



Centro de Aguas y  
Saneamiento Ambiental



Facultad de Ciencias  
y Tecnología

SERIE DE PUBLICACIONES TÉCNICAS N°1

# DESINFECCIÓN SOLAR DEL AGUA, DE LA INVESTIGACIÓN A LA APLICACIÓN



U.M.S.S.



D.I.C. y T.



CONVENIO  
ASDI-UMSS



# Desinfección solar del agua, de la investigación a la aplicación

## CONTENIDO

### PRESENTACIÓN

PRÓLOGO: Un nuevo punto de vista para el acceso al agua segura  
Marcelo Encalada, Matthias Saladin

INTRODUCCIÓN: La Tecnología SODIS

### **SECCIÓN I: El Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental**

La Investigación en el Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental (C.A.S.A.) por Jenny Rojas Céspedes

### **SECCIÓN II: Investigaciones desarrolladas sobre SODIS**

Eficiencia del Método de Desinfección Solar (SODIS) en la Inactivación  
Enterococcus faecalis y Pseudomonas aeruginosa y su Recuperación  
por dos métodos de análisis  
Evelin Urquieta, Mercedes Iriarte

Evaluación de la Eficiencia del Método SODIS  
en la Inactivación de Coliformes Termotolerantes  
en tres Regiones de Bolivia (Valle, Trópico y Altiplano)  
Janette Encinas, Mercedes Iriarte

Evaluación de la Eficiencia de SODIS en la Inactivación  
de Escherichia coli y Colifagos F-RNA macho específicos  
Lizeth Navarro, Mercedes Iriarte

Evaluación de la Eficiencia de Inactivación de  
Tres Especies de Salmonella (Salmonella typhi, Salmonella enteritidis,  
Salmonella typhimurium) por el Método SODIS  
Ruth Jarro, Mercedes Iriarte.

Cálculo de Propiedades Ópticas en los Plásticos PET  
(Polietileno de Tereftalato) para Optimizar el Método SODIS  
Iván Fuentes, Abraham Torrico

Influencia de los Parámetros Físicos en la  
inactivación de Coliformes Termotolerantes  
por la Desinfección Solar del Agua y Evaluación del Potencial  
de SODIS en Cochabamba y Bolivia

Abraham Torrico, Iván Fuentes

### **SECCIÓN III: Aplicación y difusión de la tecnología SODIS.**

Desinfección solar del agua en Bolivia: Proyecto Piloto

Sacabamba y difusión inicial (1996-2000)

Alvaro Mercado, Ana Maria Romero, Olver Coronado

Difusión mundial de la tecnología de SODIS

Regula Meierhofer, Martin Wegelin, Matthias Saladin, Alvaro Mercado

## **PRESENTACION**

La investigación científica en la Universidad, aunque ahora aún una actividad secundarizada debido a otras urgencias y a deficiencias presupuestarias, está llamada a ser, en un concepto kantiano indisoluble de Universidad y de Autonomía (planteado en El Conflicto de las Facultades), una actividad esencial. Vale decir fundamental, como idea de fundamento. En efecto, sólo la investigación científica puede dar sentido a los procesos formativos; más aún, mantenerlos vivos. Con mayor razón la investigación científica deberá acompañar a los procesos de transferencia tecnológica y actividades de innovación, a fin de no hacer de ellos una mera práctica empírica. Planteamos, por tanto, más bien el acompañamiento, si no el ensamblaje, que debe haber entre el laboratorio y el taller, si queremos hablar de Universidad.

La idea anterior, aunque a veces no de manera explícita, salta en varias iniciativas de los Centros de investigación de la Facultad de Ciencias y Tecnología, cuyo nombre mismo conjunciona los elementos de la idea planteada. En particular, el Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental (C.A.S.A), se desenvuelve en esa línea, tal como se puede comprobar en las tres breves partes de la presente edición.

En la primera parte, la Directora del C.A.S.A., MSc. Jenny Rojas C., presenta su Centro, que posee todas las características que indicábamos arriba; ello será corroborado por la segunda parte de la edición, donde jóvenes investigadores exponen sus avances y resultados iniciales en una de las líneas temáticas sobre las que el Centro investiga: la desinfección de agua por radiación solar. Esta línea de investigación es muy especial, como se podrá constatar: aplica técnicas modernas de análisis al agua del pobre, es decir, al agua contaminada, y propone un tratamiento que hasta ahora es accesible al pobre, la radiación solar que aún es para todos; todo ello unido de manera estrecha al área de la salud. Por último, es remarcable el hecho que esta actividad, abierta al servicio de las comunidades de gente humilde, se la realiza bajo Convenio con la Fundación SODIS, lo que facilita el intercambio de conocimiento y experiencias, además del contacto con las comunidades en las que la Fundación se desenvuelve. En resumen, una línea de investigación de alto valor en términos de desarrollo científico y pertinencia social. Algo acerca del método SODIS está planteado en la tercera parte del texto.

Es por ello que la Dirección de Investigación Científica y Tecnológica de la UMSS, por encargo de sus autoridades superiores, se complace en presentar esta edición, felicitando al gran conjunto de actores involucrados por su aporte y trabajo. Al mismo tiempo compromete el apoyo a la socialización y difusión de sus resultados investigativos futuros en esta línea y en otras que son parte de su actividad universitaria.

Dr. Sc. Octavio Chávez Alba  
DIRECTOR DICYT

Cochabamba, Julio 2005

## **PRÓLOGO: Un nuevo punto de vista para el acceso al agua segura**

En el año 1992 en la Cumbre sobre el Desarrollo Sostenible en Johannesburgo, Sudáfrica, se acordaron los Objetivos de Desarrollo para el Milenio (2015). Uno de los objetivos específicos propuestos es disminuir por la mitad el número de personas sin acceso a agua segura hasta el 2015.

Entre 1990 y 2000, en varios países de América Latina se han realizado esfuerzos para incrementar la cobertura de acceso al agua segura. Sin embargo, según informes de la OPS/OMS 2000, en América Latina 76 millones de personas carecen de acceso a agua segura y 53 millones se abastecen a través de sistemas de “fácil acceso” (bombas manuales, piletas públicas y captación de agua de lluvia), que asociado a factores de higiene y de educación sanitaria, representan un riesgo significativo en la salud por la recontaminación del agua, debido al inadecuado almacenamiento y manipuleo antes de su consumo.

La difícil situación financiera que atraviesan los países de América Latina y los costos altos de los sistemas convencionales, han motivado que muchas ONGs dejen de construir sistemas de agua, sumado a otros factores que estarían limitando el poder cumplir la meta.

Actualmente, se puede apreciar que varias ONGs importantes en América Latina han redireccionado sus esfuerzos hacia proyectos que buscan la prevención de la salud, educación y nutrición (desarrollo humano), muchas de ellas han retomado la promoción de métodos de desinfección del agua en el hogar, entre los cuales SODIS ha tenido una buena acogida, y en este momento están ayudando a que miles de familias consuman agua segura.

Por lo expuesto, para cerrar la brecha de la falta de acceso al agua segura de miles de familias en América Latina, se debe buscar alternativas de prevención para aquellas familias que en los próximos 10 años no tendrán acceso a los sistemas convencionales de abastecimiento de agua potable, para lo cual se propone:

Retomar la promoción de la desinfección del agua en el hogar, su manipuleo adecuado y el lavado de manos, con un enfoque hacia el cambio de comportamientos, con miras a “Crear un escudo contra las diarreas”, como una medida de prevención, hasta que lleguen los sistemas de agua convencionales.

Por lo anterior, la Fundación SODIS busca consolidar sus esfuerzos en los países de América Latina a fin de lograr establecer alianzas con los Gobiernos, ONG y organizaciones de la cooperación internacional, para promover estas “soluciones simples” que ayudan a salvar las vidas de las familias más necesitadas.

Como indica la Dra. Gro Harlem Brundtland, Ex Directora General de la OMS, “No podemos darnos el lujo de esperar grandes inversiones en infraestructura para brindar agua segura. No tiene sentido y no es aceptable ignorar las prioridades de los más necesitados”.

Marcelo Encalada  
Director Ejecutivo  
Fundación SODIS  
[mencalada@fundacionsodis.org](mailto:mencalada@fundacionsodis.org)

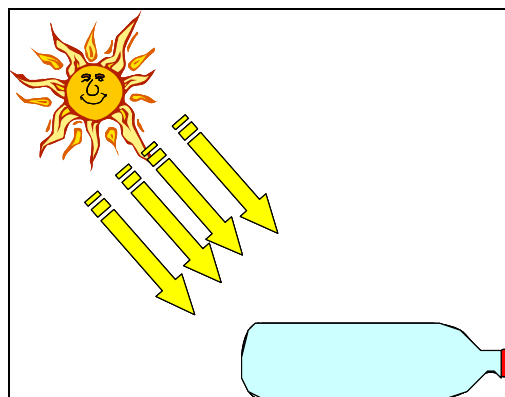
Matthias Saladin  
Director Adjunto  
Fundación SODIS  
[msaladin@fundacionsodis.org](mailto:msaladin@fundacionsodis.org)

# INTRODUCCIÓN

## LA TECNOLOGÍA SODIS

La Desinfección Solar del Agua (SODIS) es una solución simple, de bajo costo y ambientalmente sostenible para el tratamiento de agua para consumo humano a nivel doméstico en lugares en los que la población consume agua cruda y microbiológicamente contaminada.

El método SODIS usa la energía solar para destruir los microorganismos patógenos que causan enfermedades transmitidas por el agua y de esa manera mejora la calidad del agua utilizada para el consumo humano. Los microorganismos patógenos son vulnerables a dos efectos de la luz solar: la radiación en el espectro de luz UV-A (longitud de onda 320-400nm) y el calor (incremento en la temperatura del agua). Se produce una sinergia entre estos dos efectos, ya que el efecto combinado de ambos es mucho mayor que la suma de cada uno de ellos independientemente.



SODIS es ideal para desinfectar agua con baja turbiedad en el hogar. El agua contaminada se coloca en botellas de plástico transparente, las cuales se exponen a la luz solar durante seis horas. La exposición al sol destruye los patógenos. Cuando la nubosidad es mayor de 50%, es necesario exponer las botellas durante 2 días consecutivos para obtener agua segura para el consumo humano. Es posible mejorar la eficacia del tratamiento si las botellas de plástico se exponen a la luz solar sobre superficies reflectoras como calaminas metálicas corrugadas.



Los cinco pasos del procedimiento SODIS

Jenny M. Rojas <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Directora del Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

## **LA INVESTIGACIÓN EN EL CENTRO DE AGUAS Y SANEAMIENTO AMBIENTAL (C.A.S.A.)**

### **INTRODUCCIÓN**

El Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental (C.A.S.A.), unidad dependiente de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Mayor de San Simón, tiene como objetivos principales el de desarrollar investigaciones básicas y aplicadas en el manejo integral del recurso agua, vinculadas al proceso de formación académica de la Facultad; el de prestar servicios de ensayos analíticos en muestras ambientales (aguas, sedimentos y suelos) y servicios de tratamiento de aguas; y el de brindar capacitación, formación y asesoramiento científico-técnico en actividades relacionadas con el medio ambiente y la salud de la población boliviana.

El C.A.S.A. cuenta con personal profesional, en las áreas de Licencia e Ingeniería Química, de Licencia en Biología y de Ingeniería Civil, con cursos de postgrado a nivel de maestría en Ingeniería Ambiental, Ciencias Ambientales, Ingeniería de Recursos Hídricos y Microbiología, incursionando a partir del año 2003 en un programa de Doctorado en el área de metales, con la Universidad Católica de Lovaina, Bélgica.

El Centro tiene una infraestructura nueva, cuya construcción fue financiada por el Banco Mundial (Convenio de Crédito No. AIF 2805-BO). En una extensión de 900 m<sup>2</sup>, cuenta con laboratorios especializados en el análisis y tratamiento de aguas y sedimentos, esto incluye laboratorios de análisis de aguas potables, aguas residuales, microbiología de aguas, laboratorios de trazas inorgánicas, laboratorios de trazas orgánicas, laboratorios de procesos de tratamiento de aguas y laboratorio de Control de Calidad Analítica.

La actividad académica del C.A.S.A. está dirigida a la formación de recursos humanos

en función a sus Líneas de Investigación. A nivel de pregrado, el personal técnico participa en programas de capacitación de las carreras de Ing. Civil, Lic. e Ingeniería Química, Ing. de Alimentos y Lic. en Biología, en la temática de aguas y saneamiento ambiental, a través de cursos, módulos experimentales y laboratorios de investigación (ensayos sistematizados bajo tutoría, durante un semestre a medio tiempo de dedicación). Aproximadamente 200 estudiantes y más de una centena de tesis de pregrado, han participado en estas actividades.

A nivel de post-grado el C.A.S.A. fue parte del comité académico de la Maestría en Ciencias Ambientales, creada el año 1997, la cual fue realizada en tres versiones, formando a 50 profesionales. El año 2000, se creó la Especialidad y Maestría en Ing. Ambiental, de las cuales la segunda versión se encuentra en proceso de finalización. La coordinación académica de la misma, está a cargo de la Dirección del CASA. En esta actividad académica ya han sido capacitados 56 profesionales.

### **LA INVESTIGACIÓN EN EL C.A.S.A.**

El Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental ha superado diferentes etapas de crecimiento y desarrollo de sus actividades:

- Un período de establecimiento de los laboratorios de control de calidad de aguas, en el que se estandarizaron técnicas analíticas básicas, que permitieron, por un lado el monitoreo de la calidad de aguas en el departamento de Cochabamba; y por otro, el inicio de prestación de servicios a la comunidad, a través del análisis de aguas y el estudio de procesos de tratamiento de aguas para consumo humano.
- La incursión en la línea de calidad y tratamiento de aguas residuales, con la estandarización y puesta en marcha de

técnicas de análisis de aguas residuales, que permitieron la evaluación del funcionamiento de plantas de tratamiento de residuos líquidos.

