



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ARQUITECTURA
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA
CAMPO DE CONOCIMIENTO: TECNOLOGÍA

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON
MATERIALES NANOESTRUCTURADOS.
CASO: MUNICIPIO CENTRO, TABASCO. (2012-14)

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE MAESTRO EN ARQUITECTURA

PRESENTA:

ARQ. IGNACIO ALEJANDRO GUZMÁN HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ DIEGO MORALES RAMÍREZ
FACULTAD DE ARQUITECTURA

CIUDAD DE MÉXICO, JUNIO 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ARQUITECTURA
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA
CAMPO DE CONOCIMIENTO: TECNOLOGÍA

**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON
MATERIALES NANOESTRUCTURADOS.**

CASO: MUNICIPIO CENTRO, TABASCO. (2012-14)

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE MAESTRO EN ARQUITECTURA

PRESENTA:

ARQ. IGNACIO ALEJANDRO GUZMÁN HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ DIEGO MORALES RAMÍREZ

SINODALES:

M. EN ARQ. JORGE RANGEL DÁVALOS

M. EN ARQ. ERNESTO OCAMPO RUIZ

DRA. MONSERRAT BIZARRO SORDO

M. EN ARQ. FRANCISCO REYNA GÓMEZ

MÉXICO, D.F. JUNIO 2017

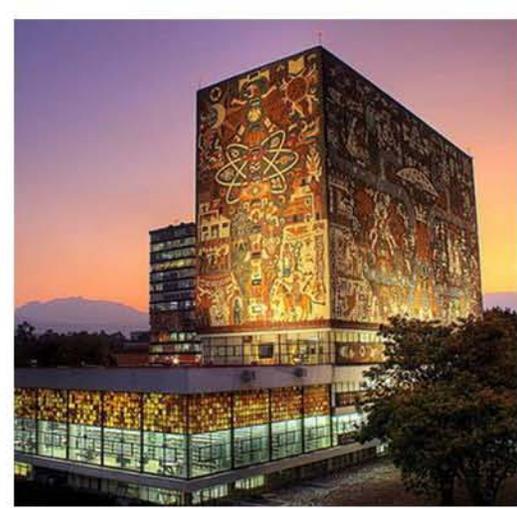




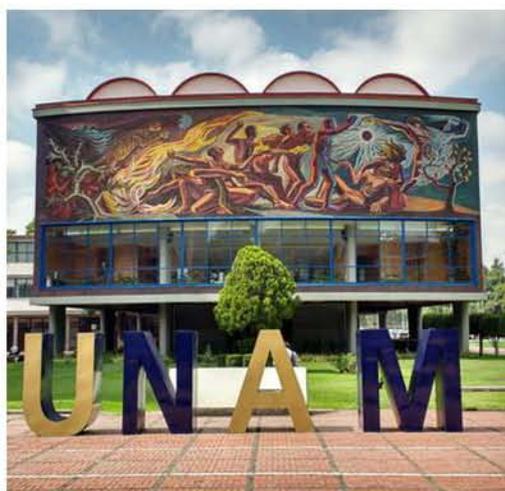


Este trabajo se realizó en conjunto con el Instituto de Investigaciones en materiales bajo la asesoría de la **Dra. Monserrat Bizarro Sordo**. Sin su conducción no hubiera sido posible la conclusión de este proyecto.





Agradezco a todos los que formaron parte de este trabajo multidisciplinario, ya que no hubiera sido posible su realización sin su valiosa participación.



Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Arquitectura y al Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, así como todos los docentes y administrativos involucrados, por haberme dado la oportunidad de seguir desarrollándome como profesional e investigador dándome todo lo necesario.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por apoyarme económicamente durante la duración de la Maestría, ya que sin ese apoyo hubiera sido imposible la realización de la misma.

Al Dr. José Diego Morales Ramírez por la dirección acertada de este trabajo de investigación, ayudándome siempre a enlazar varias partes de la investigación con la arquitectura y sus propósitos.

Al Instituto de Investigación en Materiales de la UNAM, por el uso de sus instalaciones para desarrollar el proyecto en su fase experimental.

A la Doctora Monserrat Bizarro Sordo, por su apoyo en los capítulos relacionados con la experimentación, teórica y práctica de este proyecto, sin su apoyo y su asesoría este trabajo no hubiera sido posible, con ella formé una buena relación de trabajo y de amistad cordial.

A Iris, quien desarrolló en conjunto conmigo la primera parte de la experimentación, con ella formé un excelente equipo para todas nuestras pruebas, así como una buena amistad dentro y fuera del laboratorio.

A Soyuki y a Laura por su apoyo con cualquier duda que yo tuviera, por brindarme su amistad y por hacer que el trabajo en el laboratorio fuera mucho más divertido.

Al Sr. Juan Manuel García León por su apoyo en las mediciones de perfilometría. Al Dr. Omar Novelo por las imágenes del microscopio

electrónico de barrido. Al Dr. Agileo Hernández por su ayuda en las mediciones de Carbono Orgánico Total.

A mi esposa, Valeria, por su constante compañía y apoyo incondicional, este fue un plan en conjunto que supimos realizar de excelente manera. Su cariño siempre me sirvió para seguir adelante, en momentos de dificultad, desidia o contrariedad.

A mis padres Gloria e Ignacio y a mi hermana Mónica, que, cada uno a su manera, me ayudaron a llegar a este momento y siempre apoyaron mi crecimiento educativo, profesional y personal.

A toda mi familia; a mis abuelitas, a mis tíos y primos, quienes se volvieron, durante la duración de la maestría, en mi núcleo familiar, ellos me ayudaron en la parte sentimental de vivir en una ciudad diferente y disfruté mucho estrechar lazos con todos ellos.

A mis profesores de la maestría que ayudaron a mi formación constante y que provocaron en mí una sed de adquirir conocimiento y actualización en la investigación y en nuestra profesión.

A todos mis compañeros y amigos de la maestría, con quienes pasé incontables horas de estrés, trabajo y desvelos, pero también de diversión y apoyo incondicional.



Resumen

La presente investigación se enfoca en el uso de nuevas tecnologías para ayudar a lidiar con el problema del desabasto y contaminación del agua en nuestro país. Aunado de los problemas mundiales en este aspecto, estudios prospectivos en nuestro país nos hacen alarmarnos más y urgen investigaciones que puedan contribuir a frenar dichos inconvenientes. Un claro ejemplo de estos estudios es el realizado por la CONAGUA en el año 2014, el cual prevé que para el año 2030 tan solo se cuente con 3,430 m³ de agua per cápita (CONAGUA, 2014), lo cual está estipulado como menor al mínimo necesario.

Por otro lado, cada día son mayores los avances en el campo de la nanotecnología, ya sea para modificar materiales que nos ayuden al tratamiento de aguas grises o utilizando materiales cuyas propiedades puedan ser alteradas para eliminar y atrapar ciertos contaminantes.

Como objetivo final esta investigación pretende adaptar y aplicar un filtro dentro de un sistema integral el cual implemente materiales nanoestructurados que aprovechen la luz solar para el tratamiento de aguas grises en conjunto con aguas pluviales previamente recolectadas del inmueble, con el fin de poder reutilizarlas dentro de los hogares en vez de su desecho inmediato al sistema de drenaje.

Índice

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO I – ESTADO DEL ARTE | 13 |
| Marco teórico | |
| Marco histórico | |
| Estado actual de la tecnología | |
| Métodos convencionales de tratamiento de agua | |
| CAPÍTULO II – EXPERIMENTACIÓN | 37 |
| Metodología de la investigación | |
| Caracterización | |
| Experimentos con colorantes | |
| Experimentos con muestras de agua | |

| | |
|----------------------------------|-----------|
| CAPÍTULO III – APORTACIÓN | 65 |
| Caso de estudio | |
| Sistema integrado | |
| DISCUSIÓN | 81 |
| CONCLUSIONES | 83 |
| PROSPECTIVA | 84 |
| BIBLIOGRAFÍA | 87 |



INTRO DUCCIÓN

Históricamente el hombre ha ocasionado cuantiosos daños al medio ambiente y a nuestra salud por su paso despreocupado a la hora de satisfacer sus necesidades; muchos de estos deterioros han sido producidos en conjunto con el desarrollo de la tecnología, tal cual podemos ver en el caso de la revolución industrial. En el auge de ésta, en 1858 se reportó un gran problema de contaminación en el río Támesis, a lo que se conoció como “El Gran Hedor” (Halliday, 2013).



Sin embargo en nuestros días existe un factor de cambio y de conciencia respecto a todo lo que nos rodea y lo que realizamos. Hemos dejado de preocuparnos solamente por satisfacer nuestras necesidades y nos hemos interesado en asegurar el futuro de las próximas generaciones. Términos acuñados en nuestras épocas como la sustentabilidad, sostenibilidad, arquitectura verde, diseño regenerativo, diseño de la cuna a la cuna describen un momento de cambio, en el que sabemos que existen muchos problemas, pero también que está en nuestras manos revertir esta situación.

La presente investigación se centra en el problema de la contaminación del agua, dado que es vital para nuestra existencia y afecta muchas actividades de nuestras comunidades, como la agricultura, la pesca, la industria, entre muchas otras. Principalmente se buscará una solución en las viviendas, las cuales son responsables del 14% de la contaminación y uso desmedido del agua, solo por debajo del sector agropecuario. (CONAGUA, 2014).



GRÁFICA #1
Distribución del agua en las industrias
CONAGUA

Más específicamente el caso de estudio es el fraccionamiento “Gracias México”, ubicado en el municipio de Centro, Tabasco y consta de un total de 438 viviendas para personas de escasos recursos que tuvieron que ser desalojadas de sus viviendas tras la inundación de 2007. Al ser una zona de alta densidad poblacional y situación económica precaria es un lugar idóneo para la implementación de un proyecto de investigación tal como este, por su gran impacto social, económico y ecológico.

En la presente investigación se hará uso de los materiales nanoestructurados en forma de películas delgadas de materiales semiconductores adheridas a algún sustrato, que al estar introducidas en soluciones líquidas e impulsadas por agentes de iluminación presenten actividad fotocatalítica, y de esta forma produzcan reacciones de oxidación-reducción que permitan la descomposición de moléculas orgánicas para convertirlas en H₂O y minerales inertes.

Estas pequeñas placas de reactivos serán integradas en un sistema de filtración de aguas grises en conjunto con aguas pluviales provenientes de las viviendas del caso de estudio, haciendo posible que al tratar el agua ésta pueda ser reutilizada para todas las áreas del hogar.



De esta forma se pretende reducir el gasto económico tanto de los usuarios como de los encargados de proveer dicho servicio a las comunidades, así como ayudar al medio ambiente, al no regresar las aguas grises a los mantos acuíferos sin darles un tratamiento para eliminar contaminantes. También se proyecta que este sistema servirá para no saturar al sistema de desagüe, que muchas veces es insuficiente para la colonia del caso de estudio.

Los alcances pretendidos de esta investigación involucran la investigación y experimentación del mejor material semiconductor nanoestructurado para realizar el proceso de fotocatalisis y de esta forma dar un tratamiento al agua de forma más efectiva; posteriormente dicho material depositado formará parte de un prototipo burdo del filtro el cual será probado en un laboratorio con condiciones controladas.

Problemática

Es común el hecho de que la gente piense que como planeta no tenemos un problema de escasez de agua, ya que como sabemos, aproximadamente dos tercios de nuestra superficie están cubiertos de agua, y es por eso que nos autodenominamos "El Planeta Azul", sin embargo la masa que representan estos volúmenes de agua no es tan impresionante como parecería en un inicio. Si juntáramos toda el agua del mundo en una esfera, ésta tendría 1,385 km de ancho, con un volumen aproximado de 1,386,000,000 km³, que al ser comparados con los 12,756 km de diámetro de la tierra y sus 1,083,210,000,000 km³ de volumen (Gleick, P. H., 1993). se logra ver de forma un poco más acentuada nuestro problema (Figura #1).

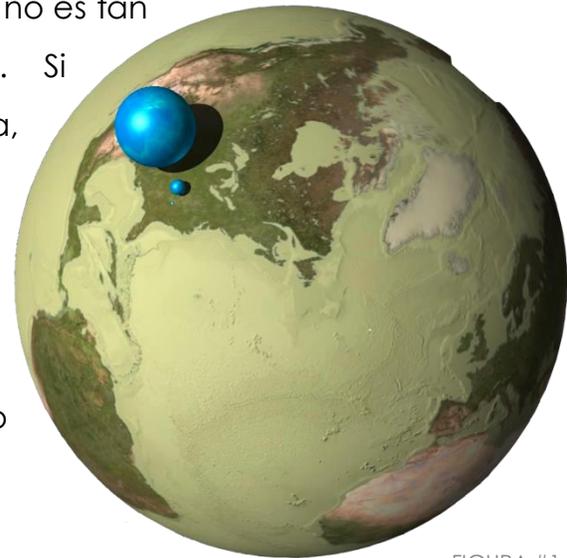


FIGURA #1
Representación gráfica del
agua disponible en el planeta
<https://water.usgs.gov>

Aunado a eso tenemos que comprender que no toda el agua disponible en nuestro planeta es apta para nuestro consumo, puesto que tenemos que desestimar toda el agua salada de los mares, la cual representa el 97% de toda el agua (Gleick, 1993). Del agua dulce restante debemos considerar que la mayoría se encuentra inaccesible, ubicada en glaciares en los polos, pantanos y en la humedad del suelo. Esto nos deja con un porcentaje cercano al .01% disponible para el consumo humano, alrededor de 1,400 km³ (Gleick, 1993). Este gran total de agua, la tendríamos que dividir, no solamente entre los más de 7,000 millones de habitantes, sino también entre todas las especies animales y vegetales que utilizan este elemento como su hogar, fuente de alimentación y transporte.

El mayor problema que tenemos es que, sumado a los problemas de escasez de agua, tenemos fuertes problemas de contaminación en el planeta y

específicamente en nuestro país. Un estudio

realizado en el 2006 por la CONAGUA destinado para evaluar la calidad del agua en nuestros mantos acuíferos mostró que solamente el 51.8% de estos cuentan

con una excelente calidad (Gráfica #2) y el restante de las estaciones de monitoreo registraron un

12.9% con buena calidad, 15.7% con calidad aceptable, 14.3%

contaminadas y 5.3% con fuerte contaminación (Paredes, A. J., 1997).



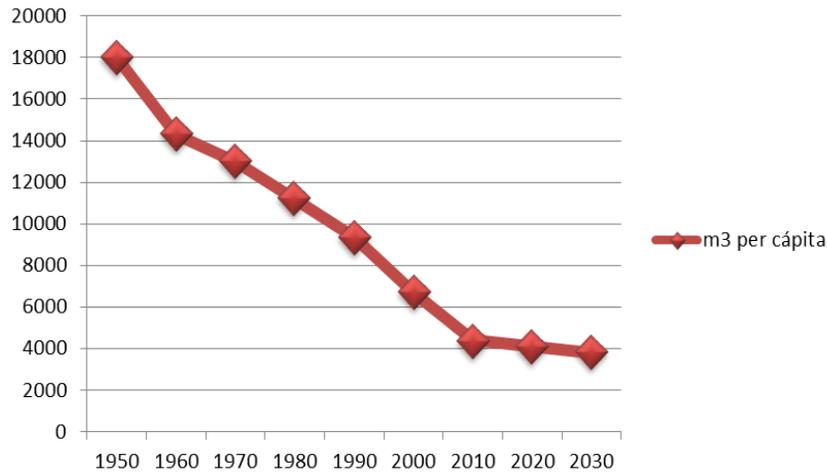
GRÁFICA #2
Estado de contaminación de
mantos acuíferos en México.
CONAGUA

Esta contaminación afecta directamente la salud de los seres humanos e indirectamente a todas nuestras actividades. En reportes de la Organización Mundial de la Salud (OMS) se señala que el 9.1% de las enfermedades actuales surge en consecuencia de problemas del agua, tales como las fiebres tifoideas, el Cólera, la Hepatitis A y E, la Poliomiелitis, entre muchas otras; así como el 6% de los fallecimientos en el mundo (OMS, 2014).

Económicamente la contaminación también representa un gran problema para nuestro país, de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, al cierre del 2012 los costos totales por el agotamiento y la degradación ambiental sumaron 985.06 mil millones de pesos, representando una suma que asciende al 6.3% del Producto Interno Bruto (INEGI, 2012).

Otro problema que se avecina en nuestro país es el “estrés hídrico” el

GRÁFICA #3 – M³ de agua per cápita en México
CONAGUA



cual se presenta cuando la demanda de agua es mayor que la cantidad de agua disponible; este problema ya existe en muchos lugares de México, sin

embargo en estudios prospectivos se prevé que esto ocurrirá en todo el país para el año 2030, en el cual solo se contarán con aproximadamente 3,430 m³ de agua per cápita anualmente (CONAGUA, 2014),

Por toda esta abundante problemática es que ésta y muchas investigaciones buscan hallar soluciones prácticas, innovadoras y ecológicas para poder tratar el agua a distintas escalas, en específico en la presente investigación se proponen materiales nanoestructurados que realizan procesos fotocatalíticos de reducción y oxidación (REDOX) de compuestos orgánicos contenidos en el agua para lograr su reutilización, generando un menor consumo de este vital elemento.

Objetivos

Objetivo general

Adaptar y probar un prototipo de sistema de filtración y tratamiento de agua que funcione con materiales nanoestructurados, como el óxido de Zinc (ZnO), y que sirva como último paso para tratar las aguas grises y pluviales de las viviendas populares del caso de estudio, con el fin de reutilizarlas dentro de los mismos hogares; dicho procedimiento debe ser rápido y eficiente, ecológicamente hablando.

Objetivos particulares

- Analizar los beneficios económicos que prevería dicho sistema instalado en las viviendas del caso de estudio.
- Obtener películas de ZnO nanoestructurado sobre sustratos de malla metálica y elegir el tipo de malla que proporcione la mayor actividad fotocatalítica.
- Determinar los parámetros óptimos de depósito por rocío pirolítico de películas de óxido de zinc dopado con aluminio y plata (ZnO:Al:Ag), en las mallas.
- Estudiar la estabilidad de los depósitos en las mallas para realizar los procesos deseados.
- Diseñar un prototipo escalable experimental de un filtro con dichos materiales diseñado para tratar aguas grises y pluviales provenientes del sector doméstico.

Hipótesis general

Si se trata el agua gris proveniente de las viviendas por medio de filtros que utilicen materiales nanoestructurados (ZnO:Al:Ag) para realizar procesos de fotocatalisis y degradación de componentes orgánicos en el agua, es posible lograr una mejora considerable en la calidad del agua. De esta manera se podrá reutilizar el agua dentro de algunas áreas de los hogares de una forma rápida y eficiente, ecológicamente hablando.

Hipótesis particulares

- Si se implementan sistemas de tratamiento de agua con materiales nanoestructurados se puede lograr un consumo menor de este servicio en las viviendas.
- El funcionamiento de los depósitos de materiales nanoestructurados en mallas metálicas es más eficiente que sobre sustratos de vidrio y su manejo y adaptación dentro del reactor es más sencillo.
- Existen beneficios económicos directos de la implementación de este tipo de sistemas comparado con los sistemas tradicionales.

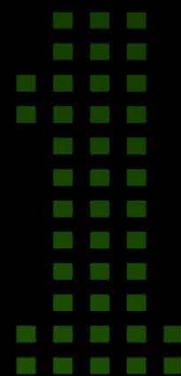
Justificación

Analizando la situación en la que se encuentran las tecnologías y sus aplicaciones en la arquitectura, debe ser una prioridad el investigar nuevos métodos de involucrar procesos elaborados para sacar provecho al máximo de los materiales que nos rodean, sirviéndonos de los últimos avances en la nanotecnología y otras ciencias; de igual forma está dentro de nuestra naturaleza nunca conformarnos con lo que ya tenemos, sino siempre tratar de mejorar lo que hemos realizado y lo que conocemos. Por todo esto, la presente investigación tendrá repercusión práctica sobre la actividad arquitectónica, aportando valiosa información que servirá para varias aplicaciones, así como la generación de un prototipo de un filtro con óxido de zinc dopado con aluminio y plata (ZnO:Al:Ag), diseñado para el tratamiento de aguas grises y pluviales de origen doméstico.

Sumado a esto, la aportación en el caso de estudio será favorable, ya que ayudaría con varios problemas reales y que suelen ocurrir en esa zona, como la falta de agua potable y las inundaciones por la saturación del drenaje. De igual forma beneficiaría a las instituciones públicas, al reducir la cantidad de agua que tendrían que proveer, esto traducido inmediatamente en un ahorro económico del gasto público. Todo esto generaría una conciencia ecológica que hace falta en lugares de bajos recursos y se espera que tenga resonancia en otros fraccionamientos y poblaciones cercanas. De igual forma, la investigación podrá servir como marco de referencia para futuras investigaciones que abarquen temas de tratamiento de aguas grises, sobre todo si también pretenden ver usos y cualidades de los materiales nanoestructurados y sus aplicaciones.



CAPÍTULO
UNO: ESTADO
DEL ARTE



MARCO TEÓRICO

Existen varios conceptos para la aplicación de la investigación, teniendo en cuenta los principales elementos que tienen un papel en ella, el agua y los materiales nano-estructurados, así como sus principios básicos y las leyes que les corresponden. A continuación se da una breve explicación de cada uno de ellos, así como sus componentes que se involucran en la investigación.

Materiales nanoestructurados

Como ya se mencionó con anterioridad los materiales nanoestructurados, también conocidos como nanomateriales son aquellos materiales naturales o elaborados cuyas dimensiones están en la escala nanométrica (entre 1 y 100 nm); esto los provee de propiedades físicas y químicas muy diferentes a las de los mismos compuestos con partículas o granos de escalas mayores (Gleiter, H., 2000). Esto se debe a que dichos materiales experimentan efectos cuánticos que no son tan obvios o que no están presentes en estructuras de mayor tamaño del mismo compuesto, y eso explica sus propiedades físicas especiales, actualmente la definición más aceptada es la acuñada por la Comisión Europea y no ha sido modificada desde el 2011.

Una forma de clasificar los materiales nanoestructurados es por el número de ejes confinados que tengan. Los materiales cero dimensionales son la unidad más sencilla que existe, sus electrones se encuentran restringidos en las tres dimensiones (X, Y, Z). Los materiales uni-dimensionales están confinados solamente en dos de las dimensiones, y el otro eje no confinado tiene dimensiones mayores a 100 nm (B. D. Fahlman, 2011). En el caso de los materiales bi-dimensionales solamente están confinados en una dirección, por lo cual las otras dos dimensiones pueden tener magnitudes mayores a

100 nm. Cuando ninguna de las dimensiones están confinadas se denomina como un material tri-dimensional (B. D. Fahlman, 2011).

Los materiales nanoestructurados ya han sido utilizados en procesos de tratamiento de aguas de diferentes procedencias, y han sido desarrollados de diversas formas para funcionar de maneras específicas, por ejemplo, existen membranas filtrantes cuyas porosidades son consideradas nanométricas y funcionan de tal forma que solo dejan pasar a través de sus orificios las moléculas de agua y los demás contaminantes quedan atrapados.

Otra forma en la que los nanomateriales han sido aplicados en esta área es en forma de nanopartículas adheridas a granos, los cuales al introducirlos al agua “atrapan” los compuestos no deseados para después eliminarlos por medio de separaciones básicas. También son relativamente comunes las aplicaciones en las cuales se modifica por medio de la nanotecnología algún material que está en contacto con el agua de forma que descomponga o elimine bacterias contenidas, haciéndolas inertes a la hora que el agua es utilizada.

