

# **DESINFECCIÓN FOTO-CATALÍTICA DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO USANDO LUZ SOLAR Y DIÓXIDO DE TITANIO (TiO<sub>2</sub>) INMOVILIZADO**

César GUTIERREZ RICO, Lucero ROBLES DÁVILA, Felipe ORTIZ ARREDONDO,  
Lourdes MARTÍNEZ GARCÍA

Centro de Estudios Académicos sobre Contaminación Ambiental, Facultad de Química e Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México. Código Postal 76010, correo electrónico: lucyrd@uaq.mx

Palabras clave: desinfección, SODIS, TiO<sub>2</sub>

## **RESUMEN**

El promedio de muertes anuales por enfermedades diarreicas supera los 2 millones de personas (ONU, 2000) y debido al consumo de agua con mala calidad microbiológica se estima la muerte de 10,000 a 20,000 niños por día (Carey, 2004). Por ello, es necesaria una tecnología simple, de bajo costo, accesible y ambientalmente sostenible, para desinfección del agua, que minimice las enfermedades transmitidas por ésta. El proceso que cumple con estas características es el de desinfección solar del agua (SODIS). En esta investigación se mejoró dicho proceso, que puede ser usado en la desinfección del agua para consumo humano a nivel doméstico, e implementarse en lugares donde no hay acceso al agua potable. La mejora consistió en el uso de un reactor solar con TiO<sub>2</sub> inmovilizado en donde se llevó a cabo el proceso de desinfección oxidativa solar, con ello se logró reducir el tiempo de exposición a la radiación solar de seis horas a dos horas y se incrementó la eficiencia de la inactivación de coliformes totales y fecales, para dar cumplimiento a la normatividad mexicana.

## **INTRODUCCIÓN**

En México, se cuenta con 439 plantas potabilizadoras de agua, sin embargo cerca de 12 millones de personas carecen de este servicio y esto tiene como consecuencia una media nacional de mortalidad por enfermedades diarreicas en menores de 5 años de 23.24 por cada 100 mil habitantes; en el estado de Querétaro se presenta una mortalidad superior a la media nacional (CNA, 2004).

En numerosas ocasiones el agua que llega a las viviendas de muchas comunidades rurales proviene de manantiales, ríos, arroyos, ojos de agua u otros tipos de fuentes naturales superficiales expuestas a contaminación (Sánchez, 2000), por lo que se busca la necesidad de una tecnología para la desinfección del agua que sea barata y accesible para minimizar los incidentes de las enfermedades transmitidas por el agua.

El proceso de desinfección solar del agua (SODIS) es una tecnología simple, usada para mejorar la calidad microbiológica del agua para consumo humano, es un tratamiento ideal para pequeñas cantidades de agua, que utiliza botellas de plástico llenas de agua contaminada y se exponen a la luz solar por seis horas, este proceso

requiere de agua con turbiedad menor a 30 unidades de nefelométricas de turbiedad (UNT). El efecto de la inactivación de microorganismos en el proceso SODIS es atribuido al calentamiento por la radiación infrarroja y a la radiación ultra violeta A (UV-A) (Sommer, 1997).

Los factores que mejoran la inactivación de microorganismos del agua por SODIS son: La baja turbiedad, la mayor cantidad de oxígeno disuelto en el agua, el uso de reflectores de luz que incrementen la incidencia solar hacia el agua, tal como papel aluminio (Kehoe ,2001). Existen varias investigaciones que demuestran que el SODIS es un proceso de desinfección efectivo y de bajo costo (McGuigan, 1998; Walter, 2004) y después de 20 años de investigaciones y proyectos pilotos, SODIS ha ganado un reconocimiento importante, como su promoción por la Organización Mundial de la Salud (OMS) durante el día Mundial del Agua 2001 (WHO, 2001). En México existe poca difusión e investigación del proceso SODIS, uno de los más recientes estudios fue determinar la eficiencia en la desinfección agua para consumo humano en una comunidad rural de la sierra Tarahumara en el estado de Chihuahua, donde se consume agua de ríos y de pozos artesanos sin tratamiento. Utilizando un concentrador solar con tres tipos de botellas, transparentes, parcialmente pintadas de negro y totalmente pintada de negro, el resultado fue un 100% de eficiencia en la desinfección solar, aun sin el uso del concentrador solar con exposición a más de seis horas en esta zona (Martín, 2004).

