón de “picos”, estos se atribuyen a la oxigenación del sistema que da lugar luego de arrancar la bomba del reactor, es por ello que en los procedimientos se plantea un tiempo de homogenización de 20 minutos, tiempo en el que los parámetros empiezan a arrojar lecturas estables, la tasa de consumo de oxígeno para este bloque es de $1.30 \text{ E-4} \pm 3.50 \text{ E-5} \text{ (mg/L s)}$. Para cada lote, se observó que el OD inicial del primer día de tratamiento es mayor, después de que el agua es sometida al proceso fotocatalítico el valor de OD inicial disminuye y se mantiene prácticamente constante para los días siguientes. El lote 21 del bloque 2 duró 2 semanas y se observó que durante el periodo de inactividad (10/Agosto – 13/Agosto) el valor del OD consumido se restableció prácticamente hasta llegar al valor inicial de OD de ese lote, este fenómeno ocurre debido a la oxigenación natural del agua que buscará un equilibrio entre el ambiente y el sistema.

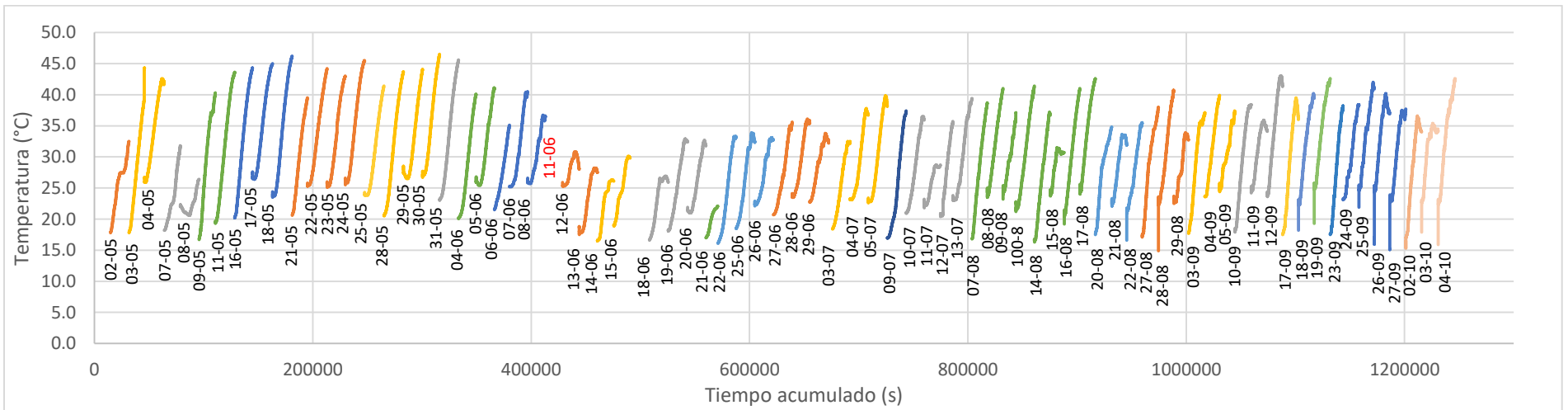
La conductividad de este bloque comprende valores iniciales que van de 1.12 E-2 hasta $9.00 \text{ E-3} \text{ mS/cm}$, como se observa en la gráfica 9; mientras aumenta la temperatura, los valores de conductividad disminuyen con una tasa de $2.60 \text{ E-7} \pm 8.00 \text{ E-8} \text{ (mS/cm s)}$. La conductividad se comporta de manera análoga del OD para el bloque 2.

En la gráfica 10 podemos observar que el pH de esta agua puede comenzar con un valor que va desde 5.5 y puede llegar hasta 7.5, valores un tanto ácidos pero que corresponden al pH regular del agua de lluvia. También se encontró un incremento del pH al final de la corrida en la mayoría de los puntos, se observó un gran cambio en el comportamiento del pH a partir del 07/Agosto, fecha que coincide con el regreso de labores después del periodo vacacional de la escuela primaria Luis Braille. En el periodo que va del 07/Agosto al 04/Octubre se reportan los pH más ácidos en todo el proyecto, el aumento del pH de estas corridas, después del tratamiento fotocatalítico no fue muy alto. En el último lote de este bloque (02/Octubre - 04/Octubre) se añadió H_2O_2 al agua cada 30 minutos para estudiar el efecto que tenía en la reacción.