Creación de películas nanoestructuradas

Existen en la actualidad numerosas formas de creación de películas nanoestructuradas, y pueden clasificarse en dos grupos: Físicas o químicas. Algunos ejemplos del primer grupo son la síntesis física de vapor, la deformación mecánica, el plasma, el crecimiento epitaxial o el sputtering, mientras que en las síntesis químicas encontramos ejemplos como el Sol-gel, el depósito por baño químico y el rocío pirolítico. Esta última es la que se empleó en esta investigación, a continuación se describen sus ventajas, junto con el proceso de síntesis.



FIGURA #2
Válvula de
Rocío pirolítico

Rocío pirolítico o spray pirolítico

Es comúnmente utilizado en investigaciones para formar películas delgadas de materiales nanoestructurados mediante un método económico y sin la necesidad de condiciones excesivamente controladas de vacío, temperatura o pureza de los precursores. Funciona mediante la atomización de una solución líquida que contiene el compuesto que se desea depositar en los sustratos.

Los sustratos son colocados sobre un baño de estaño previamente calentado a la temperatura deseada, generalmente entre 300 y 500°C y

FIGURA #3 – Baño de estaño



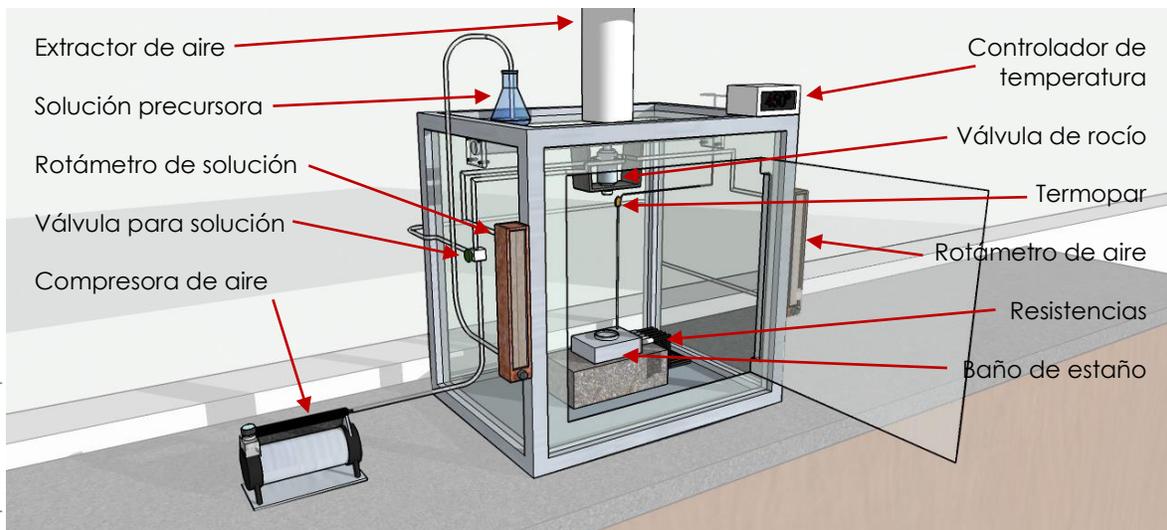
posteriormente se procede a pasar la solución líquida y un flujo de aire por un cono inyector de boquilla, al chocar dicha solución con el calor generado por el

baño de estaño hace que ciertas partículas de tamaño nanométrico se impregnen al sustrato formando una película nanoestructurada de organización uniforme, porosa, delgada, rugosa o lisa, dependiendo de los requerimientos específicos.

Éste último proceso es el que se seleccionó para realizar los experimentos ya que es un medio bastante económico y sencillo, lo cual permite realizar bastantes pruebas con diferentes concentraciones, materiales y sustratos, teniendo varios puntos de comparación y así crear un material eficiente y duradero para realizar los procesos de purificación del agua.

El proceso completo se puede observar en la figura #4, desde la inyección de aire por medio de una compresora y la solución, ambas pasando por una boquilla especial para el rocío; dicho material resultante se esparce sobre los sustratos y con ayuda de las altas temperaturas se impregna a los sustratos en forma de una película delgada nanoestructurada.

FIGURA #4 – Diagrama de campana para rocío pirolítico



Catálisis

La catálisis es la aceleración o frenado de la velocidad de una reacción química debido a la intervención de un agente externo llamado catalizador (McNaught, A. D., & McNaught, A. D., 1997). Existen dos tipos de catálisis conocidas, la homogénea y la heterogénea, dependiendo si el catalizador se encuentra en la misma fase que la sustancia a reaccionar o en una fase distinta, (Bizarro, M., 2011) es decir, un catalizador líquido en un medio líquido o un catalizador sólido en un medio líquido o gaseoso. En la presente investigación se emplea un tipo de catálisis heterogénea conocida como fotocatálisis, en la cual el catalizador es un semiconductor.

Semiconductor

Un material semiconductor es aquel que puede conducir la corriente eléctrica bajo ciertas condiciones, pero en ausencia de estímulos se comporta como aislante. (Yarwood, J. 1953) Este comportamiento se debe a su estructura electrónica, que en los sólidos se puede representar mediante bandas donde se localizan los electrones. La banda que está completamente llena de electrones se denomina banda de valencia (BV) y la banda que está completamente vacía se llama banda de conducción (BC). Entre estas dos bandas existe una brecha de energía prohibida en donde no pueden estar los electrones. Para que un material pueda conducir la corriente eléctrica debe promover electrones de la BV a la BC, para que ocurra se le debe proporcionar al material la energía suficiente, que corresponde al tamaño de la brecha prohibida. En la figura #5 se observa que cuando la BV y BC están traslapadas el material es un conductor; cuando la BV y la BC están separadas el material es un semiconductor. Si esta separación entre las bandas es muy grande, el material se vuelve un aislante. La activación del semiconductor puede ocurrir por estímulos

eléctricos, térmicos o incluso luminosos. Los semiconductores que pueden activarse con luz nos sirven para ser empleados como catalizadores de las reacciones de oxidación y reducción de los compuestos orgánicos del agua por medio de la absorción de luz. Un ejemplo de estos materiales es el óxido de zinc (ZnO) que es capaz de absorber luz ultravioleta del sol.

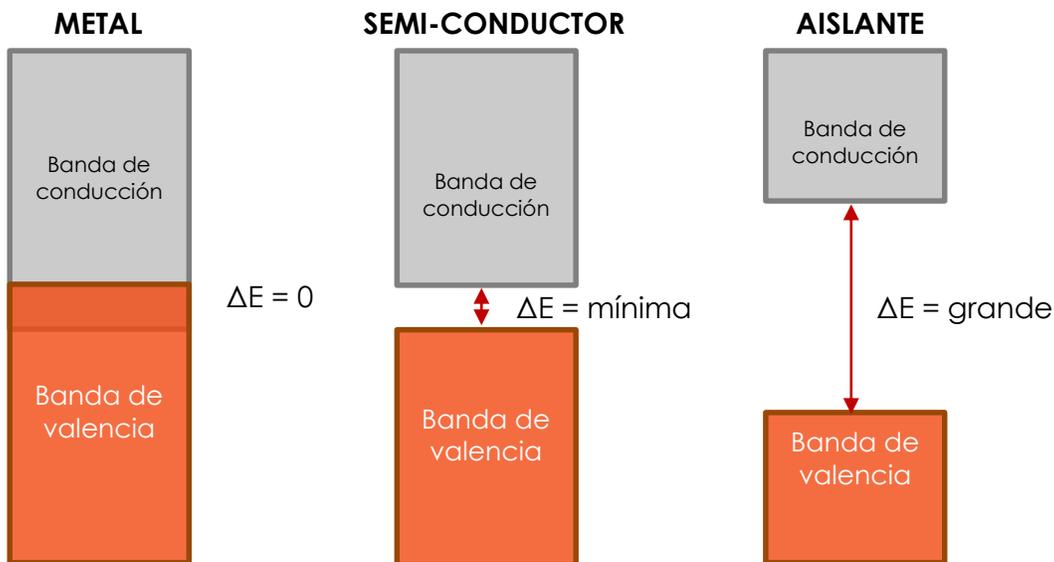


FIGURA #5 – Diagrama de estructura de bandas de materiales sólidos

Fotocatálisis

Este tipo de catálisis refiere a una reacción en la que por medio de la absorción de luz por parte del catalizador se transforma la energía luminosa, en este caso del sol, en energía química (Lu, M., 2013). La luz solar excita los electrones de un material semiconductor para pasar de su banda de valencia a su banda de

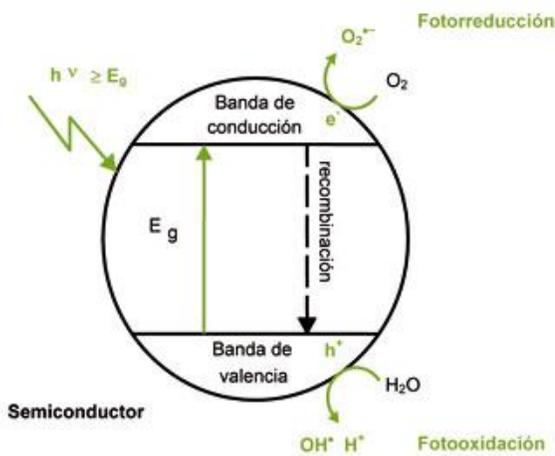


FIGURA #6 – Esquema del proceso fotocatalítico de un semiconductor

absorción de luz por parte del catalizador se transforma la energía luminosa, en este caso del sol, en energía química (Lu, M., 2013). La luz solar excita los electrones de un material semiconductor para pasar de su banda de valencia a su banda de

conducción, generándose de esta forma un hueco en la banda de valencia, propiciando reacciones tanto de oxidación como de reducción, también conocidas como REDOX, de los compuestos orgánicos contenidos en el sustrato, que en este caso es agua con distintas disoluciones.

El fotocatalizador más utilizado es el óxido de titanio (TiO_2), sin embargo se ha demostrado que el óxido de zinc (ZnO) presenta muy buena actividad fotocatalítica. La mayoría de dichas investigaciones emplea dichos catalizadores en forma de nanopolvos, sin embargo para el tratamiento de agua resulta mucho mejor emplear películas delgadas, debido a que terminado el proceso de degradación se puede separar el catalizador de una manera más fácil y sin tener pérdida de material.

Degradación de compuestos orgánicos por fotocatalisis

Como ya se mencionó anteriormente, una de las aplicaciones de la fotocatalisis es para el tratamiento de aguas con distintas disoluciones orgánicas, puesto que estos últimos reaccionan con los huecos generados por el cambio de bandas de los electrones excitados por la luz solar, y descomponiéndolos finalmente. Generalmente los huecos dejados por los electrones vuelven a ser ocupados rápidamente por otros electrones, sin embargo en las reacciones fotocatalíticas este proceso ocurre mucho más lento, lo que le permite a los huecos interactuar con su entorno y la materia ubicada ahí antes de recombinarse.

En ese momento comienzan las reacciones de oxidación y reducción, responsables de la descomposición de los componentes orgánicos contenidos en el agua. Los huecos positivos en la banda de valencia oxidan directamente a los contaminantes o al agua absorbida, formando radicales

hidroxilo (OH), quienes a su vez reaccionan con la materia orgánica. Por otro lado los electrones libres reducen el oxígeno, formando un radical superóxido (O_2), el cual oxida y contribuye en la formación de peróxido de hidrógeno. Los radicales formados descomponen a los compuestos orgánicos degradando así los contaminantes y dejando como producto final dióxido de carbono (que se libera en pequeñas cantidades al ambiente) y agua.

Debido a que la catálisis es un fenómeno que en general se produce en la superficie del material, la cantidad de área superficial del catalizador es un parámetro muy significativo; por lo tanto, mientras mayor sea el área superficial de éste, mayor será la eficiencia del proceso, por ende se necesita disminuir el tamaño de las partículas del catalizador con el fin de aumentar el área de contacto, tal como se muestra en la figura #7 (Bizarro, M., 2011).

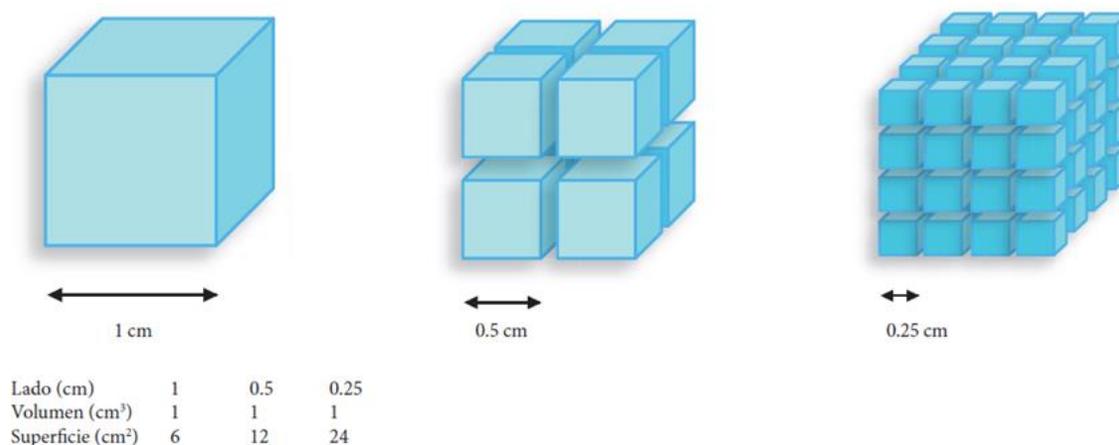


FIGURA #7 – diagrama de áreas de contacto – Bizarro, M.

Películas delgadas

Para resolver el problema de aumentar el área superficial del material una presentación en polvo sería la ideal en el proceso, sin embargo a la hora de remover el catalizador nos encontraríamos con el mayor problema, puesto que seguramente tendríamos grandes pérdidas de material en cada ciclo; sin embargo esto se puede evitar si el material catalizador se encuentra fijado a un sustrato que pueda ser retirado sin involucrar grandes consumos de energía y tiempo. Una de las formas de conseguir este propósito es con la creación de películas delgadas.

Sin embargo las películas delgadas presentan el inconveniente de que disminuye su superficie de contacto ampliamente en comparación con su similar en polvo; esto se ve mitigado haciendo las películas lo más rugosas que se pueda, sin causar que se desprendan del sustrato o que se vuelvan poco estables.

Estos materiales debido a que son realineados en pequeñas capas delgadas, con rugosidades y estructuras diferentes variando algunos parámetros, pueden ser catalogados como materiales nanoestructurados, existen numerosos métodos para la creación de estos materiales, algunos de los cuales se explicarán más adelante.

Marco histórico

Materiales Nanoestructurados

En 1940 el científico Von Neumann estudia la posibilidad de crear sistemas que se auto-reproduzcan, El concepto de constructor universal fue presentado en su trabajo póstumo Teoría de los Automatas Autorreproductivos. El término «máquina de von Neumann» se refiere alternativamente a las máquinas autorreplicativas (Von Neumann, J., & Burks, A. W., 1966).

Esto inspira a Richard Feynmann, que en 1959 habla de la posibilidad de maniobrar las cosas átomo por átomo (Feynman, R. P., 1992). Entre sus trabajos más importantes, destaca la elaboración de los diagramas de Feynman, una forma intuitiva de visualizar las interacciones de partículas atómicas en cuántica mediante aproximaciones gráficas en el tiempo. Feynman es considerado también una de las figuras pioneras de la nanotecnología, y una de las primeras personas en proponer la realización futura de las computadoras cuánticas.

En 1974 Norio Taniguchi es el primero en traducir esto y acuñar el término “nanotecnología” al describir procesos de producción de capa delgada en semiconductores tan delgado como una película o negativo de fotografía controlando los iones a niveles de un nanómetro (Taniguchi, Norio.,1974).

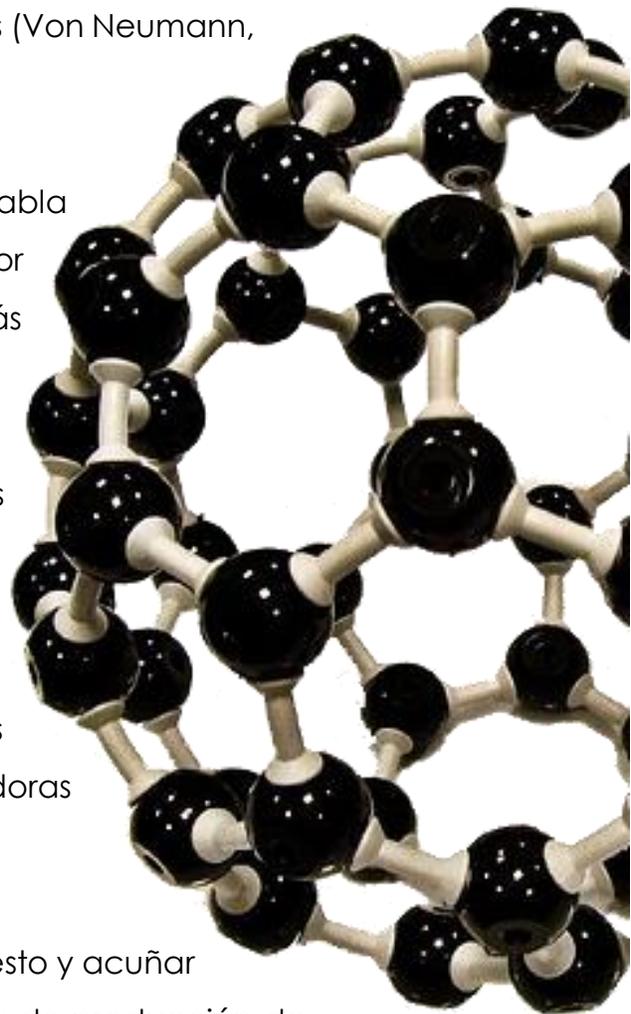


FIGURA #8
Diagrama de un
buckminsterfullereno

Ya en 1985, en Suiza, se crea un microscopio de efecto de túnel, lo que facilita estudiar los átomos y sus estructuras. Este paso es fundamental en la historia de la nanotecnología puesto que fue el invento que permitió pasar de un tema teórico a la práctica. Un año después, también en Suiza se crea el primer microscopio de fuerza atómica, que es una combinación entre el microscopio de efecto túnel y un perfilómetro stylus. Este último ayudaba a definir la rugosidad de los materiales al incluir otra dimensión al proceso de escaneo.

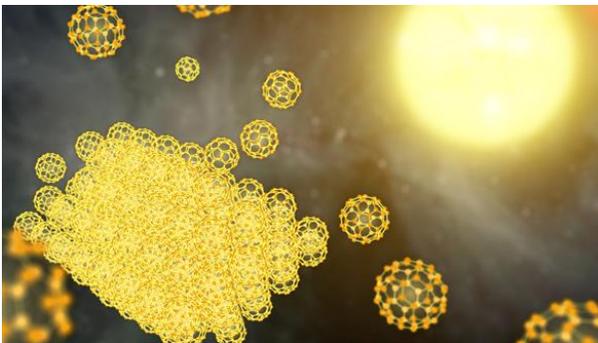


FIGURA #9 – Representación de un conjunto de Buckminsterfullerenos

Ese mismo año en la Universidad de Rice, en Texas, Estados Unidos, auxiliados por los recientes microscopios desarrollados en Suiza, se descubren los Buckminsterfullerenos, alótropos del

carbono y el diamante, cuya mayor diferencia es el arreglo de sus estructuras. A diferencia de los diamantes, cuya estructura es de una hibridación sp^2 de forma plana, la de los Buckminsterfullerenos es un arreglo tridimensional en forma de esfera, razón por la cual también fueron llamados “Buckyball” (Kroto, H. W., Heath, J. R., O'Brien, S. C., Curl, R. F., & Smalley, R. E., 1985).

Ya en el año 1991 en Japón se crea el primer nanotubo de carbono, inspirado igual en la creación anterior de los buckminsterfullerenes en la Universidad de Rice. Básicamente lo que hicieron fue modificar el arreglo estructural del carbono para crear tubos, estos se comportan de forma completamente diferente a su compuesto original, siendo más ligeros y mucho más resistentes (Weiis, 2008).

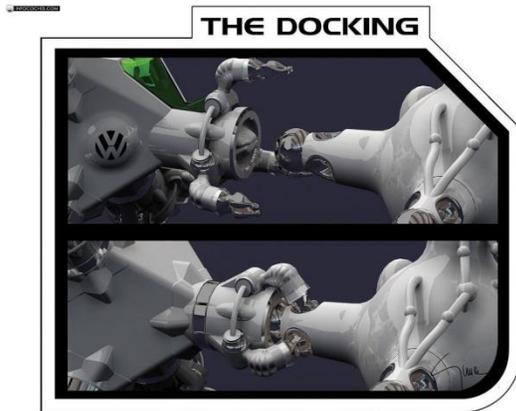


FIGURA #10 – Representación de un sistema de auto-ensamblaje con tecnología nano.
VW

En la actualidad tiene impacto en la mayoría de las áreas de investigación y de desarrollo tecnológico alrededor del mundo, ya sea con fármacos que funcionan a nivel atómico, en la nanoelectrónica con circuitos eficientes y más pequeños, en la industria automotriz con piezas auto-ensamblables y mejorando la mayoría de

los productos que conocemos.

Y el futuro es aún más prometedor, buscando aplicaciones prometedoras en áreas como la construcción, la fabricación y empaque de alimentos, armamento y sistemas de defensa, detección y control de plagas, cambios térmicos moleculares, remediación de la contaminación atmosférica, entre muchos otros ejemplos.

Estado actual de la tecnología

En la actualidad, alrededor del mundo se está dando un avance significativo tanto en las investigaciones como en las aplicaciones de los materiales nanoestructurados, que sin darnos cuenta están presentes en muchos productos de uso diario y en diversas áreas, algunos ejemplos de estas áreas de aplicación son la medicina, la robótica, las ciencias ambientales, la industria de la energía, diversas ingenierías, informática, comunicación, aeronáutica, la construcción, la industria automovilística, los cosméticos, la agricultura, la industria textil, la óptica y los deportes entre muchos otros.

En el caso de las ciencias ambientales, los mayores avances han sido en la evolución de los filtros, ya sea que se trate de filtros para purificar el agua o el aire, estos han mostrado su gran efectividad lograda con la nanotecnología. En el caso del tratamiento del agua, los filtros o membranas buscan separar iones de diferentes fluidos e incluso desechar metales pesados u otros contaminantes no deseados. De igual forma se han encontrado y desarrollado nuevas técnicas de fabricación que ayudan a los sistemas de colección de energía solar y su transformación a energía eléctrica, mejorando desde los colectores de silicio hasta los mecanismos de almacenamiento de dicha energía.

En esta área entra la aportación de esta investigación por lo cual se expondrán a continuación los ejemplos más recientes de filtración de agua con materiales nanoestructurados en diversas partes del mundo, los cuales solucionan problemáticas puntuales de la región y de los cuales se puede tomar como aprendizaje su avance y descubrimientos en el área.

Nanopartículas de oro

Una investigación realizada en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A), realizó experimentos para tratar aguas residuales, con materiales fotocatalíticos de TiO_2 con nanopartículas de oro para lograr descontaminar el agua. Los investigadores de dicha casa de estudios destacan que la implementación de esta tecnología sirve para atacar a varios contaminantes como los nitritos y nitratos (Devard, A., Aghemo, V. S., Dorantes, C. A. C., Arzaluz, M. G., Marchesini, F. A., et al., 2016).

