

Desinfección de agua mediante energía solar en un reactor tipo piscina

Juan Rodríguez^{1,2} jrodriguez@ipen.gob.pe, Javier Palomino³ jgpalominog@hotmail.com, Edward Carpio², José Díaz², Joel Pérez⁴, Alcides López^{1,2} alopez@ipen.gob.pe, Pedro Zanabria³, José Solís^{1,2} jsolis@ipen.gob.pe, Walter Estrada^{1,2} westrada@ipen.gob.pe

¹ Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima, Perú

² Universidad Nacional de Ingeniería, P.O. Box 31-139, Av. Túpac Amaru 210, Lima, Perú

³ CECADE

⁴ ROTOPLAS

Resumen

En este trabajo se muestran los estudios de desinfección y descontaminación solar de agua contenida en envases de plástico diseñados específicamente como un reactor que utiliza el efecto combinado de la banda ultravioleta-A (310 - 400 nm) y la descontaminación basada en la tecnología avanzada de oxidación denominada fotocatalisis heterogénea con óxido de titanio. Los resultados obtenidos en los análisis de propiedades de descontaminación y desinfección solar de agua en este nuevo tipo de reactor han mostrado resultados promisorios para el tratamiento de agua en zonas rurales, lográndose tratar hasta 200 L en un día de tratamiento.

Abstract

Water disinfection was reached by using solar radiation. It uses the effect of the UV-A component of the solar radiation (310 – 400 nm) impinging onto a specific designed reactor and driving two effects for bacteria inactivation, the so called photolysis and photocatalysis. Designed system works under bath conditions, it was optimized under laboratory conditions and tested on site. Preliminary results indicate us that is possible treat volumes of the order of 200 L in just one day.

1. Introducción

La tecnología de desinfección solar de agua “SODIS” [1-7] se basa en la exposición al sol por algunas horas de botellas de plástico conteniendo el agua contaminada a potabilizar. Los rayos solares actúan contribuyendo con la radiación UV-A (310 – 400 nm), para la cual el agua es completamente transparente mientras que es muy absorbente de la radiación infrarroja. La tecnología SODIS viene siendo aplicada con éxito en zonas rurales de diversos países de la región, pues asegura una reducción importante de la carga microbiana, sin embargo se ve limitada por los bajos volúmenes de tratamiento. Por otro lado la fotocatalisis Heterogénea (FH) [8-18] pertenece al grupo genérico de métodos de purificación de aguas conocidas como Tecnologías Avanzadas de Oxidación (TAO). Estas buscan transformar (oxidar) cuantitativamente la materia orgánica a dióxido de carbono y otros compuestos simples, logrando así su mineralización completa. La FH usa partículas de TiO₂, un semiconductor que absorbe la componente UV del sol (con longitud de onda menor que 400 nm) y genera centros oxidantes altamente reactivos que, además de destruir los contaminantes químicos, promueven también la eliminación de los agentes

patógenos. La inmovilización del fotocatalizador sobre esferitas de sílice u otro material conveniente, permite su fácil recuperación luego del tratamiento. Utilizando la irradiación solar como fuente de energía en este trabajo se reporta la validez de la tecnología SODIS para la desinfección de agua en zonas rurales de Lima [15] y Cusco, descontaminado agua utilizando la tecnología FH [16,18].

1.1 Aguas utilizadas

Para los estudios de laboratorio se utilizaron aguas de consumo humano corresponden al pozo de Trapiche en el distrito de Comas km 22 de la Av. Túpac Amaru al Norte de Lima, las cuales fueron contaminadas con E-colis cultivadas. En este caso 40 litros de estas aguas fueron inoculadas con la cepa de *Escherichia coli* ATCC 25922 entre 10⁻³ a 10⁻⁴ ufc/ml (ufc: unidades formadoras de colonia) y se distribuyeron en cada uno de los recipientes, la toma de muestras se realizó cada hora durante un periodo de 3 a 4 horas. El horario escogido para la experiencia fue de preferencia entre las 10:00 am y las 15:00 pm. En la segunda parte de la investigación se trabajó con aguas del río Yaurisque.



Figura 1. Entrada al poblado de Yaurisque, una de las zonas en donde se implementó el prototipo de desinfección solar.