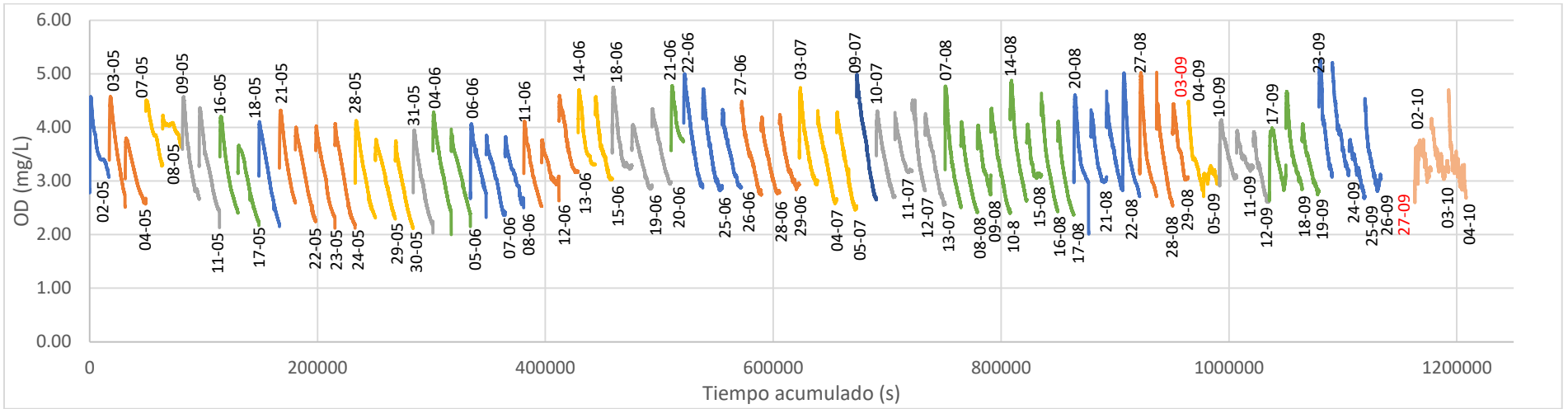
Gráfica 6. Radiación bloque 2



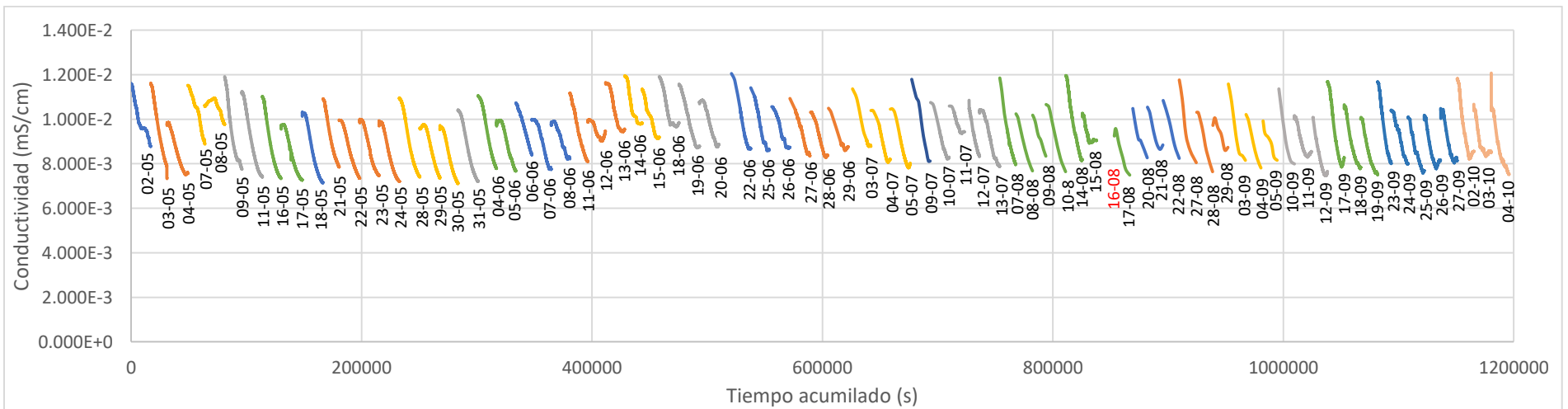
Gráfica 7. Temperatura bloque 2



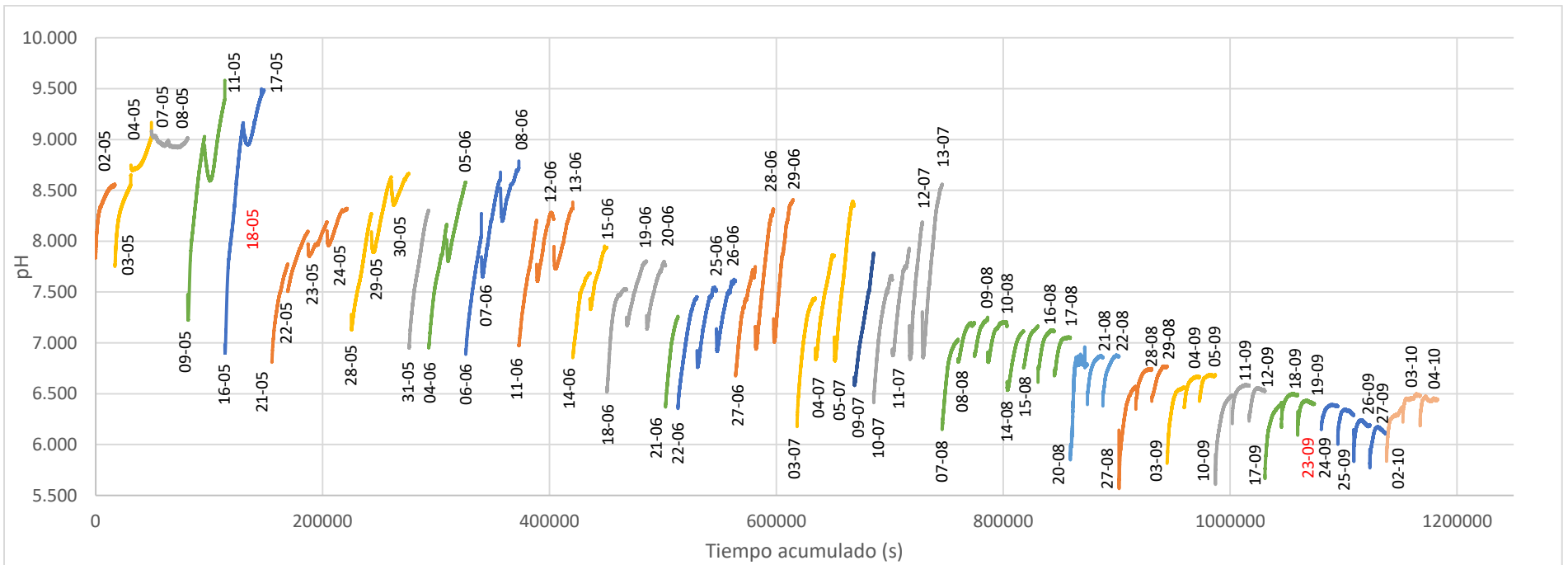
Gráfica 8. OD bloque 2



Gráfica 9. Conductividad bloque 2



Gráfica 10. pH bloque 2

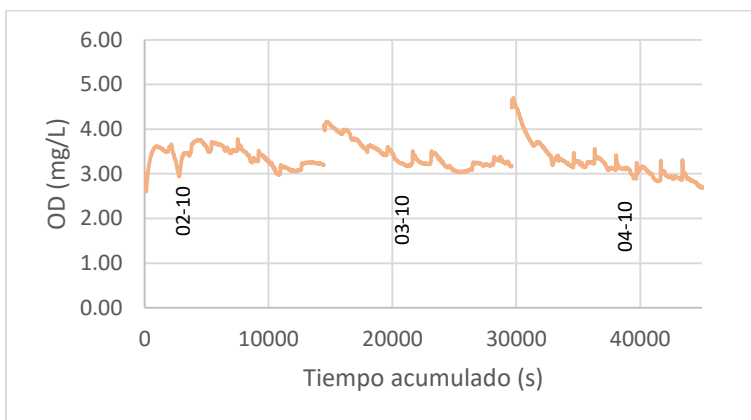


La adición de H_2O_2 al agua no afecto en gran medida a la conductividad, como se puede observar en la gráfica 9, los valores disminuyen con una tasa de $2.10 E-7 \pm 5.00 E-8 (mS/cm s)$, estos valores son similares a los días anteriores de este bloque; sin embargo los valores de OD y pH se comportan de una forma diferente ante la adición de H_2O_2 .

La grafica 11 muestra de forma más detallada el comportamiento del OD en presencia de H_2O_2 , se observa una tendencia irregular con diversas subidas y bajadas, los picos de las gráficas de cada día están relacionados con la adición de H_2O_2 a ciertos intervalos, no todo el H_2O_2 ayuda a formar $\bullet OH$, parte de este se disocia en agua y oxígeno, el aumento en el OD que se observa en las gráficas está relacionado con dicha disociación, se observa de manera general una caída en el OD de 4 a 2 mg/L, cada una de las subidas y bajadas tiene una tasa de consumo de $2.60 E-4 \pm 5.00 E-4 (mg/L s)$.

Al degradar la materia orgánica natural se logra alcalinizar el agua, con la adición del H_2O_2 se observó una mayor alcalinización que en ausencia de H_2O_2 , por ejemplo el día 27/Septiembre el agua no contenía H_2O_2 y mostró valores de pH inicial de 5.7 y pH final de 6.2, mientras que el día 02/Octubre el pH inicial fue de 5.8 y pH final de 6.3; el valor de pH inicial para el lote de agua con H_2O_2 fue de 5.8 y al finalizar el lote tenía un pH final de 6.5.

Gráfica 11. OD del agua de lluvia en presencia de H_2O_2



6.3 Bloque 3 (ausencia de radiación)

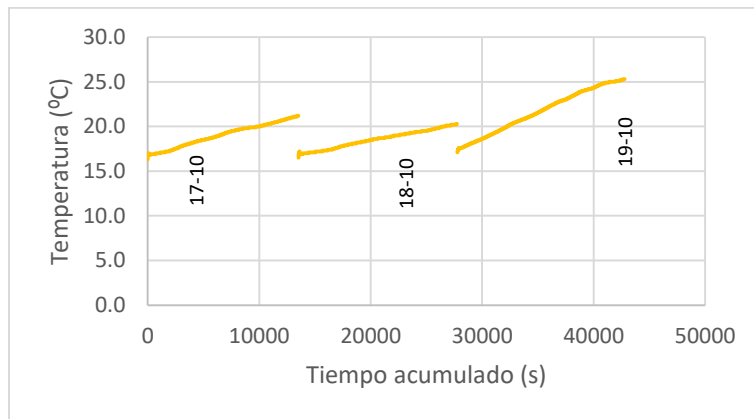
Se hizo un experimento en ausencia de radiación para poder comprobar que el cambio en los parámetros medidos eran producto del proceso fotocatalítico, como se vio en la reacción 10 se necesita de una energía para activar el TiO_2 y así se lleve a cabo la reacción. Como se observa en la gráfica 12 el aumento de temperatura es demasiado bajo en comparación a los demás bloques alcanzando temperaturas máximas de $25\text{ }^\circ\text{C}$, esto es debido a que el reactor permaneció cubierto, por lo que ni los rayos del sol ni la radiación insidiana en el sistema.

