

DESINFECCIÓN DE AGUA CON PROCESOS FOTOCATALÍTICOS: ESTADO DEL ARTE Y PERSPECTIVAS

L. E. MORA, J. SANABRIA

Universidad del Valle. Cali
Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente EIDENAR
Grupo de Procesos Avanzados de Oxidación para Tratamientos Químicos y Biológicos GAO,
luismora@univalle.edu.co; gaiox@univalle.edu.co.

Fecha Recepción: 12 de Agosto de 2006
Fecha Aceptación: 10 de Septiembre de 2006

RESUMEN

El deterioro de la calidad de las fuentes superficiales de agua y la carencia de desinfección ejercen un alto impacto en la mortalidad infantil en los países en vía de desarrollo. La aplicación de fotocatalisis con fines de desinfección se remonta a las últimas décadas del siglo XX, se emplea principalmente dióxido de titanio (TiO_2) en su forma anatasa, el cual es un semiconductor que al excitarse con luz cercana a la ultravioleta genera especies químicas altamente reactivas que pueden inactivar microorganismos y degradar materia orgánica incluso hasta su mineralización. Parte de la investigación básica se ha dedicado a elucidar los mecanismos microbicidas de esta tecnología que se relacionan con alteraciones estructurales, interrupción de procesos metabólicos y daño al material genético. Los estudios *in vitro* emplean a *E. coli* como modelo y en menor medida a otros microorganismos, el trabajo sobre matrices sencillas ha permitido identificar las principales interferencias en la reducción bacteriana como el papel de ciertos iones y de la materia orgánica presente. El diseño de reactores fotocatalíticos requiere incluir un componente óptico para el aprovechamiento de la radiación y el uso de un catalizador suspendido o inmovilizado además de los parámetros empleados en el diseño de reactores químicos convencionales. Los reactores denominados colectores parabólicos compuestos han mostrado el mejor desempeño. Las experiencias en plantas piloto son muy recientes pero promisorias y buscan optimizar las condiciones de operación, empleando nuevos catalizadores o sus mezclas, mejorando el aprovechamiento de la radiación y reduciendo los costos con el fin de optimizar las eficiencias y de evaluar la sostenibilidad de esta tecnología.

Palabras Claves: Desinfección, Fotocatalisis, TiO_2 , *E. coli*, Colector Parabólico Compuesto (CPC).

INTRODUCCIÓN

Como resultado de las actividades humanas y del acelerado crecimiento demográfico en América Latina y el Caribe se ha generado un deterioro progresivo de la calidad de las fuentes naturales de agua; los desechos descargados contienen y propician el desarrollo de una gran diversidad de organismos patógenos, incluyendo virus, bacterias, protozoos, hongos y huevos de helmintos. Las enfermedades transmisibles por agua afectan principalmente a los países en desarrollo donde tiene una participación importante en la pérdida de años de vida saludable^[1]; se reportan 4 billones de casos de diarrea al año que generan más de dos millones de muertes, principalmente en niños menores de 5 años^[13]. La Organización Panamericana de la Salud determinó para 1984 que la desinfección del 75% de los sistemas de agua de los municipios y comunidades de América Latina y el Caribe es inadecuado o inexistente, se calculó que más del 90% de los pueblos y aldeas con menos de

10 mil habitantes carecían totalmente de sistemas de desinfección^[14].

Desde una perspectiva netamente microbiológica, la calidad del agua para consumo se evalúa mediante la estimación de poblaciones de bacterias indicadoras cuya presencia puede ser indicio de la existencia de otros patógenos que son de interés en la salud pública, se han empleado microorganismos entéricos como indicadores clásicos que incluyen a *Escherichia coli*, coliformes totales y fecales.

Los procesos basados en fotocatalisis han sido incluidos en el grupo de las nuevas tecnologías denominadas procesos de oxidación avanzadas (AOP), estos procesos se caracterizan por la presencia de un catalizador, que es una sustancia química que incrementa la velocidad de reacción y reduce la energía de activación. Estos procesos se han desarrollado como una alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas con sustancias recalcitrantes, no obstante se ha demostrado su potencial para aplicación en procesos de

desinfección. El presente artículo presenta una revisión de los aspectos más relevantes en la aplicación de la fotocatalisis a estos procesos, abordando la temática desde los fundamentos y la investigación básica para llegar a las experiencias en la implementación a escala piloto junto con las perspectivas de la tecnología.