Una de las áreas de oportunidad para investigación es reducir el tiempo de exposición solar por SODIS. Una alternativa para incrementar la eficiencia en la desinfección del agua puede ser utilizando SODIS en combinación con los Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs). Los AOPs son procesos foto-catalíticos que degradan compuestos orgánicos (incluso no biodegradables) en agua o aire (Guillard, 2003), hacen uso de compuestos que producen radicales OH (\*OH) con exposición a luz ultravioleta (UV) (Malato, 2002), tales como dióxido de titanio ( $TiO_2$ ), peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), peroxodisulfato ( $S_2O_8^{2-}$ ) y ozono ( $O_3$ ) (Blanco, 2000). El  $TiO_2$  es el semiconductor más frecuentemente usado en foto-catálisis por su bajo costo, baja toxicidad, resistencia a foto-corrosión y a su eficiencia catalítica (EPA, 1998; Transito, 2003).

Esta investigación coadyuvó a mejorar el proceso de desinfección solar (SODIS) del agua para consumo humano a nivel doméstico, en lugares en los que la población consume agua contaminada por microorganismos patógenos, como una alternativa de solución simple, de bajo costo y ambientalmente sostenible.

La investigación implementa un reactor solar con  $TiO_2$  inmovilizado como catalizador para llevar a cabo el proceso de desinfección oxidativo solar de agua microbiológicamente contaminada, para reducir el tiempo de exposición a la radiación solar e incrementar la eficiencia de la inactivación de coliformes totales y fecales, utilizados como indicadores de la calidad del agua. Lo anterior para dar cumplimiento a la Norma NOM-127-SSA1-1994 "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano- límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización", respecto a la calidad microbiológica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología que se llevó a cabo para lograr desinfectar el agua para consumo humano usando luz solar y dióxido de titanio inmovilizado fue realizada en cuatro etapas, las cuales se explicarán con detalle a continuación:

### I. Inmovilización de dióxido de titanio sobre varillas de vidrio.

El método para producir dióxido de titanio inmovilizado sobre varillas de vidrio es llamado Dip-Coating (Kim, 2004). Este procedimiento fue utilizado en la Universidad de California, San Diego para la fijación de dióxido de titanio en pequeños tubos para la experimentación con un reactor foto-catalítico, con el objetivo de determinar la cinética química en la degradación del ácido benzoico que sirvió como diseño de una planta de remediación de agua residual. Se inmovilizaron 49 varillas con dióxido de titanio  $TiO_2$ .

### II. Desinfección solar con diferentes concentraciones de $TiO_2$ .

Para la realización de esta investigación se tomó la muestra de agua de una comunidad rural llamada Hoya de Álvarez de la del municipio de Valle de Santiago Guanajuato. El agua es de un ojo de agua natural que utiliza la comunidad para consumo y uso humano de la propia comunidad. Se siguieron los puntos de la Norma Oficial Mexicana. NOM-014-SSA1-1993 "Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados.



**Figura 1.** Toma de muestra en Hoya de Álvarez de la del municipio de Valle de Santiago Guanajuato.

Posterior a la fijación del  $\text{TiO}_2$  en varillas de vidrio mediante el método de Dip-Coating (Kim, 2004). Se agregó agua (de Hoya de Álvarez) a  $\frac{3}{4}$  de la capacidad de una botella de PET de 2.5 l, se tapó y agitó vigorosamente 1 minuto para aumentar el oxígeno disuelto. Se introdujo una varilla de vidrio con el  $\text{TiO}_2$  inmovilizado y se terminó de llenar la botella. Se expuso al sol la botella en forma horizontal-inclinada y se determinaron coliformes totales y fecales a intervalos de una hora. Finalmente se determinó coliformes totales y fecales de cada muestra por el método del sustrato cromogénico.