En la gráfica 13 se puede observar que al inicio de las corridas el OD tiene un valor aproximado a 5 mg/L , el oxígeno se consume a razón de $2.13\text{E-}4 \pm 6\text{E-}5\text{ (mg/L s)}$ y después permanece casi constante; sin radiación no hay producción de $\bullet\text{OH}$ y por ende no hay consumo de OD.

En la gráfica 14 podemos ver que el valor de la conductividad inicial es de $1.200\text{E-}2\text{ mS/cm}$, y que la conductividad disminuye de forma mínima, esto se asocia al poco aumento de temperatura en el sistema por la ausencia de radiación y a la nula degradación de TDS; la tasa de esta disminución es de la conductividad es de $9.00\text{E-}8 \pm 3.00\text{E-}8\text{ (mS/cm s)}$.

La gráfica 15 muestra los valores de pH obtenidos, podemos observar un ligero aumento en el pH inicial del primer día, sin embargo, el valor del pH final del primer día se mantiene casi constante para los demás días de prueba.

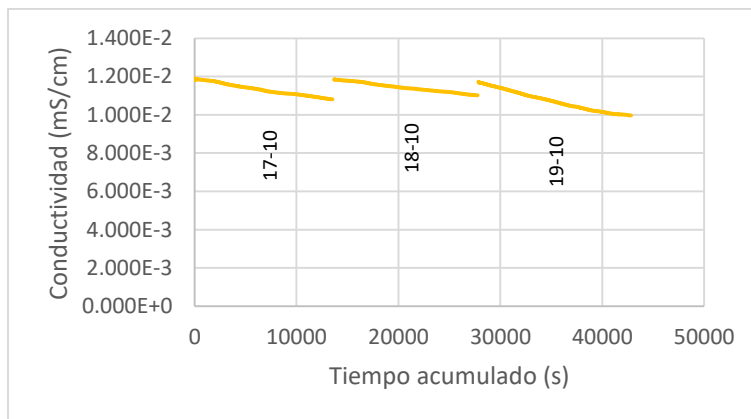
Gráfica 12. Temperatura bloque 3



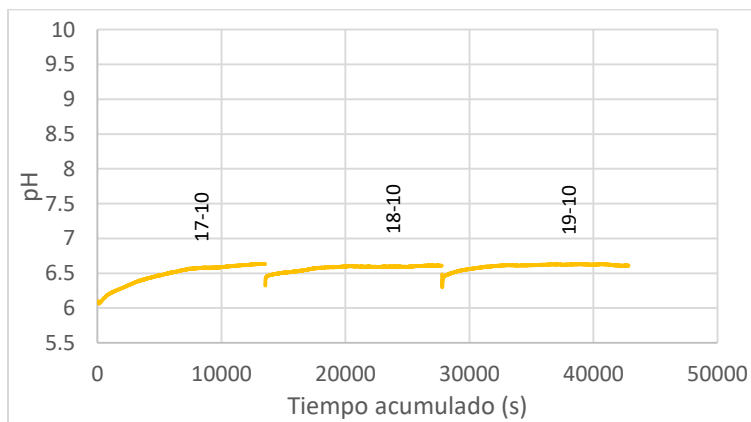
Gráfica 13. OD bloque 3



Gráfica 14. Conductividad bloque 3



Gráfica 15. pH bloque 3



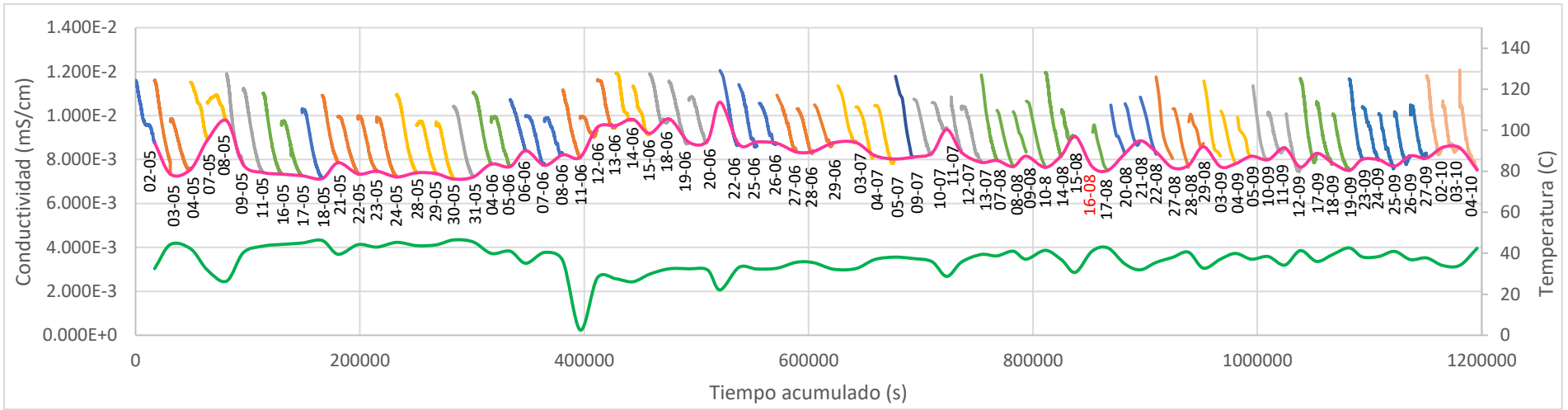
7. Discusión de resultados

Se observó que al igual que el OD, la conductividad presenta una caída en sus valores, relacionado al aumento de la temperatura. La ley de Henry indica que a temperatura constante, la cantidad de gas disuelto (OD) en un determinado volumen de líquido (agua) es proporcional a la presión que ejerce el gas, por lo tanto al aumentar la temperatura también aumenta la presión disminuyendo la capacidad del agua de absorber oxígeno. El inverso de la temperatura final de las corridas ($1/T$) se comporta de manera proporcional al OD final correspondiente. (Grafica 16)

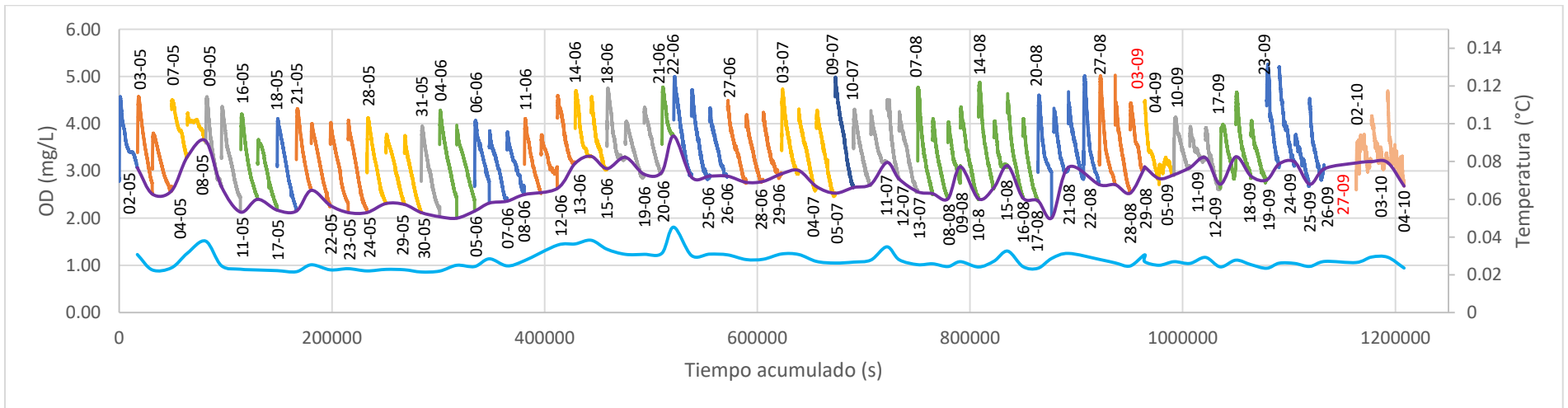
Al aumentar la temperatura, también aumenta la energía cinética de las moléculas del agua, lo que ocasiona que vibren más rápido y por ende choquen unas con otras, impidiendo que fluyan libremente. En la gráfica 17 se observó que la conductividad es inversamente proporcional a la temperatura, es decir a mayor temperatura menor conducción y viceversa.