- El desarrollo de programas de capacitación a la comunidad en la temática de calidad de aguas y saneamiento básico.

- Sobre la base anterior el C.A.S.A. ingresa a su actual etapa: el desarrollo sistematizado de investigaciones puras y aplicadas que cualifican su actividad académica al interior de la Universidad, así como la calidad de sus servicios y sus interacciones con el medio.

Un importante impulso a la actividad investigativa del C.A.S.A., fue realizado con el apoyo financiero de la Cooperación Belga, en el marco del convenio UMSS – IUC (Cooperación Inter Universitaria), gracias al cual se trabaja con el apoyo de la Universidad Católica de Lovaina; lo que ha posibilitado, además de un excelente equipamiento de sus laboratorios, el desarrollo de investigaciones con equipamiento adecuado, a nivel de Maestría, en la temática de la contaminación de ecosistemas acuáticos provenientes de la actividad minera, petrolera y agrícola en el país.

Ciertamente la dotación de una moderna infraestructura con el financiamiento del Banco Mundial, permite al C.A.S.A., continuar sus actividades y emprender nuevas, con mayor comodidad, organización y calidad.

En todo este proceso, ha sido también prioritaria la formación y capacitación permanente del personal de investigación del C.A.S.A., a nivel de postgrado, con su participación en calidad de estudiantes y posteriormente de docentes, en los programas de Maestría de Ciencias Ambientales; Especialidad y Maestría en Ingeniería Ambiental, programas en el cual el C.A.S.A., además de ser impulsor, se constituye en el principal soporte a la investigación requerida.

#### Áreas temáticas y líneas de investigación

El C.A.S.A. es un Centro especializado en el área del Medio Ambiente con fuerte

aproximación al área de la Salud. De aquí se desprenden sus líneas de investigación soportadas por diferentes proyectos propios y conjuntos, tal como se puede observar a continuación:

TEMATICA	PROYECTOS	FINANCIAMIENTO Y CONVENIOS
<b>TRAZAS INORGANICAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metales pesados en ecosistemas acuáticos.</li> <li>• Efecto del uso de aguas residuales en la calidad del suelo y aguas subterráneas de la Maica.</li> </ul>	UMSS,CASA-IUC  UMSS, CASA-ASDI/SAREC
<b>TRAZAS ORGANICAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trazas orgánicas en cuerpos de agua y suelos.</li> <li>• Evaluación de hidrocarburos y plaguicidas en suelos.</li> <li>• Contaminación por hidrocarburos y plaguicidas en zonas petroleras y agrícolas en las provincias Chapare y Carrasco.</li> <li>• Uso de pesticidas en organismos acuáticos en zonas bananeras del Chapare</li> </ul>	UMSS,CASA-IUC  UMSS,CASA-ASDI/SAREC  UMSS,CASA-FAO
<b>NUTRIENTES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dinámica de nutrientes en lagunas de baja profundidad</li> </ul>	UMSS,CASA-IUC
<b>MICROBIOLOGIA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inactivación de microorganismos, por el método de desinfección SODIS</li> <li>• Proyecto SODIS</li> </ul>	UMSS,CASA-EAWAG  UMSS,CASA-ITS

En conjunto, estos proyectos están orientados a evaluar el grado de contaminación generado en ecosistemas acuáticos, y su relación con la salud de la población; lo que deberá permitir proponer alternativas de prevención y/o remediación, apoyadas por investigaciones aplicadas de procesos de tratamiento de aguas.

Una breve información de los proyectos de investigación en actual desarrollo, se presenta a continuación:

#### METALES PESADOS EN ECOSISTEMAS ACUÁTICOS

Este proyecto está dirigido a estudiar el grado de contaminación de ecosistemas acuáticos por metales, que provienen de la actividad minera, estudiando:

- Los factores que inciden en la biodisponibilidad de los metales, a través de estudios de bioacumulación de metales en peces y quironómidos.

- Origen, biodisponibilidad y riesgo de la contaminación de suelos agrícolas en Quila Quila (cuenca Chayanta) por Cadmio.

- La evaluación de la contaminación por metales en la cuenca del río Grande.
- Alternativas de remoción de metales pesados por medio de procesos fisicoquímicos y/o biológicos.



**EFEECTO DEL USO DE AGUAS RESIDUALES EN LA CALIDAD DEL SUELO Y AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA ZONA DE LA MAICA.**

El efecto del uso de las aguas residuales en la zona de La Maica, es evaluado a través de un monitoreo sistemático de la calidad del agua y suelos en la zona de La Maica. El monitoreo de la calidad del agua subterránea y aguas superficiales se realiza a través del análisis fisicoquímico, microbiológico y de trazas de metales, como plomo, cadmio y cromo. En suelos se evalúa la presencia de contaminantes como metales y pesticidas a diferentes profundidades.



**TRAZAS ORGANICAS EN CUERPOS DE AGUA Y SUELOS.**

El estudio de trazas orgánicas en cuerpos de agua y suelos, comprende:

- La evaluación del grado de contaminación por plaguicidas en aguas y suelos agrícolas de la cuenca del río Mizque.
- El estudio de los derivados o productos secundarios de los plaguicidas, usados en la zona de La Maica.
- El estudio de la contaminación por plaguicidas en agua, suelos y sedimentos en la zona agropecuaria de Chané y Portachuelo del departamento de Santa Cruz.



**EVALUACIÓN DE HIDROCARBUROS Y PLAGUICIDAS EN SUELOS.**

- El comportamiento de hidrocarburos y pesticidas en suelos se estudia, a través de la implementación de un método para medición de parámetros de infiltración de contaminantes en suelos y a través de estudios de la cinética de adsorción de un grupo de hidrocarburos y un plaguicida en suelos seleccionados.



**CONTAMINACIÓN POR HIDROCARBUROS Y PLAGUICIDAS EN ZONAS PETROLERAS Y AGRÍCOLAS EN LAS PROVINCIAS CHAPARE Y CARRASCO.**

- Se realiza la evaluación de la contaminación por hidrocarburos provenientes de la actividad petrolera, en cursos de agua, suelo y sedimento en los parques Amboró, Carrasco y áreas circundantes.
- La determinación de la contaminación por plaguicidas en la cuenca Chapare, debido a la actividad agrícola.



**DINÁMICA DE NUTRIENTES EN LAGUNAS DE BAJA PROFUNDIDAD**

El estudio de nutrientes en lagunas de baja profundidad, se realiza a través:

- La caracterización fisicoquímica del agua de las lagunas: Alalay, Coña Coña y Alba Rancho, durante un ciclo hidrológico.

- El monitoreo de las tres lagunas a través del análisis de nutrientes en aguas, sedimento y biota de los ecosistemas.
- La realización de batimetría y balance hídrico en la laguna Alalay.



#### **INACTIVACIÓN DE MICROORGANISMOS POR MÉTODOS DE DESINFECCIÓN SOLAR Y ESTUDIOS DE IMPACTO EN SALUD**

El proyecto de investigación en desinfección solar de aguas, comprende:

- Estudios de la inactivación de patógenos bacterianos, *Vibrio cholerae*, *Enterococcus faecalis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus subtilis*, *Giardia sp.*, *Cryptosporidium sp.*, *Entamoeba histolytica* y Colifagos por efecto de la desinfección solar.
- La evaluación de la eficiencia de inactivación de indicadores clásicos con diferentes volúmenes de agua, la influencia del oxígeno, la agitación de las botellas y la turbiedad del agua.
- La verificación comparativa de la incidencia de la radiación solar a diferentes altitudes (altiplano, valle y trópico).
- El estudio de la regeneración y crecimiento de bacterias como Coliformes fecales, *Vibrio cholerae*, *Salmonellae*, *Pseudomonas sp.*, *Enterococos* y Colifagos en botellas que fueron expuestas a la radiación UV.
- Evaluación del método SODIS en aguas naturales y desarrollo de metodologías para determinar bacterias viables y no cultivables.
- Evaluación de concentradores solares caseros para el incremento de la eficiencia de SODIS.
- Evaluación de metodologías de presencia/ausencia para la determinación de contaminación del agua a nivel de campo.

- Determinación de la dosis de radiación solar mediante materiales simples para su aplicación en campo.
- Realización de estudios de Impacto en Salud por el uso del método SODIS en el Distrito de Totora.



#### **CONCLUSIONES**

El Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental es una Unidad de Investigación fuertemente enraizada en la Facultad de Ciencias y Tecnología de la UMSS, con una gran vocación en el desarrollo de proyectos de investigación básica y aplicada, de carácter inter y multidisciplinario, en los cuales participan otros Centros y Programas de investigación, regionales, nacionales e internacionales.

Estos proyectos de investigación contemplan, entre otros:

- La evaluación del comportamiento y el grado de contaminación fisicoquímica, microbiológica y biológica, de ecosistemas acuáticos.
- La realización de estudios de remoción de contaminantes, que permitan proponer sistemas de tratamiento, los cuales deben ser técnica y económicamente aplicables.
- El apoyo a programas académicos de pre y postgrado, a través de investigaciones realizadas.
- El desarrollo de programas de capacitación comunitaria en regiones donde se desarrollan los proyectos.

En su perspectiva de desarrollo el CASA proyecta constituirse en un Centro de Excelencia en el manejo integral del recurso agua, cuyas tareas inmediatas están

orientadas a lograr la acreditación de técnicas de análisis, la sistematización de la información técnica-científica producida, la publicación y difusión de los resultados de

investigación obtenidos y al mejoramiento del sistema de prestación de servicios hacia la comunidad en general.

Evelin Urquieta<sup>1</sup>, Mercedes Iriarte<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Microbiología del Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

# EFICIENCIA DEL MÉTODO DE DESINFECCIÓN SOLAR (SODIS) EN LA INACTIVACIÓN DE *Enterococcus faecalis* y *Pseudomonas aeruginosa* Y SU RECUPERACIÓN POR DOS MÉTODOS DE ANÁLISIS

## RESUMEN

La inactivación de bacterias patógenas oportunistas como *Enterococcus faecalis* y *Pseudomonas aeruginosa* por el método SODIS fue evaluada. Suspensiones bacterianas de *Ent. faecalis* y *P. aeruginosa* fueron inoculadas a botellas con 2 litros de agua, posteriormente fueron expuestas al sol, por un periodo de 8 hrs. y cada hora se contó el número de organismos viables por los métodos de Filtro de Membrana y Vertido en Placa. Paralelamente se tomaron datos de radiación global, UV-A y de temperatura.

Ambos microorganismos de estudio mostraron tasas de inactivación muy elevadas frente al proceso SODIS. La inactivación de *Ent. faecalis* y *P. aeruginosa* se produjo al finalizar las 8 horas de exposición, produciendo una disminución desde  $5.8 \times 10^5$  UFC/ml hasta 4 UFC/ml y desde  $1.7 \times 10^6$  UFC/ml a 12 UFC/ml para ambos microorganismos respectivamente. La dosis promedio de radiación UV-A fue de 132,2 W\*h/ m<sup>2</sup> para inactivar 6 unidades logarítmicas de *Ent. faecalis* y *P. aeruginosa* respectivamente. Se encontró una eficiencia promedio por encima de 99.999 % a las 8 horas de exposición para *Ent. faecalis* y *P. aeruginosa*.

## INTRODUCCIÓN

La salubridad del agua potable ha sido un gran logro de los países desarrollados y una meta importante que tratan de alcanzar los países en vías de desarrollo (Atlas et al., 2002; Lopez et al., 1999).

En Bolivia más del 32 % de los habitantes no tienen acceso al servicio de Agua Potable y el 68 % de la población que está conectada a la red pública de agua recibe un servicio deficitario en calidad y continuidad. En lo referente al alcantarillado la situación es más dramática ya que cerca del 57 % de la población no tienen acceso a un buen servicio de alcantarillado como consecuencia la contaminación ambiental es elevada debido a la falta de tratamiento de las aguas servidas (Viceministerio de Servicios Básicos, 2002).

Anualmente se producen más de 15 millones de muertes en todo el mundo por infecciones que se transmiten por agua contaminada. Sólo las diarreas de los niños pequeños provocan más de 2 millones de muertes al año en los países en vías de desarrollo (WHO, 2000). En Bolivia más de 450.000 menores de 5 años sufren episodios de Enfermedades Diarreicas Agudas (EDA)

anualmente, existiendo una mayor incidencia en el área rural en relación al área urbana (INE, citado por Encinas, 2003).

Suministrar agua segura es un problema complejo, ya que la difusión de métodos tradicionales se ve limitada debido a problemas asociados con la confiabilidad, operación, mantenimiento y costos, especialmente en países en desarrollo como Bolivia. Entre las alternativas para la desinfección del agua surge el método de desinfección solar (SODIS), siendo este de bajo costo, fácil manejo y operación sencilla, además que va dirigido a áreas rurales donde existe una gran necesidad de agua segura.

Se estudiaron los microorganismos *Ent. faecalis* y *P. aeruginosa* (Figura 1), por ser resistentes a condiciones medioambientales adversas, así como a tratamientos convencionales como la cloración. Además de haberse realizado pocos estudios sobre el efecto de SODIS en estos microorganismos.