ANTECEDENTES DE DESINFECCIÓN CON FOTOCATÁLISIS

El uso de la fotocatalisis para destruir compuestos orgánicos se remonta la década de los años 70, en muchas de las aplicaciones se emplea dióxido de titanio (TiO_2) generalmente bajo la formulación P-25, la cual está formada mayoritariamente por la forma cristalina anatasa. El espectro de energía de los electrones en un cristal está formado por grupos de estados llenos de energía y estados carentes de ella, los cuales se denominan bandas de valencia y conducción respectivamente; entre estas bandas existe un rango en el cual no es posible que permanezca un electrón por falta de estados de energía, este rango se denomina *band gap* o ancho de banda óptico y de su valor se dependen las características electrónicas del material. Para el TiO_2 dicho ancho de banda corresponde a 3.2 eV por lo que se comporta como un semiconductor. Este compuesto, bajo excitación con luz cercana a la ultravioleta (<385 nm) genera el salto de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, originando el denominado par electrón-hueco en la superficie del catalizador. El hueco en la banda de valencia puede reaccionar con H_2O o con iones hidróxido adsorbidos en la superficie para producir radicales hidroxilo ($\text{OH}\cdot$); el electrón desplazado a la banda de conducción puede reducir O_2 para producir iones superóxido (O_2^-), tanto los huecos como los $\text{OH}\cdot$ son especies altamente reactivas en contacto con materia orgánica (Rodríguez et al., 2005). La oxidación de compuestos orgánicos se produce por abstracción de hidrógeno o por adición electrofílica a dobles enlaces, generándose radicales orgánicos libres ($\text{R}\cdot$) que reaccionan a su vez con moléculas de oxígeno, formando un peroxiradical, e iniciándose una serie de reacciones de degradación de moléculas orgánicas, incluso hasta su completa mineralización (CO_2).

En 1985, Matsunaga y col. publicaron uno de los primeros reportes del efecto microbicida del TiO_2 cuando este se iluminaba con luz cercana a ultravioleta (UV) por 60 a 120 min. Este trabajo abrió las puertas a la aplicación de tecnología fotocatalítica para la desinfección de agua potable y para la remoción de bioaerosoles del aire en ambientes confinados. Trabajos posteriores trataron

de identificar los mecanismos responsables de la desinfección. Matsunaga y col. (1988) propusieron que el efecto microbicida estaba relacionado con alteraciones en la Coenzima A. Saito y col. (1992) plantearon que el TiO_2 causa disrupción de la membrana y la pared celular por la liberación de K^+ intracelular dándose paralelamente la muerte celular. Sunada y col. (1998) describieron el daño en la membrana externa de *E. coli* y encontraron que su endotoxina fue destruida bajo condiciones fotocatalíticas. Kikuchi y col. (1997) propusieron que la formación de H_2O_2 tiene un papel importante en el efecto bactericida a largo plazo. Dunford y col. (1997) identificaron como otra de las causas de la muerte celular el efecto sobre el material genético de los microorganismos. Wamer y col. (1997) detectaron hidroxilación de bases pirimidicas en el DNA. Hidaka y col. (1997) demostraron la descomposición del DNA dentro de unas pocas horas después de la exposición a iluminación (Blake et al., 1999). Huang y col. (2000) reportaron un incremento inmediato en la permeabilidad de la membrana a pequeñas moléculas y la liberación posterior de grandes moléculas como la β -D-galactosidasa luego de 20 minutos de exposición, se propone que el daño a la pared celular tiene lugar en menos de 20 minutos y le sigue un daño progresivo de la membrana citoplasmática y los componentes intracelulares. El efecto bactericida también tiene lugar por pequeñas partículas de TiO_2 que penetran al interior celular. Cho y col. (2004) demostraron que los radicales hidroxilo eran las especies principalmente responsables de la desinfección. En los últimos años la atención también se ha centrado en verificar el efecto celular de los catalizadores sobre los microorganismos [11].