Para conocer la cantidad de sólidos totales disueltos TDS, se hizo uso de la conductividad, de acuerdo con HANNA Instrument la relación que existe entre estos dos parámetros es: $2 \mu\text{S}/\text{cm} = 1 \text{ ppm}$ ($2 \mu\text{S} \times 0.5 = 1 \text{ ppm}$), en promedio podemos observar entre 6 y 5 ppm antes del tratamiento y entre 4 y 3.5 ppm al finalizar.

Gráfica 16. Relación OD y 1/T



Gráfica 17. Relación Conductividad y Temperatura



Para cuantificar la radiación que era suministrada al sistema fue necesario pasarla a términos de energía, esto debido a que se quiso encontrar una relación del decrecimiento o crecimiento microbiológico con la radiación que incidía en el reactor; para ello se utilizó la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Energía solar UV acumulada por volumen.

$$Q = \sum_{i=0}^n Q_{t_i} = \sum_{i=0}^n \left(\frac{A \Delta t I}{V_T} \right)_{t_i}$$

Donde:

A = Área irradiada (m²)

V_T = Volumen total irradiado (L)

I = Promedio de radiación UV incidida (J/s m²) de Δt (s) entre dos tiempos de muestreo (i)

Q = Energía acumulada por volumen

La energía acumulada por volumen para cada lote que se trabajó se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 19. Q acumulada (J/L) bloque 1

Lotes	Q acumulada (J/L)
1	604.598
2	666.905
3	758.357
4	1038.897
5	811.591
6	777.065
7	886.102
8	1392.422
9	941.423
10	1504.188
11	1650.714
12	1124.326
13	538.357
14	2491.216
15	2237.252
16	671.963

Tabla 20. Q acumulada (J/L) bloque 2

Lotes	Q acumulada (J/L)
1	453.248
2	1527.714
3	766.788
4	1418.686
5	1148.736
6	623.868
7	2593.104
8	1606.398
9	594.642
10	1039.78
11	1361.91
12	1400.13
13	769.838
14	1753.332
15	225.941
16	1549.473
17	1647.828
18	1612.821
19	551.043
20	2207.788
21	5081.112
22	1838.277
23	1936.479
24	2192.532
25	2541.237
26	2364.42
27	3893.755
28	2510.319

Se trabajó en diferentes escenarios para estudiar el comportamiento en el sistema; I) de manera regular, II) adicionando H₂O₂ y III) en ausencia de radiación.

Se trabajó con un escenario extra que pretendía oxigenar el sistema; la teoría dice que al oxigenar el sistema mantendríamos una producción alta de radicales hidroxilo (reacción 12) lo que implicaría una mayor eficiencia, para permitir mayor entrada de oxígeno al sistema se optó por mantener abierta la tapa de la cisterna 2.

No se observó un cambio importante en la disminución de OD pero si repercutió en la proliferación de algas en el sistema, llegando incluso a incrustarse en las paredes de algunos tubos absorbedores.

Al mantener la tapa abierta no solo entró oxígeno al sistema sino que también los rayos del sol, aunado a la temperatura cálida del sistema favorecieron la fotosíntesis.

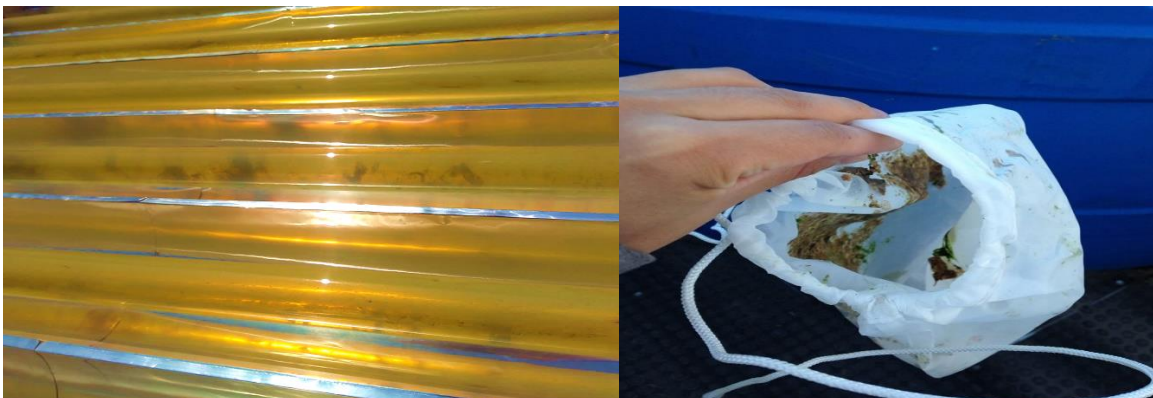


Figura 39. Sistema con presencia de algas

Desde que aparecieron las algas y hasta que se solucionó el problema pasaron aproximadamente 15 días (del 02/Mayo al 18/Mayo), la aparición de algas trajo consigo algunas complicaciones, por ejemplo; pérdida de catalizador de los tubos absorbedores (15 % aproximadamente); al tratar de remover las algas en algunos tubos también se llegó a desprender TiO_2 . Cabe señalar que la persistencia de algas fue mínima y no mostro interferir con el comportamiento de la reacción fotocatalítica.

En la gráfica 10 (pH bloque 2) podemos observar 3 comportamientos diferentes; el primero corresponde al antes mencionado “periodo de algas” en donde el pH se encuentran entre los valores 9 y 9.5, el segundo comportamiento corresponde al intervalo 21/Mayo a 13/Juio, se observa en ese periodo que el pH final de cada lote oscila en 8 y 8.5; pH que corresponde también a los obtenidos en el bloque 1. El tercer periodo consta de las fechas 07/Agosto a 27/Septiembre, en ese periodo de trabajo encontramos el pH más ácido con el que se estuvo trabajando.

Por cuestiones administrativas de la escuela primaria Luis Braille no fue posible trabajar del 13/Julio al 07/Agosto, el pH ácido del agua se le atribuye al tiempo que permaneció almacenada el agua de lluvia, además la presencia de organismos heterótrofos (bacterias y animales acuáticos), de acuerdo con la literatura; “Esta situación ocurre debido a los intensos procesos de descomposición y respiración, a través de los cuales hay liberación de CO_2 , que por hidrólisis origina ácido carbónico e iones de hidrogeno. Además varios procesos metabólicos que ocurren en las aguas naturales pueden generar iones de hidrogeno, contribuyendo de esta forma con la disminución del pH del medio. Los procesos que destacan son los de oxidación biológica, de intercambio catiónico e hidrólisis de cationes” (Talavera, V. 1998)

Po otra parte respecto a los resultados microbiológicos cabe mencionar que debido a las características del análisis y para que la lectura de resultados coincidiera con el horario de trabajo del LANCIS solo era posible trabajar en el reactor tres días.