Los experimentos mostraron que las nanopartículas de oro ayudaron a las de TiO_2 a generar un catalizador tri-metálico con buena actividad para reducir nitratos en el agua.

Esponjas oleofílicas

Investigadores de la Universidad de Rice, en Estados Unidos, desarrollaron un material esponjoso realizado en su mayoría con nanotubos de carbono con pequeños agregados de boro que puede absorber hasta 100 veces su peso en aceite. Esto es debido a su poca densidad y al hecho de que el material es hidrofóbico y oleofílico, esto significa que puede estar flotando sobre el agua y absorber solamente las sustancias aceitosas, ya que repele completamente al agua (Hashim, D. P., Narayanan, N. T., Romo-Herrera, J. M., Cullen, D. A., Hahm, M. G., et al., 2012).

El principal uso que se prevé para dicho material es el de ser auxiliar para limpiar derrames de petróleo en los océanos u otros cuerpos acuáticos, sin embargo investigadores como Daniel Hashim argumentan que los usos para este material son ilimitados, pudiendo servir, entre muchas otras cosas, como

un filtro de aguas jabonosas eliminando grasas eficiente y rápidamente sin disminuir la calidad del agua.

Aquaporins

Una compañía danesa llamada "Aquaporin" en conjunto con el departamento de nanotecnología de la Universidad Técnica de Dinamarca han desarrollado membranas biomiméticas (inspiradas en procesos naturales) involucrando una proteína llamada aquaporin, esta molécula sirve como puente para facilitar la transportación de las moléculas de agua a través de las membranas sin permitir su ingreso con otros compuestos disueltos. La idea surgió de la observación de las estructuras de las paredes celulares, en donde de igual forma los aquaporins sirven como puente de transporte para el agua al interior de la célula (Tang, C. Y., Zhao, Y., Wang, R., Hélix-Nielsen, C., & Fane, A. G., 2013).

Son muy efectivos sobre todo en procesos de desalinización por medio de ósmosis inversa. En dichos procesos realizados de forma convencional es necesario implementar energías adicionales que pueden ser costosas para transportar el agua. Estas membrana son "semi-porosas" ya que el tamaño de sus poros es menor de 10 nm, y la permeabilidad de estos materiales es muy poca.

Esta implementación nanotecnológica, aparentemente sencilla minimiza considerablemente los costos en los procesos de desalinización de aguas de mar para su potabilización, al igual que se planea que tenga usos en otras aplicaciones, puesto que es un agregado que se podrá implementar en diversas membranas y materiales semi-porosos.

Caucho triturado nanoestructurado

Otro ejemplo estrechamente relacionado con esta investigación es el de la aportación realizada por el investigador Peruano Oscar Perales Pérez de la Universidad de Puerto Rico. Él ha desarrollado una propuesta para el tratamiento de aguas residuales utilizando llantas trituradas sometidas a un proceso nanotecnológico, provocando que dicho material “atrape” los elementos contaminantes para posteriormente ser separados del agua. Los principales componentes que elimina este material son el tolueno y el xileno,



FIGURA #11 – Caucho triturado

los cuales son eliminados en un 60% y 81% relativamente con tan solo 30 minutos de contacto con el nanocompuesto (Alamo-Nole, L., Perales-Perez, O., & Roman, F. R., 2012).

Filtro de nanotubos de carbono

Científicos del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT por sus siglas en inglés) crearon un filtro que separa el agua y el aceite de forma rápida y limpia. Está compuesto por una fina malla de acero inoxidable que está recubierta de nanotubos de carbono de aproximadamente 10 micrones que forman estructuras como un panal de abeja (Cohen-Tanugi, D., Grossman, J. C. (2012).

Este filtro repele el agua, sin embargo atrae toda la materia orgánica con contenido de carbono, como el petróleo o el aceite. El prototipo es del tamaño de una moneda aproximadamente y tiene el problema de que las gotas de agua pueden obstruir los espacios entre los nanotubos, sin

embargo es atractivo debido a que el sistema es relativamente sencillo y funciona con gravedad.

Filtro con Nanopartículas de plata

En Estados Unidos, en la Universidad de Standford un grupo de investigadores ha desarrollado un simple filtro que consiste en una tela de

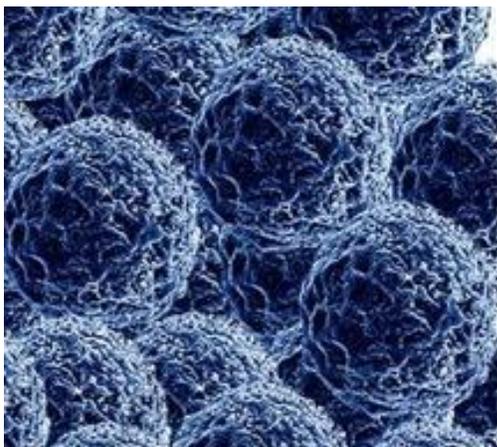


FIGURA #12
Nanopartículas de plata

algodón sumergido en un “caldo” de nanocables de plata y nanotubos de carbono, creando de esta forma un filtro de bajo costo y de alta velocidad que puede ser empleado para purificar el agua.

En lugar de trabajar como una membrana que no permite pasar a las bacterias, este filtro las deja pasar con la misma facilidad que el agua, sin embargo estas mueren debido al campo eléctrico que corre a lo largo del algodón revestido con las nanopartículas de plata, que son altamente conductoras.

Los resultados de laboratorios muestran que el filtro mata hasta el 98% de la bacteria *E.coli* con solamente exponer unos cuantos segundos en el filtro en un campo eléctrico de veinte voltios (Schoen, D. T., Schoen, A. P., Hu, L., Kim, H. S., Heilshorn, S. C., et al., 2010). El espesor de 2.5 pulgadas se debe a que el filtro está compuesto por varias capas del algodón revestido de nanopartículas de plata y nanotubos de carbono.

Tratamientos con fotocatálisis

Los procesos de oxidación por medio de fotocatálisis se han realizado desde los años ochenta y han demostrado ser bastante efectivos a la hora de eliminar gran variedad de compuestos tóxicos que son persistentes a la degradación natural.



FIGURA #13 – Colector solar adaptado para fotocatálisis

Igualmente importante estos métodos se han modificados para poder funcionar con la energía solar, en lugar de fuentes de iluminación artificial utilizando colectores solares y así eliminar los compuestos orgánicos en las aguas vertidas utilizando muy poca energía o todo su proceso. Estos tratamientos hoy se ven influenciados por los materiales nanoestructurados, ya que permiten la utilización de películas delgadas en lugar de los polvos sólidos de los reactivos, haciendo la separación de estos mucho más fácil.

Métodos convencionales de tratamiento de agua

Las aguas utilizadas en el hogar se dividen en aguas negras y aguas grises, las primeras son las provenientes de escusados y mingitorios, el resto de aguas es llamado "grises", es importante la separación de las mismas en los sistemas sanitarios de las viviendas ya que, a diferencia de las aguas negras, pueden ser reutilizadas para algunas actividades si se les da el tratamiento correcto. Los tratamientos más utilizados se pueden dividir en dos categorías dependiendo de los agentes utilizados: Biológicos o mecánicos. En la primera categoría encontramos ejemplos como los humedales artificiales y los biorreactores de membrana, mientras que en el segundo apartado existen ejemplos como la filtración de sólidos con piedras, filtros de carbón activado, ósmosis inversa y algunos otros que emplean radiación UV, a continuación se explicarán brevemente algunos ejemplos de ambas categorías:

Biorreactor de membrana

Esta tecnología se compone de dos partes integradas: por un lado, el reactor biológico responsable de la depuración biológica y por otro lado, la separación física de la biomasa y el agua mediante un sistema de filtración directa con membranas (Lopetegui Garnika, J., & Trouvé, E., 2004). Este sistema ha tomado fuerza formando parte en numerosas plantas de tratamiento de aguas no solo grises, sino también negras, con una previa separación de sólidos y tratamientos aerobios.

Humedal Artificial

Este proceso emula las funciones de los humedales naturales, solamente que al ser construidos por el hombre tienen características añadidas. Debido a que el agua de la superficie se mueve lentamente se promueve la sedimentación de sólidos suspendidos, al igual que las esteras de las plantas sirven como trampas para los sedimentos (Chafloque, W. A. L., & Gómez, E. G., 2006). Pero la parte más importante es el proceso de remoción biológica, en éste las plantas juegan un papel primordial, ya que toman los contaminantes tales como el nitrato, amonio y fosfato y los emplean como nutrientes, e incluso algunas plantas son capaces de captar y acumular significativamente metales tóxicos, como el cadmio y el plomo (Chafloque, W. A. L., & Gómez, E. G., 2006).

Carbón activado

El carbón activado es una forma de carbón procesado de tal forma que tenga pequeños poros, incrementando así el área de superficie que se emplea para la adsorción o varias reacciones químicas (Pendleton, P., Wong, S. H., Schumann, R., Levay, G., Denoyel, R., & Rouquero, J., 1997). Gracias a sus propiedades físicas es capaz de adsorber muchos compuestos tóxicos, en muchos casos es auxiliado de nanopartículas de plata para evitar la formación de bacterias en el material.



FIGURA #14
Carbón activado triturado

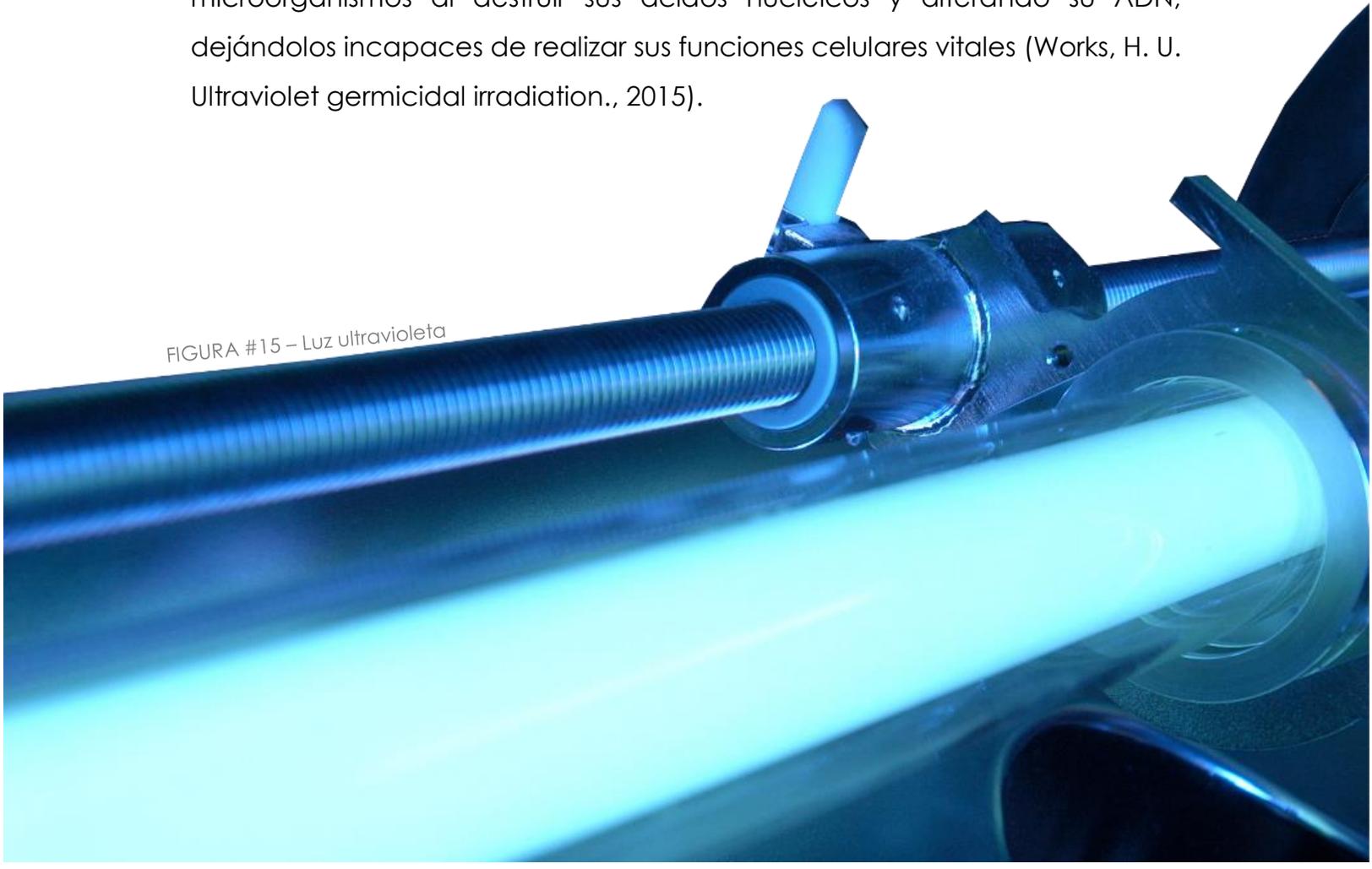
Ósmosis inversa

Esta tecnología aprovecha las diferencias entre las propiedades físicas y químicas de los solutos y el agua a separar. Una corriente de alta presión es dirigida a través de un material semipermeable y debido a la diferencia de presión entre la alimentación y lo permeable de la membrana, una parte deseada del fluido pasa por la membrana, mientras lo demás se retiene o queda en el otro lado (Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G., 2012).

Radiación UV

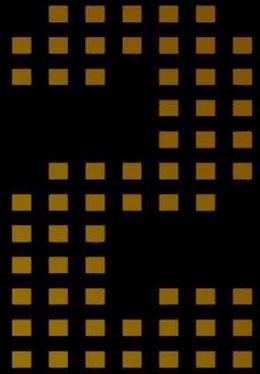
La desinfección por medio de irradiación UV es un método que utiliza longitudes de onda corta ultravioleta (UV-C) para matar o desactivar microorganismos al destruir sus ácidos nucleicos y alterando su ADN, dejándolos incapaces de realizar sus funciones celulares vitales (Works, H. U. Ultraviolet germicidal irradiation., 2015).

FIGURA #15 – Luz ultravioleta





CAPÍTULO DOS: EXPERI- MENTACIÓN





Metodología de la investigación

Para el desarrollo del prototipo de tratamiento de agua por fotocatalisis heterogénea se sintetizaron películas de óxido de zinc dopado con aluminio (ZnO:Al) sobre mallas de acero inoxidable y películas de ZnO:Al con nano partículas de plata en su superficie (ZnO:Al/Ag) siguiendo el procedimiento que se describe a continuación:

Preparación de sustratos

Se cortaron piezas de malla de acero inoxidable en rectángulos de 2.5 x 1.25 cm. Se probaron diferentes aberturas de malla (30X30, 50X50, 60X60, 80X80, 100X100) para encontrar la más adecuada. Se lavaron en un baño ultrasónico con tricloroetileno, acetona y metanol consecutivamente durante 5 minutos. Se secaron con nitrógeno a presión. Al mismo tiempo se sometieron al mismo proceso piezas de vidrio de 1.0 x 1.0 cm y unos más pequeños, de aproximadamente 0.4 x 0.4 cm, para perfilometría.

Preparación de la solución y depósito.

Se utilizó una solución precursora de acetato de zinc dihidratado ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, >98%, Sigma-Aldrich) con una concentración 0.2 M disuelto en agua desionizada. Se le agregó el 25% atómico de cloruro de aluminio ($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 99%, Sigma-Aldrich), para obtener películas de ZnO:Al. Esta solución se roció sobre los sustratos a 450°C, usando flujos de aire de 1028 mL/min y el flujo de solución varió entre 8.0, 9.55 y 11.1 mL/min. En el caso de los sustratos de vidrio, se colocaron vidrios de 0.16 cm² sobre los

vidrios más grandes, con la finalidad de crear un “escalón” y poder caracterizarlos por perfilometría posteriormente.

Para las películas de ZnO:Al/Ag primero se realizó el depósito de ZnO:Al, luego se sometieron a un tratamiento térmico dentro de una mufla a 450°C durante 15 minutos para completar la oxidación y eliminación de restos orgánicos del precursor. Posteriormente, se roció una solución de nitrato de plata (AgNO₃) disuelto en agua desionizada al 5 % atómico. Este segundo depósito se realizó también a 450° C usando unos flujos de aire de 1028 mL/min y el flujo de solución varió entre 8.0 y 11.1 mL/min.

Caracterización

Perfilometría

Para determinar el espesor de las películas depositadas en vidrio se utilizó un perfilómetro mecánico DekTak IIA. El perfilómetro realiza un movimiento vertical de una aguja, aplicando una fuerza constante sobre las muestras y haciendo un barrido lineal sobre las películas, determinando así su espesor y rugosidad. La medición se realiza en cinco regiones de cada muestra para tener un promedio.

Microscopía electrónica de barrido

La microscopía electrónica de barrido (MEB) consiste en un equipo de alta resolución para la obtención de imágenes 2D, haciendo pasar un haz de electrones de alta energía (desde 50 hasta 30,000 voltios) que barre la superficie del material. El haz incide sobre las muestras, generando múltiples

interacciones entre los electrones y los átomos de la muestra, creando una imagen topográfica punto a punto. El microscopio de barrido utilizado fue un JEOL 7600-f.

Pruebas de fotocatalisis

Para el análisis fotocatalítico se realizaron experimentos colocando las mallas con depósitos dentro de una solución de colorante. Los colorantes utilizados fueron anaranjado de metilo (AM, $C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$) e índigo carmín (IC, $C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$) e irradiando con diversas fuentes de luz (UV, Simulador solar, luz del sol). Se midió la absorbancia con un espectrofotómetro UV-1800 SHIMADZU en diferentes intervalos de tiempo.

Para los experimentos se colocaron 10 mL de colorante con una concentración de 3.27 ppm en el caso del AM y 5 ppm para el IC en viales de vidrio; Posteriormente se introdujo un par de mallas con películas de ZnO:Al:Ag junto con un agitador magnético en cada vial y se dejó uno sin mallas como control. Antes de comenzar la prueba se midió la absorbancia de la muestra control de colorante sin muestra como referencia. Las muestras fueron colocadas en una mesa de agitación (Corning Stirer multiple position 9 x 250 mL) e irradiadas con diversas fuentes de iluminación durante 3 horas, realizando mediciones en el espectrofotómetro a los 15, 30, 45, 60, 120 y 180 minutos. Las fuentes de luz empleadas fueron: luz ultravioleta y luz solar simulada (Newport modelo 67005).

Pruebas en reactor solar

El reactor solar consiste en un tubo de vidrio que lleva dentro 10 mallas metálicas de 3.20 cm de diámetro con depósitos de material fotocatalítico, colocadas aproximadamente con 15 mm de separación, dicho tubo se coloca justo en medio de un colector parabólico compuesto para captar y concentrar mayor cantidad de rayos solares. En ambos extremos el tubo tiene tapas con una pequeña manguera que permite la entrada y salida de la solución a tratar. Una de las mangueras está conectada a una pequeña bomba, la cual hace genera un flujo al interior del tubo de aproximadamente 6 mL/s.

En las pruebas del reactor se utilizaron 250 mL de colorante anaranjado de metilo 3.27 ppm. A diferencia de las pruebas con viales, para el reactor se utiliza la luz solar natural, por lo que el reactor se colocó en la azotea del edificio C del IIM, se orientó hacia la posición del sol y se prendió la bomba. El tiempo total del experimento fue de 3 horas, tomando muestras de 5 mL para medir en el espectrofotómetro a los 15, 30, 45, 60, 120 y 180 minutos.

Carbono orgánico total (COT)

El carbono orgánico total (COT) es la cantidad de carbono contenido en un compuesto orgánico y es comúnmente utilizado como indicador para conocer la calidad del agua. La prueba consiste en tomar una cantidad de las muestras de control y de agua o colorante tratado y analizarlo con ayuda de un SHIMADZU TOC-L Analyzer, el cual mide el Carbono total y le resta el carbono inorgánico total, dando como resultado el COT.

Experimentos con colorantes

Uno de los semiconductores más empleados para procesos fotocatalíticos es el TiO_2 (Dióxido de titanio), sin embargo uno de los inconvenientes que tiene es que necesita de luz ultravioleta para que funcione. Este y otros fotocatalizadores son empleados generalmente en polvo, ya que aumenta el área de contacto que tienen con los contaminantes, el problema surge cuando se emplea agua, ya que se tienen que realizar procesos extra para separarlo; una solución a dicho problema es el empleo de películas delgadas adheridas a algún sustrato, en esta investigación se utilizaron mallas de acero inoxidable como sustratos ya que nos permiten el paso de un flujo a través del filtro, manteniendo una superficie de contacto similar a otros sustratos menos porosos.

Para poder encontrar la malla adecuada, así como la optimización del material a ser depositado en ésta fue necesario realizar experimentos a pequeña escala para evaluar su efectividad, para esto se realizaron varias series de experimentos con colorante anaranjado de Metilo con una concentración de 3.27 ppm molar, debido a que es mucho más fácil observar la degradación de los compuestos orgánicos midiendo las modificaciones en el espectro UV-visible de las muestras. Esto comprueba que las mallas y los compuestos funcionan correctamente debido a que la molécula del colorante es orgánica y lo primero que sucede en los procesos de reducción-oxidación es que se rompe dicha molécula, perdiendo la coloración.