Las primeras aproximaciones para el empleo de la radiación solar en procesos de desinfección se encuentra en la tecnología SODIS o Solar Disinfection, en la cual se emplean recipientes transparentes que se exponen a la radiación solar, lo que les permite absorber las longitudes ultravioleta e infrarrojo, estas producen alteraciones en el material genético de los patógenos e incrementan la temperatura del agua, respectivamente. Esta combinación de efectos contribuye de forma sinérgica a inactivar microorganismos presentes en el agua a tratar, se ha evaluado su efectividad contra *Escherichia coli*, *Vibrio cholerae* y bacteriófagos con buenos resultados. Presenta como limitación de que los volúmenes tratados son pequeños y no reportan ensayos de recrecimiento [26,22,12].

ESTUDIOS *IN VITRO*

Se ha realizado un apreciable número de trabajos a escala laboratorio empleando diferentes configuraciones y tamaños de reactores que incluyen reactores batch con volúmenes entre 10 y 50 mL, reactores de lámpara inmersa y reactores coaxiales; en otras circunstancias se ha fijado el TiO₂ sobre placas de vidrio, tubos de vidrio o sobre superficies plásticas. Como fuente de luz se emplean simuladores solares y generalmente a *E. coli* K-12 como microorganismo modelo.

Estos trabajos han permitido identificar factores de relevancia en los procesos fotocatalíticos, como la interferencia de iones sulfato, nitrato y bicarbonato; la materia orgánica presente en el agua también interfiere con el proceso compitiendo por los espacios activos del catalizador, presentándose menores eficiencias en la inactivación bacteriana a mayor concentración de materia orgánica presente [18,20]. Otro de los fenómenos que se han reportado se relaciona con la denominada reactivación celular, en donde las poblaciones bacterianas expuestas a procesos de fotólisis (estrés por radiación UV) y fotocátalisis consiguen regenerarse por sus mecanismos de defensa al estrés oxidativo hasta alcanzar incluso la misma concentración celular existente al inicio del proceso [17]. Adicionalmente se ha revisado el efecto del TiO₂ sobre virus, bacterias, hongos y protozoos en cultivos puros. Se ha probado la efectividad de la fotocátalisis con TiO₂ en la reducción de otras enterobacterias, de *Pseudomonas* sp., cocos y bacilos gram positivos, levaduras, hongos, bacteriófagos MS2 y PL-1 y poliovirus [2,17]. La inactivación de protozoos es efectiva solo contra sus trofozoitos pero no contra sus quistes (formas de resistencia ambiental). Las esporas de bacilos son igualmente resistentes. En aguas naturales con altos niveles de turbiedad, materia orgánica y otros compuestos químicos, la eficiencia de desinfección disminuye dependiendo en la mayoría de los casos de la complejidad de la matriz de agua a tratar [17,27]. Uno de los aspectos en el cual la investigación se ha enfocado es en encontrar las condiciones óptimas para obtener los mejores resultados en este tipo de desinfección, empleando reacciones tipo Fenton y TiO₂ en suspensión y soportado [16]. Se ha determinado que el incremento en la intensidad luminosa de 400 W/m² a 1000 W/m² aumenta 10 veces la inactivación de *E. coli*, la inactivación es más efectiva en períodos cortos con alta intensidad luminosa que viceversa, la relación entre la velocidad de reacción y la intensidad no siempre es lineal pero se observa proporcionalidad directa cuando se usa solo radiación UV [23].