Apoyándonos en la NOM-127-SSA1-1994, el análisis microbiológico radicó en la identificación y cuantificación de Enterococos, E. coli y Coliformes fecales, sin embargo se observó la presencia de Microorganismos Aerobios Mesófilos (MAM) y se decidió estudiar su comportamiento.

Se analizaron 5 lotes de agua de lluvia los cuales se detallan a continuación:

- Lote 1 del 03/Sep/18 a 05/Sep/18
- Lote 2 del 10/Sep/18 a 12/Sep/18
- Lote 3 del 17/Sep/18 a 19/Sep/18
- Lote 4 del 23/Sep/18 a 27/Sep/18; en este lote se trabajaron 5 días para observar el comportamiento de los Microorganismos Aerobios Mesófilos; debido a que la incubación de los Enterococos es de 48 horas y a la inexistencia en pruebas anteriores se consideró omitir su análisis en este lote.
- Lote 5 del 02/Octubre/18 a 04/Octubre/18; en este lote se trabajó con agua de lluvia y H₂O₂

Las pruebas de E. coli siempre resultaron negativas por lo que se omitió mostrar su cuantificación en las siguientes tablas:

Tabla 21. Conteo de colonias lote 1

FECHA	Coliformes		MAM		Enterococos		MAM	
	inicio	final	inicio	final	inicio	final	inicio	final
03/Sep/2018	0	0	24	35	0	0	19	10
04/Sep/2018	0	2	212	108	0	0	29	10
05/Sep/2018	0	0	31	86	0	0	36	12

Tabla 22. Conteo de colonias lote 2

FECHA	Coliformes		MAM		Enterococos		MAM	
	inicio	final	inicio	final	inicio	final	inicio	final
10/ Sep /2018	0	0	10	49	1	0	27	40
11/ Sep /2018	0	0	33	17	0	0		
12/ Sep/2018	0	0	90	40	0	0	78	40

Tabla 23. Conteo de colonias lote 3

FECHA	Coliformes		MAM		Enterococos		MAM	
	inicio	final	inicio	final	inicio	final	inicio	final
17/ Sep/2018	-	-	-	-	-	-	-	-
18/ Sep/2018	0	0	130	267	0	0	0	0
19/ Sep/2018	0	0	159	273	0	0	0	0

Tabla 24. Conteo de colonias lote 4

FECHA	Coliformes		MAM	
	inicio	final	inicio	final
23/ Sep /2018	0	0	105	129
24/ Sep /2018	0	0	116	73
25/ Sep /2018	0	0	55	39
26/ Sep /2018	1	0	269	373
27/ Sep /2018	0	0	400	400

Tabla 25. Conteo de colonias lote 5

FECHA	Coliformes		MAM		Enterococos		MAM	
	inicio	final	inicio	final	inicio	final	inicio	final
02/Oct/2018	0	0	20	1	0	0	0	0
03/Oct/2018	0	0	367	178	0	0	6	0
04/Oct/2018	0	0	400	103	0	0	13	2

Al terminar el tratamiento, el conteo de Enterococos y Coliformes fecales resulto en cero pero el comportamiento de los MAM no fue de la misma manera. La tasa de degradación de los MAM se observan en las tablas siguientes:

Tabla 26. Tasas de degradación de MAM observada en Agar m FC Difco

MAM (Agar m FC Difco)			
Fecha	Inicial	Final	Porcentaje de degradación
02/ Sep/2018	24	35	45.83
03/ Sep/2018	212	108	-49.05
04/ Sep/2018	31	86	177.41
10/ Sep/2018	10	49	390
11/ Sep/2018	33	17	-48.48
12/ Sep/2018	90	40	-55.55
17/ Sep/2018	16	22	37.5
18/ Sep/2018	130	267	105.38
19/ Sep/2018	159	273	71.69
23/ Sep/2018	105	129	22.85
24/ Sep/2018	116	73	-37.06
25/ Sep/2018	55	39	-29.09
26/ Sep/2018	269	373	38.66
27/ Sep/2018	400	400	0
Degradación promedio			47.86

Tabla 27. Tasas de degradación de MAM observada en Agar m Enterococcus Difco

MAM (Agar m Enterococcus Difco)			
Fecha	Inicial	Final	Porcentaje de degradación
03/ Sep/2018	19	10	-47.36
04/ Sep/2018	29	10	-65.51
	36	12	-66.66
10/ Sep/2018	27	40	48.14
11/ Sep/2018	0	0	0
12/ Sep/2018	78	40	-48.71
17/ Sep/2018	0	0	0
18/ Sep/2018	0	0	0
19/ Sep/2018	0	0	0
Degradación promedio			-20.01

Tabla 28. Tasas de degradación de MAM con H₂O₂ observada en Agar m FC Difco

MAM (Agar m FC Difco)			
Fecha	Inicial	Final	Porcentaje de degradación
02/Oct/2018	20	1	-95
03/Oct/2018	367	178	-51.49
04/Oct/2018	400	103	-74.25
Degradación promedio			-73.58

Tabla 29. Tasas de degradación de MAM con H₂O₂ observada en Agar m Enterococcus Difco

MAM (Agar m Enterococcus Difco)			
Fecha	Inicial	Final	Porcentaje de degradación
02/Oct/2018	0	0	0
03/Oct/2018	6	0	-100
04/Oct/2018	13	2	-84.61
Degradación promedio			-61.53

La tasa de degradación promedio de MAM observada en Agar FC Difco es nula (tabla 26), mientras que en Agar m Enterococcus Difco se observó un 20% (tabla 27). Podemos observar en los dos tipos de Agar una degradación mucho mayor cuando se trabajó con H₂O₂, 73% en Agar FC Difco y 61% en Enterococcus Difco (Tabla 28 y 29).

Se elaboraron diversas graficas comparando el comportamiento de los MAM con el de los demás parámetros para saber si alguno de estos estaba relacionado con el decrecimiento o crecimiento de estos; se observó que después del tratamiento el agua es más alcalina y favoreció al crecimiento de estos, así mismo, por su propia naturaleza tienden a desarrollarse de mejor manera en el rango de temperaturas 30°C y 40°C (Grafica 22).