El río Yaurisque, Fig. 2, situado en el Distrito de Yaurisque en el Cusco, presenta contaminación de sus aguas debido a actividades antropogénicas.



Figura 2. Río Yaurisque cuyas aguas contaminadas se investigaron.

2. Técnicas experimentales

2.1 Medidas bacteriológicas

La caracterización bacteriológica del agua se realizó utilizando el Equipo para prueba de agua OXFAM – DELAGUA (Universidad de Surrey y Oxfam). Este equipo utiliza para la cuantificación de los coliformes totales, el método de filtración de membrana, el medio de cultivo utilizado es caldo Lauril Sulfato y la membrana es de la marca Oxoid. Se realizaron diluciones de 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} y 10^{-4} , tomándose para el trabajo las últimas tres diluciones. Una vez filtradas las muestras, las membranas son colocadas en placas petri que contienen el medio de cultivo y son incubadas a $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas. Se realizaron las lecturas y cuentas de ufc/ml de las Bacterias.

2.2 Medidas fisicoquímicas

Para realizar las medidas espectrofotométricas se utilizó un espectrofotómetro Perkin Elmer Lambda 10, con rango entre 200 y 1200 nm. La radiación solar global se midió con un radiómetro construido en nuestro laboratorio y equipado con un sistema remoto de adquisición de datos. La medida de la radiación solar UV-A (310 –400 nm) se realizó con un radiómetro UDT-268. La medida de la temperatura se realizó con un termómetro de mercurio y para los análisis por activación neutrónica se utilizó el Reactor Nuclear RP-10 y un espectro fotómetro de rayos gamma del Centro Nuclear RACSO.

3. Procedimiento Experimental

3.1 Estudio de la Transmitancia óptica del agua en el rango UV-A

Se sabe que el agua es altamente transparente por encima de los 200 nm hasta el infrarrojo cercano, sin embargo las partículas suspendidas en su volumen, hacen que cierto porcentaje de la radiación incidente sea dispersado y absorbido, con un resultado efectivo de la reducción del porcentaje de su transmitancia óptica. Para evaluar el porcentaje de luz ultravioleta en el rango A: (310-400 nm) que se transmite el agua como función de la altura, se usó un envase opaco con base transparente y se hizo la medida de la transmitancia en el rango UV-A

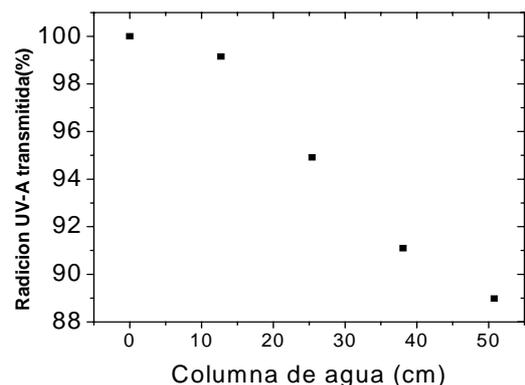


Figura 3. Transmitancia en la banda UV-A dependiendo de la altura de una columna de agua.

La figura 3 muestra los resultados y se observa que la transmitancia UV-A ha decrecido un 12 %. Eso implica que el poder bactericida del sol, que es asociado al espectro UV-A, ha decrecido el 12 % en 50 cm de una columna de agua. Mayores valores de turbidez harán que la transmitancia de la radiación solar

disminuya, por lo que el estudio se viene realizando actualmente.

4. Resultados de la evaluación de la desinfección solar de E-coli en agua

Con el objetivo de analizar las condiciones bajo las cuales la degradación bacteriana pueda llevarse a cabo, se realizaron diferentes análisis, entre los que se analizó la influencia del catalizador, soportado y no soportado, con y sin flujo; los cuales pasamos a detallar.

4.1 Influencia de un fotocatalizador colocado en la base y con agua en reposo

Se usó dos tanques con 9 litros de agua cada uno e inoculados con 4.05×10^5 ufc/ml de Coli, la altura que ocupa este volumen fue 15.5 cm, un recipiente contenía en su base un catalizador de celulosa soportando al óxido de titanio (Ahlstrom) (ver figura 4), el otro no. Se irradiaron durante tres horas bajo el sol, las condiciones de experimentación se muestran en la figura 5 y los resultados en la Tabla 1.