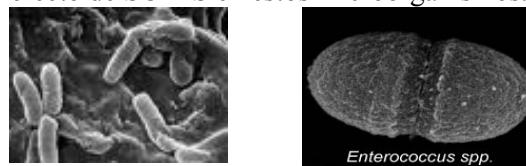


Figura 1: Microfotografía de *Ent. faecalis* y *P. aeruginosa*

Fuente: [www.textbookofbacteriology.net/pseudomonas](http://www.textbookofbacteriology.net/pseudomonas)

Por otro lado ambas especies son importantes desde un punto de vista epidemiológico, por presentar una patogenicidad media ya que son patógenos oportunistas, especialmente en infecciones nosocomiales tales como: Infecciones del Tracto Urinario (ITU), bacteriemias, Endocarditis, infecciones localizadas en piel y ojos (figura 2). También se ha reportado que adquieren cada vez resistencia a varios antibióticos incluso a aquellos de primera generación tales como la vancomicina (Basualdo et al., 1996; Pumarola et al., 1988; Gleesson et al., 1997)

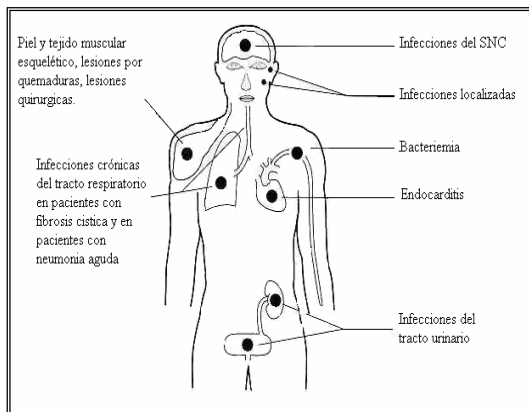


Figura 2: Diversos sitios de infección por *P. aeruginosa*  
Fuente: Iglewski, 2002

## MATERIALES Y METODOS

### Diseño Experimental

En cada ensayo, 20 botellas fueron expuestas al sol durante 8 horas para cada microorganismo. Se trabajó con dos repeticiones por tratamiento (botella A y botella B) para cada bacteria. La unidad experimental fue cada una de las botellas PET de 2 litros de agua.

### Preparación de la suspensión bacteriana

Las cepas de *Ent. faecalis* ATCC 29212 (obtenida del laboratorio de Microbiología de la Universidad Mayor San Simón, Cochabamba) y *P. aeruginosa* ATCC 27853, (comprada del Instituto Nacional de Laboratorios en Salud INLASA), fueron cultivadas hasta encontrarse en la fase estacionaria. El cultivo bacteriano fue lavado mediante centrifugación sucesiva, posteriormente fue resuspendido en agua

destilada estéril, para su posterior inoculación.

### Tipo de agua

Se trabajó con agua de pozo subterráneo (de una profundidad de 50 m) de la embotelladora de Agua de mesa Chacaltaya y Cia. en Cochabamba, de la cual se midió el pH con un pHmetro marca Quimis y para determinar la turbiedad, se usó un Turbidímetro nefelométrico marca DRT-15 CE (APHA, 1995).

### Inoculación de las Botellas

Se desinfectó la superficie externa de las botellas con alcohol al 70%. Luego se vació 1/4 del contenido de cada botella a frascos estériles, para inocular 1 ml de la suspensión bacteriana a cada una de las botellas, luego se oxigenó mediante agitación por 20 segundos. Finalmente se llenó las botellas hasta el cuello con el agua vaciada anteriormente.

Las dosis de las suspensiones bacterianas fueron entre  $6.0 \times 10^8$  a  $3.0 \times 10^9$  UFC para *Ent. faecalis* y de  $1.3 \times 10^8$  a  $9.0 \times 10^8$  UFC en el caso de *P. aeruginosa* respectivamente para cada botella.

### Exposición de las botellas

Una vez terminada la inoculación a las botellas, estas se colocaron sobre un soporte metálico reflectante (calamina corrugada) con un ángulo de inclinación de  $22^\circ$  orientado al N. Desde las 9:00 am hasta las 17:00 pm, se tomaron las muestras cada hora.

Para la medición de la temperatura se introdujo 6 termómetros Van Gee Brand de  $-20$  a  $110^\circ$  con una sensibilidad  $\pm 1^\circ$  C, a 6 botellas, las cuales fueron colocadas en diferentes posiciones, las mediciones de la temperatura del agua dentro las botellas se realizaron cada hora.

Se tomaron medidas de la radiación UV-A cada 10 minutos desde las 9:00 am hasta las 17:00 pm; con un sensor radiométrico tipo Macan SD 104A-Cos, con una respuesta espectral de 320 nm a 405 nm (luz ultravioleta A), que ha sido calibrado por Macan Photometrics. La intensidad de la radiación UV-A fue medida y la dosis de

UV-A fue calculada por la integración de estos valores.

### Métodos de Análisis

Se realizó los recuentos de las bacterias viables en estudio por dos métodos: el método de siembra en profundidad o vertido en placa y el método de filtro de membrana (APHA, 1998).

Vertido en placa: Cada hora a partir de cada botella, se procedió a realizar una serie de diluciones decimales. Luego se sembró asépticamente 1 ml de determinadas diluciones, en una placa estéril, a la cual se agregó agar TSA (Trypticase Soy Agar) licuado y atemperado. Posteriormente fueron incubadas a  $37 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  por  $24 \pm 3$  hrs. (Reed, 1996; Kehoe et al 1999; APHA, 1998; EPA, 1991)

Filtro de Membrana: El volumen restante de los tubos de dilución usados para Vertido en placa fueron filtrados a través de una membrana de esteres de celulosa, posteriormente se filtraron volúmenes tomados directamente de la botella, dichas membranas fueron colocadas en medios de cultivo selectivos de acuerdo al microorganismo (Ent. faecalis en Agar KF-Streptococos y P. aeruginosa en Agar Cetrimide). Fueron incubadas a  $37 \text{ }^\circ\text{C}$  por 24 y 48 horas (APHA, 1995).

### Análisis de datos

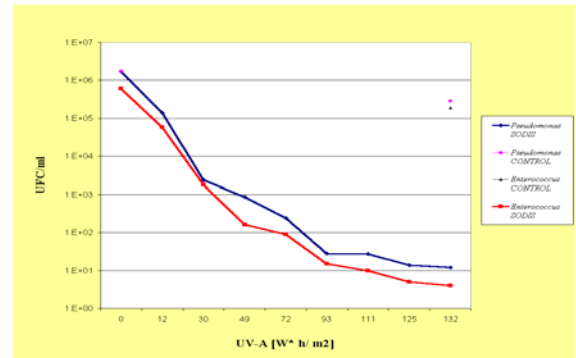
El análisis de varianza se realizó en base a 12 ensayos, dicho análisis se realizó con las dos especies bacterianas: Ent. faecalis y P. aeruginosa, las cuales recibieron dos tratamientos: tratamiento 1 (con exposición al sol), tratamiento 2 (sin exposición), también se consideró los métodos utilizados (Vertido en Placa y Filtro de Membrana), durante los 9 intervalos de tiempo (de 09:00 am hasta 17:00 pm). Los datos fueron analizados mediante el uso del paquete estadístico SAS 6.12 (Statistics Análisis System).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Efecto de la dosis de Radiación UV-A sobre Ent. faecalis y P. aeruginosa

A medida que la radiación UV-A se incrementa, esta tiene un claro efecto en la reducción de ambos microorganismos. El

número de Ent. faecalis viables se redujo desde  $5.8 \times 10^5$  UFC/ml hasta 4 UFC/ ml y P. aeruginosa de  $1.7 \times 10^6$  UFC/ ml hasta 12 UFC/ ml, existiendo una reducción en promedio de hasta 6 unidades logarítmicas con una dosis de radiación UV-A de  $132,2 \text{ W}^* \text{ h/m}^2$ . Además se observa que no hay una disminución significativa en el número de organismos del tratamiento control para ambas bacterias (Figura 3), durante un



periodo de 8 horas de exposición.

Figura 3: Efecto de la UV-A sobre Ent. faecalis y P. aeruginosa (eje vertical escala logarítmica)

Para ambas bacterias, se alcanzó una eficiencia promedio por encima del 99,999 % al cabo del tiempo de exposición (8 horas). (Figura 4).

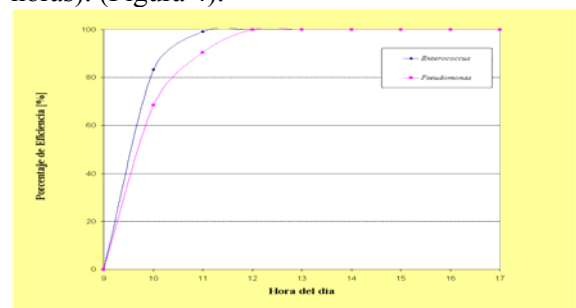


Figura 4: Porcentaje de eficiencia para Ent. faecalis y P. aeruginosa

### Temperatura del agua dentro las botellas

La temperatura del agua de las botellas fue medida cada hora a lo largo de cada experimento, siendo la temperatura promedio mínima de  $17,8 \text{ }^\circ\text{C}$  y la temperatura promedio máxima de  $39,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Sin embargo la temperatura mínima registrada fue de  $14 \text{ }^\circ\text{C}$  en Agosto

(Invierno) y la máxima registrada de 43,6 ° C en Noviembre (Primavera) (Figura 5). Según Rojko (2003) solo temperaturas por encima de 50 ° C tienen un efecto significativo en la desinfección de la bacteria *Escherichia coli*. Las propiedades de inactivación mediante la desinfección solar son por consiguiente debido a su componente de radiación UV-A o del efecto sinérgico de UV-A y calor.

Por otro lado la temperatura de crecimiento de *Pseudomonas* va desde los 4 ° C hasta los 43 ° C y los *Enterococcus* pueden crecer desde los 10 ° C hasta los 45 ° C e incluso resisten por 30 minutos los 60 ° C (Basualdo et al. 1996), por lo que no se puede atribuir un efecto significativo de la temperatura alcanzada por el agua en todos los ensayos realizados.

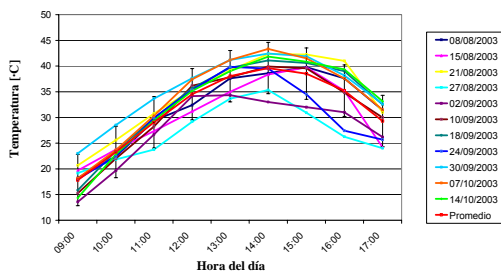


Figura 5: Temperatura del agua vs. hora del día.

### Intensidad de la Radiación UV-A

Se realizaron mediciones de intensidad de la radiación UV-A con un sensor, el cual registro valores mayores a 15 W/m<sup>2</sup> a partir de las 10:30 a.m. hasta las 16:30 p.m. Las intensidades máximas a medio día fueron entre 25,26 W/m<sup>2</sup> y 18,81 W/m<sup>2</sup>, siendo menor la intensidad en invierno en relación a la primavera (Figura 6).

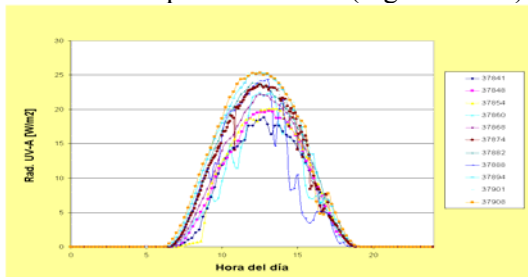


Figura 6. Intensidad de la Radiación UV-A

Los valores registrados de intensidad de UV-A una vez integrados se convierten en la dosis de radiación UV-A que recibieron las botellas que contenían los microorganismos.

La dosis de radiación UV-A se incrementa con el tiempo de exposición, alcanzando valores entre 154.6 W\*h/m<sup>2</sup> y 111 W\*h/m<sup>2</sup> al fin del día (Figura 7).

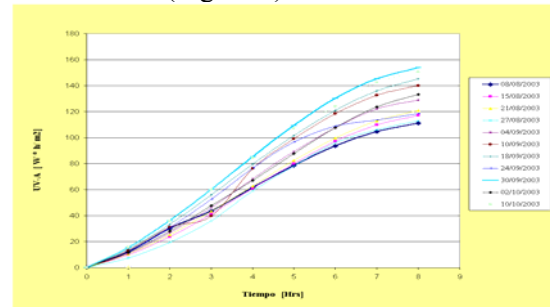


Figura 7: Dosis de Radiación UV-A

Por otra parte estudios realizados por Wegelin et al. (1994) indican que la luz UV-A (320- 400 nm) es el principal responsable para la inactivación de microorganismos, sin embargo la luz violeta (400-450 nm) también tiene efecto bactericida, debido a los efectos sinérgicos con la radiación UV-A. Por lo anteriormente expuesto se puede decir que la luz violeta del espectro visible podría actuar de manera conjunta con la luz UV-A para tener un incremento en el efecto bactericida.

### Comparación del método de recuento bacteriano utilizado para *Ent. faecalis* y *P. aeruginosa*

De acuerdo a los datos obtenidos existe una mayor recuperación de bacterias viables por el método de Vertido en Placa encontrando en promedio valores de 3.200 UFC/ ml y 2.500 UFC/ml en comparación con el método de Filtro de Membrana con 450 UFC/ ml y 110 UFC/ml para *Ent. faecalis* y *P. aeruginosa* respectivamente (Figura 8).

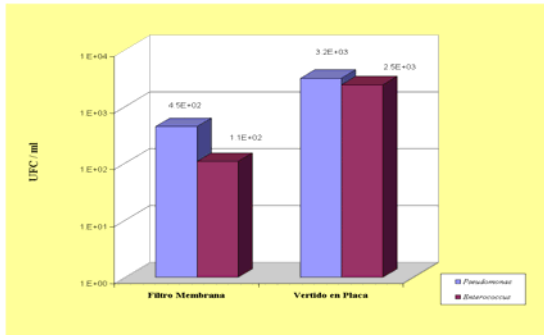


Figura 8: Comparación de recuento por 2 métodos para Ent. faecalis y P. aeruginosa.