Las concentraciones de catalizador empleadas para TiO₂ suspendido (en solución coloidal) generalmente oscilan en el rango de 0.1 a 1.0 g/L, altas concentraciones pueden llegar a disminuir la eficiencia puesto que se favorece la recombinación de los pares electrón-hueco, además de dificultar la penetración de la luz por lo que toda la radiación incidente no puede ser aprovechada. El TiO₂ inmovilizado presenta menores tasas de desinfección que el suspendido, entre los factores responsables de esta diferencia se puede incluir: El catalizador soportado disminuye la superficie específica del fotocatalizador accesible a la luz y a las bacterias; se aumenta la recombinación de los pares electrón/hueco generados; aumenta el recorrido de la luz hasta llegar a las capas de TiO₂; cambia la iluminación y difusión de O₂ a través de las capas de TiO₂; el catalizador inmovilizado está menos expuesto a fuerzas de fricción; la distancia media entre las bacterias y el TiO₂ aumenta, además se disminuye la posibilidad de ataque por radical hidroxilo por su tiempo de vida corto; decrece la penetración de partículas menores de 1 micra al interior de las bacterias y no hay daños intracelulares; la geometría del reactor determina la distribución de la luz y su disponibilidad para excitar el catalizador.

ENSAYOS A ESCALA PILOTO

El diseño de reactores fotocatalíticos además de las consideraciones de distribución del flujo, el mezclado y la transferencia de masa involucra cierta complejidad por el uso de catalizadores suspendidos e inmovilizados y por la necesidad de contacto de estos con los reactivos y las células, dado el tiempo de vida corto de los radicales formados. Los requerimientos de exposición del catalizador a la luz y las variaciones de esta en las diferentes latitudes y épocas del año dificulta un poco más la tarea de diseño y optimización. A esto se suma la dificultad de comparar reactores fotocatalíticos entre sí por sus diferencias geométricas a diferentes escalas y por los parámetros y la complejidad del sistema. El parámetro E_{uv} se ha empleado para interpretar los resultados en un reactor solar, esta magnitud estima la energía UV acumulada en el fotorreactor por unidad de volumen tratada para períodos de tiempo durante el experimento, este parámetro se usa para normalizar la dosis de energía requerida en la reacción fotocatalítica para reducir cierta concentración bacteriana y ha permitido comparar configuraciones de reactores [3].

Diferentes tipos de reactores se han ensayado para aplicaciones fotocatalíticas, los resultados más promisorios tanto para descontaminación como para

desinfección los han mostrado los colectores parabólicos compuestos (CPC) ^[10]. Estos reactores surgieron en la década de los 70 para lograr concentrar la radiación solar en dispositivos estáticos (no siguen la trayectoria del sol) a un menor costo. Consisten de una serie de cilindros en vidrio ubicados sobre una superficie reflectante que tiene forma de involuta y que permite concentrar la radiación directa y la difusa que incide dentro del "ángulo de aceptación" ^[3]. La mayoría de trabajos en este campo usan muestras de agua contaminadas artificialmente, muy pocos trabajos se han realizado con aguas de ríos o lagos ^[27,6]. Las experiencias con desinfección solar por fotocatalisis en plantas piloto son recientes y se ha demostrado que la tecnología puede ser económicamente competitiva ^[25,24].

Las aplicaciones en planta piloto han empleado el catalizador en suspensión e inmovilizado (ver tabla 1), sus principales diferencias incluyen el área superficial del catalizador, las tasas de reacción y el consumo de oxígeno. Dentro de las condiciones de operación se reporta que un incremento en el flujo permite alcanzar mayores eficiencias, asumiendo que es un requisito forzar la interacción entre los microorganismos y el catalizador; sin embargo, se ha determinado que la agitación no es crucial en ciertos casos puesto que reactores batch de lecho empacado con TiO₂ soportado en películas delgadas han alcanzado reducciones de 4 Log *E. coli*/ 30 min ^[6].