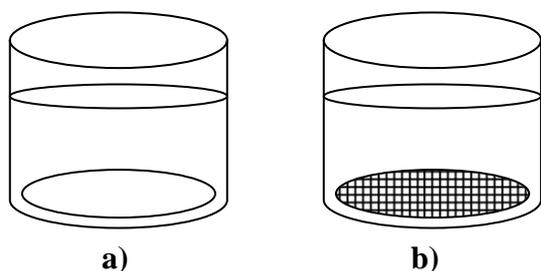


Figura 4. Esquema que muestra la disposición de los tanques, a) sin papel fotocatalizador, b) con papel fotocatalizador basado en TiO_2 .

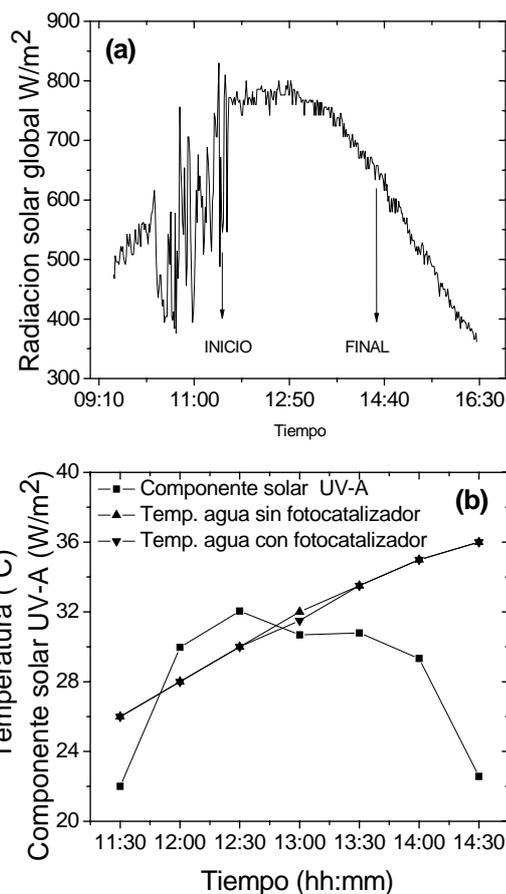


Figura 5. Radiación solar (a) global, (b) componente solar UV-A y temperatura del agua medida durante un experimento de irradiación solar de envases de polietileno con 9 litros de agua contaminada con bacterias.

Tabla 1. Concentración de bacterias como función del tiempo de irradiación. Se muestran también los controles en oscuridad tomados al inicio y al final del experimento.

Tiempo (min)	Con TiO_2 , E-coli UFC/mL	Sin TiO_2 , E-coli UFC/mL
0	2.82E5	2.34E5
180	0	0
Cont. inicial		2.82E5
Cont. final		1.35E5

4.2 Influencia de un fotocatalizador colocado en la base y con agua en circulación

Se usó dos recipientes con 9 litros de agua cada uno e inoculados con E. Coli, de concentración 4.05×10^5 ufc/ml, la altura de este volumen fue 15.5 cm, un tanque contenía papel catalizador Ahlstrom en el fondo, el otro no, se irradiaron durante 4

horas bajo el sol, con flujo recirculante y caudal entre 16 y 19 l/min. Los detalles se pueden apreciar en la figura 6.

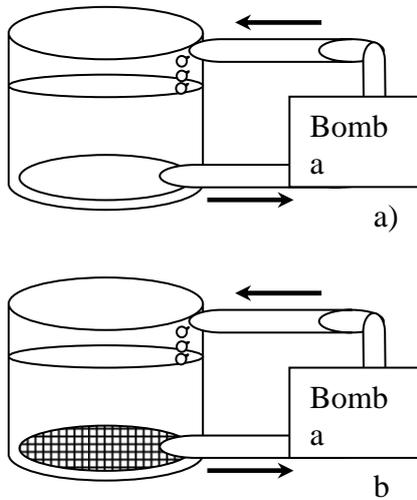


Figura 6. Esquema que muestra la disposición de los tanques recirculantes (a) sin papel fotocatalizador (b) con papel fotocatalizador basado en TiO_2

En este caso los resultados de la degradación bacteriana fueron similares a los observados en el caso anterior. Es decir se observa la desinfección del agua en ambos casos.