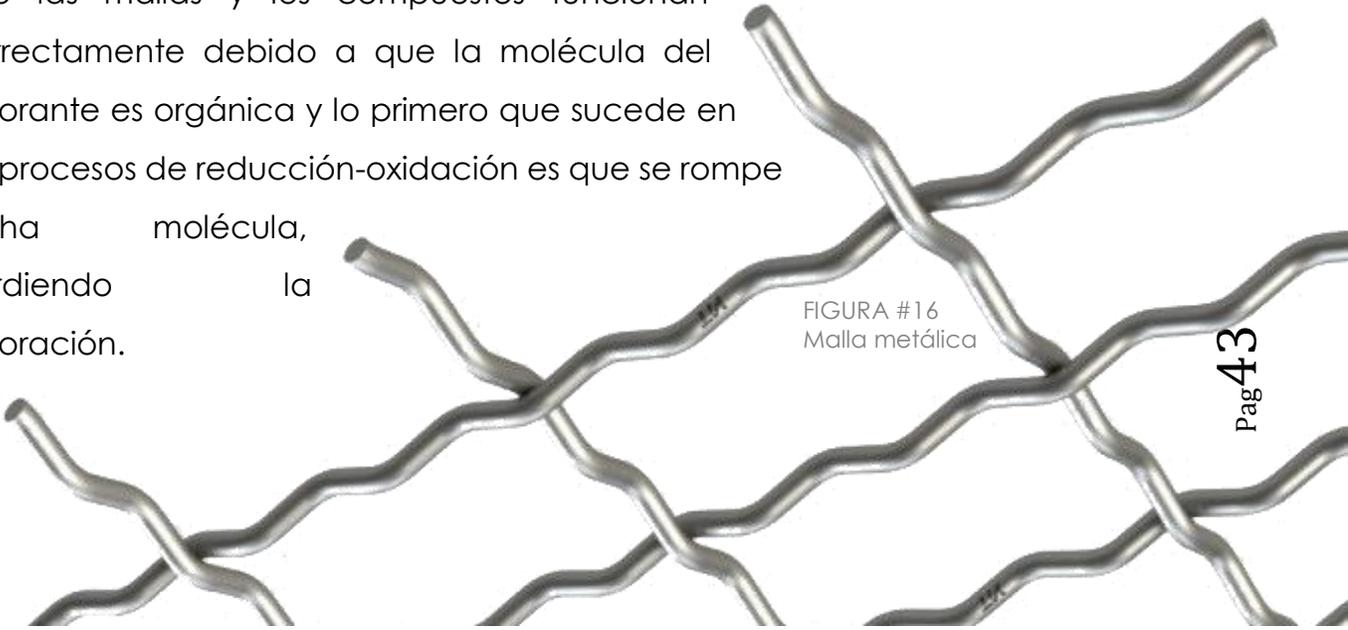


FIGURA #16
Malla metálica

Experimento #1

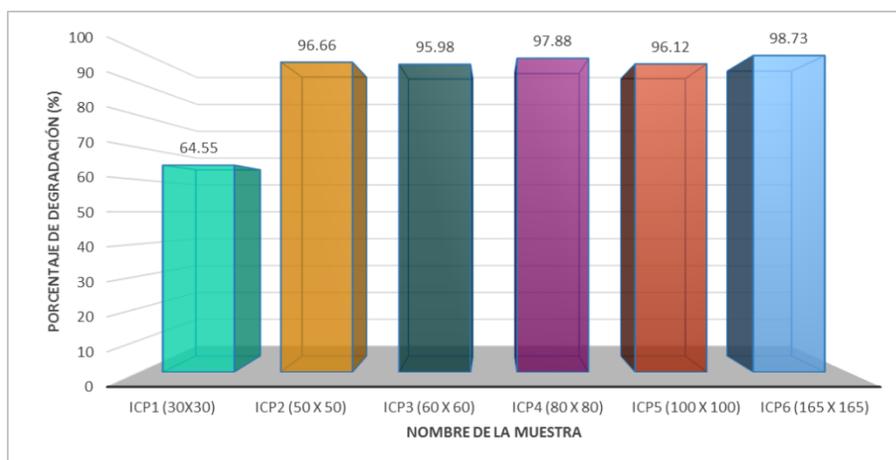
Elección de mesh

Estos experimentos fueron para elegir la amplitud del tejido (mesh) de la malla, de una selección de 6 diferentes saturaciones, ya anteriormente se habían realizado pruebas para conocer su permeabilidad observando que todas dejaban pasar el agua con relativa facilidad. Las mallas fueron rociadas con una película delgada de óxido de zinc dopada con aluminio (ZnO:Al), el flujo de la solución para el rocío fue de 11.1 ml/min para todas las mallas.

| MUESTRA | MESH |
|---------|-----------|
| ICP1 | 30 X 30 |
| ICP2 | 50 X 50 |
| ICP3 | 60 X 60 |
| ICP4 | 80 X 80 |
| ICP5 | 100 X 100 |
| ICP6 | 165 X 165 |

TABLA #1 – Muestras y mallas experimento 1

Se emplearon 6 viales de vidrio con colorante anaranjado de metilo, en



cada una se introdujo un par de mallas con distintas aperturas de mesh. La prueba de fotocatalisis se

realizó con luz ultravioleta debido a que con este tipo de lámpara podemos realizar pruebas simultáneas con las 6 muestras. Los seis tipos de mesh funcionaron con relativa eficacia, degradando entre un 60 y un 98%.

Sin embargo posterior a la prueba se realizaron imágenes de MEB a cada una de las mallas, observando que en algunos casos (ICP5 - ICP6) las aperturas de las mallas se encontraban obstruidas por los depósitos realizados, como se puede observar en las siguientes imágenes del microscopio electrónico de barrido (MEB):

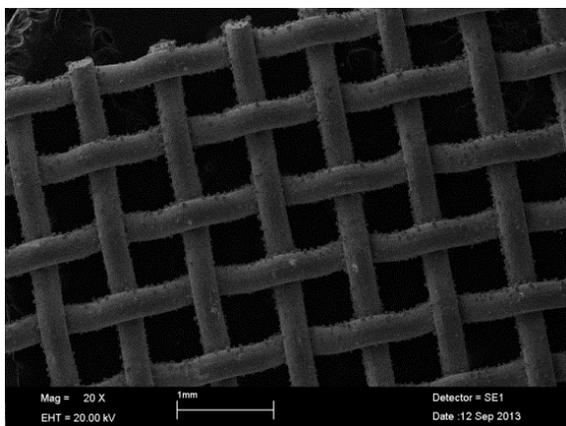


FIGURA #17 - ICP1 MEB

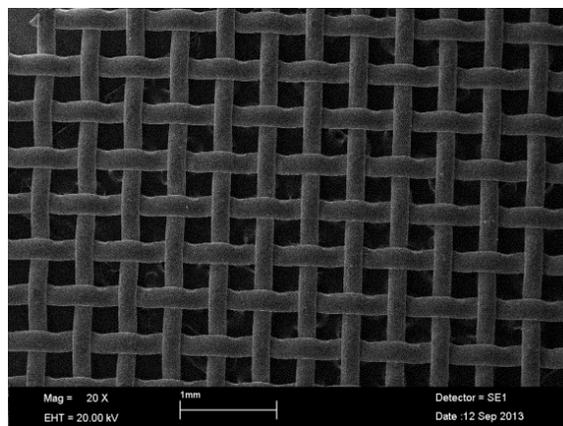


FIGURA #18 - ICP2 MEB

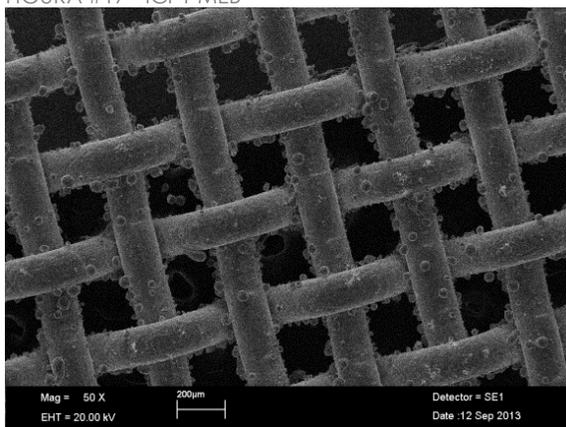


FIGURA #19 - ICP3 MEB

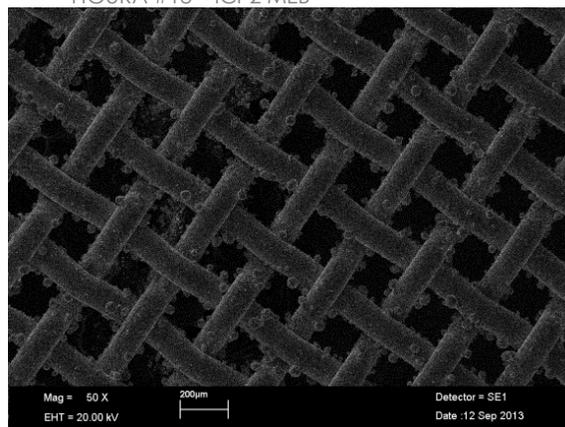


FIGURA #20 - ICP4 MEB

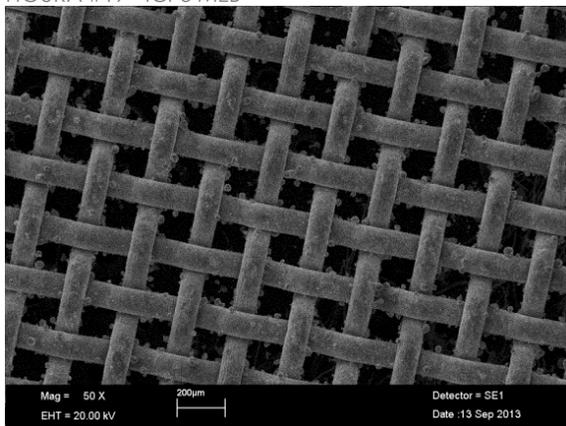


FIGURA #21 - ICP5 MEB

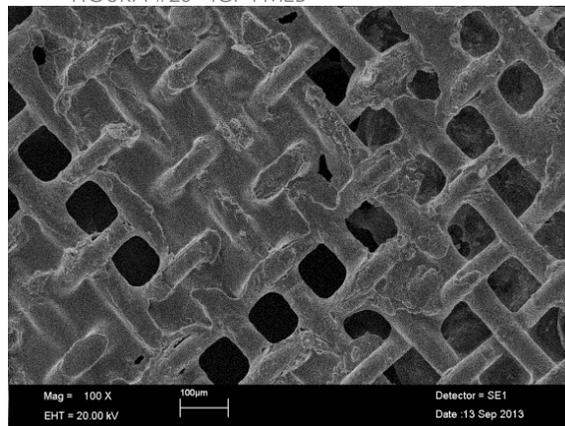
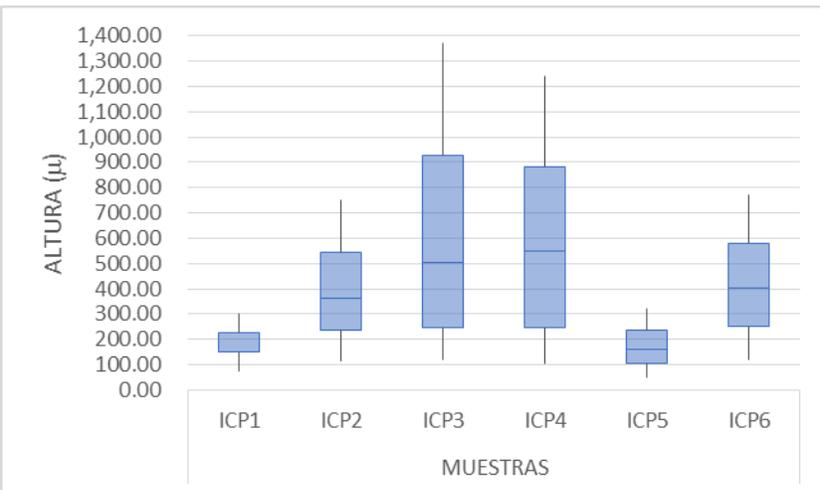


FIGURA #22 - ICP6 MEB

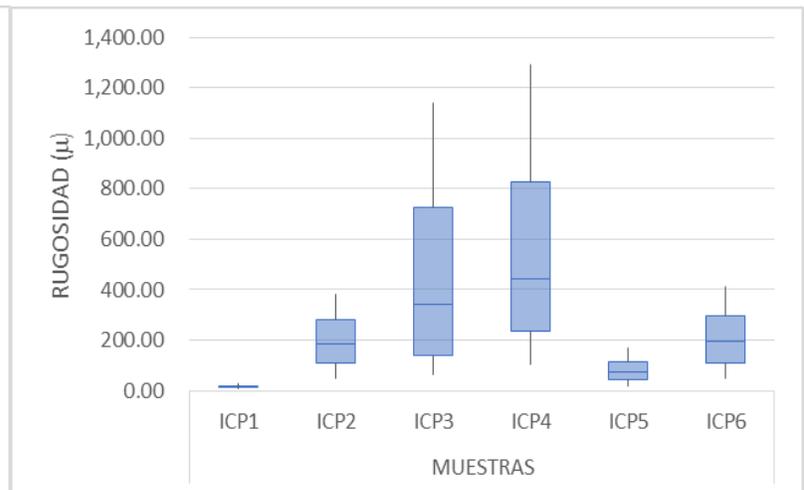
También se observó en las imágenes de MEB que en otros casos parte de la película se había desprendido de las mallas y eso había enturbiado el agua (ICP3, ICP 5 e ICP6), por esto fue que se decidió continuar las siguientes pruebas con las mallas con mesh 50 X 50 y 80 X 80.



FIGURA #23 - Viales ICP1-ICP6 después del experimento



GRÁFICA #5 – Altura promedio ICP 0-6



GRÁFICA #6 – Rugosidad ICP 0-6

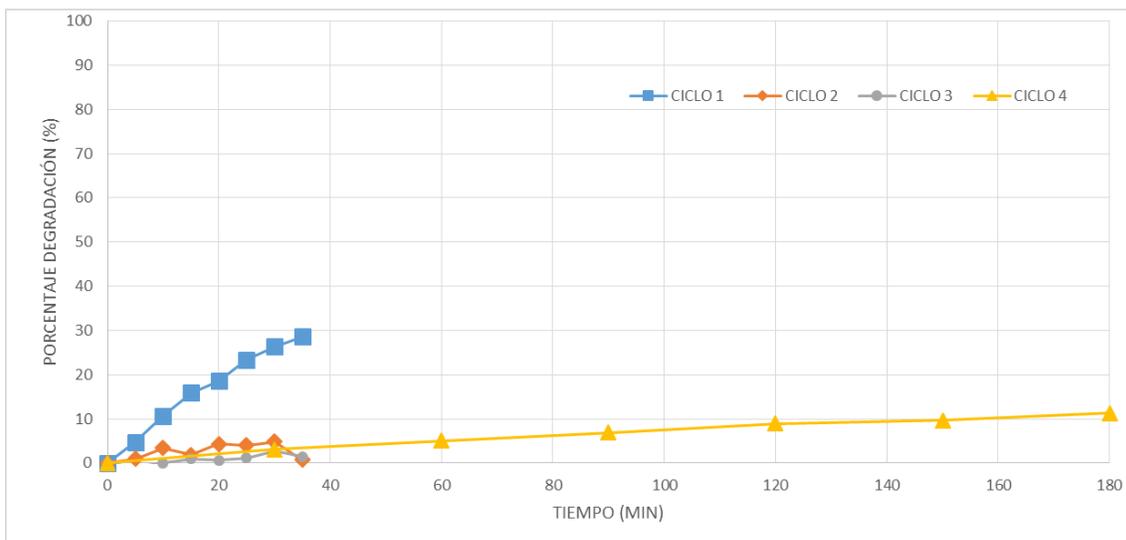
En las gráficas #5 y 6 podemos observar las mediciones de perfilometría de las primeras 6 muestras, donde se puede observar una amplia diferencia tanto en altura promedio, como en rugosidad, teniendo como las muestras más rugosas la ICP3 e ICP4, Para obtener películas eficientes que se puedan comparar con la efectividad de los polvos es deseable la síntesis de películas con más área de contacto para realizar los procesos fotocatalíticos, es decir, más rugosas. (Bizarro, M., Tapia-Rodríguez, M. A., Ojeda, M. L., Alonso, J. C., & Ortiz, A., 2009).

Experimento #2

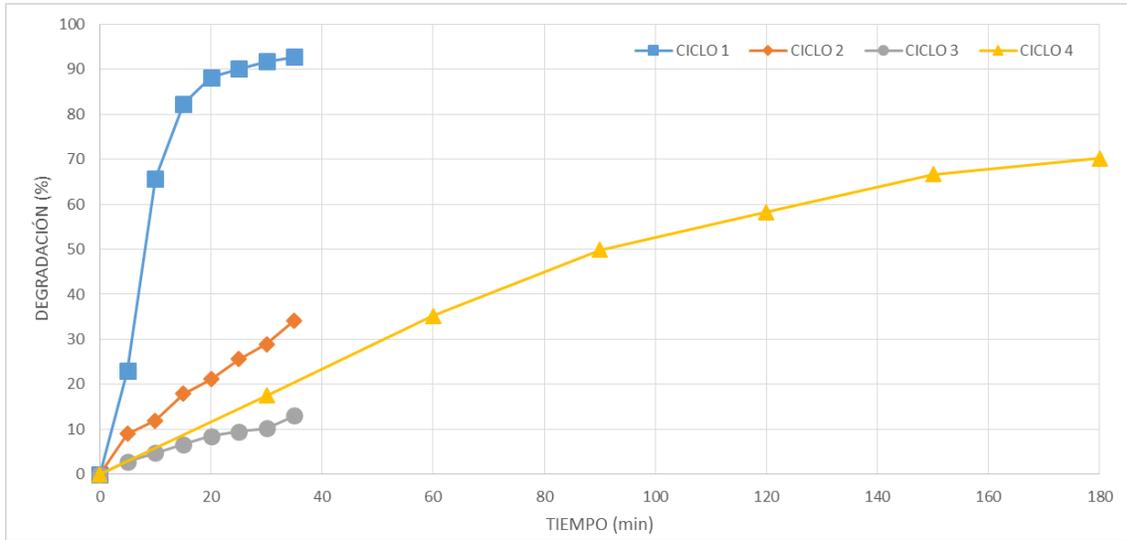
Determinación final mesh y estabilidad

Estos experimentos se realizaron para seleccionar un mesh final para todos los demás experimentos, teniendo como opciones las muestras ICP2 e ICP4 (50 X 50 Y 80 X 80 respectivamente) por los resultados del experimento anterior. Se realizaron 4 ciclos de degradación en días separados para conocer su efectividad con el paso del tiempo, los procedimientos fueron similares al anterior, con la única diferencia que en lugar de una lámpara UV se utilizó una lámpara simuladora de luz solar, los resultados fueron los siguientes:

GRÁFICA #7 – ICP7 / 4 CICLOS



GRÁFICA #8 – ICP8 / 4 CICLOS



A pesar de que la eficiencia de las mallas baja significativamente en ambos casos, en el caso del mesh 80 x 80 (ICP8) no baja tanto la eficacia como con el mesh 50 x 50 (ICP7), por lo cual se decidió que se utilizarían mallas con mesh 80 x80 para todas las pruebas subsecuentes.

GRÁFICA #9 – Comparación ICP7 – ICP8 en 4 ciclos

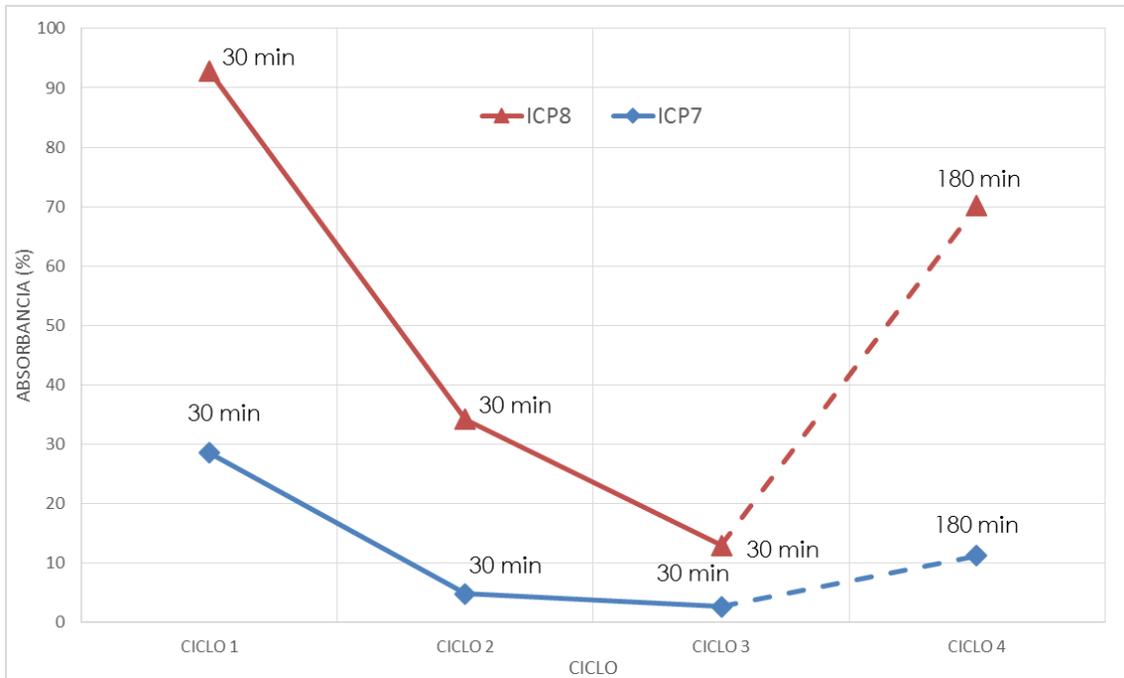
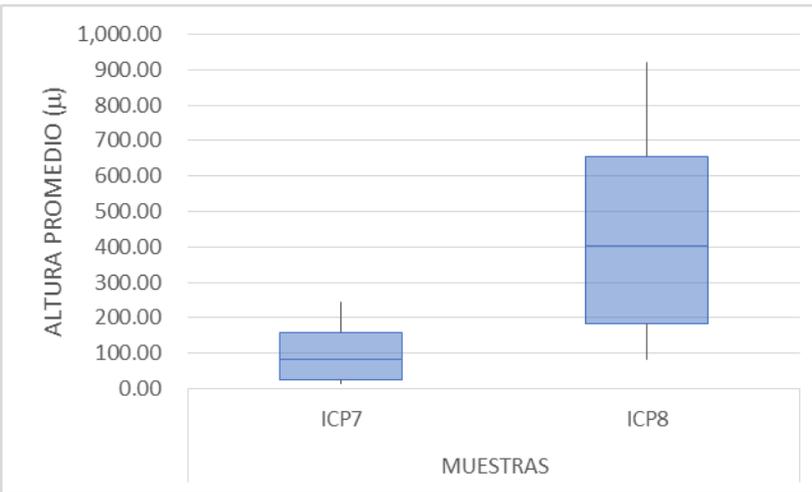


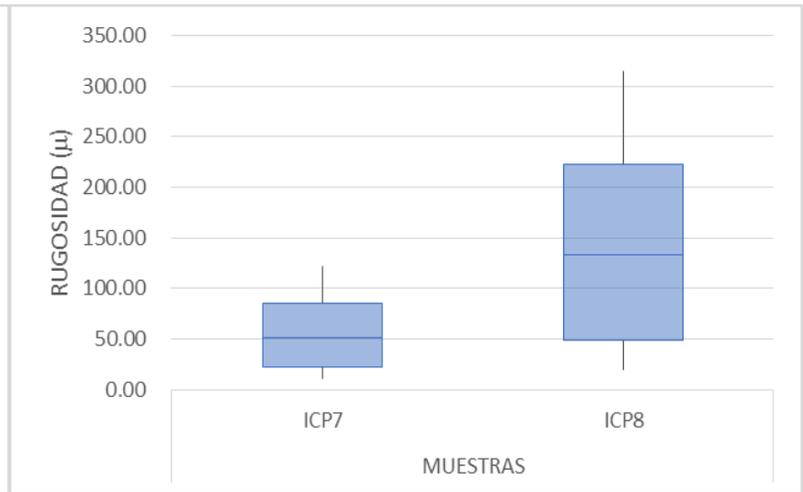


FIGURA #24 Y #25 -FOTOGRAFÍAS ALUSIVAS AL EXPERIMENTO #2

En las gráficas #10 y #11 se puede observar las mediciones de altura promedio y rugosidad realizadas por perfilometría a las muestras ICP7 e ICP8, donde se observa una mayor altura promedio y rugosidad en la muestra ICP8 (80 x 80) lo que hace que tenga mayor área de contacto, favoreciendo los procesos fotocatalíticos que ocurren en la superficie del material.