Tabla 1. Eficiencia de remoción de *E. coli* en reactores fotocatalíticos

Reactor	Catalizador	Capacidad (L)	Volumen iluminado (L)	Superficie iluminada (m ²)	Tasa de recirculación (L/min)	Q _{uv} (kJ/l)	Reducción de <i>E. coli</i> (Log ₁₀ /h)	Referencia
CPC	Suspendido (100 mg/L)	57-90	24	3.08	13-20.5	12	6 Log/ 1.5h	(Rincon & Pulgarin, 2004)
Cilindrico con superficie reflectante en V	Soportado (94 mg/L)	1	0.4	0.057	2.8	7	4 Log/ 60 min	McLoughlin et al., 2004b
Parabólico	Soportado (94 mg/L)	1	0.4	0.042	2.8	7	3.5 Log/ 60 min	McLoughlin et al., 2004b
CPC	Soportado (94 mg/L)	1	0.4	0.057	2.8	Aprox. 7.7	5 Log/ 60 min	McLoughlin et al., 2004b
CPC	Suspendido (3 mg / L)	35	22.4	1.03	20	1.5	4 Log/ 30 min	McLoughlin et al., 2004a
CPC	Suspendido (6 y 9 mg /L)	35	22.4	1.03	20	1.5	3.5 Log/ 25 min	McLoughlin, et al., 2004a
CPC	Soportado (19.3 g /m ²)	11	5.4	0.125 0.25 0.5 0.75	22.5	2	3-3.5 Log/ 60 min	(Fernández et al., 2005)
CPC	Soportado	14	2.27	0.41	2 L/ min	3.6	6 Log/ 90 min	(Sichel et al., 2007)

Se han evaluado otras formulaciones de TiO₂ como el VP Aeroperl® P25/20 el cual es una versión granulada del Degussa P-25 con un tamaño de partícula mayor (20 μm) que permita su separación más fácilmente luego del proceso, sin embargo el peso específico del catalizador lo hace sedimentarse espontáneamente reduciendo la eficiencia del proceso. La formulación Millenium PC-100 tiene casi el doble de área superficial del P-25 y posee un tamaño de partícula de 1,2 μm y puede una eficiencia similar al P-25 por lo que puede ser una

buena alternativa dependiendo de la facilidad con que pueda separarse del agua ^[8].

Trabajos recientes han reportado que el incremento en los flujos ocasiona lesiones mecánicas a las células, Fernández y col (2005) encontraron que la acción de la fotólisis es más pronunciada a un flujo de 22 L/min que a 5 L/min; Sichel y col. (2007) reportaron que para TiO₂ inmovilizado la eficiencia en la remoción tiende a disminuir inversamente al flujo entre 2 y 10 L/min, esto implicaría el uso de equipamiento con menor capacidad y por tanto mayor ahorro de energía.

Fernández y col (2005) evaluaron concentraciones de 0, 25, 20, 200 y 500 mg/L de TiO₂ en suspensión a una tasa de 22,5 L / min y no encontraron diferencias en la remoción de *E. coli*. Se ha revisado el efecto del estrés osmótico en la supervivencia de *E. coli* en agua destilada en reactores CPC, los hallazgos indicaron que al recircular una suspensión bacteriana (10⁴ ufc/mL) en oscuridad por más de 90 minutos se disminuyó el recuento bacteriano en 4 Log/ mL a una tasa de 2 L/min, cuando la suspensión se realizó en solución salina la reducción fue solamente de 0.7 Log/ mL (Sichel et al., 2007).

PERSPECTIVAS

La fotocatalisis es una tecnología que emplea una fuente de energía limpia, gratuita y abundante en el trópico, podría aportar soluciones innovadoras para la desinfección del agua pues posee gran potencial para eliminar microorganismos, microcontaminantes y materia orgánica, así mismo limita la formación de subproductos de desinfección de reconocido efecto adverso para la salud como los trihalometanos. La aplicación de esta tecnología a escala real requiere de la optimización de las eficiencias de remoción que involucran la evaluación de nuevos catalizadores o la aplicación de mezclas de estos (reacciones tipo Fenton junto con TiO₂) que incrementen las velocidades de reacción, el mejoramiento de los reactores, la reducción de costos de los materiales de construcción y la evaluación de la tecnología con las calidades de agua y cepas de microorganismos autóctonos de las regiones con perspectiva de aplicación, para de esta manera identificar los escenarios de aplicación en donde se garantice la sostenibilidad de la tecnología.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal participante del convenio EPFL-UNIVALLE por su apoyo y a los integrantes del grupo GAOX por sus valiosos aportes.