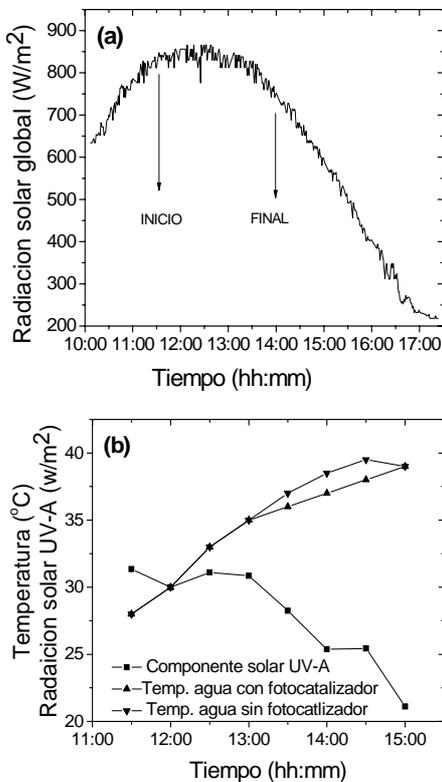


Figura 7. Radiación solar (a) global, (b) componente UV-A y temperatura del agua.

4.3 Influencia de las cubiertas: vidrio y polietileno

El objetivo de este experimento es evaluar la acción de la banda solar UV-A sobre las bacterias, considerando que atraviesa primero una cubierta de vidrio o un film de plástico. Se usaron dos recipientes con 9 litros de agua inoculados con *E. Coli*, de concentración $4.05 \text{ E}5 \text{ ufc/ml}$, la altura que ocupaba este volumen fue de 15 cm en los recipiente que se usaron, se irradiaron durante 4 horas bajo el sol, con flujo de agua recirculante y caudal entre 16 y 19 l/min. Uno de los recipientes tiene doble tapa de vidrio sodo cálcico con un espesor de 2 mm separados 1 cm entre ellos. El otro recipiente tiene como tapa a dos laminas de plásticos separado entre sí.

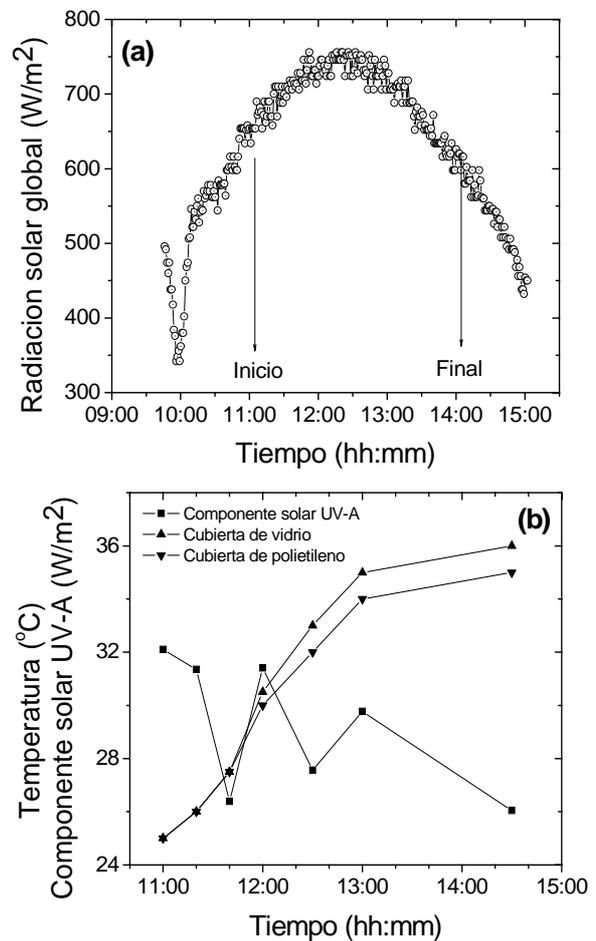


Figura 8. (a) Radiación solar global, (b) componente UV-A y temperatura del agua.

Tabla 2. Concentración de bacterias como función del tiempo de irradiación. Se muestran también los controles en oscuridad tomados al inicio y al final del experimento.