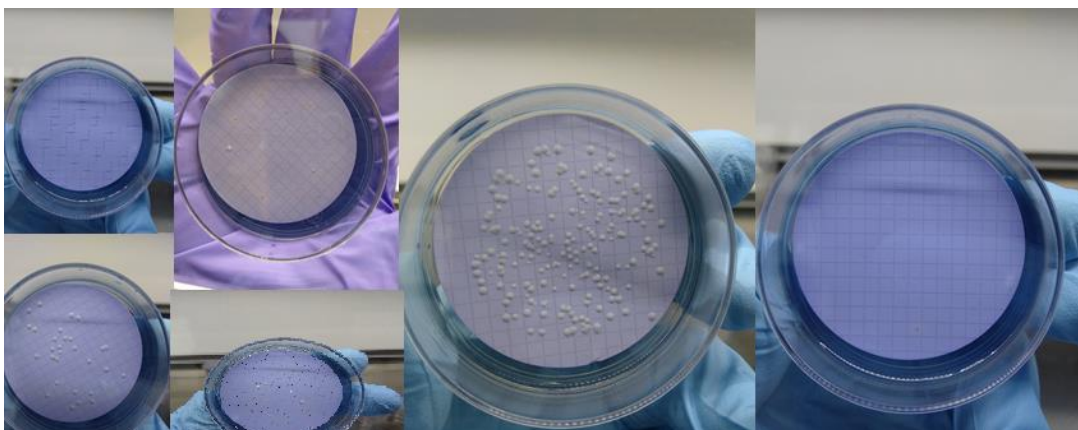
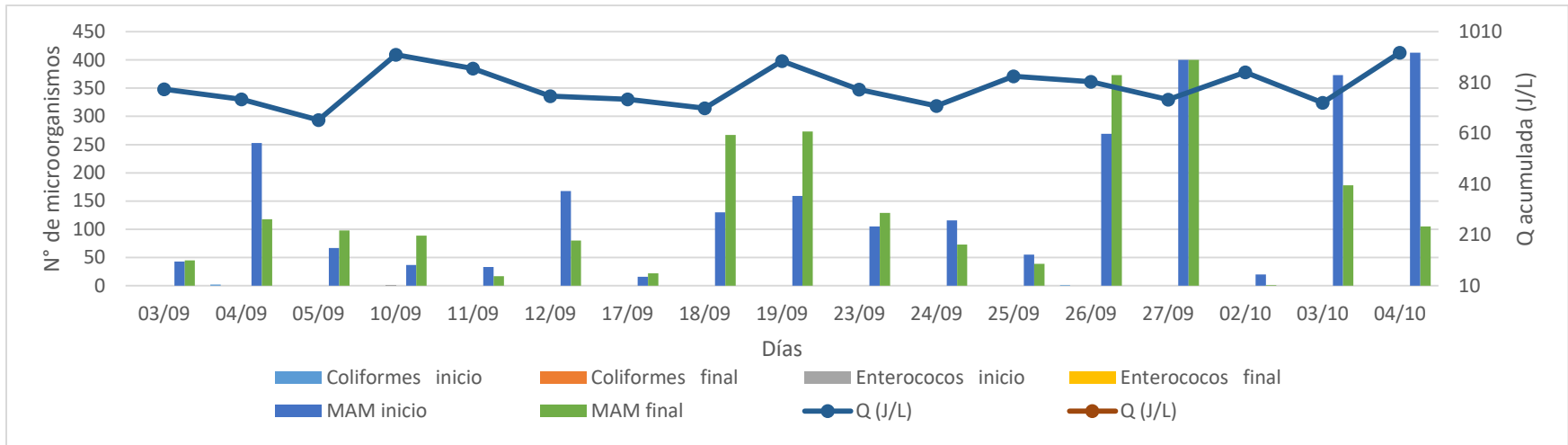
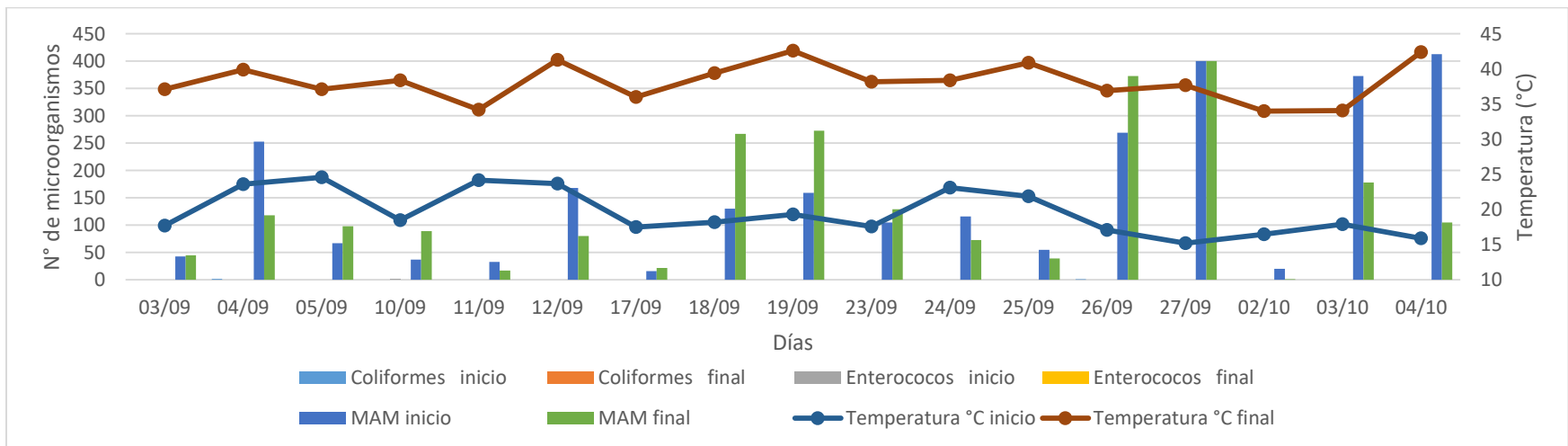


Figura 40. Conteo de colonias en sus respectivos medios de cultivo.

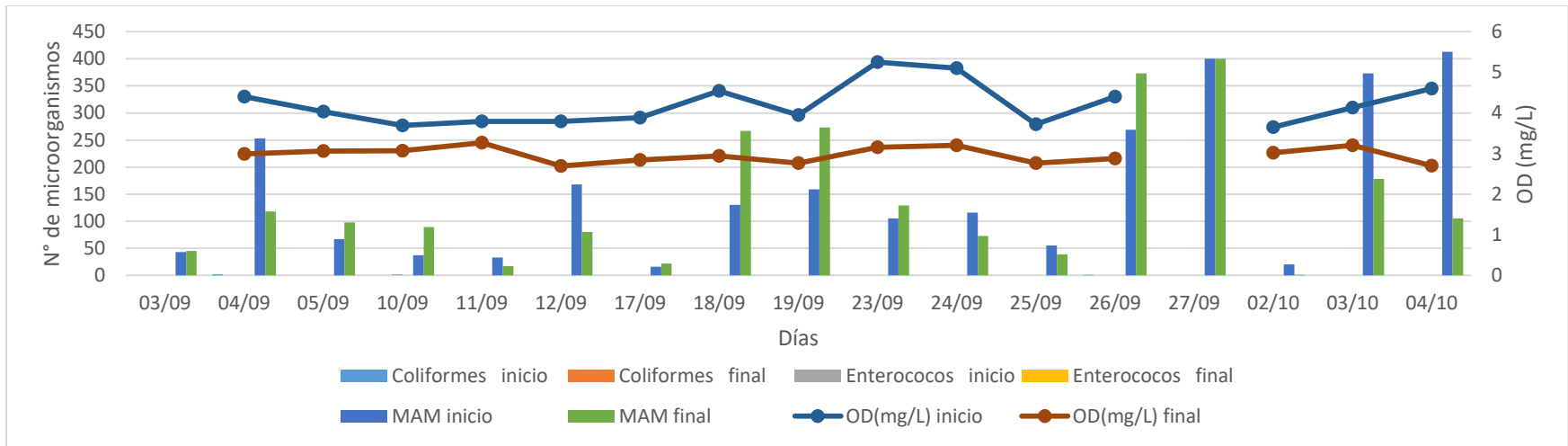
Gráfica 18. Microorganismos-Energía acumulada