ABSTRACT

The deterioration of the quality of surface water sources and the lack of disinfection have a high impact on infant mortality in developing countries. The implementation of photocatalysis for the purpose of disinfection dates from the last decades of the twentieth century, is mostly used the titanium dioxide (TiO₂) as anatase, which is a semiconductor that excite with ultraviolet light produces chemical

species highly reactive that may inactivate microorganisms to degrade organic matter and even his mineralization. Part of the basic research has been devoted to elucidating the microbicides mechanisms of this technology that are related to structural changes, disruption of metabolic processes and damage to genetic material. In vitro studies employing *E. Coli* as a model to a lesser extent of other microorganisms, work on simple matrix has identified major interference in reducing bacterial as the role of certain ions and organic matter present. The photo-catalytic reactor design requires to add an optical component for the use of radiation and the use of a suspended catalyst or immobilized in addition to the parameters used in the design of conventional chemical reactors. The reactor called compound parabolic collectors have shown the best performance. The experiences in pilot plants are very recent but promising and seek to optimize operating conditions, using new catalysts or their blends, improving the use of radiation and reducing costs in order to maximize efficiencies and to assess the sustainability of this technology .

Keywords: Disinfection, Photocatalysis, TiO₂, *E. Coli* Collector Compound Parabolic

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASHBOLT, N.J. (2004). Microbial contamination of drinking water and disease outcomes in developing regions. *Toxicology* 198 (1-3), 229-238
- [2] BLAKE, D. M.; MANESS, P. C.; HUANG, Z.; WOLFRUM, E. J.; JACOBY, W. A. & HUANG, J. (1999). Application of the photocatalytic chemistry of titanium dioxide to disinfection and the killing of cancer cells. 28: 1-50.
- [3] BLANCO, J. (2005). El reactor fotocatalítico: estado del arte. In: *Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua*, Eds. M. A. Blesa & J. Blanco., Universidad Nacional de San Martín.
- [4] CHO, M.; CHUNG, H.; CHOI, W. & YOON, J. (2004). Linear correlation between inactivation of *E. coli* and OH radical concentration in TiO₂ photocatalytic disinfection. *Water Research* 38(4): 1069-1077.
- [5] FERNÁNDEZ, P.; BLANCO, J.; SICHEL, C. & MALATO, S. (2005). Water disinfection by solar photocatalysis using compound parabolic collectors. *Catalysis Today* 101: 345-352.