Este método se fundamenta en el uso de sustratos cromogénicos hidrolizables para la detección de enzimas de bacterias coliformes. Cuando se utiliza esta técnica, el grupo se define como todas las bacterias que poseen la enzima  $\beta$ -D-galactosidasa y capaces de romper el sustrato cromogénico, dando como resultado una liberación del cromógeno. A diferencia del método de fermentación de lactosa que permite el crecimiento de muchos organismos aeróbicos y elimina o suprime algunos no-coliformes con inhibidores químicos, esta técnica provee nutrientes que son más selectivos y específicos para el crecimiento de coliformes (NOM-180-SSA1-1998).

### **III. Comparación de la velocidad de inactivación de coliformes totales y coliformes fecales usando SODIS y SODIS/ $\text{TiO}_2$ inmovilizado.**

Después de haber determinado la concentración óptima de  $\text{TiO}_2$  para inactivar el agua de coliformes totales y fecales, se procedió a comparar el método de SODIS con SODIS/ $\text{TiO}_2$  para ello se utilizaron botellas de plástico (PET) de dos litros y medio de capacidad y cada tratamiento se realizó por triplicado.

Finalmente se realizaron paralelamente experimentos por el método SODIS y SODIS con el  $\text{TiO}_2$  inmovilizado para comparar los resultados.

### **IV. Recrecimiento de coliformes totales en el proceso SODIS y SODIS con $\text{TiO}_2$**

Una vez desinfectada el agua, se determinaron coliformes totales, a diferentes intervalos de tiempos para observar posible recrecimiento de microorganismos. Lo anterior se hizo con la finalidad de determinar tiempo recomendado para consumir el agua después de desinfectarla. La primera muestra se obtuvo después de 24 horas de la desinfección, la segunda después de 48 h. y así sucesivamente durante siete días se realizó el monitoreo.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo, se expondrán los resultados de la concentración de dióxido de titanio inmovilizado en diferentes varillas, así como la variación de la desinfección solar con diferentes concentraciones de  $\text{TiO}_2$  y la comparación de estos resultados con el proceso de desinfección solar tradicional (SODIS). Con respecto a la calidad del agua, se presentan los resultados de los análisis microbiológicos y la comparación de éstos con la norma que rigen los límites máximos permisibles de la calidad del agua para consumo humano (NOM-127-SSA1-1994).

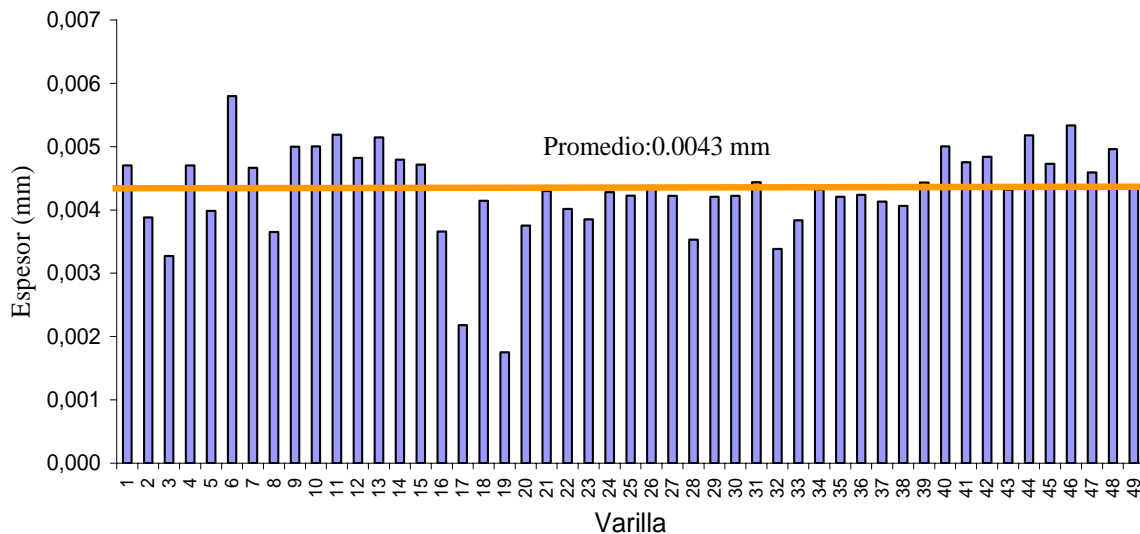
Igualmente, se presenta el tiempo de caducidad que se obtuvo después de haber analizado coliformes totales en diferentes intervalos de tiempo, y esto será un indicativo del tiempo en que se puede consumir el agua sin peligro a contraer alguna enfermedad.