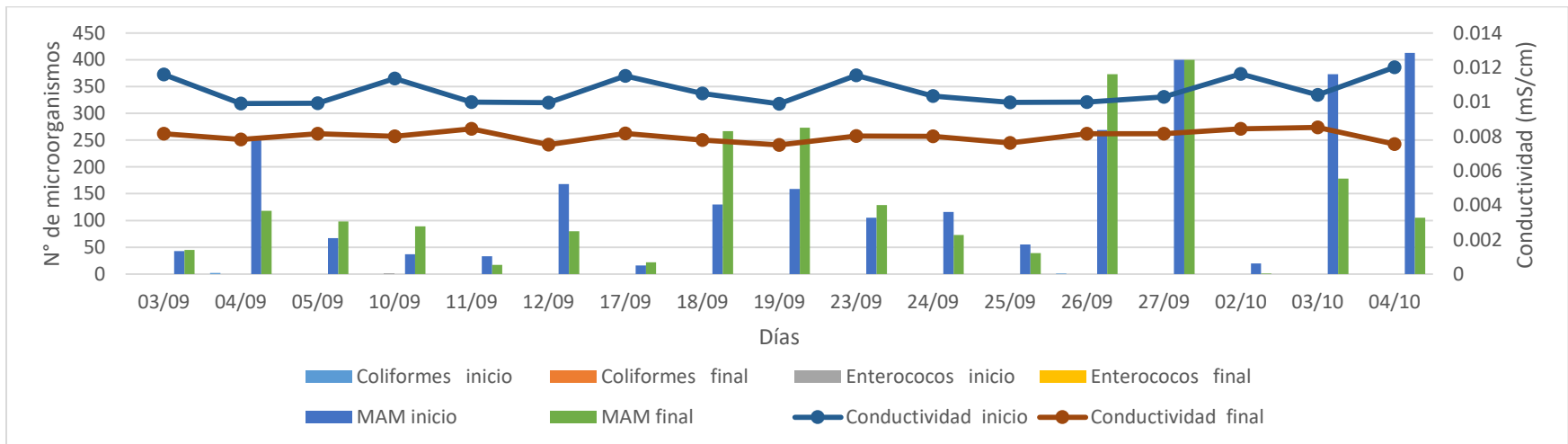
Gráfica 19. Microorganismos-Temperatura



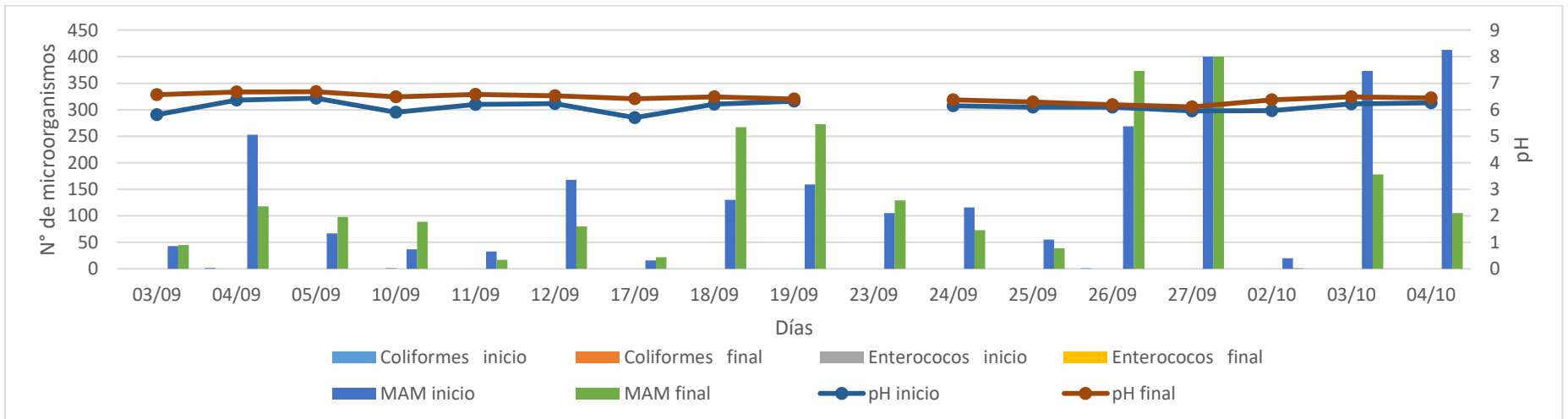
Gráfica 20. Microorganismos-OD



Gráfica 21. Microorganismos-Conductividad



Gráfica 22. Microorganismos-pH



8. Conclusiones

El tratamiento de agua de lluvia con procesos fotocatalíticos repercute en sus propiedades de la siguiente manera; aumenta su pH, disminuye la conductividad y disminuye su concentración de OD. Que el agua tratada sea más alcalina que el agua inicial representa una degradación por parte de los contaminantes y materia orgánica contenida en ella, componentes que le otorgan el carácter ácido al agua de lluvia. La degradación de dichos contaminantes también se pueden observar si se sigue el comportamiento de la conductividad, al estar directamente relacionada con los TDS implica una reducción no solo de la conductividad si no también una disminución de la concentración de contaminantes del agua. La disminución del OD implica la generación del $\bullet\text{OH}$, agente oxidante responsable de la degradación de los contaminantes presentes en el agua de lluvia, el aumento del pH manifiesta la degradación de materia orgánica.

El agua tratada con el reactor fotocatalítico de la escuela primaria Luis Braille cumple con los parámetros establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 para la parte microbiológica, presentando ausencia de Coliformes fecales y *E. coli*, además se observó ausencia de Enterococos, así mismo cumple con el estándar microbiológico de la norma NOM-041-SSA1-1993 para agua purificada envasada estando por debajo de las 100 UFC de MAM, el sistema fotocatalítico es capaz de degradarlos teniendo mayor eficiencia trabajando en presencia de H_2O_2 .

En general el reactor fotocatalítico Luis Braille mostró un gran desempeño, es posible que se pueda mejorar la eficiencia hasta llegar incluso a la inactivación del 100% de los MAM ya sea añadiendo mayor cantidad de H_2O_2 al sistema o modificando la forma en la que se encuentra inmovilizado el catalizador (TiO_2), posibilidades que quedan abiertas para futuras investigaciones.

Legalmente (en México), se define como agua potable aquella que cumple con los 48 parámetros de calidad establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Debido a las características del proyecto y a los parámetros que se siguieron no podemos darle el término “potable” al agua tratada, sin embargo si nos apoyamos en las pruebas de calidad que realiza CONAGUA, el agua tratada en el reactor fotocatalítico cae en el rango de excelente calidad para los parámetros de Sólidos Suspendidos Totales (SST), Coliformes fecales, *E. coli* y porcentaje de saturación de oxígeno, obteniendo un agua adecuada para uso humano.

9. Comentarios y recomendaciones

Con base en la experiencia adquirida al trabajar estos meses con el prototipo, se han propuesto una serie de recomendaciones que pueden ayudar a aumentar la eficiencia del sistema en general.

Recomendaciones generales

- ✓ Impregnar tubos nuevamente con TiO_2 ya que las algas desprendieron una parte del catalizador de ser posible estudiar la viabilidad de otro tipo de tecnología para inmovilizarlo el catalizador por ejemplo empacar con anillo raschig u otras geometrías hechos de TiO_2 que podrían incluso ser generados con impresoras 3D.
- ✓ Implementar un sistema de oxigenación para el agua de lluvia almacenada; con el propósito de prevenir o retrasar los procesos anaeróbicos y de esta manera impedir la disminución del pH además de evitar malos olores y mantener una calidad óptima del agua. Se plantea instalar un segundo tanque de almacenamiento de agua captada y un sistema de bombeo que recircule el agua entre estos tanques.
- ✓ Implementar un sistema de desfogue; se observó que al apagar el sistema no toda el agua regresa al tanque 2, esta agua termina estancada en los tubos del reactor y aunque no comprometen la eficiencia operacional del sistema bien podría ser un factor en el desprendimiento de catalizador impregnado.
- ✓ Aislar de mejor manera el sistema para impedir el paso de agentes que puedan interferir con el tratamiento del agua. Al estar el sistema a la intemperie, se hallaron insectos dentro del agua tratada.
- ✓ Mantener cerrada la tapa de la cisterna 2, tal y como fue mencionado en la sección de discusión de resultados, ya que al recibir luz solar se favorece la fotosíntesis y con esto la formación de algas.