- [6] GELOVER, S.; GOMEZ, L. A.; REYES, K. & LEAL, M. T. (2006). A practical demonstration of water disinfection using TiO₂ films and sunlight. *Water Research* 40: 3274–3280.
- [7] HUANG, Z.; MANESS, P.C.; BLAKE, D. M.; WOLFRUM, E. J.; SMOLINSKI, S. L., & JACOBY, W. A. (2000). Bactericidal mode of titanium dioxide photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 130(2-3), 163-170.
- [8] MALATO, S.; BLANCO, J.; CAMPOS, A.; CACERES, J.; GUILLARD, C.; HERMANN, J. M. & FERNANDEZ-ALBA, A. R. (2003). Effect of operating parameters on the testing of new industrial titania catalysts at solar pilot plant scale. *Applied Catalysis B: Environmental* 42(4): 349-357.
- [9] MCLOUGHLIN, O.; FERNÁNDEZ, P.; GERNJAK, W.; RODRÍGUEZ, S. & GILL, L. (2004). Photocatalytic disinfection of water using low cost CPCs. *Solar Energy* 77: 625-633.
- [10] MCLOUGHLIN, O.; KEHOE, S.C., MCGUIGAN, K.G.; DUY, E. F.; TOUATI, F. A., GERNJAK, W.; ALBEROLA, I. O.; RODRÍGUEZ, S. M. & GILL, L. W. (2004). Solar disinfection of contaminated water: a comparison of three small-scale reactors. *Solar Energy* 77: 657-664.
- [11] NADTOCHENKO, V. A.; RINCÓN, A. G., STANCA, S. E. & KIWI, J. (2005). Dynamics of *E. coli* membrane cell peroxidation during TiO₂ photocatalysis studied by ATR-FTIR spectroscopy and AFM microscopy. *J Photochem Photobiol A* 169: 131-137.
- [12] OATES, P. M.; SHANAHAN, P. & POLZ, M. F. (2003). Solar disinfection (SODIS): simulation of solar radiation for global assessment and application for point-of-use water treatment in Haiti. 37: 47-54.
- [13] OMS/JMP. (2000). *Global Water Supply and Sanitation Assessment (GWSSA)2000 REPORT*
- [14] REIFF, F. M. (1996). El estado de la desinfección del agua potable en América Latina y el Caribe. In: *La calidad del agua potable en América Latina y el Caribe*, Ed. G. Craun & R. Castro, ILSi.
- [15] RINCÓN, A. G. & PULGARIN, C. (2004) Field solar *E. coli* inactivation in the absence and presence of TiO₂: is UV solar dose an appropriate parameter for standardization of water solar disinfection? *Solar Energy Photocatalysis* 77(5): 635-648.
- [16] RINCÓN, A. G. & PULGARIN, C. (2006) Comparative evaluation of Fe³⁺ and TiO₂ photoassisted processes in solar photocatalytic disinfection of water. *Appl Catal B: Env* 63: 222-231.
- [17] RINCÓN, A. G. & PULGARIN, C. (2004a) Bactericidal action of illuminated TiO₂ on pure *Escherichia coli* and natural bacteria consortia: post-irradiation events in the dark and assessment of the effective disinfection time. *Appl Catal B Env* 49: 99-112.
- [18] RINCÓN, A. G. & PULGARIN, C. (2004b) Effect of pH, inorganic ions, organic matter and H₂O₂ on *E. coli* K12 photocatalytic inactivation by TiO₂: implications in solar water disinfection. *Appl Catal B Env* 51(3): 283-302.
- [19] RODRÍGUEZ, J.; CANDAL, R. J.; SOLIS, J.; ESTRADA, W. & BLESA, M. A. (2005). El fotocatalizador: síntesis, propiedades y limitaciones. In: *Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua*, Ed. M. A. Blesa & J. Blanco., Universidad Nal. de San Martín.
- [20] SANABRIA, J.; MORA, L. E. & VALENCIA, A. (2006). Efecto de compuestos dihidrobenzénicos en desinfección de aguas por procesos fotocatalíticos. *Memorias Simposio Latinoamericano de Procesos Avanzados de Oxidación*: 141-146.
- [21] SICHEL, C.; BLANCO, J.; MALATO, S. & FERNANDEZ-IBÁÑEZ, P. (2007). Effects of experimental conditions on *E. coli* survival during solar photocatalytic water disinfection. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 189(2-3): 239-246.
- [22] SOMMER, B.; MARIÑO, A.; SOLARTE, Y.; SALAS, M. L.; DIEROLF, C.; VALIENTE, C.; MORA, D.; RECHSTEINER, R.; SETTER, P.; WIROJANAGUD, W.; AJARMEH, H. & WEGELIN, M. (1997) SODIS-an emerging water treatment process. *J. Water SRT - Aqua* 46(3): 127-137.
- [23] SOMMER, R.; HAIDER, T.; CABAJ, A.; PRIBIL, W. & LHOTSKY, M. (1998). Time dose reciprocity in UV disinfection of water. *Water Science and Technology*, 38(12), 145-150.
- [24] VIDAL, A., & DIAZ, A. I. (2000). High performance, low cost solar collectors for disinfection of contaminated water. *Wat. Environ. Res.*, 3, 271-276.
- [25] VIDAL, A.; DIAZ, A. I.; HRAIKI, A. E., ROMERO, M.; MUGURUZA, I.; SENHAJI, F. & GONZÁLEZ, J. (1999). Solar photocatalysis for detoxification and

disinfection of contaminated water: pilot plant studies. *Catalysis Today* 54: 283-290.

[26] WEGELIN, M.; CANONICA, S.; MECHSNER, K.; FLEISHMANN, T.; PESARO, F. & METZLER, A. (1994). Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments. *J. Water SRT - Aqua* 43(3): 154-169.

[27] WIST, J.; SANABRIA, J.; DIEROLF, C.; TORRES, W. & PULGARIN, C. (2002). Evaluation of photocatalytic of crude water for drinking - water production. *J Photochem Photobiol A* 147: 241-246.