GRÁFICA #10 – Altura promedio ICP 0-6



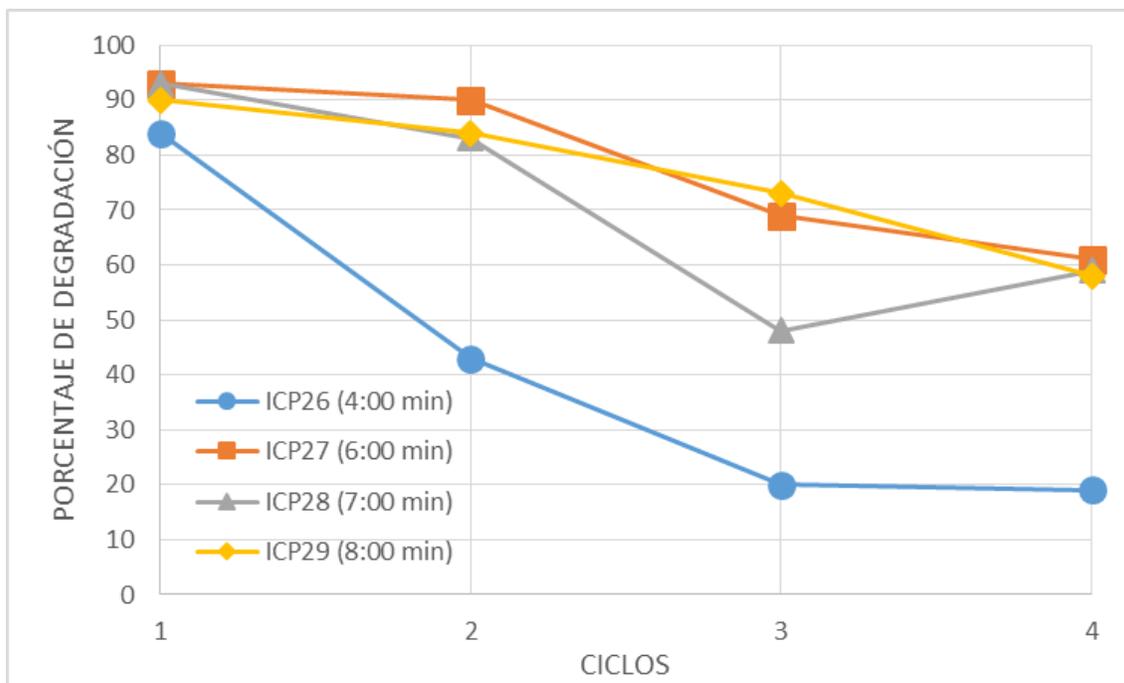
GRÁFICA #11 – Rugosidad ICP 0-6

Experimento #3

Determinación de tiempo de depósito de plata

Con el propósito de mejorar la estabilidad de los depósitos y que estos tuvieran un mejor desempeño al paso de los ciclos, se decidió dopar los depósitos con nanopartículas de plata, basados en experimentos previos (Bizarro, M., & Martínez-Padilla, E., 2014). Para conocer la cantidad de nanopartículas de plata que depositadas en las mallas, lograran que estas tuvieran mejor desempeño se hicieron diferentes depósitos variando el tiempo total para la solución. Los tiempos de depósito de la plata fueron 4, 6, 7 y 8 minutos.

GRÁFICA #12
Comparación ICP26 – ICP29 en 4 ciclos



Tomando en cuenta los resultados mostrados en la gráfica #12 se tomó la decisión de elegir el tiempo de depósito de 8:00 minutos, ya que se comportó de manera más constante en los cuatro ciclos. Otra diferencia de los experimentos anteriores es que en esta ocasión se recoció las

muestras posteriormente al depósito de ZnO:Al y previo al depósito de Ag, con la finalidad de eliminar cualquier precursor orgánico contenido en las muestras y así asegurar la pureza de los depósitos, el resultado final es un depósito de ZnO:Al25%:Ag5%, lo cual es óxido de zinc dopado un 25% con aluminio y 5% con partículas de plata.

Experimento #4

Pruebas en reactor solar y estabilidad

Una vez seleccionado el tipo de mesh y el depósito exacto que tuviera la mejor eficiencia de degradación se pasó a la adaptación de un pequeño reactor solar, el cual es un prototipo de experimentación que funciona con la luz solar para activar los materiales fotocatalíticos. El conjunto de mallas se introducen en el cilindro de vidrio y se sella en los extremos para evitar que se salga el fluido.

El experimento consiste en hacer pasar 250 ml de colorante inicial anaranjado de metilo con una concentración de 3.27 ppm durante 2.5 horas. Los resultados se miden de la siguiente forma: La primera hora se mide el espectro UV-visible en intervalos de 15 minutos, una vez transcurrida la primera hora se hacen las mediciones cada media hora. Las muestras, aproximadamente 3 mL se extraen con una jeringa y después de hacer el análisis se regresa al contenedor inicial.

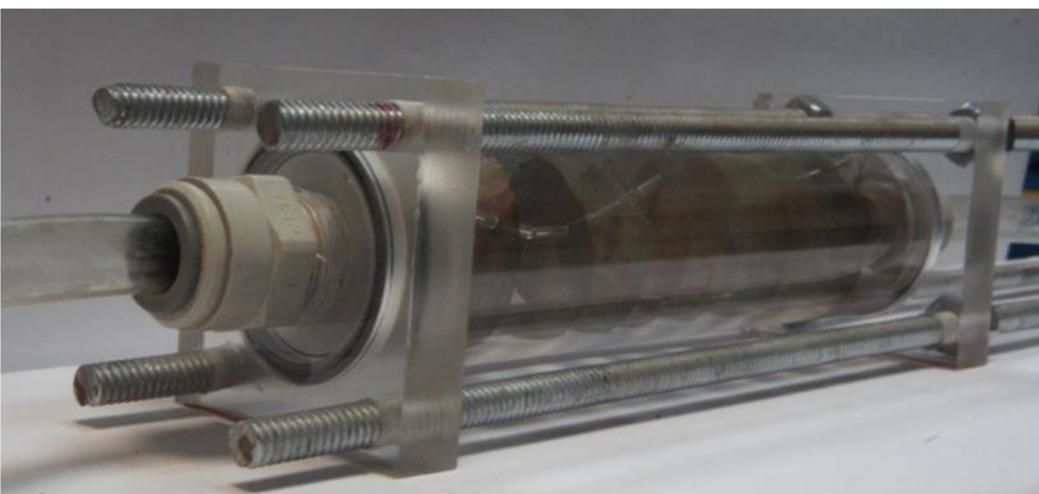
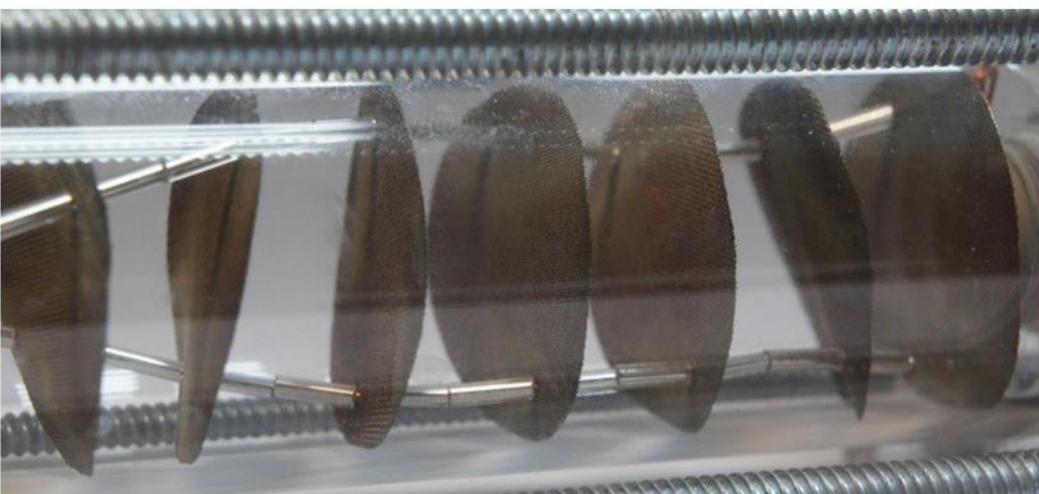
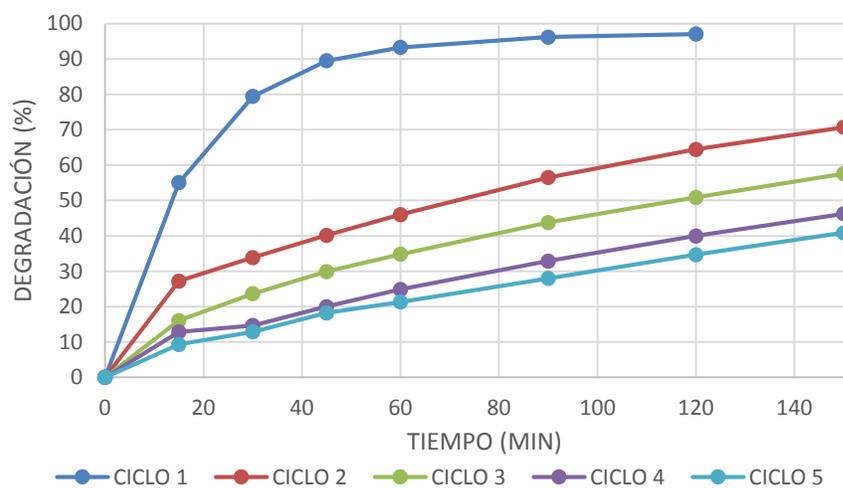
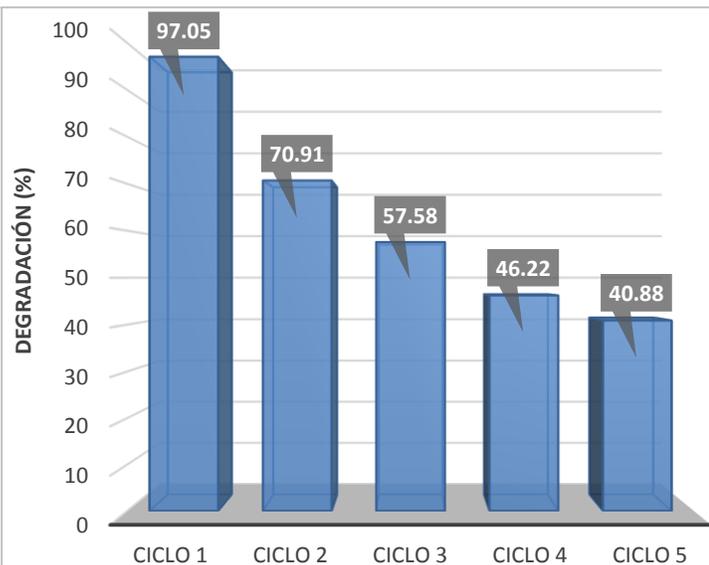


FIGURA #26 – COLLAGE DEL IMÁGENES DEL EXPERIMENTO #4

Esta prueba se repitió de la misma forma durante 5 ciclos con la finalidad de conocer la estabilidad de las muestras, así como evaluar su desempeño a través del tiempo, los primeros resultados reportados del espectrofotómetro son los siguientes:



GRÁFICA #13 – ICP30-39 Estabilidad de ciclos



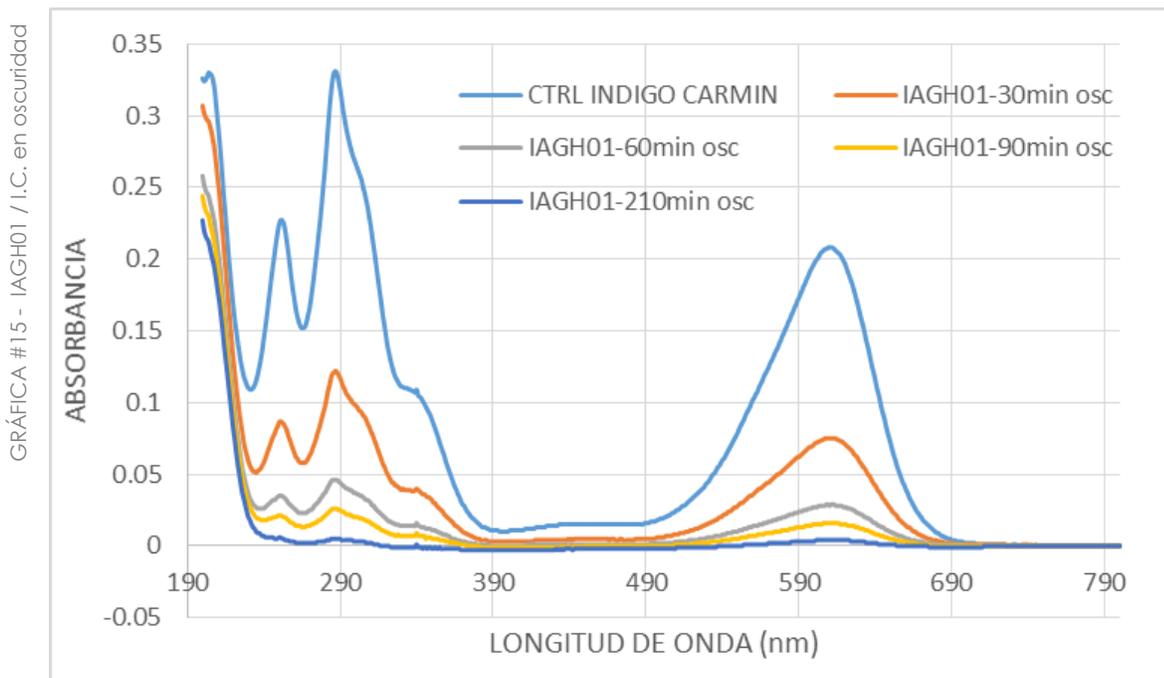
GRÁFICA #14 – ICP30-39 Máxima degradación

Este último experimento demostró mantener una estabilidad considerable (40.88% al final del quinto ciclo) en los primeros ciclos con tan solo 2.5 horas de tratamiento con un prototipo experimental.

Experimento #5

Pruebas con índigo carmín

Con finalidad de poder distinguir cuanto verdaderamente está funcionando el material foto catalítico y cuanto del colorante se adsorbe en las mallas y no se descompone se hicieron pruebas en oscuridad con colorante índigo carmín, la razón por elegir dicho colorante es porque la molécula es simétrica y al descomponerse se le puede dar mejor seguimiento. La prueba se hizo de manera similar que las pruebas de espectrofotometría, sin embargo en esta ocasión las muestras se dejaron en la oscuridad y se midieron en los minutos 30, 60, 90 y 210. Los resultados se pueden ver en la siguiente gráfica:



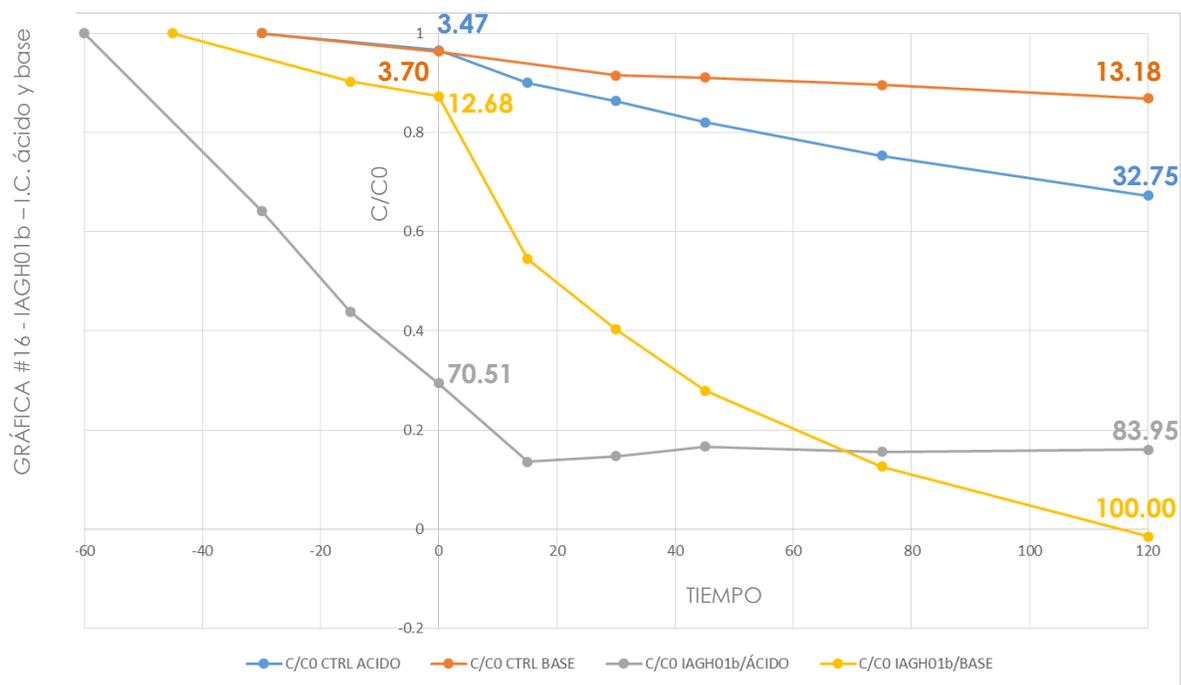
Podemos observar que después de 3.5 horas de dejar las muestras en la oscuridad se adsorbió hasta un 98.07%, lo cual no nos permite conocer qué tanto está actuando la película fotocatalítica y qué tanto el colorante se

adsorbe en la malla. Basado en experimentos similares realizados en el laboratorio se tomó la decisión de hacer otro experimento variando el pH de las muestras entre ácido, neutro y básico.

Experimento #6

Pruebas con pH

Para este experimento se pusieron cantidades iguales de colorante índigo carmín en viales de vidrio y previo a sumergir las mallas se modificó el pH de dos de ellas, en uno con ácido clorhídrico para tener un pH de 2 (ácido) y en otro con hidróxido de sodio para obtener un pH de 12 (base). Los resultados se muestran en la gráfica #16.



Como se puede observar en las muestras con pH ácido las mallas adsorben la mayor parte del colorante, mientras que las muestras que tenían un pH

básico adsorben máximo el 12.69% y por el contrario degradan hasta el 100% al paso de 120 minutos. Los siguientes experimentos se realizaron con agua proveniente de varios lugares del hogar, para tener muestras más representativas del caso de estudio.



FIGURA #27 – VIALES DEL EXPERIMENTO #6

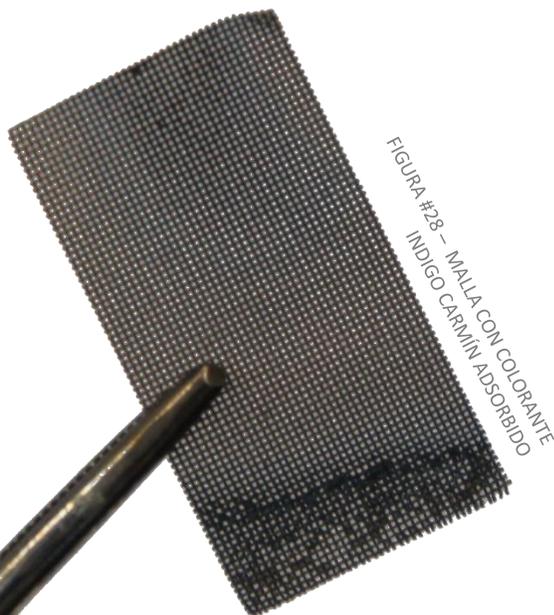


FIGURA #28 – MALLA CON COLORANTE
INDIGO CARMIN ADSORBIDO

Experimentos con muestras de agua

La siguiente serie de experimentos fueron realizados con agua proveniente de diversas fuentes del hogar (agua jabonosa de lavadora y agua estancada de azotea). A continuación se describe cada uno de ellos y sus resultados.

Experimento #7

Agua jabonosa

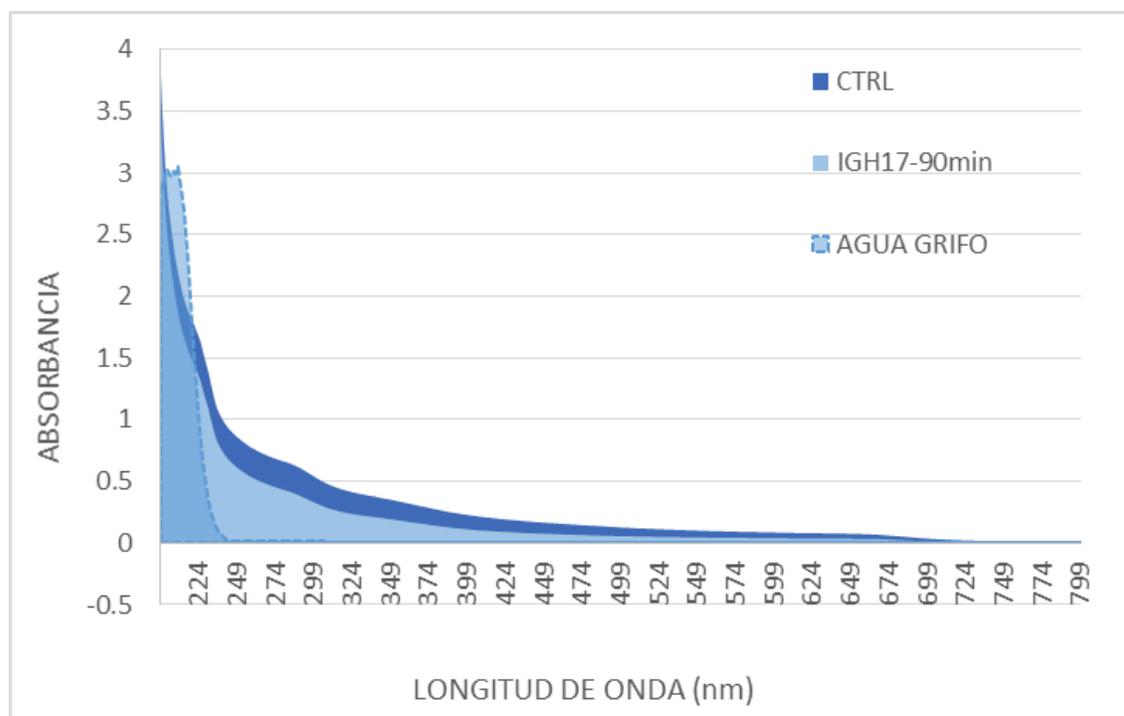
Para este experimento se tomaron muestras provenientes de lavadora, después de haber lavado ropa de mezclilla color azul (IGH17), ropa roja (IGH18) y por último ropa negra (IGH19). El agua fue filtrada con papel filtro para retirar residuos sólidos y se colocaron 10ml en cada uno de los viales.

Se procedió a hacer el experimento para espectrofotometría durante 3 horas. A diferencia de los experimentos con colorantes, donde conocemos la longitud de onda exacta en la que veremos cambios, con el agua jabonosa tenemos que evaluar el desempeño en todo el espectro, por lo que se tomó la decisión de medir el área bajo la curva.