## CONCLUSIONES.

Existe un claro efecto de la radiación UV-A en el número de organismos viables para ambas bacterias, siendo necesaria una dosis de radiación solar UV-A de 132,2 W\*h/m<sup>2</sup> para inactivar 6 unidades logarítmicas de Ent. faecalis y P. aeruginosa respectivamente. Dicha radiación es alcanzada a las 17:00 pm, luego de 8 horas de exposición. En cuanto a la temperatura, esta no tuvo un efecto significativo puesto que la temperatura máxima alcanzada por el agua de las botellas fue de 43,6 °C.

Existe una mayor recuperación de los microorganismos por el método de vertido en placa de 2.5 E+03 y 3.2E+03 para Ent. faecalis y Pseudomonas aeruginosa en comparación con el método de filtro de membrana de 1.1 E+02 y 4.5 E+02 para Ent. faecalis y Pseudomonas aeruginosa.

## RECONOCIMIENTOS

La presente investigación fue posible gracias al convenio UMSS / CASA - EAWAG / SANDEC. Quiero agradecer a todo el personal del Laboratorio de Microbiología del Centro de Aguas y Saneamiento ambiental y a la Fundación SODIS por facilitarnos la bibliografía.

## BIBLIOGRAFIA.

ATLAS, R. y R. BARTHA 2002. Ecología microbiana y Microbiología ambiental 4<sup>a</sup> ed. Ed. Addison Wesley. Madrid - España 283 - 292 pp.  
ACRA, A. M. JURDI, H. MUALLEM, Y. KARAHAGOPIAN, AND Z. RAFFOUL. 1990 Water Disinfection by Solar Radiation:

Assesmentet and Application IDRC Ottawa Ontario pp 70.

APHA, AWWA & WPCF, 1995. Standard Methods of the Examination of Water and Wastewater. USA. 168 pp.

BASUALDO, J., C.COTO, R.,TORRES 1996 Microbiología biomédica Ed Atlante s.r.l. buenos Aires argentina.

ENCINAS, P. 2003 Evaluación de la eficiencia del método SODIS en la Inactivación de Coliformes Termotolerantes en Tres Regiones de Bolivia (Valle, Trópico y Altiplano) Tesis de Grado para optar el diploma Académico de Licenciatura en Biología Cochabamba, Bolivia pp139.

GLEESON, C.; N. GRAY 1997 The Coliform Index and Waterborne Disease Chapman &Hall London pp102-107.

HURST, C., G.KNUDSEN, M. McINERNEY, L. STETZENBACH Y M. WALTER 1997 Manual of Environmental Microbiology 1<sup>a</sup> Edición ASM PRESS, Washington D.C-U.S.A.. 133-147, 184-190pp

IGLEWSKI, J. 2002. [www.gsbs.utmb.edu/microbook/\(ch27\)](http://www.gsbs.utmb.edu/microbook/(ch27))

KEHOE. S.; C JOYCE, T. CONROY; R. GILLESPIE, ELMORE - MEEGAN. 1999 Effect of agitation, turbidity, aluminium foil reflectors and container volume on the inactivation efficiency of bacht process solar disinfectors Water Research 35, 1061-1065  
LOPEZ, D., GARCÍA, O., GUTIERREZ, M., GARCÍA, J., IBARRETXE, J. y GARCIA, B. 1999 Uso de la Radiación Solar para la Desinfección del Agua. Printed for Martín Wegelin pp. 23 -31.

PUMAROLA A., A. RODRIGUEZ, J. GARCIA, y G. PIEDROLA 1988 Microbiología y Parasitología Medica 2 ed Ed Salvat S.A. Barcelona.

REDD, R., 1997 Solar inactivation of faecal bacteria in water: the critical role of oxigen Journal The Society for Applied Bacteriology Vol 24 pp1-5.

VICE-MINISTERIO DE VIVIENDA Y SERVICIOS BÁSICOS. 2002. Plan Bolivia – Sector de Servicios Básicos de Agua Potable y Saneamiento. La Paz-Bolivia. 1,2 pp.

WEGELIN, M., S. CANONICA, K.  
MECHSNER, T. FLEISCHMANN, F.  
PESARO and A. METZLER. 1994 Solar  
Desinfection: scope of the process and

analysis of radiation experiments Journal  
Water Reserch Vol 43.Nº 3 pp154-169.  
ZARATTI, 1997. Naturaleza y Efectos de la  
Radiación Ultravioleta y la capa de ozono  
Ed. Formo y Andrade pp.116

Janette P. Encinas<sup>1</sup>, Mercedes Iriarte<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Laboratorio de Microbiología del Centro  
de Aguas y Saneamiento Ambiental,  
Universidad Mayor San Simón,  
Cochabamba, Bolivia

# EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL MÉTODO SODIS EN LA INACTIVACIÓN DE COLIFORMES TERMO-TOLERANTES EN TRES REGIONES DE BOLIVIA (VALLE, TRÓPICO Y ALTIPLANO)

## RESUMEN

Investigaciones realizadas en varios países del mundo, han comprobado la efectividad del método SODIS sobre indicadores de contaminación fecal y otros microorganismos. El presente trabajo intenta investigar la variación de la dosis de la radiación solar, el clima local, los tiempos de exposición de botellas y su influencia en las tasas de inactivación de coliformes termotolerantes (fecales).

Para los ensayos, se utilizaron botellas plásticas transparentes (no retornables), hechas de PET (terephthalato de polietileno) de dos litros de capacidad. Las botellas fueron inoculadas con concentraciones intermedias de coliformes termotolerantes y expuestas al ambiente de 6 a 8 horas. Se efectuó ensayos bajo diferentes condiciones climáticas y en 3 diferentes regiones de Bolivia (Valle, Trópico y Altiplano).

Los resultados obtenidos en las tres regiones revelan un efecto muy claro del método SODIS en la inactivación de coliformes termotolerantes en todos los experimentos. El efecto de la radiación y la temperatura sobre dichos microorganismos estuvo sujeto a las características geográficas y climáticas de la región. El factor que más influyó en la eficiencia del proceso SODIS fue la condición climática local. La inactivación de los organismos indicadores fue de 100% en 6 horas de exposición bajo condiciones de cielo despejado. Bajo condiciones de cielo parcialmente nublado, la inactivación fue en promedio de 99.78%, y bajo cielo completamente nublado de 89.0% en 6 a 8 horas de exposición.

Bajo condiciones de cielo despejado, 6 horas de exposición al sol son suficientes para una eficiencia de 100% de inactivación de coliformes termotolerantes. Bajo condiciones nubladas, se recomienda aumentar el tiempo de exposición.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente entre las alternativas para la desinfección del agua surge el tratamiento a través de la radiación solar (SODIS), el cual utiliza la temperatura y la radiación para lograr la desinfección del agua. El interés principal se centra en el aprovechamiento de la energía solar con un costo bajo, fácil manejo y operación sencilla (López, 1999). Investigaciones realizadas en varios países del mundo, han comprobado la efectividad del método SODIS sobre indicadores de contaminación fecal y otros microorganismos (Wegelin et al. 1994, Sommer et. al 1997, López et al. 1999). Sin embargo para la implementación del método es importante tomar en cuenta la distribución de la radiación UV en diferentes pisos bioclimáticos, en este sentido el presente trabajo pretende evaluar la

eficiencia del método SODIS en la inactivación de coliformes termotolerantes (fecales) en tres regiones del país, bajo condiciones climáticas diferentes: Chimoré (Trópico), Cochabamba (Valle) y Oruro (Altiplano), para así proporcionar información para estudios posteriores en cuanto a la temperatura, horas de exposición y dosis de radiación requeridas para la inactivación de microorganismos.

## METODOLOGÍA

Para los ensayos, se utilizaron botellas plásticas transparentes (no retornables), hechas de PET (terephthalato de polietileno) de dos litros de capacidad. Se expusieron las botellas al ambiente ya sea soleado o nublado, de 6 a 8 horas. El soporte utilizado para la exposición de las botellas en las tres regiones fue calamina corrugada.

Las botellas fueron inoculadas con concentraciones intermedias de coliformes fecales (entre 1050 y 3520 UFC/100 ml). Cada hora, una muestra de cada botella fue tomada y analizada para coliformes termotolerantes. Como control, se guardó una botella en un lugar oscuro durante el día y se analizó su concentración inicial y final de dichos microorganismos.

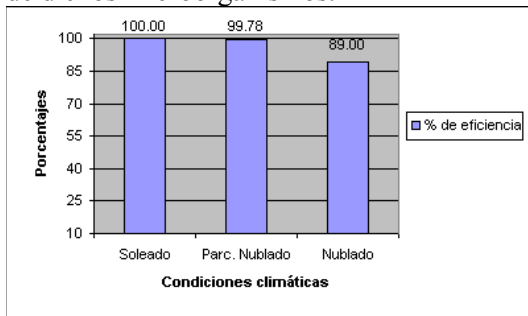


Figura 1: Porcentajes de inactivación de coliformes termotolerantes después de 6-8 horas de exposición, bajo condiciones no óptimas en Cochabamba.

El trabajo realizado se dividió en dos fases: La primera fase se llevó a cabo en Cochabamba (Cercado), bajo condiciones estrictamente nubosas, y la segunda, en tres pisos geograficos diferentes: Valle (Cochabamba, 500 msnm), Trópico (Chimoré, 2500 msnm) y Altiplano (Oruro, 3800 msnm), bajo condiciones climáticas variadas (días soleados, nubosos, ventosos y en algunos casos con presencia de precipitación). Se efectuaron 8 ensayos en la primera fase, y 31 en la segunda.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Bajo condiciones nubosas durante los meses de febrero-marzo correspondientes a la época lluviosa en Cochabamba, los porcentajes de eficiencia estuvieron comprendidos entre 62 y 100 %. El análisis de varianza revela un 89 % de eficiencia bajo condiciones de nubosidad total y 99 % de eficiencia, bajo condiciones de cielo parcialmente nublado (figura 1).

Cabe indicar que en algunos ensayos después de 7 horas de exposición se llegó a un 100 % de eficiencia, en otros casos se requirió más tiempo de exposición por las bajas dosis de radiación alcanzadas. Sin embargo, Brofferio (2000), menciona que en

verano las variaciones de radiación son mas altas con respecto a las otras estaciones, existiendo un promedio de radiación alto, por lo tanto a pesar de las condiciones de nubosidad durante un día o parte del mismo, no representan una limitación, ya que la fuerte radiación para el resto del día es suficiente para la desinfección.



Figura. 2: Secuencia de pruebas durante un día en Cochabamba, a partir de una concentración inicial menor a 3000 microorganismos. Resultados obtenidos cada hora

Los resultados obtenidos en la segunda fase de la investigación en las tres regiones se indican a continuación: En Cochabamba, fueron de un 100% en todos los ensayos, con un rango de 3 a 6 horas de exposición y una dosis de radiación UV-A comprendida entre 53 - 124 Wh/m<sup>2</sup> y temperaturas máximas del agua dentro de las botellas comprendidas entre 38 - 53 °C bajo condiciones de cielo despejado en la mayoría de los casos (figura 2). Al respecto, Solarte et al. (1997) indica que cuando se combinan la temperatura y la radiación solar, la reducción de microorganismos como *Escherichia coli* y *Vibrio Cholerae* comienza a los 35 °C, y cuando se exponen los recipientes sólo a la temperatura, la inactivación se inicia a los 40°C.

Los resultados obtenidos en la región de Chimoré fueron los siguientes: De un total de 10 ensayos, sólo tres llegaron a una eficiencia del 100 % bajo condiciones óptimas de radiación y temperatura (Dosis de radiación UV-A mayor a 127 Wh/m<sup>2</sup>) y temperaturas máximas comprendidas entre 48 - 55°C. Bajo condiciones climáticas variadas (nubosidad, precipitación y ventosidad), los porcentajes de eficiencia

estuvieron comprendidos entre 42 - 89 %, cabe mencionar que a pesar de las altas radiaciones UV-A en esta región en días nublados, no se llegó a una eficiencia del 100 %, hecho que posiblemente se deba a la radiación difusa existente en el lugar. Al respecto Mathur et al. (1988) mencionan que la desinfección del agua potable depende de varios factores entre ellos la intensidad solar y el tiempo de exposición, los cuales dependen de la ubicación geográfica, por ejemplo la latitud, las variaciones estacionales, la cobertura de nubes y el rango efectivo de longitud de onda de la luz. En la región de Oruro los porcentajes de eficiencia estuvieron comprendidos entre 95 - 100%, después de un período de 4 a 6 horas de exposición, con una dosis de radiación UV-A comprendida entre 113-183 Wh/m<sup>2</sup>, bajo condiciones de cielo despejado en la mayoría de los ensayos. Sin embargo es de interés mencionar que se tuvo influencia de vientos fuertes durante la ejecución de los ensayos, el 80 % de los ensayos fueron bajo condiciones ventosas. Al respecto Montes de Oca (1997) menciona, que los vientos predominan del norte con velocidad de 5 nudos. Lawand et al. (1998) mencionan que las partículas pequeñas presentes en la atmósfera tales como el polvo, gotas de aguas y moléculas de gas actúan como un filtro del cual la radiación es irradiada a todas las direcciones, limitando de esta manera la eficiencia del método. Con presencia de vientos, el número de partículas de tierra y polvo en el aire aumenta y de esta forma podría limitar la radiación. De acuerdo al análisis de varianza se puede indicar que la eficiencia del método SODIS es diferente en cada región. En Cochabamba, la inactivación fue en promedio de 100%, en Oruro de 99.86% y en el Chapare de 94.74% (figura 3).