### **I. Resultados de la inmovilización de $\text{TiO}_2$ sobre varillas de vidrio.**

Se inmovilizaron 49 varillas con dióxido de titanio  $\text{TiO}_2$  por el método de Dip-Coating, se registró el peso inicial y final de cada una de las varillas y por diferencia de pesos se obtuvo la cantidad de  $\text{TiO}_2$  inmovilizado y además se determinó el espesor logrado para cada una de las varillas.



Con base en los resultados obtenidos del  $\text{TiO}_2$  inmovilizado sobre las varillas de vidrio, se obtuvo un espesor promedio de  $\text{TiO}_2$  de 0.0043 mm. En la figura 2 siguiente se observa el espesor obtenido en cada varilla.



**Figura 2.** Espesor de la capa de dióxido de titanio inmovilizado sobre varillas

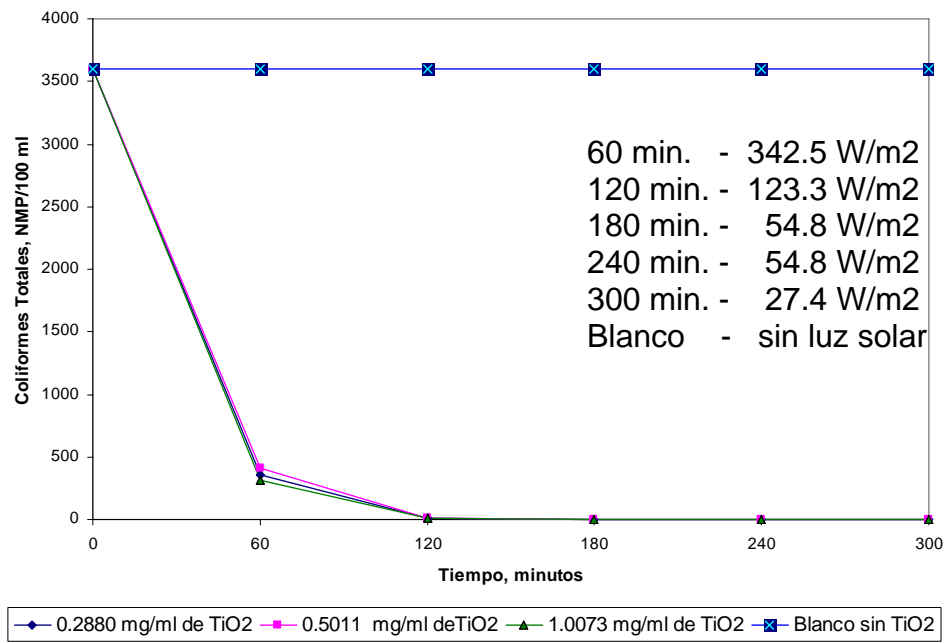
### **II. Resultados de la desinfección solar con diferentes concentraciones de $\text{TiO}_2$**

Después de tener las varillas fijadas con  $\text{TiO}_2$  se procedió a colocarlas en reactor *batch* que consistió de botellas de PET de 2.5 litros de volumen (Figura 3). A cada botella se le adiciono tres cuartos del agua en estudio y se agitó vigorosamente, posteriormente se llenó de agua y finalmente fueron expuestas al sol, durante diferentes intervalos de tiempo se tomaron muestras de agua y se le determinaron la temperatura, coliformes totales y fecales.