FIGURA #29
FILTRADO DE MUESTRAS

GRÁFICA #17 - IGH19 – Agua azul de lavadora

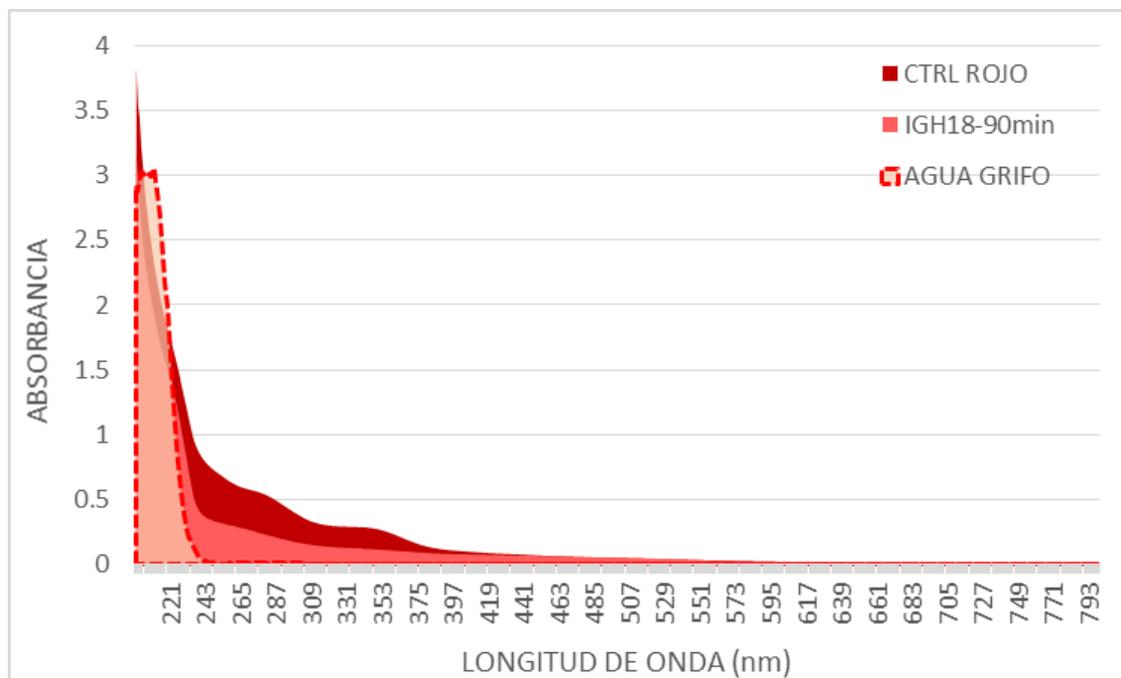


Al no conocer que compuestos se encuentran dentro de las muestras ni saber el comportamiento de las mismas es imposible observar puntos exactos en los cuales medir degradación, por lo cual se tomó la decisión de analizar el área bajo la curva y así poder medir de manera más precisa la degradación en todas las longitudes del espectro, a continuación se muestran los resultados en la tabla #2.

TABLA #2 - IGH17 – AGUA AZUL DE LAVADORA

| DESCRIPCIÓN | ÁREA BAJO LA CURVA |
|--------------------|--------------------|
| MUESTRA CONTROL | 191.0455 |
| IAGH17 – 90 min | 129.4905 |
| AGUA DE GRIFO | 67.7614 |
| DEGRADACIÓN | 50.07 % |

GRÁFICA #18 - IGH18 - Agua roja de lavadora

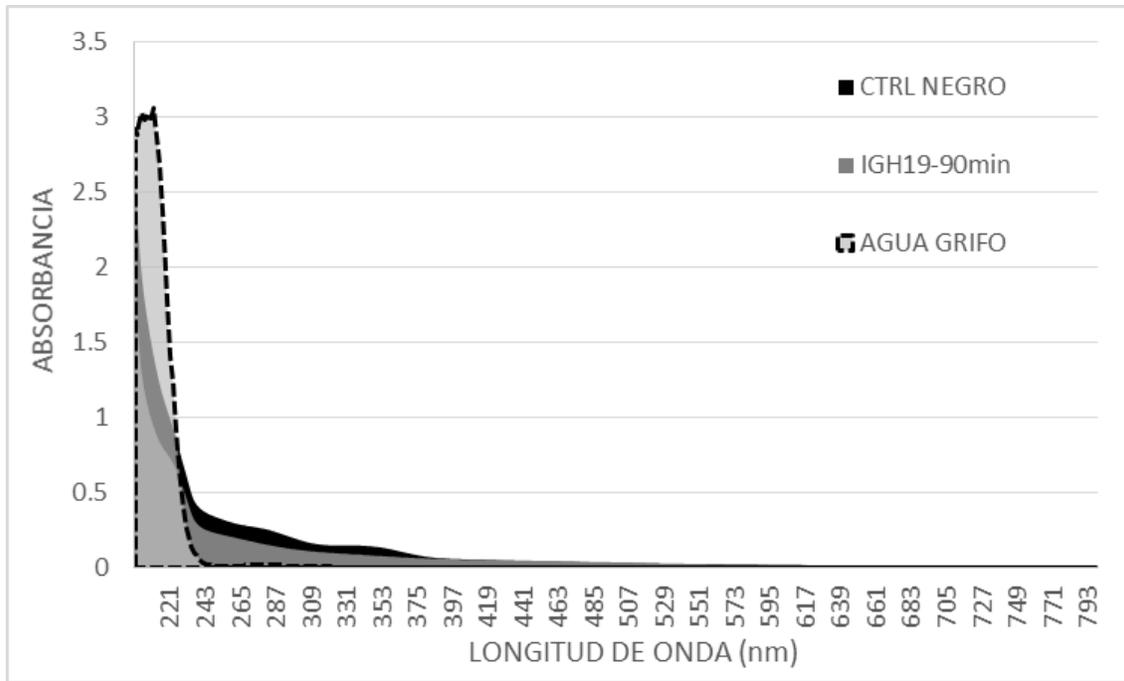


Similar al caso anterior el agua jabonosa roja se analizó con el área bajo la curva, comparándola de igual forma con el agua de la llave, para tener un punto comparativo con el objetivo deseado.

TABLA #3 - IGH18 – AGUA ROJA DE LAVADORA

| DESCRIPCIÓN | ÁREA BAJO LA CURVA |
|--------------------|--------------------|
| MUESTRA CONTROL | 149.0785 |
| IAGH18 – 90 min | 99.877 |
| AGUA DE GRIFO | 67.7614 |
| DEGRADACIÓN | 39.48 % |

GRÁFICA #19 - IGH19 Agua negra de lavadora



Algo similar sucede con el agua de lavadora color negro, la cual logra degradar hasta un 28.25%, comparando el área bajo la curva del control y de la muestra después de recibir el tratamiento.

TABLA #4 - IGH19 – AGUA NEGRA DE LAVADORA

| DESCRIPCIÓN | ÁREA BAJO LA CURVA |
|--------------------|--------------------|
| MUESTRA CONTROL | 81.761 |
| IAGH18 – 90 min | 58.6565 |
| AGUA DE GRIFO | 67.7614 |
| DEGRADACIÓN | 100 % |

Experimento #8

Agua jabonosa en reactor

El siguiente experimento empleó de igual forma agua de lavadora después de haber lavado ropa de mezclilla color azul, pero en esta ocasión las pruebas se hicieron a mayor escala, en el reactor solar, para tener mayor cantidad de muestra y poder analizarla por COT. Se tomaron 250 mL de muestra y se comenzó el experimento. A continuación se muestra una tabla con los resultados del COT.

TABLA #5 - IGH7-16 – CARBONO ORGÁNICO TOTAL

| DESCRIPCIÓN | COT (mg/L) |
|-------------------------|--------------|
| Agua jabonosa control | 31.24 |
| Agua jabonosa 1er ciclo | 29.72 |
| Diferencia | 1.52 |
| Degradación (%) | 4.86% |

A pesar de no obtenerse un porcentaje de degradación grande, como se había observado con la espectrofotometría, en este caso pudimos comprobar que con el tratamiento se están degradando moléculas orgánicas contenidas en el agua jabonosa hasta en un 4.86%. Vale la pena aclarar que las pruebas de espectrofotometría únicamente indican el grado de decoloración de la muestra de agua, mientras que el análisis por COT realmente proporciona una medida de la mineralización del compuesto orgánico, es decir, su degradación.

Experimento #9

Agua estancada

Para este experimento se recopiló agua estancada, similar a la que se podría encontrar en alguna azotea o patio de alguna casa o incluso en las situaciones de inundación del estado de Tabasco. Se filtró el agua con ayuda de un papel filtro y se colocó en viales de vidrio. Se colocó la muestra en el reactor solar y se dejó a la luz solar durante 3 horas. Se realizaron pruebas de espectrofotometría y de carbono orgánico total sin obtener resultados significativos; sin embargo con el paso del tiempo se pudieron observar características cualitativas diferentes en el antes y después del tratamiento, principalmente en el color, ya que el agua tratada se había aclarado significativamente comparada con la no tratada. También se

FIGURA #30 – Antes y después agua estancada



observó una formación de colonias de bacterias en la muestra control, a diferencia del agua tratada donde no se observaron dichas colonias, incluso después de varios meses

Experimento #10

Agua estancada #2

En el experimento #6 se observó que el funcionamiento de las películas era mejor si el pH era básico, por lo cual se decidió repetir el experimento con agua estancada modificando su pH con hidróxido de sodio para mantenerlo en un nivel básico 10. Se filtró el agua estancada y se colocó en viales de 10 mL, posteriormente se irradió con una lámpara de luz solar simulada y, a diferencia de otras pruebas, se dejó irradiar durante 24 horas, esto con el propósito de observar un alcance mayor y procurar que no quedara degradado en subproductos que inclusive pudieran aportar más carbono a las moléculas. A continuación se presentan los resultados de espectrofotometría y de COT.

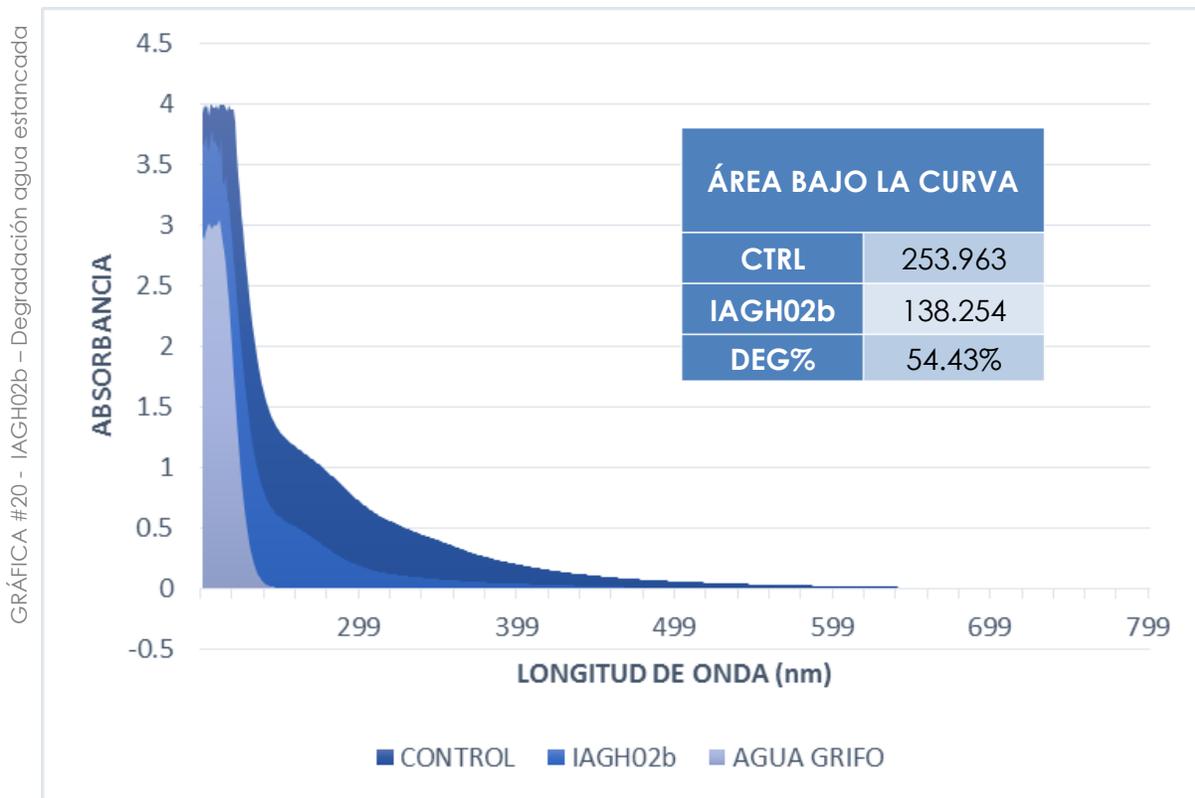


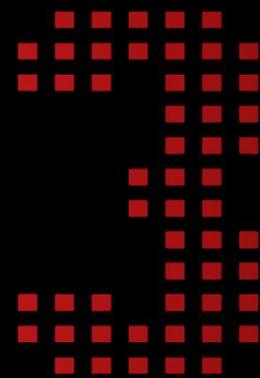
TABLA #6 - IAGH02b – CARBONO ORGÁNICO TOTAL

| DESCRIPCIÓN | CONCENTRACIÓN (mg/L) |
|---|-----------------------------|
| Agua estancada control | 101.35 |
| Agua estancada tratada (IAGH02b) | 95.475 |
| Diferencia | 5.875 |
| Degradación (%) | 5.79% |

A pesar de observar un cambio pequeño en la concentración de COT antes y después del tratamiento, este resultado es muy satisfactorio, ya que las mediciones de COT no reflejan totalmente el grado de avance de la reacción. Esto se debe a que las moléculas orgánicas fragmentadas pueden tener una contribución de carbono mayor en cada nueva especie que en las moléculas originales. Por otro lado, como se muestra en la gráfica 20, el área bajo la curva después del tratamiento indica un 54.43% de degradación, que es muy superior al 5.79% obtenido por COT.

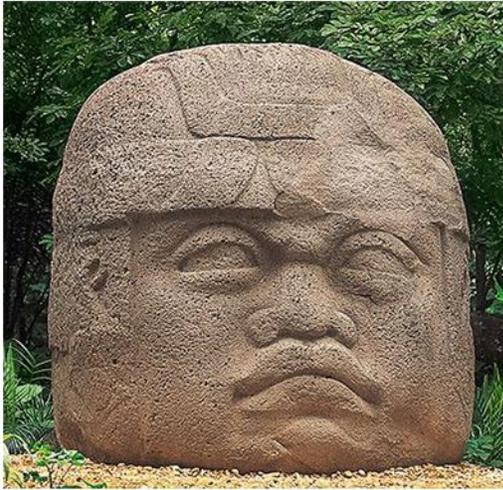
Los resultados aquí obtenidos, en escala de laboratorio y de prototipo de reactor solar son indicativo de que son potencialmente escalables para una aplicación real.

CAPÍTULO
TRES: APOR-
TACIÓN





Caso de estudio



El caso de estudio se sitúa en el municipio de Centro, en el estado de Tabasco, en el fraccionamiento llamado "Gracias México", construido en 2008. Tabasco tiene un volumen anual de agua de 125 000 millones de m³. En el municipio de Centro el 6.4% de su superficie lo ocupan lagunas y ríos, conjuntando alrededor de 13,000 hectáreas (Conagua, 2009).



El clima que se presenta es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano y lluvias dispersas el resto del año, con tiempo de sequía entre los meses de mayo y junio. La temperatura promedio es de 27°, la máxima promedio de 36° (mayo) y la mínima promedio de 18.5° (enero). La precipitación media estatal es de 2550 mm anualmente, con las lluvias más abundantes entre los meses de junio a octubre (INEGI, 2012).





El fraccionamiento Gracias México fue construido en el año 2008 por el Instituto de Vivienda de Tabasco (INVITAB) con aportaciones gubernamentales y privadas.



Se encuentra situado en una zona alta, no propensa a inundaciones, cuenta con 438 lotes habitacionales tipo dúplex de 9x15 mts., donde fueron entregadas viviendas tipo horizontal progresivo a muchas de las familias afectadas durante las inundaciones del 2007 en el estado.





Desde su traslado en el 2008, los habitantes han tenido que pasar con numerosos problemas como la delincuencia e inseguridad, y la falta de servicios como luz eléctrica y agua potable, y también, debido a que las instalaciones destinadas para el drenaje y desalojo de las aguas negras, grises y pluviales son insuficientes, han numerosas inundaciones dentro del fraccionamiento de hasta 40cm de altura en el interior de algunas viviendas (Junior, J.A., 2008). Todas estas condiciones de inhabilitación han ocasionado la desocupación de numerosas viviendas en el fraccionamiento, provocando mayor inseguridad y descuido a la zona.



FIGURA #31 –
Collage de fotografías del caso de estudio

Sistema integrado

Como se ha mencionado con anterioridad el tratamiento con películas nanoestructuradas formaría parte de un sistema integral de tratamiento de aguas grises en una vivienda. Dicho sistema tendría primero un filtrado de sólidos con materiales de distintas dimensiones, posteriormente un filtro de arena, y después desembocando en una cisterna donde se dejaría para asentar la materia que lograra pasar del paso anterior, después el agua subiría a la cisterna con ayuda de una bomba de 1Hp, directo a una cisterna de almacenamiento. Posteriormente el agua pasaría por el filtro de mallas con películas nanoestructuradas donde estaría recirculando durante cierto tiempo y desembocando después a las llaves de salida ubicadas en patios, jardines y tazas de escusado. A continuación de muestran planos y diagramas donde se ejemplifica dicho proceso.