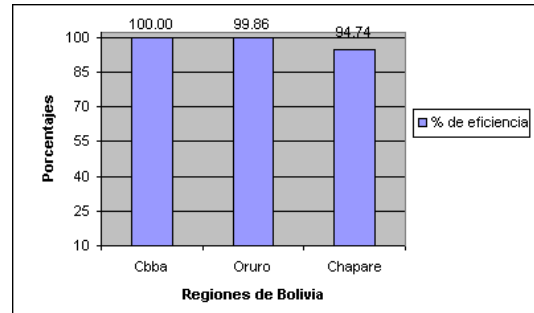


Figura 3: Porcentajes de eficiencia de inactivación de coliformes termotolerantes en tres regiones de Bolivia.

El efecto de las horas de exposición a la luz solar dentro de cada región es altamente significativo, es decir que la inactivación de los microorganismos está en función a las horas de exposición y a las condiciones climáticas de cada región. Los resultados indican que las condiciones climáticas tuvieron un efecto altamente significativo en la inactivación de los coliformes termotolerantes, es decir la eficiencia del método SODIS depende de las condiciones de radiación y temperatura existentes en el ambiente. Por lo expuesto se ha visto que el clima juega un papel importante, pues las nubes suponen un freno a la propagación de la radiación solar. Según Lopez et al. (1999), un espesor medio de nubes provoca una reflexión del 10% de la radiación. Ese porcentaje puede verse aumentado hasta el 90 % en situaciones de nubes muy densas (1000 m de espesor).

### CONCLUSIONES:

El método SODIS mostró ser un proceso muy eficiente de inactivación de coliformes termotolerantes en las regiones de Bolivia. El factor más importante que influyó en la eficiencia del proceso fue el clima. Bajo condiciones climáticas ideales (día totalmente despejado) y un período de 6 horas de exposición, se ha visto que se llega a obtener 100 % de eficiencia y por ende la eliminación total de coliformes termotolerantes.

Bajo condiciones de cielo parcialmente nublado, la inactivación de coliformes termotolerantes todavía es alta (99.78%), pero no se llega a una inactivación total.

En un día de exposición bajo condiciones completamente nubladas, la eficiencia del proceso SODIS en promedio llegó a 89%. Estas eficiencias bajas están correlacionadas con una cantidad menor de radiación UV-A.

En este sentido, las recomendaciones para usuarios SODIS tienen que indicar que bajo condiciones de cielo nublado, el tiempo de exposición tiene que ser más de 6 horas. Bajo condiciones ideales (cielo despejado), 6 horas de exposición son suficientes para la inactivación total de concentraciones intermedias de las coliformes termotolerantes utilizadas en estos ensayos.

### **RECONOCIMIENTOS**

El presente trabajo fue posible gracias al apoyo de EAWAG/SANDEC de Suiza y el Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental de Bolivia.

### **REFERENCIAS**

BROFFERIO, S. 2000. SODIS - Solar Water Disinfection Diffusion project in Cochabamba - Bolivia. 4,6 pp.  
LAWAND, T. A. ; ALWARD, R.; ODEYENI, O.; HAHN, J.; KANDPAL, T. C. y AYOUB, J. 1998. Solar Water Disinfection. 34, 137 pp.  
LOPEZ, D.; GARCIA, O.; GUTIERREZ, M.; GARCIA , J.; IBARRETXE, J. y

GARCIA, B. 1999. Uso de la Radiación Solar para la Desinfección de Agua. 23-31 pp.

MATHUR, S. y KANDPAL T.C. 1988. Physics of Solar Water Disinfection: An Introductory Review. Solar Water Disinfection IDRC. Montreal-Canadá. 137 pp.

MONTES DE OCA, I. 1997. Geografía y Recursos Naturales de Bolivia. 3ª Edición. Ed. Edobol. La Paz Bolivia. 35,37 pp.

RIJAL, G.K. y FUJIOKA, R.S. s/f. Synergistic Effect of Solar Radiation and Solar Heating to disinfect Drinking Water Sources. Water Resources Research Center and Department of Microbiology. Hawaii-USA.

Sommer, B., Marino, A., Solarte, Y., Salas, L. M., Dierolf, C., Valiente, C., Mora, D., Rechsteiner, R., Setters, P., Wirojanagud, W., Ajarmeh, H., Al-Hassan, A., & Wegelin, M. (1997). SODIS – an Emerging Water Treatment Process. Journal of Water Science Research Treatment-Aqua. 46(3), 127-137.

WEGELIN, M., S. CANONICA, K. MECHSNER, T. FLEISCHMANN, F. PESARO and A. METZLER. (1994): Solar Disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments. Journal of Water Reserch, Vol 43.Nº 3 pp154-169.

Lizeth Navarro<sup>1</sup>, Mercedes Iriarte<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Laboratorio de Microbiología del Centro  
de Aguas y Saneamiento Ambiental,  
Universidad Mayor de San Simón,  
Cochabamba, Bolivia.

## **EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE SODIS EN LA INACTIVACIÓN DE ESCHERICHIA COLI Y COLIFAGOS F-RNA MACHO ESPECÍFICOS**

### **RESUMEN**

El Método SODIS se aplicó en el presente trabajo para la desinfección del agua, logrando demostrar su eficiencia en la inactivación de Colifagos F-RNA macho específicos o MS2 utilizados como indicador viral y Escherichia coli (utilizada paralelamente) como indicador bacteriano complementario.

La cepa de Colifagos F-RNA macho específicos se obtuvo a partir de aguas residuales de la Planta de Tratamiento de Albarrancho, mediante una técnica de purificación, la cepa sirvió de inóculo en los ensayos SODIS, los mismos fueron detectados por el método de Formación de Placas. Paralelamente se procedió a inocular la cepa patrón de E. coli C 3000 (ATCC 15597) para los ensayos SODIS. Las muestras fueron sometidas al tratamiento por el Método SODIS por 10 horas en el caso de Colifagos y 6 horas para E. coli.

Entre los resultados obtenidos de Colifagos se llegó a obtener un 89% de inactivación en días despejados y un 55% en días parcialmente nublados. Por otra parte se obtuvo un 100 % de inactivación de E. coli con 4 horas de exposición, en días despejados y parcialmente nublados. Concluyendo que en la aplicación del Método SODIS se requieren mayores dosis de radiación, temperatura y mayor tiempo de exposición para la inactivación total de Colifagos, además se determinó que la dosis teórica de radiación UV-A para inactivar un 99,9% de los fagos fue de 448 W.h/m<sup>2</sup> que equivale a tres días de radiación solar. Paralelamente se trabajó con dos tipos de reflectores solares (bandejas de aluminio) con los que se llegó a obtener de un 97 hasta un 99% de inactivación con 10 horas de exposición solar por lo que se recomienda el uso de reflectores. Finalmente por correlaciones gráficas se comprobó que los Colifagos no son buenos indicadores bacterianos y que deben utilizarse aisladamente como indicadores de enterovirus.

### **INTRODUCCIÓN**

La vigilancia de virus entéricos en el agua es necesaria debido a que en ella se pueden encontrar agentes etiológicos de muchas enfermedades virales y las bacterias entéricas no son buenos indicadores de la contaminación vírica. Los virus entéricos son más difíciles de eliminar, sobreviven por periodos largos en el agua y tienen mayor resistencia a los desinfectantes comúnmente usados (De León et al. 1988).

Estudios efectuados, sugieren el uso de los Colifagos (nombre que se aplica a los bacteriófagos que atacan a E. coli) como modelo de comportamiento de enterovirus en aguas tratadas (Havelaar et al. 1986), utilizando en la inactivación E. coli, como indicador complementario.

La eficiencia del método de desinfección solar del agua (SODIS) en la inactivación de bacterias, principalmente E. coli y Coliformes termotolerantes, ha sido evaluada mediante pruebas de laboratorio realizadas desde el año 1991 por el Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Ambiental (EAWAG) y su Departamento de Agua y Saneamiento en

Países en Desarrollo (SANDEC) (SODIS, 2000).

Por lo anteriormente expuesto, en el presente trabajo se evaluó la eficiencia del método SODIS en la inactivación de Colifagos utilizándolos como indicador viral para la desinfección solar del agua, con la finalidad de proporcionar información con base científica al respecto.

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

Los ensayos SODIS se efectuaron sobre un techo de calamina ubicado en las inmediaciones de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Mayor de San Simón, los análisis de las muestras se realizaron en el Laboratorio de Microbiología del Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental (CA.SA).

Para la obtención de la cepa de Colifagos F-RNA macho específico que sirvió de inóculo en los ensayos SODIS, se realizaron muestreos de las aguas servidas que ingresaban en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Albarrancho, mediante una técnica de purificación establecida por Métodos Estándar modificada en laboratorio

para su almacenamiento a 4°C y posterior inoculación en las botellas.

A partir de esta solución se realizaron diluciones hasta 10<sup>-3</sup> (que sirvieron de inóculo para los ensayos SODIS) que corresponde a una concentración de 1x10<sup>3</sup> de Colifagos por 100 ml.

En cuanto a la reactivación de *E. coli* C3000 (ATCC 15597) se realizó en BHI a partir de un agar de conservación STOKER y se realizaron diluciones hasta 10<sup>-4</sup> (1x10<sup>3</sup> bacterias *E. coli* por 100 ml), utilizando esta concentración para el inóculo.

Para la inoculación de las cepas en el agua de las botellas se utilizó agua de SEMAPA (Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado) libre de cloro residual. Se utilizaron botellas nuevas PET de dos litros de capacidad, conteniendo un termómetro. Se inocularon 21 ml de la cepa patrón *E. coli* y 5 ml de la cepa de Colifagos obteniendo una dosis inicial de 10<sup>3</sup> Unidades formadoras de colonia y Unidades formadoras de placa por 100 ml de agua en cada botella. La turbiedad del agua fue de 0.12 a 0.16 NTU, homogenizando la mezcla por 7 minutos con movimientos rotativos, el tiempo de exposición solar fue de seis y diez horas para *E. coli* y Colifagos respectivamente. Este proceso implica que la dosis inicial de *E. coli* y Colifagos es de 10<sup>3</sup> Unidades Formadoras de Colonia y Unidades Formadoras de Placa por 100 ml.

Se consideró un mayor tiempo de exposición para los Colifagos, porque los virus entéricos son más difíciles de eliminar, sobreviven por periodos más largos en el agua y tienen mayor resistencia a los desinfectantes comúnmente usados (De León et al. 1988).

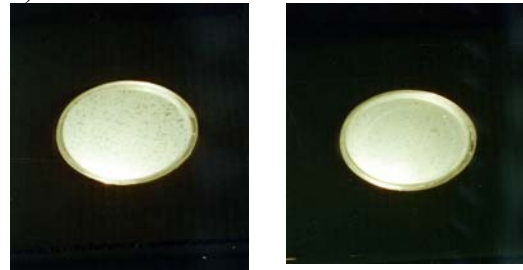
Se efectuaron 40 ensayos, considerando los siguientes aspectos: temperatura, dosis de radiación y concentración de *E. coli* y Colifagos.

La obtención de las muestras se realizó cada tres horas, tomando de cada botella 10 ml de agua, todas las muestras se hicieron por duplicado.

Para la obtención de los datos de radiación, se utilizó un Radiómetro (Sensor Radiométrico tipo Macam SD/104 A-Cos

con una sensibilidad de 4578 x 10<sup>-8</sup> A/W/m<sup>2</sup> con una respuesta espectral de 320 nm a 405 nm de Radiación UV-A el cual se conectó a un sensor Datalogger 1000) previamente configurado y programado en un modo integral para el suministro de datos cada 10 minutos, durante el tiempo de exposición de las botellas.

Para la detección de *E. coli* se utilizó la técnica de Filtro de Membrana según Andrew et al. (1985). Los volúmenes filtrados variaron en función a las horas de exposición solar, 100 ml en las dos primeras horas, 200 ml en las dos siguientes y 500 ml en las dos últimas. De forma similar para la detección de Colifagos se utilizó el Método de Formación de Placas de Lisis establecido en Andrew et al. (1995) (Fotografías N° 1, 2).



Fotografía N° 1, 2: Cuantificación de Colifagos F-RNA específicos usando la técnica de Formación de Placas Lisis hora inicial (izquierda) y final (derecha)

Para el análisis estadístico se analizó las diferencias entre los tratamientos:

- a) Botellas sobre la calamina
- b) Botellas colocadas en el reflector solar tipo 1
- c) Botellas colocadas en el reflector solar tipo 2
- d) Botella testigo

## RESULTADOS

Los resultados de los ensayos obtenidos, fueron divididos en dos condiciones climáticas distintas; días despejados y parcialmente nublados.

Condiciones climáticas	Inactivación de Colifagos 10 horas (8:00 a 18:00)	Inactivación de E. coli 4 horas (9:00 a 13:00)	Temperatura máxima del agua °C	
			Colifagos	E. coli
Días despejados	89%	100%	48	41
Días parcialmente nublados	55%	100%	46	43

Cuadro N° 1: Porcentajes de inactivación de Colifagos y E. coli

En el Cuadro N° 1 se observa que la inactivación de E. coli (tomando una concentración inicial de 103 UFC/100 ml) fue de un 100% después de 4 horas de exposición solar tanto en días despejados como en días parcialmente nublados con una temperatura máxima promedio del agua de 41 a 43°C y con una dosis de radiación UV-A promedio de 75 a 78 W.h/m<sup>2</sup>.

Bajo condiciones de cielo despejado con una dosis de radiación UV-A promedio de 151 W.h/m<sup>2</sup> y con una temperatura máxima promedio de 48°C, el porcentaje promedio de la eficiencia en la inactivación de Colifagos F-RNA específicos obtenido en el presente trabajo fue de 89% después de 10 horas de exposición.

Bajo condiciones de cielo parcialmente nublado con una dosis de radiación UV-A promedio de 145 W.h/m<sup>2</sup> y con una temperatura máxima promedio de 46°C, el porcentaje promedio de eficiencia en la inactivación de Colifagos obtenido en el presente trabajo fue de 55% después de 10 horas de exposición.