Tiempo (min)	Cubierta de vidrio, E-coli UFC/mL	Cubierta de polietileno, E-coli UFC/mL
0	3.91E5	3.4E5
20	367E5	2.61E5
40	2.13E5	6.0E3
60	7.32E4	2.0E2
90	3.2E4	0
120	1.38E4	0
210	2.14E3	
Cont. inicial		3.66E5
Cont. final		3.79E5

En la Tabla 2 se observan los resultados de las evaluaciones bacteriológicas, se puede notar el efecto positivo de la cubierta de polietileno, frente a la cubierta de vidrio. Ello principalmente debido a su mejor transmitancia óptica en el cercano ultravioleta.

4.4 Influencia de la concentración del fotocatalizador en suspensión

Con el objetivo de evaluar la influencia de fotocatalizador en suspensión, se utilizaron diferentes concentraciones de TiO₂ nanoparticulado Degussa P-25. Se usaron tres recipientes con 5, 10 y 15 cm de altura de agua inoculada con 4.05 E⁵ ufc/ml de E. Coli. Se irradiaron con 30 W/m² de luz ultravioleta UV-A y un flujo de agua de 15 l/min. En este estudio se utilizaron tres concentraciones de nanoparticulas de P-25: 1 ppm, 2 ppm y 3 ppm

Tabla 3. Concentración de bacterias como función del tiempo de irradiación de una columna de agua de 15 cm. Se muestran también los controles en oscuridad tomados al inicio y al final del experimento.

Tiempo (min)	1 ppm	2 ppm	3 ppm
0	437000	480000	472000
10	245000	185000	173000
20	193000	91000	56000
30	7100	3600	2700
40	500	20	80
50	100	0	0
60	80	0	0
Cont. inicial		487000	
Cont. final		425000	

Se puede notar que la concentración de 2 ppm es la mínima necesaria para, bajo estas condiciones, comenzar a obtener la desinfección del agua.

4.5 Evaluación de la influencia del TiO₂ soportado en el polietileno

Nanopartículas de óxido de titanio fueron soportados en una matriz de polietileno. El material compuesto fue caracterizado por microscopía óptica y activación neutrónica para analizar su composición elemental así como su potencial para la inhibición del crecimiento bacteriano en su superficie. Las muestras compuestas por TiO₂ y polietileno fueron caracterizadas por microscopía de luz a baja magnificación para observar sus características morfológicas. En general las muestras de polietileno mostraron una superficie plana, la cual a medida que aumentó la concentración de TiO₂, se incrementó la rugosidad, esto se explica por el incremento de cúmulos de TiO₂ sobre la matriz del polímero, las imágenes se aprecian en la figura 9.

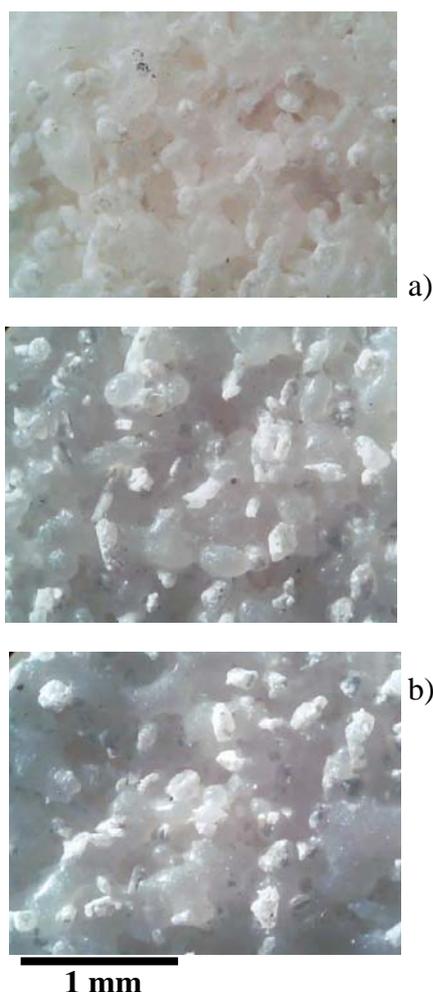


Figura 9. TiO₂ en polietileno. En el material compuesto, se observó un efecto bacteriostático, es decir las bacterias no crecen en su superficie.

4.6 Caracterización por activación neutrónica

La concentración de titanio obtenida por la técnica de activación neutrónica (Tabla 4), difiere ligeramente de los valores de concentración previstos en la fabricación. Este hecho se debe a la aglomeración del fotocatalizador y a factores de segregación de este dentro de la matriz polimérica.