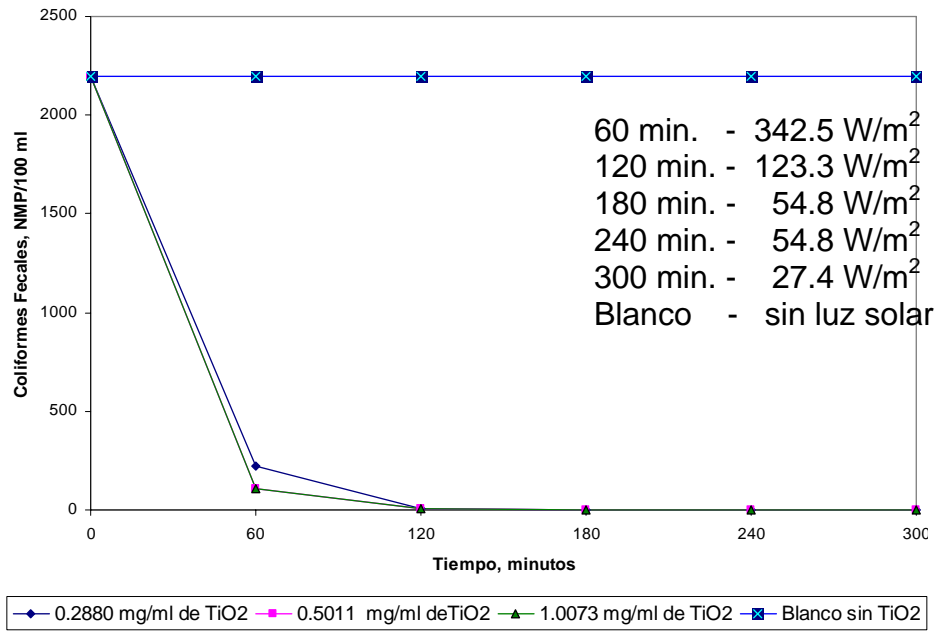


**Figura 3.** Reactor batch con varillas de vidrio fijas con  $\text{TiO}_2$

Se utilizaron tres concentraciones diferentes de  $\text{TiO}_2$  : 0.2880, 0.5011 y 1.0073 mg/ml. Los resultados promedios obtenidos de coliformes fecales y totales para cada una de las muestras se observan en las siguientes figuras 4 y 5. Cabe señalar que cada experimento se realizó por triplicado y sólo se muestran los resultados promedios. Es importante destacar que la mitad de la botella fue pintada de negro para incrementar la intensidad de radiación del sol.