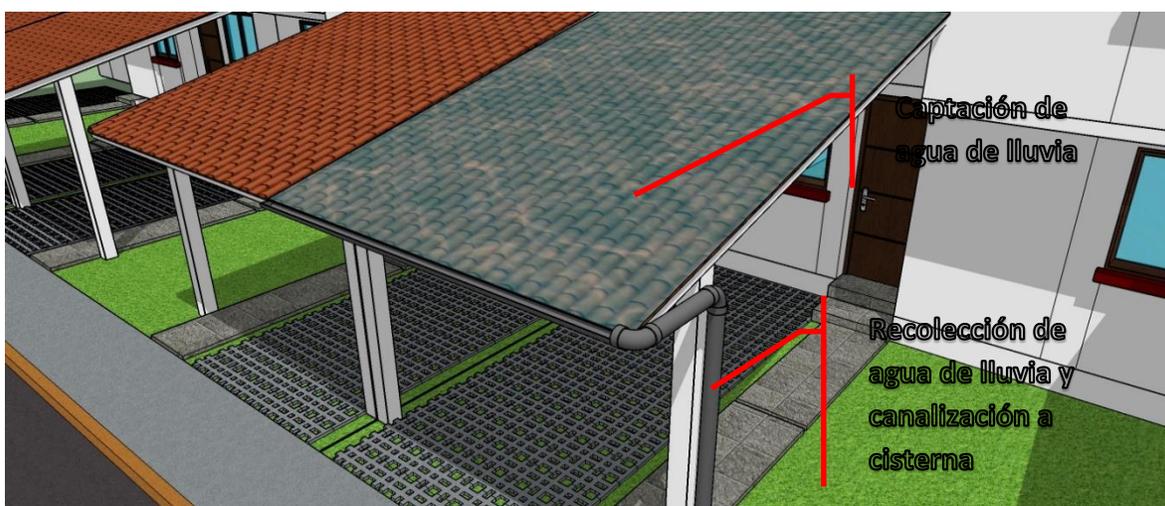


FIGURA #32 – Diagrama de captación y canalización de aguas pluviales



FIGURA #33 – Diagrama de filtro de sólidos y cisterna

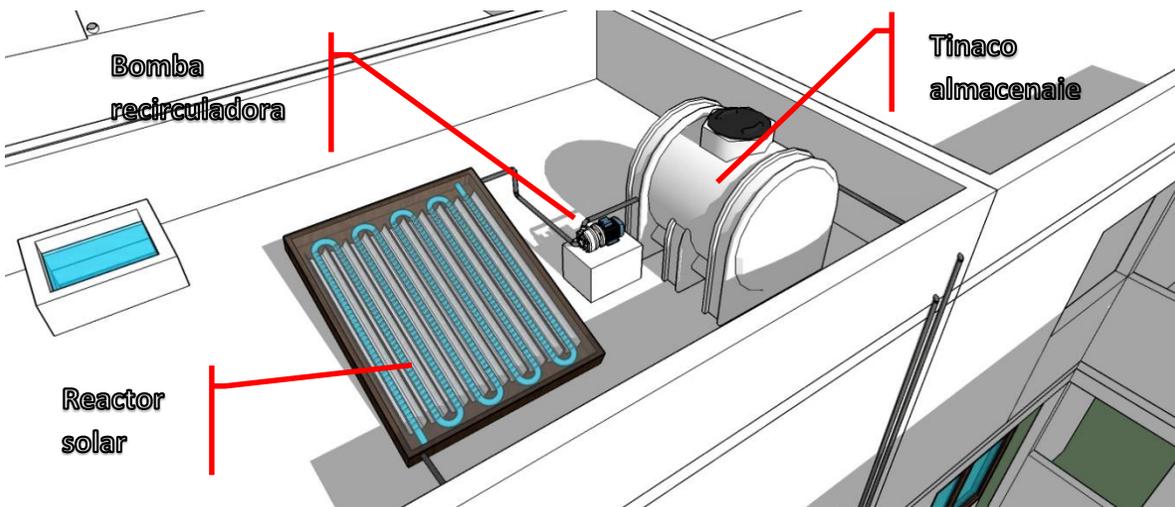


FIGURA #34 – Diagrama de ubicación de tinaco y reactor solar

FIGURA #35 – INSTALACIÓN SANITARIA/PLUVIAL PLANTA BAJA

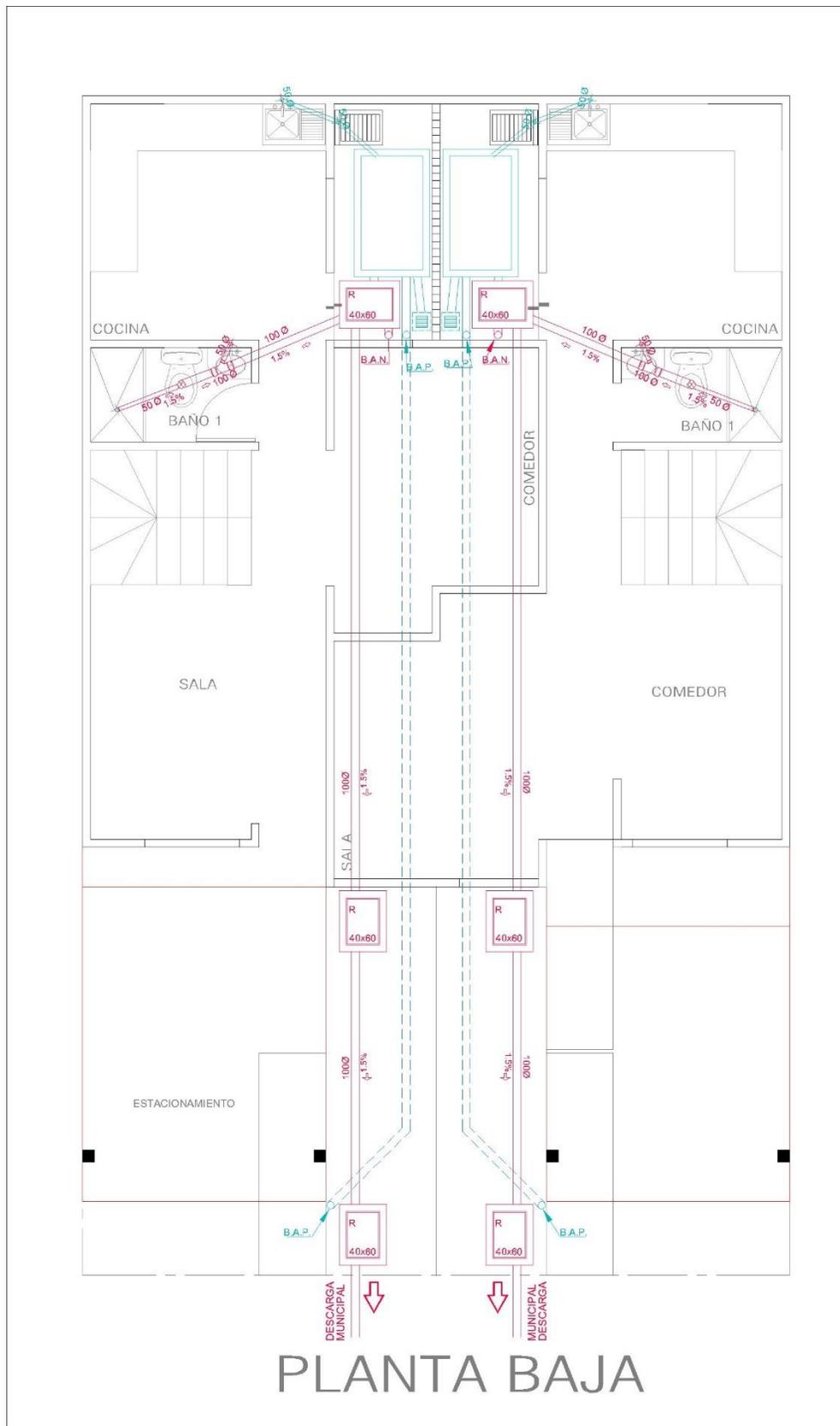
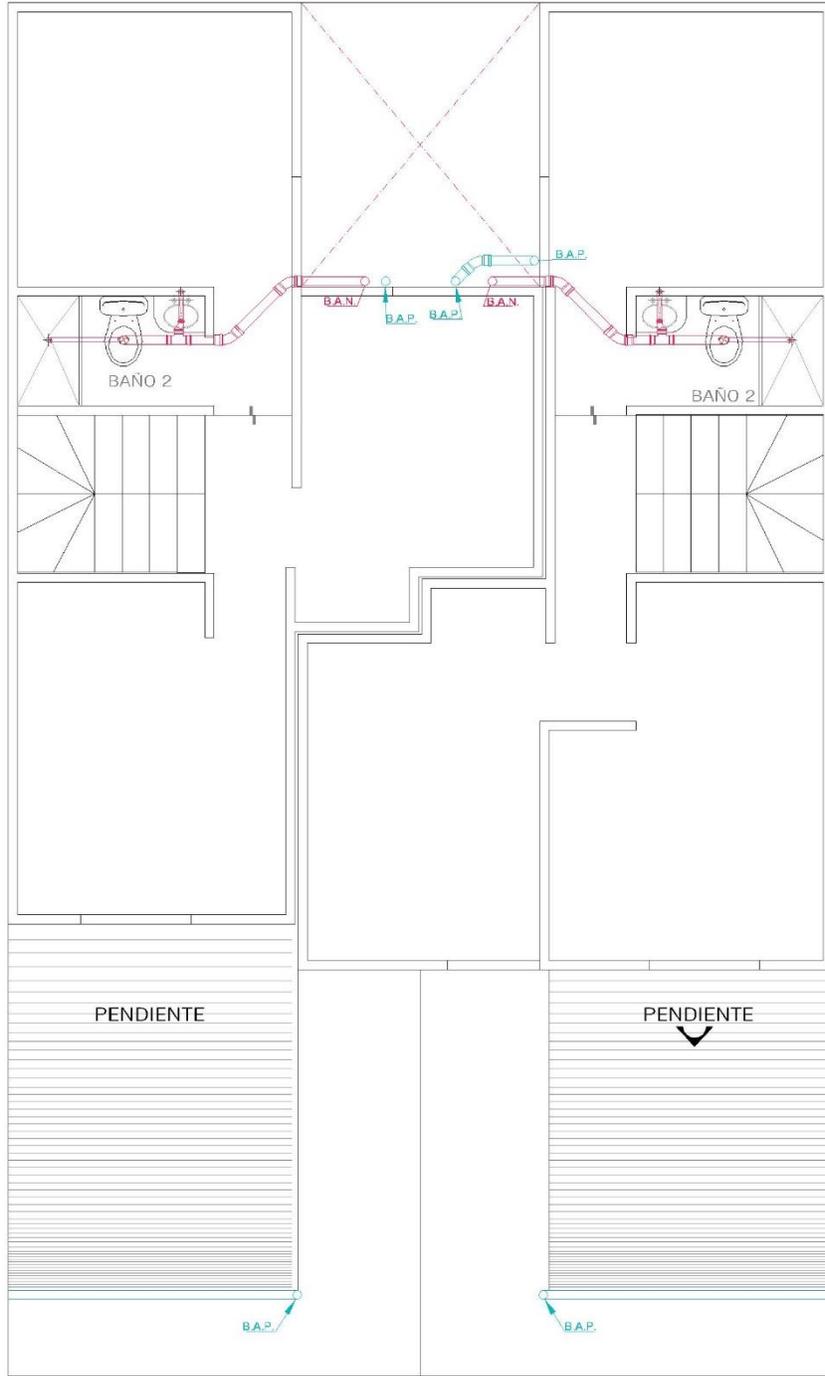


FIGURA #36 – INSTALACIÓN SANITARIA/PLUVIAL PLANTA ALTA



PLANTA ALTA

FIGURA #37 - INSTALACIÓN SANITARIA/PLUVIAL AZOTEA

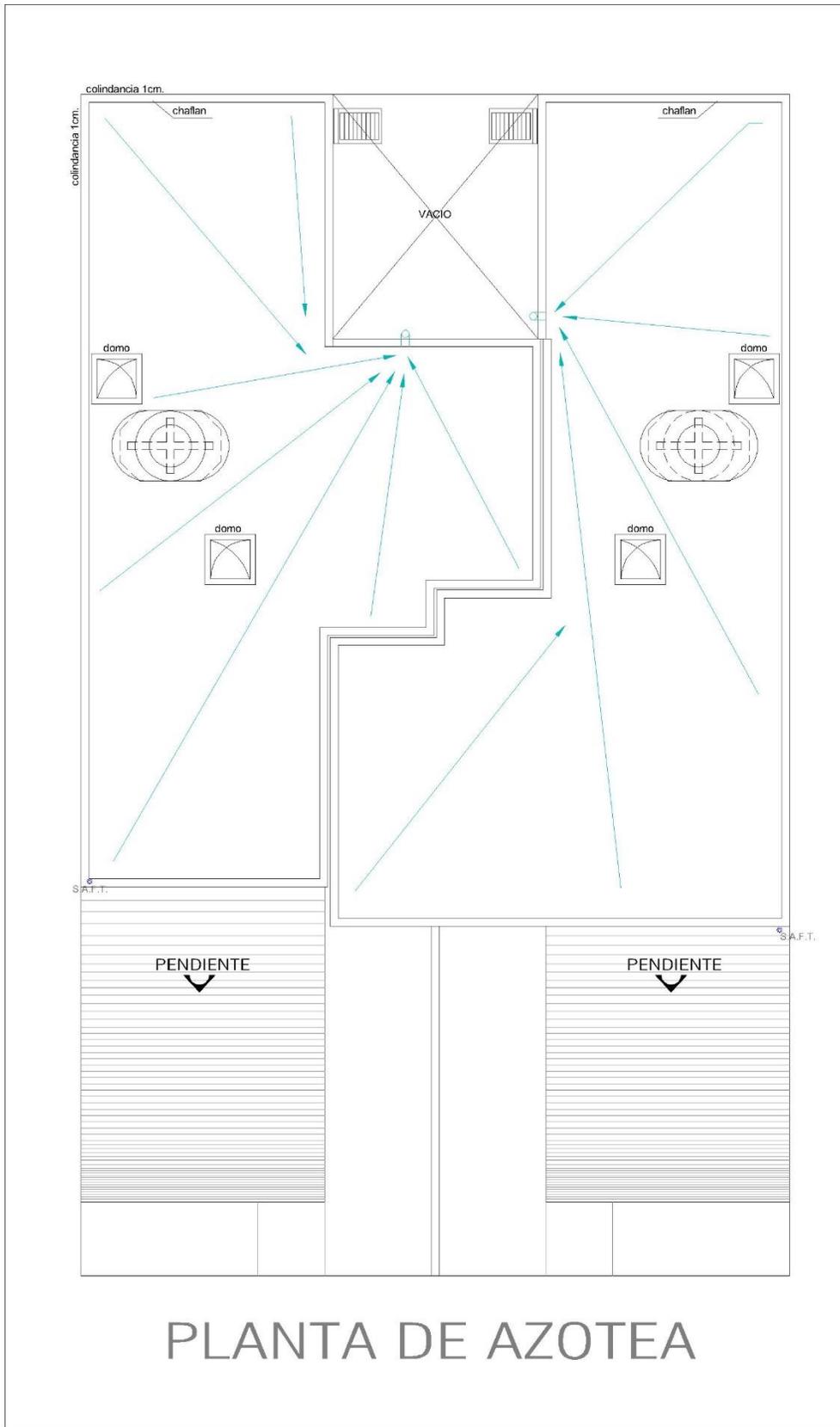


FIGURA #38 – INSTALACIÓN HIDRÁULICA PLANTA BAJA

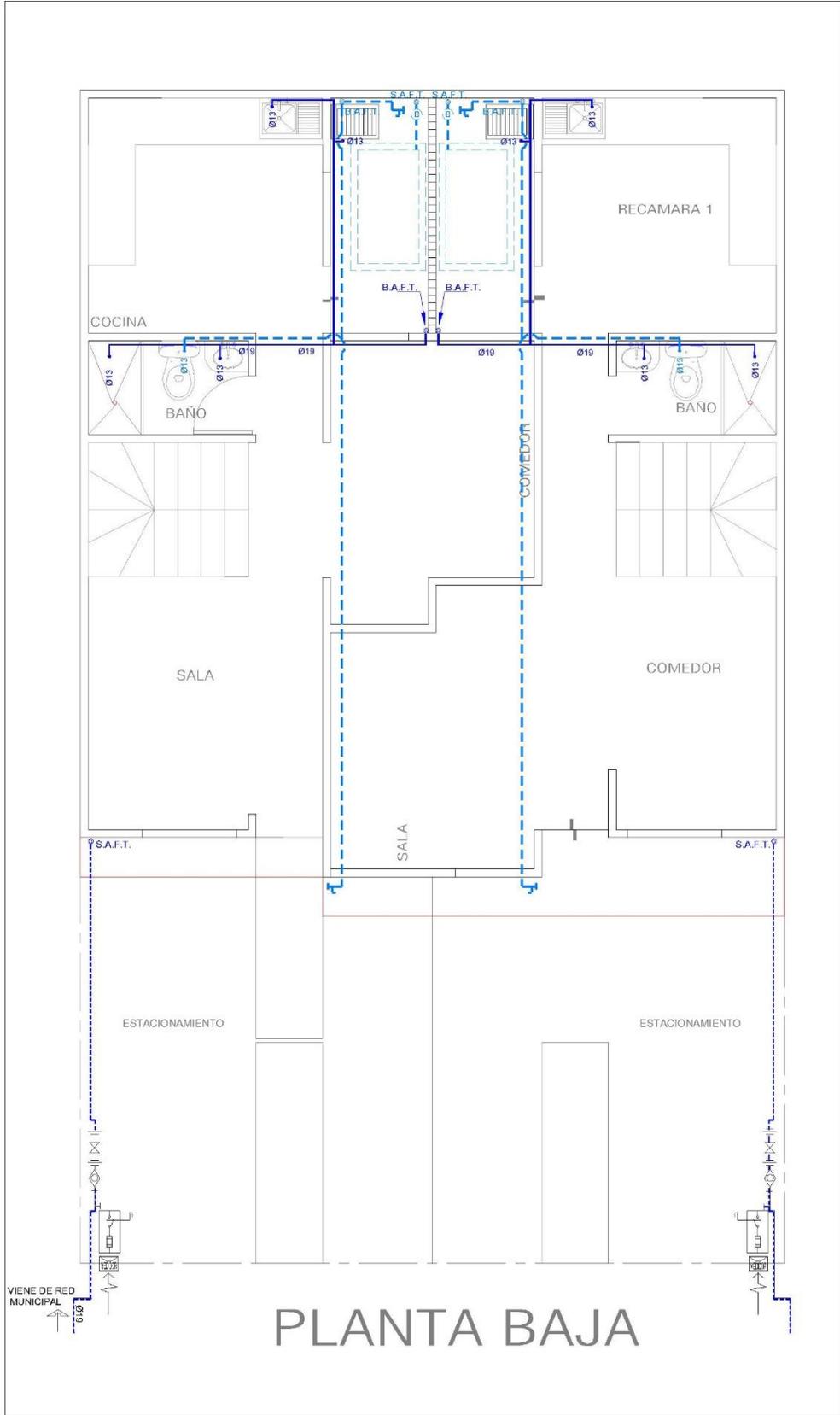
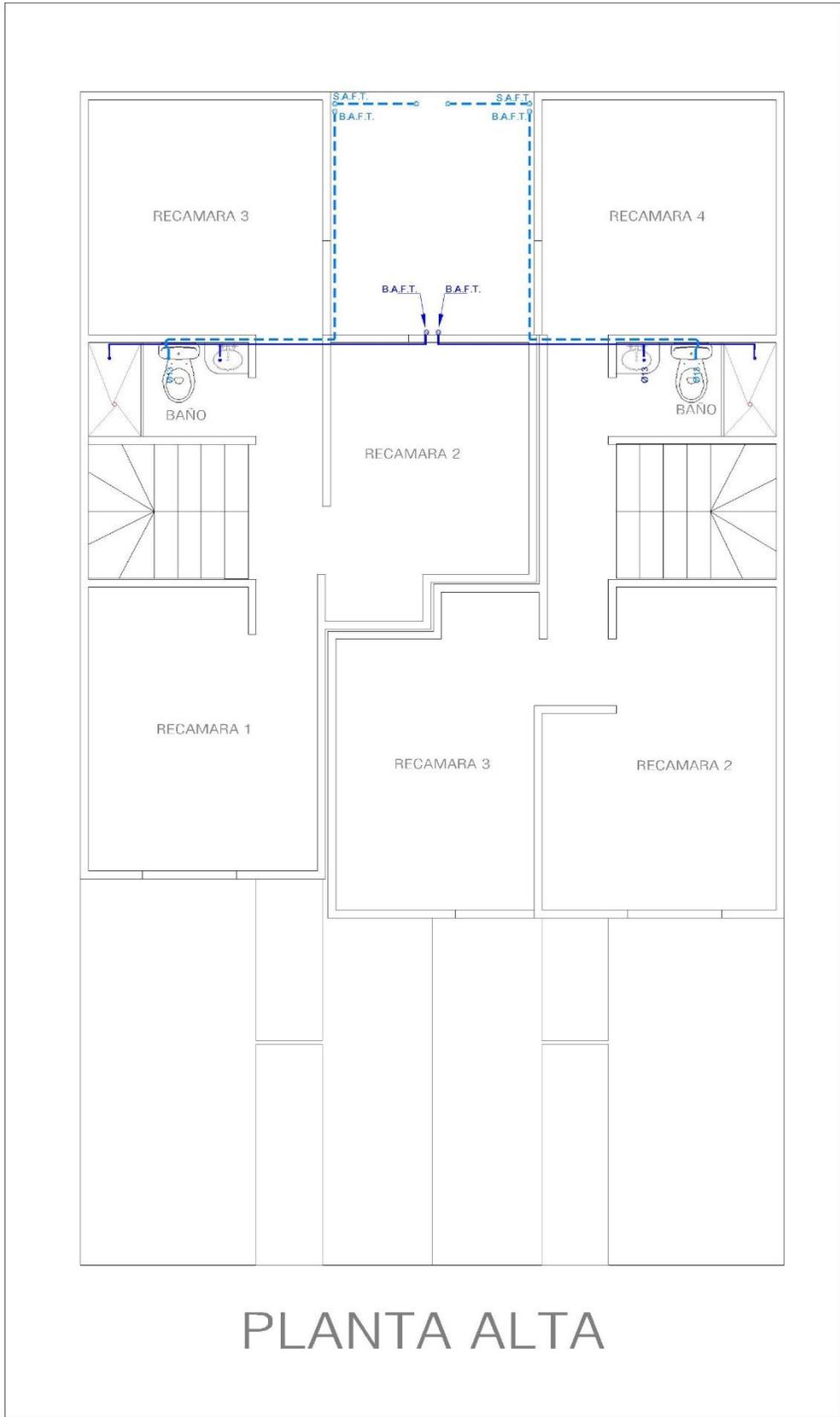
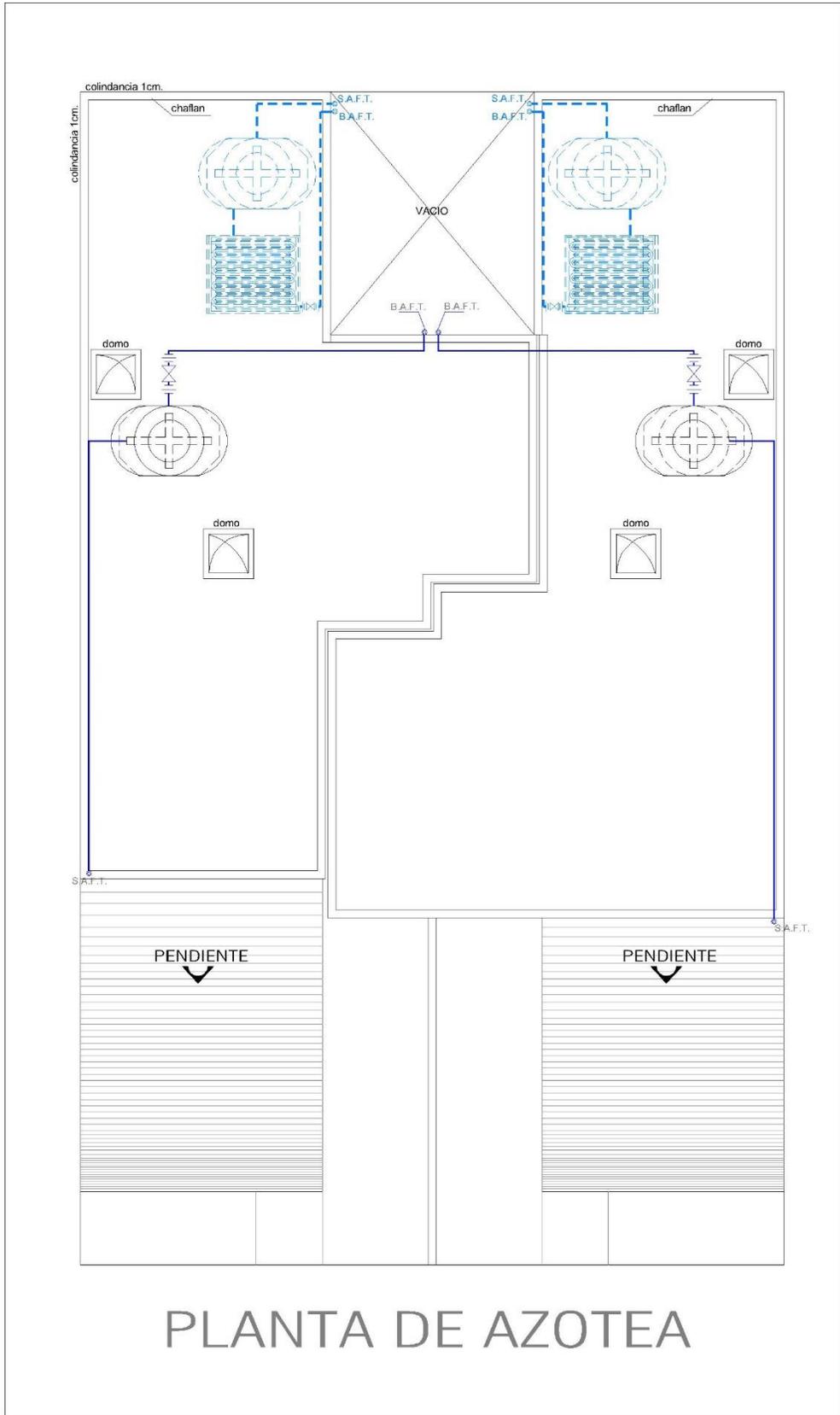