Tabla 4. Cantidad de Ti obtenido por espectrometría de activación neutrónica.

Muestra	preparado	peso de Ti (%)
a	Polietileno	0
b	Polietileno +1% TiO ₂	1.21 ±0.06
c	Polietileno +5% TiO ₂	3.9 ±0.5



Figura 10. Detalle de la cubierta de polietileno implementada en el reactor.

4.7 Implementación y evaluación del prototipo en Yaurisque, Cusco

El equipo optimizado geoméricamente fue construido por la compañía ROTOPLAS (figura 10) y su subsidiaria DALKA y transportado al distrito de Yaurisque provincia de Paruro departamento de Cuzco,

con coordenadas geográficas 13° 40' 1" latitud sur y 71° 55' 16" longitud oeste.

En esta evaluación el volumen considerado fue de 176 litros con un equivalente a 10 cm de altura del tanque reactor rotomoldeado.

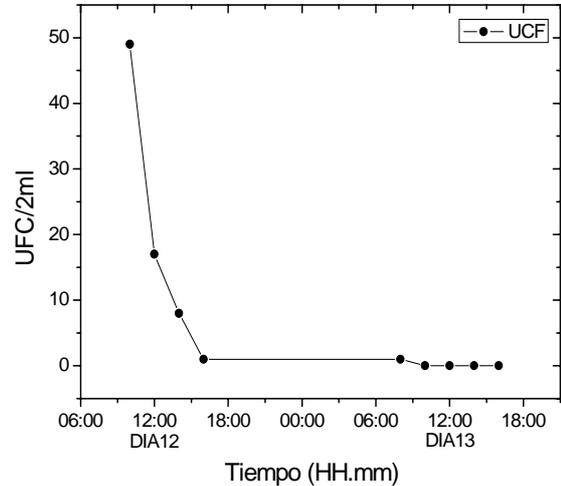


Figura 11. Variación temporal de la concentración bacteriana durante el experimento de desinfección de agua con irradiación solar realizado el 12 de Noviembre del 2005.

4.8 Medidas de la radiación solar a lo largo del año

Como una forma de evaluar la factibilidad de utilizar la tecnología propuesta para la desinfección de agua en la ciudad de Lima se hizo una medida sistemática de la radiación solar en la ciudad de Lima a partir del 01 de Enero del 2005. En la Fig. 12 se muestra la radiación solar global al medio día, se observa que la intensidad de la radiación solar muestra una función que alcanza su máximo a fines de enero, para luego disminuir de manera consistente a medida que avanzan los meses

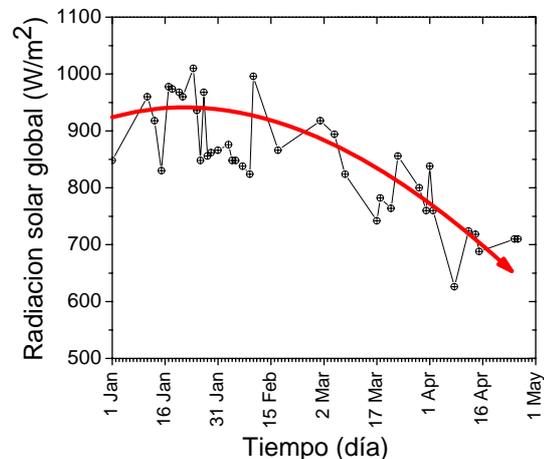


Figura 12. Variación de la radiación solar promedio al medio día en la ciudad de Lima.

5. Conclusiones

De los resultados obtenidos se desprende que en todos los experimentos realizados hubo decrecimiento bacteriano del agua analizada por efecto de la irradiación solar. La temperatura del agua alcanzada en nuestros experimentos no es un parámetro relevante e incluso puede ir a favor de la activación bacteriana ya que alcanza valores cercanos a los ideales para su incubación, sin embargo la radiación solar de la banda UV-A es sumamente importante.

La inclusión del catalizador como material compuesto en la matriz polimérica hace que esta se comporte como un inhibidor efectivo del crecimiento de bacterias en su superficie. La desinfección completa de agua se logró en un sistema bajo irradiación solar durante un día claro. El óxido de titanio como fotocatalizador soportado sobre celulosa o polietileno (Conc. $3.9 \pm 0.5\%$), no ha mostrado una eficiencia mayor que la sola irradiación solar para la desactivación de la E-coli en agua, pero su poder bactericida está en evidencia al limitar el desarrollo de pseudomonas y evitar el crecimiento de estas en su superficie.