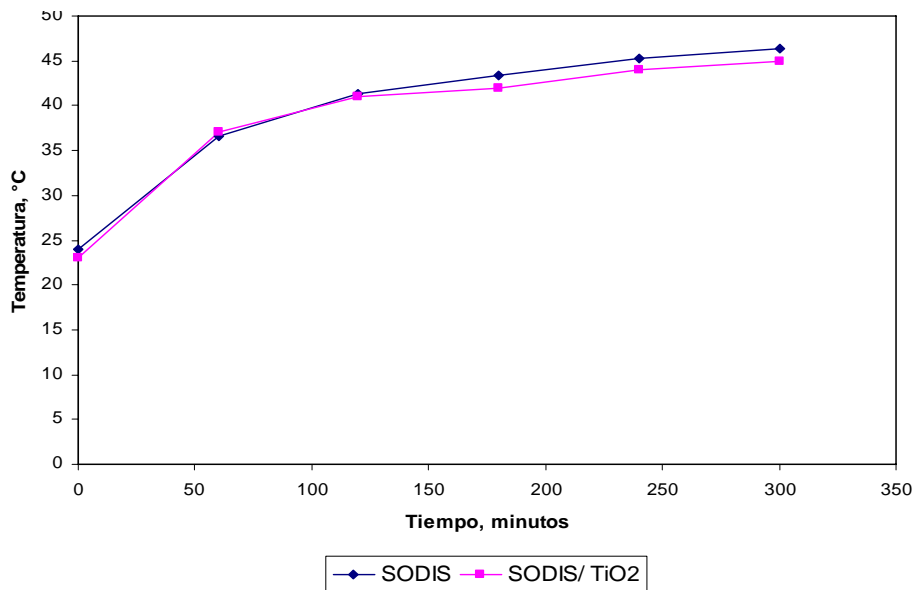


**Figura 4.** Inactivación de coliformes totales en función de la concentración de  $\text{TiO}_2$



**Figura 5.** Inactivación de coliformes totales en función de la concentración de TiO<sub>2</sub>

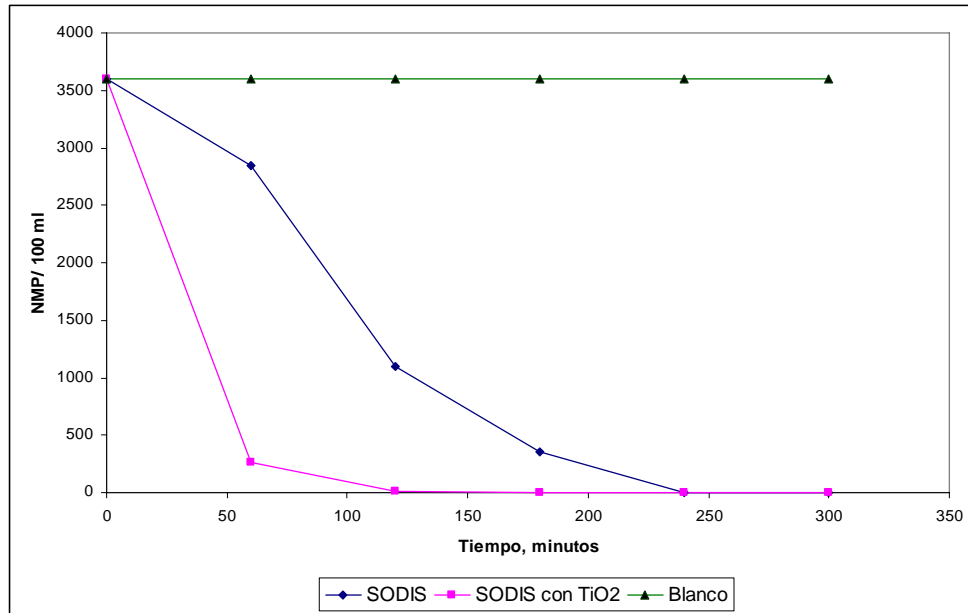
Con base en los resultados obtenidos se tiene que, muy independientemente de la concentración de dióxido de titanio utilizado y al tener el agua una temperatura por encima de 43°C en combinación con las varillas fijadas de dióxido de titanio, los coliformes totales y fecales ya tenían valores por debajo de 1.1 NMP/100 ml, y esto da cumplimiento a la normatividad mexicana: NOM-127-SSA1-1994 (Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización", respecto a la calidad microbiológica), que establece como límite máximo permisible; ausencia o No detectable.



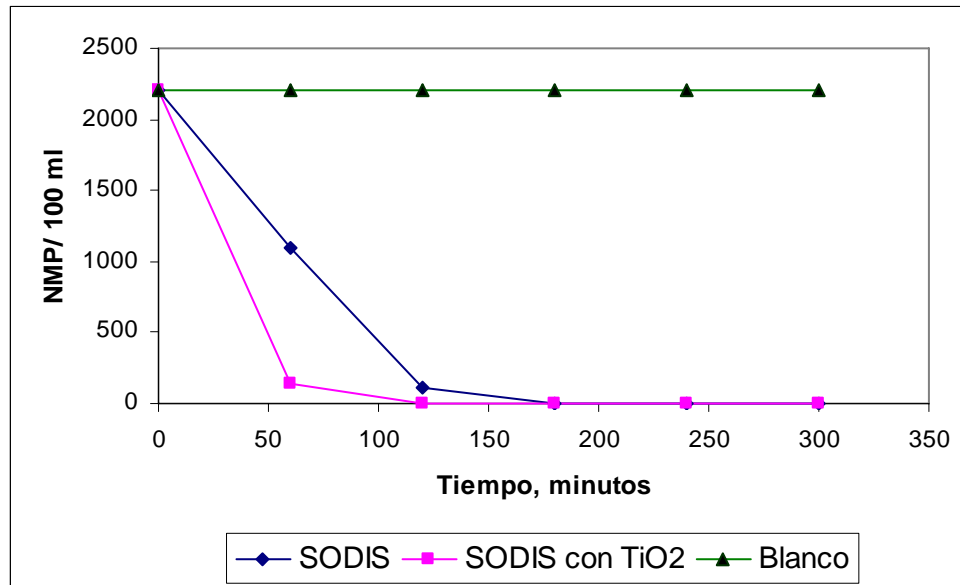
**Figura 6.** Variación de temperaturas realizadas en diferentes días.