La inactivación de Colifagos (Cuadro N° 1) (con una concentración inicial de 103 UFP/100 ml) en días despejados fue de 89% con una dosis de radiación UV-A promedio de 151 W.h/m<sup>2</sup> y una temperatura máxima promedio de 48°C y 55% de inactivación de Colifagos en días parcialmente nublados con una dosis de radiación UV-A promedio de 145 W.h/m<sup>2</sup> y con una temperatura máxima promedio de 46°C.

Además se realizó la Correlación gráfica de E. coli y Colifagos en base a un análisis Binomial (Fig N° 1) observando que en días despejados el % de inactivación de E. coli se adecua a una curva exponencial consecuyente de su limitada resistencia al Método SODIS,

mientras que los Colifagos tienen un comportamiento multiexponencial resultante de su resistencia en la aplicación del Método.

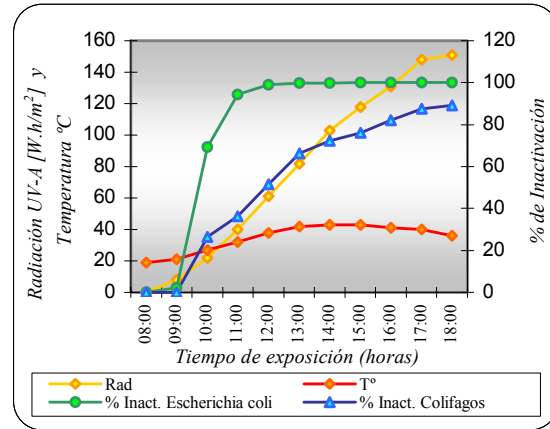


Figura N° 1: Correlación gráfica del porcentaje de inactivación de Colifagos y Escherichia coli

Sobre la base de los resultados obtenidos, se buscó formas de aumentar la eficiencia de inactivación de los Colifagos por el método SODIS. Se utilizaron bandejas de aluminio desechables como reflectores (Figura N° 2), una sin modificar (tipo 1) y otra modificada (tipo 2), en 25 ensayos se comprobó que con ambos reflectores, la inactivación se incrementó, y que el tipo 2 era ligeramente más eficiente que el tipo 1 (Cuadro N° 2).

Condiciones climáticas	Botella sin reflector	Reflector tipo 1	Reflector tipo 2
Días despejados	89%	97%	99%
Días parcialmente nublados	55%	75%	81%

Cuadro N° 2: Inactivación de Colifagos por el método SODIS sin reflectores y con 2 tipos de reflectores con 10 horas de exposición (8:00 a.m. a 18:00 p.m.)

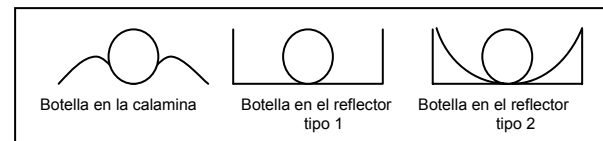


Figura N°2: Los dos tipos de reflectores utilizados en los ensayos



Fotografía 3: Reflector solar, tipo 1



Fotografía 4: Reflector solar, tipo 2

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La inactivación de *E. coli* (con una concentración inicial de 103 UFC/100 ml) fue de un 100 % después de 4 horas de exposición a una temperatura máxima promedio del agua dentro la botella de 43°C. Al respecto en trabajos realizados por Encinas, (2003) se observa una inactivación de los coliformes termotolerantes (*E. coli*) de un 100% con un rango de 3 a 6 horas de exposición y a una temperatura máxima del agua dentro las botellas de 53°C.

La inactivación de Colifagos (con una concentración inicial de 103 UFP/100 ml) fue de 89% con una temperatura máxima promedio de 48°C y con una dosis de radiación UV-A promedio de 151 W.h/m<sup>2</sup>; no habiéndose considerado un mayor tiempo de exposición por la declinación de la incidencia solar en los ensayos después de 10 horas de exposición. Al respecto varios autores como Chang et al. (1985) citado por Craik et al. (2000), Grabow et al. (1990), Taylor, (1982) y Tartera et al. (1988)

mencionan que los virus son mucho más resistentes a los efectos de la radiación UV y que requieren tres a cuatro veces más de radiación UV para alcanzar el mismo nivel de inactivación que *E. coli*. Así mismo menciona que los fagos en ambientes acuáticos son muy resistentes sistemas de tratamientos y procesos normales de desinfección (cloro, ozono, radiaciones ultravioleta) que las bacterias indicadoras *E. coli*.

De lo anteriormente expuesto se llegó a las conclusiones siguientes:

El porcentaje de eficiencia en la inactivación de *E. coli* en el presente trabajo, en forma general fue de un 100% con 4 horas de exposición, bajo condiciones climáticas variadas (cielo despejado y cielo parcialmente nublado) con una dosis de radiación UV-A promedio de 75 a 78 W.h/m<sup>2</sup> y con una temperatura máxima promedio de 43 a 41°C.

La dosis teórica de radiación UV-A requerida para una inactivación de 100 % de Colifagos en días despejados es de 448 W.h/m<sup>2</sup> que equivale a 3 días de exposición solar.

La correlación gráfica de *E. coli* y Colifagos muestra que *E. coli* no es un buen indicador viral para evaluar la eficiencia de tratamiento por SODIS tanto en días despejados como en parcialmente nublados. Debido a su gran resistencia a la desinfección solar de los Colifagos F-RNA específicos es necesario realizar ensayos con mayores tiempos de exposición.

Mediante la utilización de reflectores simples de aluminio se puede incrementar la concentración de la radiación y temperatura y por lo tanto la eficiencia del método SODIS.

## RECONOCIMIENTOS

El presente trabajo fue posible gracias al convenio EAWAG/SANDEC-UMSS/CASA.

## REFERENCIAS

Craik, S. A., R. Gordon, J. R. Bolton and M. Belosevic. (2000) Inactivation of *Giardia muris* cysts using médium –pressure

ultraviolet radiation infiltrated drinking water. *Wat. Res.* 34 p.p 4325-4332.

De León, R. ; C. P. Gerba y J. B. Rose. (1988) *Manual de Vigilancia de Virus Entéricos en el Agua*. OPS, Inst. Mexicano de la Tec. del agua y la Dirección General de Const. Y Op. del Dpto. del Distrito Federal. México. p. 95

Encinas, J. P. (2003) *Evaluación de la eficiencia del Método SODIS en la inactivación de coliformes termotolerantes en tres regiones de Bolivia* Tesis de Grado Lic. Biología U.M.S.S. Cochabamba-Bolivia. p.p. 112

EAWAG/SANDEC Y CASA/UMSS *Notas técnicas*, (2000) *Notas Técnicas Suiza y Cochabamba Bolivia* p.p. 17 (Nota técnica N° 4).

Grabow, (1990) *Microbiology of Drinking Water Treatment Reclaimed Wastewater*. Ed. Springer-Verlag. London

Havelaar, A., K. Furuse y W. H. Hogeboom. (1986) *Bacteriophages and Indicador*

*bacteria in human and animal faeces*. *J. Appl. Bacteriol.* 60 U.S.A. p.p. 255-262

Andrew D Eaton, Lenore S. Clescery and Arnold E. Greenberg (Ed.) *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. (1985) Washington D.C.

Andrew D Eaton, Lenore S. Clescery and Arnold E. Greenberg (Ed.) *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. (1995) Washington D.C.

Tartera C., Boscha. and Jofre J. (1988). *The inactivation of bacteriophages infecting Bacteroides fragilis by chlorine treatment and U.V. irradiation*. U.S.A. F.E.M.S. *Microbiology Letters*, Vol 56 p.p. 315-316.

Taylor, G.R. (1982). *The effect of disinfectants on picornavirus structure and infectivity*. In "Viruses and disinfection of water and wastewater", Ed. BUTLER M. MEDLEN A.R. and MORRIS R. Guilford University of Surrey, p.p. 289-297.

Jarro Ruth<sup>1</sup>, Mercedes Iriarte<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Laboratorio de Microbiología del Centro  
de Aguas y Saneamiento Ambiental,  
Universidad Mayor de San Simón,  
Cochabamba, Bolivia.

# EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE INACTIVACIÓN DE TRES ESPECIES DE SALMONELLA (*Salmonella typhi*, *Salmonella* *enteritidis*, *Salmonella typhimurium*) POR EL MÉTODO SODIS

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación evaluó la eficiencia de SODIS (Solar Disinfection) en la inactivación de tres variedades de salmonelas: *Salmonella typhi*, *Salmonella enteritidis* y *Salmonella typhimurium*; se pretende determinar la dosis de radiación UV-A, temperatura y tiempo de exposición necesarios para su inactivación; evaluar la influencia del periodo del año y del estado del tiempo, correlacionar el comportamiento de inactivación entre ellas y finalmente comparar la eficiencia de inactivación respecto a un indicador de contaminación fecal *Escherichia coli*.

Botellas PET de 2.25 litros que contenían agua contaminada con suspensiones de *S. typhi*, *S. enteritidis* y *S. typhimurium* respectivamente, fueron expuestas al sol por 6 horas; cada hora de tratamiento se tomaron datos de Radiación UV-A, temperatura y muestras de agua de las botellas, las que fueron analizadas por la técnica Filtro de membrana.

Los tres tipos de *Salmonella* son inactivados eficazmente por el método SODIS. *Salmonella typhi* ofrece poca resistencia al tratamiento SODIS, se registro 7 log de reducción luego de 4 a 6 horas de tratamiento, alcanzándose dosis de radiación UV-A entre 81.96 y 117 W\*h/m<sup>2</sup> y temperaturas máximas del agua entre 38 y 48 °C, *Salmonella enteritidis* y *Salmonella typhimurium* mostraron 6 log y 7 log de reducción, luego de 6 horas de tratamiento SODIS, alcanzándose dosis de radiación UV-A entre 100 y 120 W\*h/m<sup>2</sup> y temperaturas máximas del agua entre 38 y 49 °C. SODIS remueve altas concentraciones de salmonelas en 6 horas.

## INTRODUCCIÓN

El agua no incluye entre las sustancias que la componen a los microorganismos que causan enfermedades; ellos se encuentran ahí por que el hombre, de una u otra forma permite y facilita que se les vierta, a través de sus desechos, en cantidades significativas a los cursos de agua, estos problemas de contaminación se agudizan con el crecimiento de las poblaciones (Pelczar et al., 1982; Caseres, 1990).

En Bolivia más de 2.5 millones de habitantes no tienen acceso al servicio de agua potable. En el área rural la situación es particularmente alarmante; alrededor del 43% de la población no tiene acceso al agua potable (Ministerio de Vivienda y Servicios Básicos, 2002), esto se traduce en elevados índices de Enfermedades Diarreicas Agudas (EDA); más de 450.000 menores de 5 años sufren episodios de EDA, existiendo una mayor incidencia en el área rural en relación al área urbana (Encinas, 2003), y lamentablemente 20% de las defunciones en niños menores a 5 años es por esta causa (SEDES, 2003).

La OPS (1994), estima que el 80% de estas enfermedades en países de América Latina son debidas a la mala calidad del agua, ya que si el agua no es potable puede llevar en ella microorganismos dañinos para la salud. Las bacterias, y entre ellas la familia Enterobacteriaceae, es el grupo más grande y heterogéneo con importancia clínica, las bacterias más comunes que contaminan el agua son las salmonelas, y en el ser humano causan enteritis, infección sistémica y fiebre entérica (Pumarola et al., 1987; Carmona et al., 1997; Murray et al., 1997; Inglis et al., 1999; Brooks, 2002).

El año 2001 el Instituto SELADIS (Instituto de Servicios de Laboratorio de Diagnostico e Investigación en Salud) y Hospitales Generales (de capitales de departamento) recibieron el reporte de 9470 posibles casos de salmonelosis en toda Bolivia, de los cuales 4447 (47%) dieron resultados positivos (Gráfico 1). Los departamentos de Santa Cruz, Beni y La Paz fueron los que reportaron mayores casos de infección por *Salmonella* (Gutiérrez, 2002).

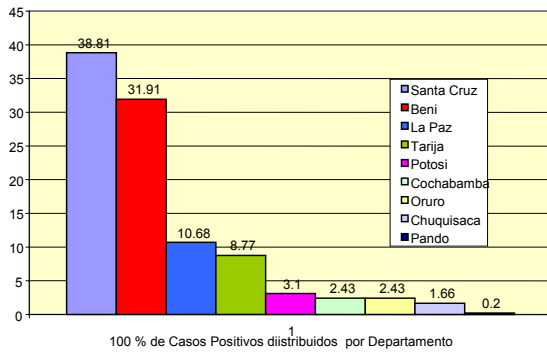


Gráfico 1: Casos de salmonelosis Bolivia - 2001.  
Fuente: Gutierrez, (2002)

Desinfectar el agua para consumo se hace prioritario para mantener la salud. La desinfección solar “SODIS” es una alternativa de desinfección de bajo costo y de fácil aplicación, su eficiencia ha sido ampliamente probada en la inactivación de indicadores de contaminación (CASA-UMSS, 1997; Lawand et al., 1998; SODIS,2000; Caslake et al., 2004)

SODIS usa el poder destructivo de diferentes bandas del espectro electromagnético para destruir patógenos, las bandas más importantes para SODIS son el UV-A, rojo e infrarrojo (Oates, 2001). El efecto de la absorción de UV por las bacterias es la inhibición de la síntesis de DNA, RNA y proteínas, por tanto supresión de la actividad celular (Zaratti, 1997 Ingraham, 1998; Madigan et al., 1999 y Black, 1999) ; a nivel de las membranas celulares se produce hidroxidación de ácidos grasos, produciéndose “stress” oxidativo con producción de radicales libres que actúan causando daño biológico y el aumento de la temperatura del agua actúa sinérgicamente en el proceso de desinfección de los microbios (Oates, 2001).