FIGURA #39 – INSTALACIÓN HIDRÁULICA PLANTA ALTA



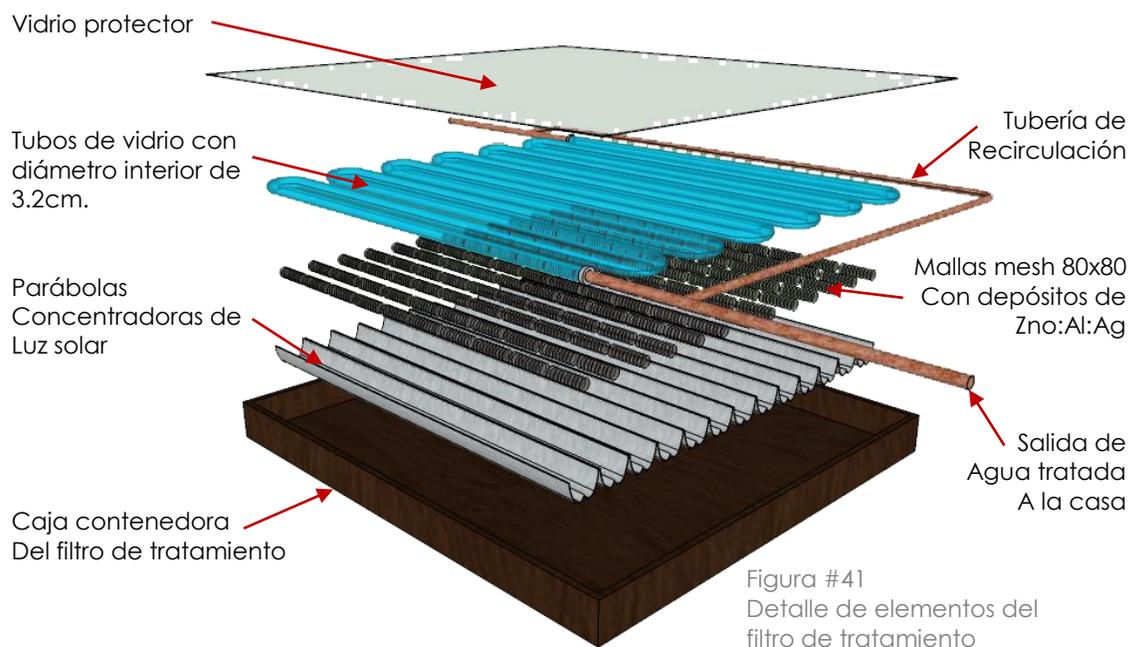
PLANTA ALTA

FIGURA #40 – INSTALACIÓN HIDRÁULICA AZOTEA



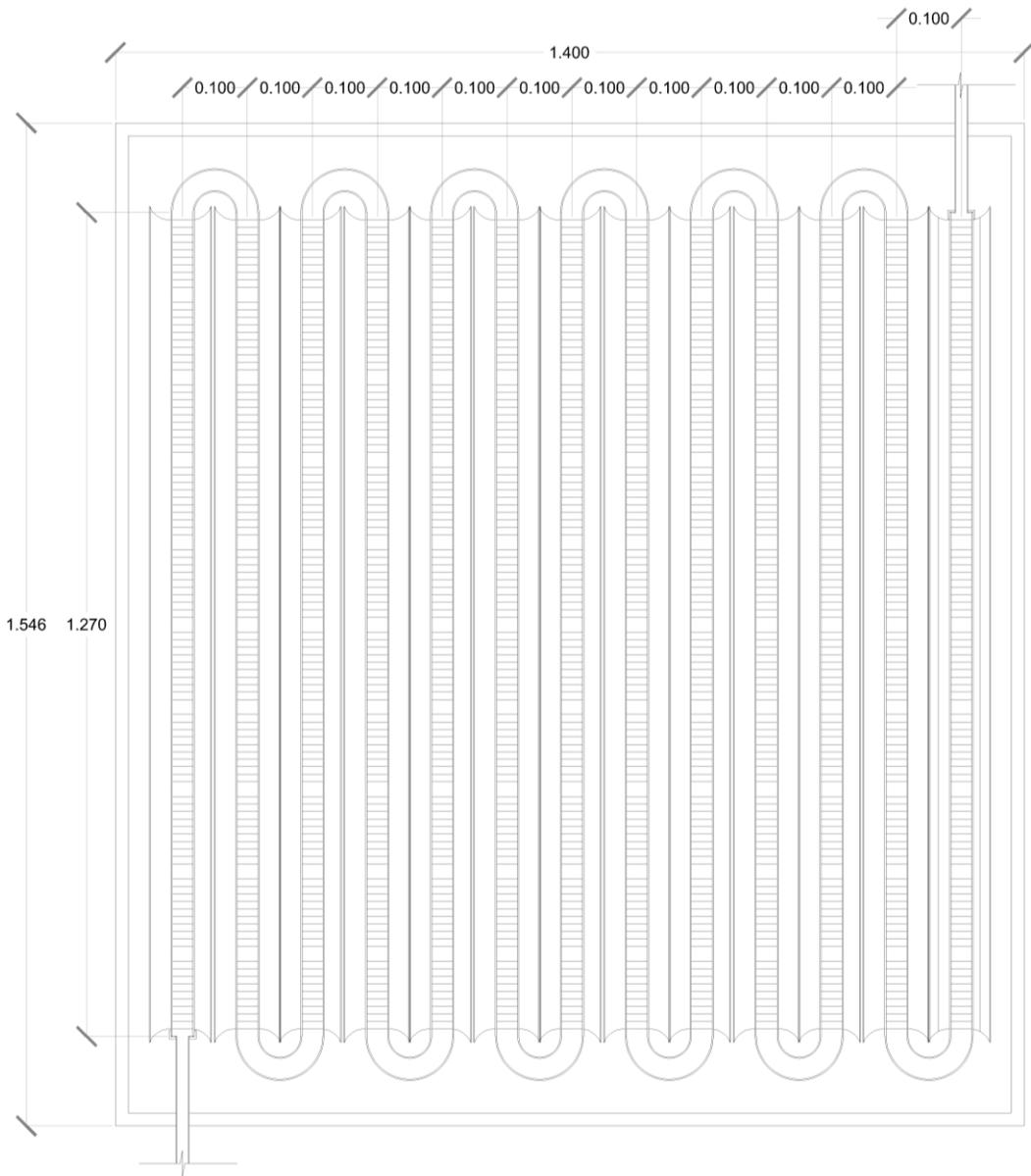
PLANTA DE AZOTEA

Basado en los resultados obtenidos con la presente investigación se escalaron las dimensiones del reactor solar de pruebas de laboratorio con el fin de tener una mejor idea de las dimensiones y número de mallas necesarias que se podrían implementar en cada vivienda. Como ya se mencionó anteriormente el reactor solar se colocaría en la azotea de cada vivienda y constaría de los siguientes elementos;



Quedando integrado en un elemento fácil de transportar y subir a una azotea con dimensiones aproximadas de 1.40 x 1.56 x 0.15 mts. Y el agua tendría que pasar por el sistema varias veces para ser tratada adecuadamente, esto se realizaría con ayuda de una pequeña bomba que hiciera fluir el líquido a través del filtro durante aproximadamente 2 horas para posteriormente enviarlo a las zonas donde va a ser reutilizada el agua.

Figura #42 - Detalle de elementos del filtro de tratamiento



El reactor final contaría con un total de 1300 mallas dentro de 13 secciones de tubos de vidrio con una capacidad de 13.27 litros, a los cuales se le añadirían 19.23 litros en la tubería de recirculación, para llegar a un total de 32.5 litros de agua que se podrían tratar eficientemente en 2 horas. Tomando en cuenta 8 horas diarias de luz solar que su pudiera aprovechar idealmente el filtro podría tratar 130 litros diarios de aguas grises mezcladas con agua de lluvia.

Como se puede observar en los planos, es necesaria la implementación de una nueva instalación tanto sanitaria/pluvial como hidráulica, esto con la finalidad de separar dichas instalaciones en aguas negras y aguas grises/pluviales; esto se debe a que las aguas negras se mandarían directamente al drenaje para que sean tratadas por los servicios municipales, mientras que las aguas grises/pluviales serían tratadas para su reutilización dentro del hogar, en patios, jardines, tanque del w.c. y llaves de nariz para limpieza de la casa. También sería necesario un nuevo tinaco en la azotea, así como la construcción de una nueva cisterna de tratamiento inicial y separación de sólidos.

Esto sin duda sería un costo adicional significativo a las viviendas, que en parte será mitigado por un menor gasto de consumo de agua; sin embargo serán necesarios programas de apoyo gubernamentales y ambientales para no traspasar dicho gasto a los habitantes de la zona, los cuales cuentan con una situación económica precaria.

Los 130 litros de agua tratable diarios, representan un total de 3900 litros al mes, o dicho de otra forma 3.9 m³, y tomando un precio promedio del estado de Tabasco de \$5.00* por metro cúbico de agua potable, representan un ahorro mensual de \$19.50 por vivienda, reduciendo hasta en un 25% el gasto a los habitantes. Si se implementara el filtro en todas las viviendas del fraccionamiento del caso de estudio representaría un ahorro mensual de \$8,541.00 y anualmente \$102,492.00 tanto para los habitantes como para el ayuntamiento.

Discusión

Las mallas tienen una efectividad similar que otro tipo de sustratos, ya que las películas se adhieren con la misma facilidad y al ser utilizados para un filtro de agua, es conveniente que los sustratos dejen pasar el agua con facilidad, por lo cual las mallas son un material idóneo para este tipo de prototipos y experimentos, de igual forma, las mallas ayudarían para atrapar cualquier sólido que hubiera podido pasar por las etapas anteriores de filtrado. De igual forma se observó que mallas con un mesh entre 50x50 y 80x80 son las que mejor funcionan, ya que con aperturas más pequeñas se tapan las mallas y al momento de hacer pasar el agua se puede desprender parte de las películas.

Se observó que la estabilidad de las mallas con depósitos de óxido de zinc, dopadas de aluminio (ZnO:Al) perdían su eficacia con el paso de pocos ciclos (menos de 20% de degradación al término del tercer ciclo), por lo cual se doparon también con nanopartículas de plata, determinando 8 minutos como el tiempo óptimo de depósito para este dopaje. Dicho cambio ayudó drásticamente la efectividad de las películas en las pruebas de estabilidad (60% al término del cuarto ciclo). Lo mismo se pudo comprobar a mayor escala en el reactor solar, donde se logró una degradación del 41% al término del quinto ciclo de 2.5 horas.

Tomando el fenómeno de adsorción presente en algunos experimentos se tomó la decisión de alterar el pH de las muestras a degradar, estableciendo que se estimula de mejor manera la degradación con pH's básicos (entre 10 y 12) con diferencias de 57% en la adsorción (mayor en muestras con pH ácido) y del 17.5% en la degradación (mayor con pH básico).

Los experimentos con agua de lavadora demostraron un buen funcionamiento de las películas en malla degradando compuestos desconocidos, como se pudo observar en el espectrofotómetro-UV, con degradaciones máximas entre 33 y 28% midiendo toda el área bajo la curva. Mientras que en carbono orgánico total se pudo observar una degradación del 4.86% final.

En cuanto al agua estancada se hizo evidente que para poder tener mediciones considerables en espectrofotometría es necesario extender las pruebas a 24 horas, donde pudimos observar una degradación del 54% comparando el área bajo la curva del antes y el después del tratamiento, sin embargo en el carbono orgánico total solo se observó una degradación del 5.79% con las mismas muestras, lo que podría sugerir que con muestras muy contaminadas, las moléculas orgánicas tardan más en descomponerse. Hay que recordar que los datos obtenidos de COT no necesariamente reflejan una baja degradación, sino más bien, indican que las moléculas originales se transformaron en subproductos que posiblemente tienen una mayor contribución de carbono. Dichos resultados son un indicativo de que son potencialmente escalables para una aplicación real.

Se realizó un cálculo estimado del ahorro de agua del fraccionamiento implementando el sistema en todas las viviendas, obteniendo un volumen promedio de 130 litros diarios tratables, lo que es equivalente a un ahorro mensual de \$19.50 por cada vivienda y un total de \$102,492.00 anualmente en todo el fraccionamiento.

Conclusiones

- Se logró depositar películas de óxido de zinc dopadas con aluminio y plata (ZnO:Al:Ag) sobre mallas metálicas, mediante la técnica de rocío pirolítico neumático.
- La malla con 80 aperturas por pulgada (mesh 80x80) presentaron mejor desempeño y estabilidad en las pruebas de fotocatalisis. No se obstruyó con el depósito y la película no se desprendió de la malla después de los experimentos.
- Las mejores películas para realizar fotocatalisis fueron de óxido de zinc dopadas con aluminio y con 8 min de depósito de plata (ZnO:Al25%:Ag5%).
- La estabilidad de las películas disminuye hasta en un 50% en tan solo 5 ciclos, a pesar de que el dopaje de plata ayuda a mantener la eficiencia del material.
- Se probó de forma exitosa un prototipo de experimentación del sistema de filtración y tratamiento de agua bajo irradiación solar, empleando muestras de agua estancada, con degradaciones máximas del 54% en espectrofotometría y 5.79% en carbono orgánico total.
- Se prevé un ahorro anual aproximado de \$234.00 para cada vivienda del caso de estudio, tanto un total de \$102,492.00 para todo el fraccionamiento.

Prospectiva

La presente investigación más que tener un producto final listo para su implementación sienta los presedentes para futuras investigaciones y líneas de investigación dentro de la arquitectura. Para ello es elemental optimizar el filtro, con la finalidad de tratar una mayor cantidad de agua al interior de los hogares, hacerlo mas rápido y establemente, y posteriormente buscar procesos de fabricación en masa que permita bajar los costos de elaboración del filtro y los posibles repuestos.

El volumen meta de tratamiento de agua está definido por la cantidad de agua que se puede recolectar con el sistema en cada vivienda. En México se utilizan 280 litros diarios por persona en promedio dentro de sus hogares, de los cuales $\frac{2}{3}$ son utilizados en escusados y regaderas y no podrían ser reutilizados, sin embargo el tercio restante, es decir 93 litros y tomando un promedio de 4 habitantes por vivienda nos da un total de 372 litros diarios generados al interior del hogar. Este dato se suma a los 478 litros de lluvia diaria que captaría cada vivienda en sus 67.5 m^2 de superficie en promedio, teniendo un total de 850 litros de agua tratable diariamente. Desde un punto de vista económico, el ahorro de dicho servicio sería de \$127.50 al mes, por vivienda, es decir \$1,530.00 al año, y este dato multiplicado por las 438 viviendas del fraccionamiento nos da un total de ahorro anual de \$670,140.00; monto considerable tanto para el ayuntamiento como para los habitantes.



Este sistema ayudaría a reducir la huella hídrica de la zona considerablemente, ya que por cada 1120 litros de agua que se tomen del sistema se estarían tratando y reutilizando 850 litros, reduciendo la huella hídrica en un 75%, esto beneficiaría directamente a las familias del fraccionamiento, a su entorno ambiental y en general a los cuerpos acuíferos del estado.

Otra ventaja del sistema es que fácilmente se puede adaptar a otros lugares del país, es interesante comentar que el costo del agua en el estado de Tabasco es bastante bajo comparado con otros estados de la república, un ejemplo muy claro sería la Ciudad de México, donde el costo del agua es mucho mayor.

Tomando en cuenta una vivienda promedio de la Ciudad de México con características similares a las del caso de estudio, con un consumo de 33,600 litros mensuales pagaría \$543.00 cada mes. Sin embargo tomando en cuenta 3510 litros de lluvia que se captarían en el terreno, y aproximadamente 11,200 litros dentro del hogar que se podrían tratar mensualmente se haría un total de 14,700 litros reutilizables reduciría el consumo a 18,900 litros y un cargo total mensual de \$221.40, representando un ahorro del 60%.

Si se hace una proyección a más a largo plazo, más allá del ahorro en pesos que puede representar este sistema integrado, el ahorro y reutilización de tantos litros de agua representará un verdadero beneficio para la población, pues como se mencionó al inicio de este trabajo, el volúmen de agua por habitante estará por debajo del nivel mínimo en menos de 15 años. Así que cualquier esfuerzo que se haga en aras de un mejor aprovechamiento del agua, será de vital importancia.

Como se mencionó anteriormente para lograr dicha cantidad meta de 658 litros de agua tratados diariamente es necesario buscar soluciones de optimización para el filtro, algunas opciones son las siguientes:

- Depositar las películas de Zn:Al:Ag por ambas caras de las mallas que se colocan dentro del filtro, aumentando de esa forma el área de contacto de las películas fotocatalíticas que harán las funciones de REDOX.
- Aumentar la cantidad de mallas dentro de los tubos de vidrio, reduciendo la distancia que existe entre ellas, de igual forma aumentando el área efectiva que realiza el tratamiento.
- Incrementar el diámetro interior de los tubos de vidrio y consecuentemente el tamaño de las mallas que se albergan en su interior.

Una vez que se logren obtener mejores resultados en COT será necesario realizar pruebas de laboratorio para medir otros parámetros que deben de cumplir las aguas tratadas, esto para asegurar que el agua resultante puede ser reutilizada sin problemas de salud o higiene para los habitantes.

Por otro lado, desde el ámbito arquitectónico es posible adaptar el sistema de una mejor manera a las viviendas, ya sea las del caso de estudio o para nuevas viviendas, algunas ideas son las siguientes:

- Aprovechar las cisternas para incorporar sistemas de climatización pasiva, como tubos de ventilación que pasen dentro de la cisterna, de tal forma que introduzcan aire fresco a las viviendas.

- Anexar de mejor manera el filtro de tratamiento a la vivienda, de tal forma que no sea un elemento “apéndice” de las mismas, como por ejemplo incorporarlo a las fachadas de forma estética.

Bibliografía

- Alamo-Nole, L., Perales-Perez, O., & Roman, F. R. (2012). Use of recycled tires crumb rubber to remove organic contaminants from aqueous and gaseous phases. *Desalination and Water Treatment*, 49(1-3), 296-306.
- Bizarro, M., & Martínez-Padilla, E. (2014). Visible light responsive photocatalytic ZnO: Al films decorated with Ag nanoparticles. *Thin Solid Films*, 553, 179-183.
- Bizarro, M., (2011) Materiales para combatir la contaminación del agua, *Materiales avanzados*, núm. 16, 15-21.
- Bizarro, M., Tapia-Rodríguez, M. A., Ojeda, M. L., Alonso, J. C., & Ortiz, A. (2009). Photocatalytic activity enhancement of TiO₂ films by micro and nano-structured surface modification. *Applied Surface Science*, 255(12), 6274-6278.
- Blum, J., Tymiak, N., Neuman, A., Wong, Z., Rao, N. P., Girshick, S. L., ... & Heberlein, J. V. R. (1999). The effect of substrate temperature on the properties of nanostructured silicon carbide films deposited by hypersonic plasma particle deposition. *Journal of Nanoparticle Research*, 1(1), 31-42.
- Brinker, C. J., & Scherer, G. W. (2013). *Sol-gel science: the physics and chemistry of sol-gel processing*. Academic press.
- Chafloque, W. A. L., & Gómez, E. G. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalurgica y Geográfica*, 9(17), 85-96.
- Choi, H. S., Ashitate, Y., Lee, J. H., Kim, S. H., Matsui, A., Insin, N., ... & Tsuda, A. (2010). Rapid translocation of nanoparticles from the lung airspaces to the body. *Nature biotechnology*, 28(12), 1300-1303.

- Cohen-Tanugi, D., Grossman, J. C. (2012). Water desalination across nanoporous graphene. *Nano letters*, 12(7), 3602-3608.
- CONAGUA, Semarnat. *Estadísticas del Agua en México. Edición 2013*. México. 2014.
- CONAGUA, Semarnat. *Estadísticas del Agua en México. Edición 2014*. México. 2014.
- CONAGUA. 2009. Atlas del agua en México 2009. Comisión Nacional del Agua.
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's water treatment: principles and design*. John Wiley & Sons.
- Devard, A., Aghemo, V. S., Dorantes, C. A. C., Arzaluz, M. G., Marchesini, F. A., & Ulla, M. A. (2016) Pd and In addition onto Au nanoparticles supported on TiO₂ as a catalytic formulation for NO₃⁻ reduction in water. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 1-16.
- Fahlman, B. D. (2011). What is Materials Chemistry?. In *Materials chemistry* (pp. 457-583). Springer Netherlands.
- Farràs, M. G. R., & Senovilla, L. P. (2008). Riesgos asociados a la nanotecnología. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), 797.
- Feynman, R. P. (1992). There's plenty of room at the bottom [data storage]. *Journal of microelectromechanical systems*, 1(1), 60-66.
- Gleick, P. H. (1993). *Water in crisis*. Pacific Institute for Studies in Dev., Environment & Security. Stockholm Env. Institute, Oxford Univ. Press. 473p, 9.
- Gleiter, H. (2000). Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. *Acta materialia*, 48(1), 1-29.
- González-Elipel, A. R., Gordillo-VázquezII, F. J., TabarésIII, F. L., & TanarroIV, I. (2014). *Física de Plasmas*.

- Gozaló, C. T. (2010). Evaluación del riesgo por exposición a nanopartículas mediante el uso de metodologías simplificadas. *Seguridad y salud en el trabajo*, (58), 22-27.
- Gullapalli, S., & Wong, M. S. (2011). Nanotechnology: a guide to nano-objects. *Chemical Engineering Progress*, 107(5), 28-32.
- Haerle, V., Hahn, B., Kaiser, S., Weimar, A., Bader, S., Eberhard, F., ... & Eisert, D. (2004). High brightness LEDs for general lighting applications Using the new ThinGaN™- Technology. *physica status solidi (a)*, 201(12), 2736-2739.
- Halliday, S. (2013). *The Great Stink of London*. 1st ed. New York: History Press.
- Hashim, D. P., Narayanan, N. T., Romo-Herrera, J. M., Cullen, D. A., Hahm, M. G., Lezzi, P., ... & Roy, A. K. (2012). Covalently bonded three-dimensional carbon nanotube solids via boron induced nanojunctions. *Scientific reports*, 2, 363.
- INEGI. Sistema de Cuentas Nacionales de México. Cuentas Económicas y Ecológicas de México, 2012 preliminar. Base 2008. Monografía. México. 2014a.
- Intl. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Part II, Japan Society of Precision Engineering.
- Kroto, H. W., Heath, J. R., O'Brien, S. C., Curl, R. F., & Smalley, R. E. (1985). C 60: buckminsterfullerene. *Nature*, 318(6042), 162-163.
- Kukowska-Latallo, J. F., Candido, K. A., Cao, Z., Nigavekar, S. S., Majoros, I. J., Thomas, T. P., ... & Baker, J. R. (2005). Nanoparticle targeting of anticancer drug improves therapeutic response in animal model of human epithelial cancer. *Cancer research*, 65(12), 5317-5324.
- Lai, W., Zheng, J., Yang, R., Xie, L., & Li, X. (2015) Synthesis of nanostructured materials by hot and cold plasma.
- Lopetegui Garnika, J., & Trouvé, E. (2004). Criterios técnico-económicos para la implantación de la tecnología de bioreactores de membrana. *Tecnología del Agua*, (253), 62-69.

- Lu, M. (2013). Photocatalysis and water purification: from fundamentals to recent applications. P. Pichat (Ed.). John Wiley & Sons.
- Mankins, J. C. (1995). Technology readiness levels. White Paper, 6(6), 1995.
- Mateo, D., Morales, P., Ávalos, A., & Haza, A. I. (2013). Nanopartículas de oro: aplicaciones y citotoxicidad in vitro. *Acta toxicológica argentina*, 21(2), 102-109.
- McNaught, A. D., & McNaught, A. D. (1997). Compendium of chemical terminology (Vol. 1669). Oxford: Blackwell Science.
- Meyyappan, M. (2011). Plasma nanotechnology: past, present and future. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(17), 174002.
- O.M.S. (2014). Progresos en materia de agua potable y saneamiento: informe de actualización 2014. In *Progresos en materia de agua potable y saneamiento: informe de actualización 2014*.
- Paredes, A. J. (1997). Water management in Mexico: a framework. *Water international*, 22(3), 135-139.
- Pendleton, P., Wong, S. H., Schumann, R., Levay, G., Denoyel, R., & Rouquero, J. (1997). Properties of activated carbon controlling 2-methylisoborneol adsorption. *Carbon*, 35(8), 1141-1149.
- Rao, N. P., Lee, H. J., Kelkar, M., Hansen, D. J., Heberlein, J. V. R., McMurry, P. H., & Girshick, S. L. (1997). Nanostructured materials production by hypersonic plasma particle deposition. *Nanostructured Materials*, 9(1), 129-132.
- Sarkas, H., Piepenbrink, J., Judd, G., & Coy, D. C. (2013) NanoArc™-A New Physical Vapor Synthesis Process.
- Schmidt, H. (2001). Nanoparticles by chemical synthesis, processing to materials and innovative applications. *Applied organometallic chemistry*, 15(5), 331-343.

- Schoen, D. T., Schoen, A. P., Hu, L., Kim, H. S., Heilshorn, S. C., & Cui, Y. (2010). High speed water sterilization using one-dimensional nanostructures. *Nano letters*, 10(9), 3628-3632.
- Schwaiger, R. (1995). Deformation of nanostructured materials: insights from experimental observations. *Int. Mater. Rev*, 40(2), 41-64.
- Segal, H. P., Fuller, R. B., & Ward, J. (1987). *Inventions: The Patented Works of R. Buckminster Fuller*.
- Taniguchi, Norio., 1974, On the Basic Concept of 'Nano-Technology', Proc.
- Von Neumann, J., & Burks, A. W. (1966). Theory of self-reproducing automata. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(1), 3-14.
- Wong-Ekkabut, J., Baoukina, S., Triampo, W., Tang, I. M., Tieleman, D. P., & Monticelli, L. (2008). Computer simulation study of fullerene translocation through lipid membranes. *Nature Nanotechnology*, 3(6), 363-368.
- Works, H. U. Ultraviolet germicidal irradiation., (consultado en abril 2017) http://www.mrsa-uv.com/uploads/8/9/7/2/8972491/wikipedia-ultraviolet_germicidal_irradiation.pdf
- Yarwood, J. (1953). Principles of Electronics. *Physics Bulletin*, 4(48), 120.
- Yokwana, K., Gumbi, N., Adams, F., Mhlanga, S., Nxumalo, E., & Mamba, B. (2015). Development of functionalized doped carbon nanotube/polysulfone nanofiltration membranes for fouling control. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(21).