### III. Resultados de la comparación de la velocidad de inactivación de coliformes totales y coliformes fecales usando SODIS y SODIS/TiO<sub>2</sub> inmovilizado.

En la figura 6 se observa que no hubo una gran variación de temperaturas, pero esto se debe a que todas las pruebas fueron realizadas durante los meses de junio y julio del 2005.



**Figura 7.** Comparación de la inactivación de coliformes totales entre SODIS y SODIS/TiO<sub>2</sub>

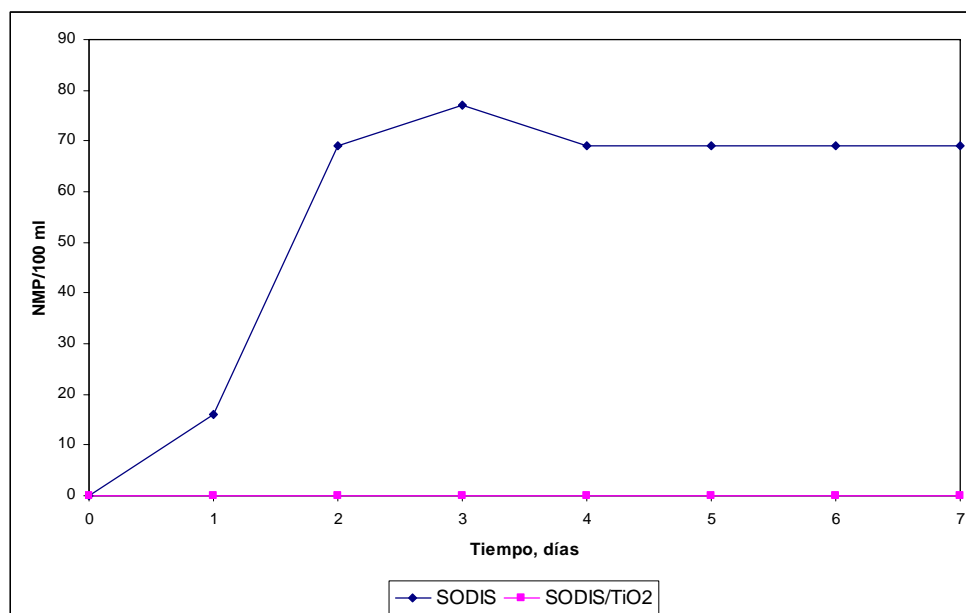


**Figura 8.** Comparación de la inactivación de coliformes fecales entre SODIS y SODIS/TiO<sub>2</sub>



#### IV. Resultados del recrecimiento de coliformes totales en el proceso SODIS y SODIS con TiO<sub>2</sub>

En la figura 7 y 8 se observa que la velocidad de inactivación de coliformes totales y fecales es mayor con el método de SODIS con TiO<sub>2</sub> en comparación con el proceso SODIS tradicional.



**Figura 9.** Determinación de recrecimiento de coliformes fecales entre SODIS y SODIS/TiO<sub>2</sub>

Finalmente los resultados mostrados en la figura 9 demuestran que el método de SODIS con TiO<sub>2</sub> mantiene por siete días el agua en condiciones aptas para consumir en cambio el método de SODIS tradicional se presentó un recrecimiento de coliformes, con 5 horas de tratamiento, por lo que se recomienda hacerlo por seis o más horas para evitar este efecto.