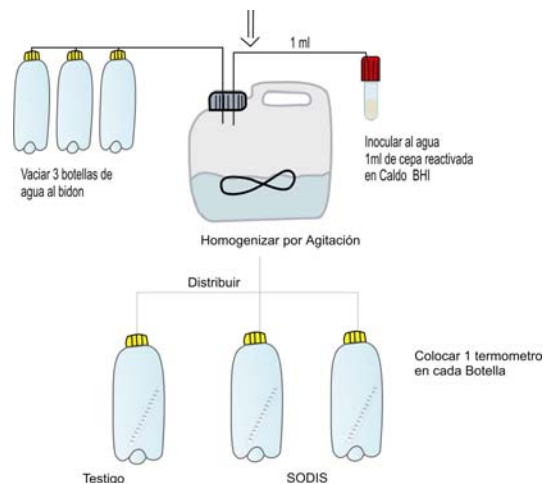
### MÉTODOS:

En el presente estudio se utilizaron cepas nativas de *S. typhi* y *S. enteritidis* adquiridas de INLASA La Paz y cepa de *S. typhimurium* enviada de Suiza. Se eligieron estos patógenos para el estudio por ser las cepas circulantes en nuestro medio con

mayor incidencia (I.G.B.J, 2004; SELADIS, 2003).

### Inoculación de muestras y tratamiento sodis:

Se inoculó 1 ml de cepa reactivada en caldo BHI (Brain Heart Infusión de BBL becton), con una densidad bacteriana de 108 UFC/ml (equivalente a 1gr de heces fecales de una persona con salmonelosis), en 3 botellas PET de 2.25 litros de agua potable libre de cloro, dispuestos en un bidón de 20 litros; se homogeneizó por agitación y se distribuyó nuevamente en las botellas; dos botellas fueron expuestas al sol (SODIS), por 6 horas de 9:00 am hasta 15:00 pm, sobre un techo de calamina corrugada, la tercera botella (testigo) fue guardada en la sombra (Esquema 1).



Esquema 1: Inoculación de las muestras

### Registro de datos y toma de muestras:

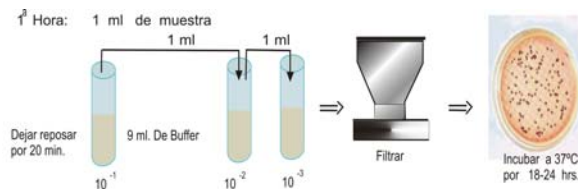
Cada hora de tratamiento se tomaron datos de radiación UV-A, temperatura, y muestras de agua de las botellas en forma creciente como sigue: 1° hora 1ml, 2° hora 1ml , 3° hora 10 ml , 4° hora 25 ml, 5° hora 50 ml , 6° hora 100 ml (la botella fue retirada del sol).

### Análisis bacteriológico muestra testigo:

Se tomó 1 ml de muestra de la botella testigo, luego se realizó diluciones hasta 10<sup>-4</sup>, y se filtro 10 ml de la ultima dilución (Repindex, 1992) siguiendo la técnica de membrana filtrante (Standar Methods,

1981); la membrana fue depositada sobre agar SS (Agar salmonella–shigella de DIFCO), luego se la incubó por 18 a 24 hrs. a 35.5° C de temperatura. Finalmente se realizó el conteo de las colonias características (colonias circulares, planoconvexas, ligeramente transparentes con centro negro por la producción de H<sub>2</sub>S). Se realizó el mismo procedimiento al finalizar el ensayo.

**Análisis bacteriológico de muestras SODIS** (Esquema 2): 1° hora: Se realizó diluciones hasta 10<sup>-3</sup>, se filtró 10 ml de la última dilución. 2° hora: se realizó diluciones hasta 10<sup>-2</sup> y se filtró 10 ml de última dilución; la 3°, 4°, 5° y 6° horas se filtraron muestras de agua sin dilución. Las membranas fueron depositadas sobre agar SS, e incubadas por 18 a 24 hrs. a 35.5° C de temperatura. Finalmente se realizó el conteo de las colonias características, los resultados fueron expresados en UFC/100 ml de agua.



Esquema 2: Toma de muestras y Análisis Bacteriológico

Este procedimiento se siguió para cada una de las bacterias en estudio.

**Análisis de Datos:** Primero se procedió al ordenamiento de los datos (Cuadro 1).

PERIODO ESTADO DE TIEMPO	1 (SEPTIEMBRE- OCTUBRE- NOVIEMBRE)	2 (MARZO-ABRIL)
0 (NUBLADO)	Cielo parcialmente cubierto de nubes. Alternan periodos de Sol fuerte y nublado. A inicio de los ensayos hay brisa fría y viento al finalizar.	Cielo parcialmente cubierto de nubes. El sol es tenue.
1 (SOLEADO)	Cielo claro, completamente despejado. Sol fuerte. A inicio de los ensayos hay brisa fría suave y viento al finalizar	Cielo completamente despejado, Sol fuerte. A inicio de los ensayos hay brisa fría.

Cuadro 1: Ordenación de resultados en Periodo del año y Estado de tiempo.

El análisis de datos se realizó utilizando el paquete estadístico Minitab 13.1, para realizar la correlación gráfica y poder comparar el comportamiento de inactivación de salmonelas con E. coli, los datos fueron analizados en base a la Cinética de Inactivación Bacteriana (Barbeau et al., 1999; Wright y Cairns, 2001).

## RESULTADOS:

Determinación de la dosis de radiación UV-A, temperatura y tiempo de exposición, para la inactivación de salmonelas en relación a 2 periodos del año y estado de tiempo soleado y nublado.

### a) Periodo 1 (Septiembre- Octubre- Noviembre) – Estado de Tiempo 0 (Nublado).

En ensayos realizados durante los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre, en estado de tiempo nublado, se observó que la inactivación de S. typhi (Con una concentración inicial de 10<sup>7</sup>) fue de 100 % (7 log de reducción bacteriana) luego de 6 horas de tratamiento SODIS, luego de alcanzar Temperatura máxima promedio del agua dentro de la botella de 43°C y Dosis de Radiación UV-A acumulada promedio de 117.21W\*h/m<sup>2</sup>.

Las cepas de Salmonella enteritidis, y Salmonella typhimurium, ofrecen mayor resistencia al tratamiento SODIS, que S. typhi (Gráfico 1). En condiciones iguales de exposición (6 horas), temperatura (43°C) y dosis de radiación UV-A acumulada (117W\*h/m<sup>2</sup>), alcanzaron porcentajes de Inactivación del 99.9999 % (6 log de reducción bacteriana). Quedando luego del tratamiento SODIS: 94 UFC/100 ml de S. enteritidis y 25 UFC/100 ml de S. typhimurium.

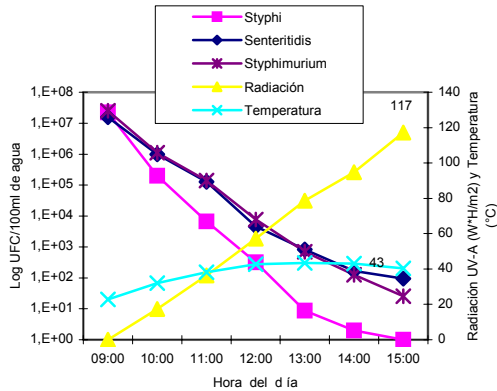


Gráfico 1: Inactivación de salmonelas por tratamiento SODIS (Periodo 1-Estado de tiempo 0).

**b) Periodo 1 (Septiembre- Octubre- Noviembre) – Estado de Tiempo 1 (Soleado).**

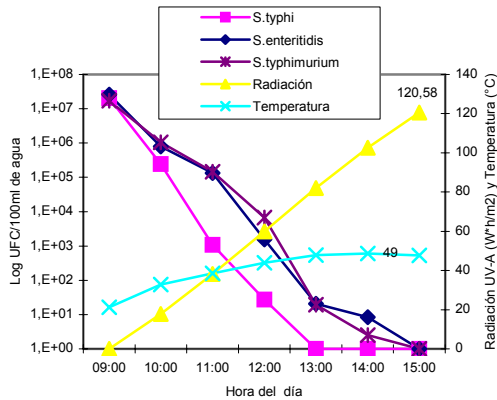


Gráfico 2: Inactivación de salmonelas por tratamiento SODIS (Periodo 1-Estado de tiempo 1).

El gráfico N° 2 muestra el comportamiento promedio de inactivación de las salmonelas en estudio, de ensayos realizados durante los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre, en estado de tiempo soleado. Salmonella typhi, ofrece menor resistencia al tratamiento. Se observó inactivación del 100% luego de 4 horas de tratamiento SODIS, habiéndose alcanzado temperatura máxima del agua dentro de las botellas de 48°C y Dosis de Radiación UV-A acumulada de 81 W\*h/m2.

Salmonella enteritidis, y Salmonella typhimurium, ofrecen mayor resistencia. Se requirió 6 horas de tratamiento SODIS,

temperatura máxima del agua dentro de las botellas de 49°C y dosis de radiación UV-A acumulada de 120 W\*h/m2, para alcanzar una inactivación del 100 %.

**c) Periodo 2 (Marzo-Abril) – Estado de tiempo 0 (Nublado).**

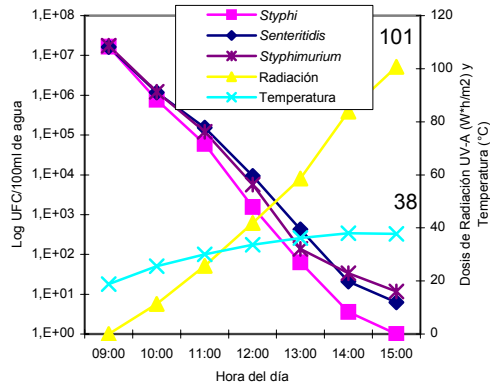


Gráfico 3: Inactivación de salmonelas por tratamiento SODIS (Periodo 2-Estado de tiempo 0)

En ensayos realizados durante los meses de Marzo y Abril, en estado de tiempo nublado; se observó que luego de 6 horas de tratamiento SODIS, Salmonella typhi alcanzó una inactivación de 100 %. Salmonella enteritidis y Salmonella typhimurium alcanzaron 99.9999 % de inactivación (Gráfico 3); quedando 6 UFC/100ml de S. enteritidis y 12 UFC/100ml de S. typhimurium, luego de alcanzar temperatura máxima del agua dentro de las botellas de 38 °C y Dosis de Radiación UV-A acumulada de 100 W\*h/m2.

**d) Periodo 2 (Marzo-Abril) – Estado de Tiempo 1 (Soleado).**

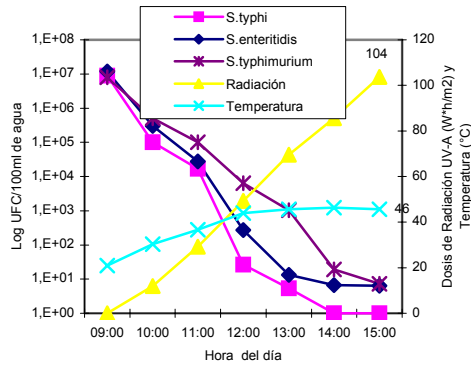


Gráfico 4: Inactivación de salmonelas por tratamiento SODIS (Periodo 2-Estado de tiempo1).

El comportamiento de inactivación de las especies de Salmonelas en estudio en ensayos realizados durante los meses de Marzo y Abril en estado de tiempo Soleado (Gráfico 4), muestran que Salmonella typhi ofrece menor resistencia a SODIS, ya que luego de 5 horas de tratamiento, a una temperatura máxima del agua dentro de las botellas de 46°C y Dosis de Radiación UV-A acumulada de 85 W\*h/m2, alcanzan 100 % de inactivación.

En cambio Salmonella enteritidis y Salmonella typhimurium alcanzan 99.9999 % de inactivación luego de 6 horas de tratamiento SODIS, habiendo alcanzado temperatura máxima del agua dentro de las botellas de 46 °C y Dosis de Radiación UV-A acumulada de 103 W\*h/m2. Quedando 6 UFC/100ml de S. enteritidis y 7 UFC/100 ml de S. typhimurium.

### Correlación en la inactivación de tres especies de salmonelas por método SODIS:

Al realizar la comparación entre la inactivación de S. typhi, S. enteritidis y S typhimurium; se encontraron altas correlaciones (Gráfico 5) entre 0.83 y 0.97. La más vulnerable es S. typhi, S. enteritidis y S. typhimurium ofrecen la misma resistencia (Gráfico 5).

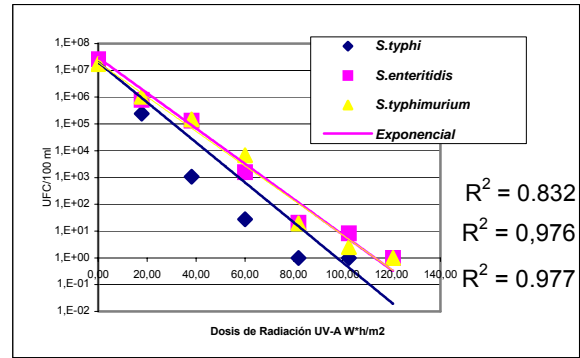


Gráfico 5: Correlación en la inactivación de salmonelas por SODIS

Comparación de la eficiencia del método SODIS en la inactivación de salmonelas y un indicador de contaminación Escherichia coli.

Para realizar ésta comparación, se realizaron 2 ensayos con repeticiones, con los 4 microorganismos, siguiendo el procedimiento descrito anteriormente.