En casos en que se utiliza el fotocatalizador en suspensión, 2 ppm de nanopartículas de TiO_2 son suficientes para llegar a la desinfección del agua en 1 h. En el estudio en campo del prototipo de reactor de desinfección de agua con irradiación solar, con capacidad mayor a 350 litros de agua, se ha logrado una disminución radical de la concentración de bacterias en el agua. Sin embargo estudios que permitan analizar el recrecimiento bacteriano o la reactivación en oscuridad son necesarios para dilucidar su potencialidad.

6. Agradecimientos

A la Ing. Blanca Torres y Pablo Mendoza por las medidas por activación neutrónica.

7. Bibliografía

[1] A. Acra, Z. Raffoul y Y. Karahagopian, "Solar disinfection of drinking water and oral rehydration solutions", *UNICEF, S.A.L.*, Beirut, Lebanon (1984).
[2] S. Arafa y M.C. Cotis, "Solar disinfection for rural communities" *Taller en Brace Research Institute*, 15-27 de Agosto, Quebec, Canadá, (1988).
[3] B. Sommer, "Solar water disinfection: impact on vibrio cholerae and faecal coliforms", *Taller CINARA*, Universidad del Valle, Cali, Colombia y EAWAG/SANDEC, Duebendorf, Switzerland (1995).

[4] EAWAG-SANDEC, "Water & sanitation in developing countries", <http://www.sodis.ch>.

[5] M. Wegelin, , *EAWAG News*, 48 September (2000) 11-12

[6] "¿Con que tipo de botellas se puede hacer SODIS?", *Desinfección solar de agua SODIS*, 8 (2004) 7,8.

[7] P. Galarza, E. Sánchez, D. Maurtua, J. Rodríguez, *et al.* "Desinfección Solar de Aguas en Tambo Pariachi, Huaycán, Lima, Perú", Cap. 3 en *Desinfección de aguas en comunidades rurales de America Latina*, Ed. *Marta Liter y Hector Mansilla*, Bs. As. (2003).

[8] P. Zúñiga, J. Rodríguez, S. Ponce, J. Solís y W. Estrada, "Degradación fotocatalítica de fenol con nanopartículas de óxido de titanio soportadas en una matriz de polidetil-siloxano", a publicarse en las *memorias del X Simposio Peruano de Energía Solar*, 17-22 Nov. (2003).

[10] M.R. Hoffmann, S.T. Martin, W. Choi, D.W. Bahnemann, *Chem. Rev.*, 95 (1995) 69.

[11] D. Bahnemann, J. Cunningham, M.A. Fox, E. Pelizzetti, P. Pichat, *et al.* "Aquatic and Surface Photochemistry", *G.R. Helz, R.G. Zepp, D.G. Crosby* (editores), Lewis Publ., Boca Raton, Florida, (1995) 261.

[12] D.F. Ollis, E. Pelizzetti y N. Serpone, "Photocatalysis Fundamentals and Applications", *N. Serpone y E. Pelizzetti* (editores), *Wiley Sons*, N.Y., USA (1989).

[13] D.F. Ollis y H. Al-Ekabi (editores), "Purification and Treatment of Water and Air", *Elsevier, Amsterdam*, (1993).

[14] A. Fujishima, K. Hasimoto, T. Watanabe, en "TiO₂: Photocatalysis, Fundamentals and Applications", *A. Donald, Y. Kitamura y N. Tamaki* (editores), *BKC*, Tokyo, Japón, (1999).

[17] E. Carpio, P. Zúñiga, S. Ponce, J. Solís, J. Rodríguez and W. Estrada, "Photocatalytic degradation of phenol using TiO₂ nanocrystals supported on activated carbon". *J. Catalysis A. Chemical*, 228 (2005) 293.

[18] E. Marchand, "Microorganismos Indicadores de la Calidad del Agua de Consumo Humano en Lima Metropolitana". Lima, UNMSM. *Tesis para optar el Título Profesional de Biólogo con mención en Microbiología y Parasitología*. (2002).