### CONCLUSIONES

- Al aplicar el método Dip-Coating para cubrir las varillas con TiO<sub>2</sub> resultó uniformidad en el espesor en promedio 0.0043 mm en doce repeticiones de la impregnación de varillas.
- Al utilizar estas varillas con la prueba para desinfectar el agua a diferentes concentraciones de TiO<sub>2</sub> (0.288, 0.5011 y 1.0073 mg/ml) se observa que no hay una diferencia significativa ya que en todas las concentraciones a las 2h de exposición solar el resultado en coliformes totales y fecales dan como resultado un valor menor a 1.1 NMP /100 ml.
- Con la prueba comparativa del efecto de utilizar SODIS y SODIS con TiO<sub>2</sub>, se concluye que, al utilizar el foto-catalizador, el proceso de desinfección es más

eficiente que el SODIS convencional. En la inactivación de Coniformes totales se requieren de 2 h para SODIS con  $\text{TiO}_2$  y para SODIS de 4 h, esto representa un 50% menor en el tiempo de exposición solar para desinfectar el agua.

- Utilizar SODIS con  $\text{TiO}_2$  también garantiza que cuando se almacena el agua por un periodo de siete días no hay recrecimiento de coliformes totales. Como puede suceder con SODIS convencional.

## REFERENCIAS

Blanco J., Malato S., M.I. Maldonado, O. Fernández I., A. Campos (2000), Optimising solar photocatalytic mineralization of pesticides by adding inorganic oxidising species; application to the recycling of pesticide containers, *Applied Catalysis B: Environmental*, 28 ;163-174.

Carey D. Walter, Soo-Voon Len and Brita Sheehan (2004), Development and Evaluation of Reflective Solar Disinfection Pouch for Treatment of Drinking Water, *Applied and Environmental Microbiology*; 70:2545-2550.

Comisión Nacional del Agua (2004) Estadísticas del agua en México, segunda edición, Pág. 7-139.

EPA-Environmental Protection Agency (1998). *Advanced Photochemical Oxidation Processes Handbook*, U.S. Office of Research and Development. U.S. Government Printing Office: Washington, DC; EPA/625/R-98/004.

Guillard C., Jean D., Christine M., Joseph D., Sixto M., Julián B., Manuel M., Jean M. H.(2003), Solar efficiency of a new deposited titania photocatalyst: chlorophenol, pesticide and dye removal applications, *Applied Catalysis B: Environmental* 46 (2003) 319–332.

Kehoe S.C., T.M. Joyce, P. Ibrahim, J.B. Gillespie, R.A. Shahar and K.G. Mcguigan, (2001), effects of agitation turbidity, Aluminium Foil Reflector and Container Volume on the Inactivation Efficiency of Batch–Process Solar Disinfectors, *Pergamon*; 35:1061-1065.

Kim G., Joseph R., Stephen Q. (2004), *Photocatalytic Reaction: designing a Waste water remediation plant*, UCSD, University of California, San Diego.

Malato S., Julián B., Alfonso V., Christoph R. (2002), Photocatalysis with solar energy at a pilot-plant scale: an overview, *Applied Catalysis B: Environmental*, 37;1-15.

Organización de las naciones unidas (ONU), (2000), Reporte completo de la declaración del milenio, capítulo 5, Un futuro sostenible, declaración 278, 279 y 281.

Sánchez-Pérez HJ, Vargas-Morales MG, Méndez-Sánchez JD,(2000), Bacteriological Quality of drinking water in areas of high levels of poverty in Chiapas, México , *Salud Publica Mex.*; 42:397-406.

Sommer B., A. Mariño, Y. Solarte, M.L. Salas, C. Dierolf, C. Valiente, D. Mora, R. Reshsteinar, P. Setter, W. Wirojanagud, H. Ajarme, A. Anisan, and M. Wegelin., (1997), SODIS, an emerging water treatment process, *Aqua*, 46:137-137.

WHO (2001), *Water for Health taking charge* World Water Day Report, Cap. 4, Pág 22-23