10. Bibliografía

1. Acosta, N. (2017). La CDMX se hunde 40 cm. al año y estas son las consecuencias México:EXCELSIOR. <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/2017/11/05/1199266>
2. Agencia Estatal de Meteorología (2018) La Radiación Solar. España
3. Andueza, F. (2014). Microbiología del agua. Informe de investigación. Escuela de bioquímica y farmacia. Universidad de los Andes. Venezuela
4. Barceló, L. y M. López de Alda. (2008). Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes. Barcelona. España
5. Benintende, S. y C. Sanchez (2018). Crecimiento bacteriano. Universidad Nacional de Entre Ríos. Argentina
6. Blanco, J. (2005). El reactor solar fotocatalítico. Almería: SOLARSAFEWATER. España
7. Cáceres, J. (2002). Evaluación analítica y optimización de procesos de oxidación avanzada en planta piloto solar, Tesis doctoral. Almería
8. Camacho, A. M. Giles, A. Ortegón, M. Palao, B. Serrano y O. Velázquez. (2009). Técnicas para el análisis microbiológico de alimentos. 2a ed. Facultad de Química, UNAM. México
9. Carbajo, O. (2013). Aplicación de la fotocatálisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa con catalizadores nanoestructurados de TiO₂. Madrid
10. Clima de México (2013). Clima de México DF. Fuertes cambios estacionales. México: Clima de.com. <https://www.clima-de.com/mexicodf/>
11. Clima promedio en Iztapalapa (2017). El clima promedio en Iztapalapa. México: Weather Spark. <https://es.weatherspark.com/y/5658/Clima-promedio-en-Iztapalapa-México-durante-todo-el-año#Sections-Clouds>
12. Colina, L. (2018). Filtración por membrana. Universidad Autónoma Metropolitana. sgpwe.izt.uam.mx
13. CONAGUA (2010). Estadísticas del agua en México. México. www.conagua.gob.mx
14. CONAGUA. (2016). LINEAMIENTOS TÉCNICOS: SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA CON FINES DE ABASTO DE AGUA POTABLE A NIVEL VIVIENDA. México
15. CONAPO (2015). Programa nacional de población 2014-2018. México
16. Consejo consultativo del agua. (2018). ¿Por qué llueve?. México: Consejo Consultativo del Agua, A.C. <http://www.aguas.org.mx/sitio/index.php/cultura-del-agua/por-que-llueve>
17. Domínguez, S. (2012). Estudio de la degradación fotocatalítica de dodecilsulfonato (DBS) en reactores con lámpara de mercurio y con leds. Tesis de grado. Cantabria
18. Echeverría, C. (2011). DISEÑO DE UN COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO COMPUESTO CON APLICACIÓN PARA EL CALENTAMIENTO DE AGUA. Tesis de grado. Piura
19. Energía, O. T. (2012). Área Tecnológica: Energía Solar Térmica.
20. Fernández, P. (2003). ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA A AGUAS CONTAMINADAS, TESIS DOCTORAL. Granada
21. Frías, L. (2018). El agua de lluvia no sirve para beber. México: Gaceta UNAM. www.gaceta.unam.mx

22. Garcés, L., & Mejía, E. &. (2008). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de investigación*, 10.
23. Gelover, S. (2008). Eliminación de contaminantes orgánicos emergentes mediante fotocatalisis heterogénea con TiO₂ empleando luz solar. SEMARNAT. México
24. Gil, E. (2004). Oxidación fotocatalítica de aguas residuales de la industria de lavandería utilizando TiO₂ como catalizador y luz UV. *Ingeniería y Ciencia*.
25. Glaze, Kang & Douglas. (1987). *The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation*. University of California. L.A. California
26. Global Development Research Center (GDRC) (2015). *Rainwater harvesting and utilisation and environmentally sound approach for sustainable urban water management*. E.U.A.
27. Hammes F., Berney M., Wang Y., Vital M., Koster O., Egli T. (2008). Flow-cytometric total bacterial cell counts as a descriptive microbiological parameter for drinking water treatment processes. E.U.A
28. Herrera, G. (2014). *Degradación de contaminantes presentes en agua mediante fotocatalisis solar*, Tesis de maestría. México.
29. Hill, R. (2016). *Bacterial Activity in Harvested Rain Water*. West Yorkshire.
30. INEGI (2010). *Censo de población y vivienda*. México
31. INEGI (2015). *Encuesta Intercensal*. México
32. Jiménez, M. (2015). *Desarrollo de nuevas estrategias basadas en fotocatalisis solar para la regeneración de aguas de una industria agro-alimentaria*, Tesis doctoral. Almería.
33. Kinkade, L. (2007). *Design for water, rainwater harvesting, stormwater catchment and alternate water reuse*. New Society Publishers. Canadá
34. *Lluvia para todos* (2018). *Sistemas de captación de agua de lluvia*, México. isla urbana.org
35. Masschelein, Willy J. (2002). "Ultraviolet light in water and wastewater sanitation". Lewis Publishers. E. U. A.
36. Méndez-Arriaga, F. (2009). *Advances Oxidation Processes (Photocatalysis, photo-Fenton and Sonolysis) for removal of pharmaceutical pollutants in water* (Tesis Doctoral) Universidad de Barcelona
37. Moreno, R. (2005). *Procedimiento para la desinfección de agua mediante fotocatalisis solar*, Tesis de maestría. Xalapa
38. Oller, I. (2008). *DEPURACIÓN DE AGUAS CONTAMINADAS CON TÓXICOS PERSISTENTES MEDIANTE COMBINACIÓN DE FOTOCATÁLISIS SOLAR Y OXIDACIÓN BIOLÓGICA*. Almería
39. P.Araujo, M.A. Blesa y G.J. de A. A. Soler-Illia. (2005). *Memorias del XIII Congreso Argentino de Fisicoquímica, Río Hondo (Santiago del Estero)*.
40. PUMAGUA. (2011). *Informe de avances*. México
41. Quintero, A., & Vargas, C. &. (2017). *EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA Y PASTEURIZACIÓN PARA DESINFECCIÓN DE AGUAS LLUVIAS*. Bogotá
42. R. Candal, S. Bilmes and M. Blesa. (2004). *Semiconductores con actividad fotocatalítica, en Eliminación de Contaminantes por Fotocatalisis Heterogénea*, Madrid
43. Rahmane, I. (2017). *Polución de agua pluvial urbana*. Córdoba

44. RealEstate. (2018). Obras hidráulicas, elemento crítico para México. Ciudad de México: Real Estate Market & lifestyle. <https://realestatemarket.com.mx/articulos/infraestructura-y-construccion/20313-obras-hidraulicas-elemento-critico-para-mexico>
45. Reyneke, B. (2017). Application of Solar Pasteurization for the Treatment of Harvested Rainwater, for the degree Master. Sudáfrica
46. Sánchez, R. (2010). SÍNTESIS DE TiO₂ MEDIANTE PROCESOS SOL-GEL PARA SU APLICACIÓN EN PROCESOS FOTOCATALÍTICOS, TRABAJO DE FIN DE CARRERA. Madrid
47. Saran, S., & Arunkumar, P. &. (2018). Desinfection of roof harvested rainwater for potable purpose using pilot-scale solar photocatalytic fixed bed tubular reactor. India
47. Tapia, S. y. (2009). Concentrador parabólico compuesto: una descripción opto-geométrica. Revista Mexicana de Física, 13.
48. Terán, M. (2016). ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA A AGUAS CONTAMINADAS, Tesis de grado. Barcelona
49. Varela, G. & Grotiz, G. (2018) Fisiología y metabolismo bacteriano. Motevideo, Uruguay
50. Watts, J. (2015). La crisis del agua de la Ciudad de México. México: The Guardian. <https://www.theguardian.com/cities/2015/nov/12/la-crisis-del-agua-de-la-ciudad-de-mexico>
51. Zdeb, Zamorska, Papciak (2016). STUDYING MICROBIOLOGY OF RAIN WATER FOR OF THEIR USE IN ECONOMY. Journal of Ecological Engineering, 17.