Se observó inactivación del 100 % (reducción de 7 Log) de S. enteritidis y S. typhimurium, a la sexta hora de tratamiento, luego de alcanzar temperatura máxima promedio del agua de 47 °C y 103 - 106 W\*h/m2 de radiación UV-A S. typhi registro inactivación de 100% a la quinta hora de tratamiento (datos no mostrados en el gráfico). En cambio E. coli ofrece mayor resistencia al tratamiento, bajo las mismas condiciones de radiación y temperatura se registro inactivación del 99.9999 % (6 Log de reducción bacteriana) quedando luego del tratamiento, 97 y 74 UFC/100ml de agua (Gráfico 6)

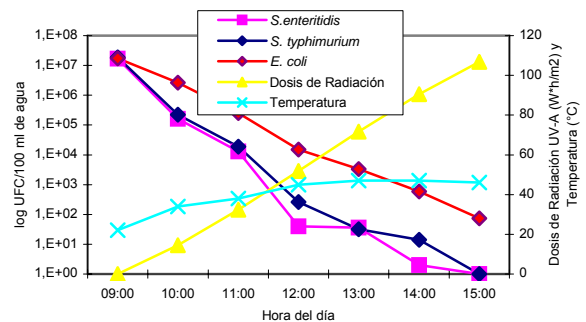


Gráfico 6: Inactivación de salmonelas y E.coli por SODIS.

## **DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN:**

### **Evaluación de la influencia de periodo y estado de tiempo en la eficiencia de inactivación de salmonelas por SODIS.**

El Análisis de Varianza de las medias de la Dosis de Radiación UV-A acumulada entre periodos 1 y 2 ( $P=0.004$ ) muestra diferencias significativas entre ellas, habiéndose registrado valores elevados de Radiación UV-A en el periodo 1 (117  $W^*h/m^2$  en tiempo nublado y 120  $W^*h/m^2$  en tiempo soleado), en relación al periodo 2 (100  $W^*h/m^2$  en tiempo nublado y 103  $W^*h/m^2$  en tiempo soleado); esto podría deberse como indican Díaz (1997) y Torrico (2004), a la variación por estaciones en la incidencia de UV sobre la superficie de la tierra. La dosis de radiación UV-A registrada entre los estados de tiempo soleado y nublado no muestran diferencias significativas ( $P=0.013$ ), la alternancia de nubes y claros en los ensayos en tiempo nublado (Tabla 1), pudo influir en estos resultados ya que si bien el efecto de las nubes habitualmente es el de atenuar la radiación, cuando en el cielo hay nubes y claros, la radiación UV es reflejada y devuelta hacia la tierra, lo cual puede dar como resultado final que la cantidad de radiación presente sea levemente mayor que la que habría con cielo totalmente despejado (Díaz, 1997; Smith, 2001).

### **Determinación de la dosis de radiación UV-A, temperatura y tiempo de exposición, para la inactivación de salmonelas.**

*S. typhi* es la bacteria que menos resistencia ofrece al tratamiento SODIS. La reducción bacteriana es de 1 log en promedio por hora de tratamiento en tiempo nublado (Gráficos 1,3), y 2 log en tiempo soleado (Gráficos 2,4) requiriéndose para su inactivación total (100%), 4 a 6 horas de tratamiento, dosis de radiación UV-A entre 81 y 117  $W^*h/m^2$  y temperatura máxima del agua entre 33 y 48 °C; estos resultados pueden deberse a que *S. typhi* es sensible a la luz solar, ya que ésta la destruye en pocas horas (Piatkin, 1981; Carmona, 1997), ó a que *S. typhi* a diferencia de las otras dos especies en

estudio posee en su estructura un antígeno somático (Vi), lábil al calor, álcalis y ácidos que está muy relacionado con su capacidad de virulencia (Brooks et al., 2002).

*S. enteritidis* y *S. typhimurium* ofrecen mayor resistencia al tratamiento SODIS. La reducción bacteriana es de 1 log por hora de tratamiento SODIS en todos los ensayos (vea gráficos 1-4), requiriéndose 6 horas de tratamiento, dosis de radiación UV-A entre 100 y 120  $W^*H/m^2$  y temperaturas máximas del agua entre 38 y 49 °C, para obtener 99.9999% y 100% (6 log y 7 log) de reducción bacteriana.

Estos comportamientos de inactivación (de los 3 microorganismos), pueden deberse a la acción sinérgica de la radiación UV-A y la temperatura acumulada por hora de tratamiento (Wegelin et al., 1994; Lawand et al., 1997; McGuigan et al., 1998) o deberse al efecto de las especies fotoreactivas de oxígeno que se forman sobre la superficie de la membrana celular y que tienen efecto letal, por exposición a radiación UV-A (Reed, 1997; Reed et al., 2000). Estudios realizados por Kramer et al., (1987), demostraron que la exposición de *S. typhimurium* a radiación UV-A próxima (300-400 nm) induce a un rápido decaimiento en el crecimiento celular.

Los gráficos 1 a 4 también nos permiten ver que entre la 12:00 y 13:00 hrs, la reducción de las tres especies de salmonelas es de 2 log (99%), esto es debido a la elevada intensidad de radiación que llega a la tierra alrededor del medio día (Díaz, 1997; Smith y Smith, 2001). Finalmente Fjendbo et al. (1998) demostró que es posible eliminar *S. typhimurium* adicionada al agua en forma artificial, con el uso de paneles solares alcanzando temperaturas superiores a 65 °C, ésta temperatura muy superior a las registradas en los ensayos nos muestra la importancia del efecto sinérgico de la temperatura con la radiación UV-A para la eficiencia de SODIS.

### **Correlación en la inactivación de tres especies de salmonelas por método SODIS:**

Al realizar la comparación entre la inactivación de *S. typhi*, *S. enteritidis* y *S.*

typhimurium; se encontraron tasas de inactivación muy altas y similares entre los tres organismos, entre 0.83 y 0.97 (vea Gráfico 5). Las correlaciones más bajas se observaron con *S. typhi*. Esta diferencia puede deberse al efecto deletéreo importante de la temperatura sobre *S. typhi* observado durante el tratamiento SODIS en el presente trabajo. Al pertenecer las tres especies en estudio, a un mismo género los resultados observados no son extraños, ya que el mecanismo subyacente a la desinfección por UV, es similar dentro de estos organismos (bacterias de características estructurales similares) (Wright & Cairns, 2001).

#### **Comparación de la eficiencia del método SODIS en la inactivación de salmonelas y un indicador de contaminación Escherichia coli.**

El Gráfico 6 permite ver la resistencia superior de *E. coli* (en relación a salmonelas) al tratamiento SODIS. Al ser *E. coli* una bacteria termorresistente cuya temperatura óptima de crecimiento es de 44.0 a 44.5°C (OPS, 1987; OMS, 1995), la temperatura de 47°C alcanzada durante el tratamiento SODIS, por sí sola no produce efectos significativos en la desinfección; Fjendbo et al. (1998) demostró que es posible eliminar *Salmonella typhimurium*, y *Escherichia coli* añadidas artificialmente al agua, calentándola con paneles solares hasta temperaturas de 65°C o más, lo que confirma la anterior aseveración. A su vez Rojko (2003), indica que temperaturas arriba de 46 °C no tienen efectos significativos en la desinfección de *E. coli*. y que la inactivación proporcionada por desinfección solar se debe a la acción sinérgica de la radiación y la temperatura.

Estos resultados deducen la utilidad de *E. coli* como indicador de la mortalidad de *Salmonella* y su importancia debido a los costos elevados de los métodos de aislamiento e identificación de salmonelas en relación a *E. coli*.

#### **AGRADECIMIENTOS:**

Expreso mis sinceros agradecimientos al Convenio UMSS – EAWAG/SANDEC, por

hacer posible la realización del presente trabajo mediante su financiamiento.

Al Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental (CASA) y al Programa de Microbiología de la Carrera de Biología por el apoyo brindado con equipos y material.

A la fundación SODIS, por el apoyo bibliográfico.

#### **REFERENCIAS:**

- BARBEAU, B. BOULOS, L. DESJARDINS, R. COALLIER, J. PREVOST, M. 1999. Examining the Use of Aerobic Spore-forming Bacteria to Assess the Efficiency of Chlorination. *Wat. Res.* Vol. 33, No. 13. pp. 2941-2948.
- BLACK, J.G. 1999. *Microbiology Principles and Explorations*. 4<sup>o</sup> ed. Ed. Prentice Hall. New Jersey-U.S.A. pp 186-187.
- BROOKS, G. BUTEL, J.; MORSE, S. 2002. *Microbiología médica de Jawetz, Melnick y Adelberg* 16<sup>a</sup> Ed. El Manual Moderno. México D.F. pp. 71-73, 267.
- CARMONA, O., M.J. GOMES, T. MONTES, C. MARCANO, F. MARINO. 1997. *Microbiología Médica de Divo*. 5<sup>a</sup> ed. Ed. McGraw-Hill-Interamericana. México. pp 177-182.
- CASA-UMSS. 1997. Reporte final trabajo validación de método SODIS en comunidad Sacabamba.
- CACERES, O. 1990. *Desinfección del agua*, Ministerio de Salud. OPS/OMS. Perú.
- CASLAKE LF, CONNOLLY DJ, MENON V, DUNCANSON CM, ROJAS R, TAVAKOLI J. 2004. Disinfection of contaminated water by using solar irradiation. *Appl Environ Microbiol.* Feb;70(2):1145-50.
- DIAZ, S. 1997. "Variación De la Radiación Ultravioleta en la Superficie Terrestre". Memoria del Seminario: Naturaleza y Efectos de la Radiación Ultravioleta y la Capa de Ozono. Instituto de Investigaciones físicas – UMSA. La Paz. pp 21-28.
- ENCINAS, J. 2003. Evaluación de la Eficiencia del Método "SODIS" en la Inactivación de Coliformes Termotolerantes en Tres Regiones de Bolivia (Valle, Trópico y altiplano). Tesis de Grado para Obtener el

Diploma Académico de Licenciatura en Biología. FCyT-UMSS. Cochabamba - Bolivia.

FJENDBO JORGENSEN AJ, NOHR K, SORENSEN H, BOISEN F. 1998. Decontamination of drinking water by direct heating in solar panels. *Appl Environ Microbiol.* 1981 May;41(5):1083-7.

GUTIERREZ, M.E. 2002. Optimización de ADN de Salmonella aislada de coprocultivos del Hospital de clínicas. Tesina Lic. Bioquímica. UMSA, La Paz - Bolivia.

I.G.B.J. (Instituto Gastroenterológico Boliviano Japonés) 2003-2004. Libro de registros de microbiología.

INGLIS, T. 1999. Churchil guía de bolsillo de Microbiología Clínica. Ed. Harcourt Brace -España.

INGRAHAM, J., INGRAHAM,C. y PRENTIS, H. 1998. Introducción a la Microbiología. Ed. Reverté S.A. Vol. 1. Barcelona-España. pp 215-217.

KRAMER, F.G. & AMES, B.N. 1987. Oxidative Mechanisms of toxicity of Low-Intensity Near-UV Light in Salmonella typhimurium. *Journal of Bacteriology.* Vol. 169, N° 5. pp 2259-2266.

LAWAND, T.A.; ALWARD, R.; ODEYENI,O.; HAHN, J.;KANDPAL, T. C. And AYOUB, J. 1998. Solar Water Disinfection. pp 34-131.

MADIGAN M. T., MARTINKO J. M., PARKER J. 1999. Brock: Biología de los Microorganismos. 8a ed. Ed. PRENTICE HALL IBERIA. Madrid. pp 308, 313-315.

Mc GUIGAN,K.G.; JOYSE, T.M.; CONROY, R.M., GUILLESPIE, J.B. AND ELMORE-MEEGAN,M. 1998. Solar disinfection of drinking water contained in transparent plastic voltees: characterizing the bacterial inactivation process. *Journal of Applied Microbiology.* 84: 1138-1148.

MINISTERIO DE VIVIENDA Y SERVICIOS BÁSICOS. 2002. Plan Bolivia - Sector de Servicios Básicos de Agua Potable y Saneamiento. La Paz – Bolivia. pp 1-2.

MURRAY, P. KOBAYASHI, G. PFALLER, M; ROSENTHAL, K. 1997.

*Microbiología Médica.* 2ª ed. Ed. Harcourt Prace Barcelona-España. pp. 227-240.

OATES, P. M. 2001. Solar disinfection for point of use water treatment in Haiti. Thesis of Master of Engineering en civil and Environmental Engineering at the Massachusetts Institute of Technology. Columbia University. pp 16-20.

OMS, 1995. Guías para la calidad del agua potable, Vol. 1: Recomendaciones.2a ed. Ed. Alsograf. España. pp 2-24

OPS. 1987. Guías para la calidad del agua potable, Vol. 2: Criterios relativos a la salud y otra información de base. publicación científica N° 506.pp 3-16.

OPS/ CEPIS. 1994. Las condiciones de salud en las Américas. Vol. 1. publicación científica N° 549. pp. 281-289.

PELCZAR, M.; R. REID; E.C.S. CHAN. 1982. Microbiología. 4º ed. Ed. Mc Graw – Hill .Mexico . pp 525-531.

PIATKIN, K. D. Y Y. U. KRIVOSHEIN. 1981. Microbiología (con Virología e Inmunología). 2a ed. Ed. “MIR”. Moscu. pp 302-313

PUMAROLA, A.; RODRÍGUEZ, A; GARCIA, J.A.; PIEDROLA, G. 1987. Microbiología y Parasitología Médica. 2ª ed. Salvat Editores. pp 100-110, 422-429.

REED, R.H. 1997 Sunshine and fresh air: A practical approach to Combating water-borne disease. *Waterlines.* Vol. 15, No. 4: 27 –29.

REED, R.H., S.K. MANI & V. MEYER. 2000. Solar photo-oxidative disinfection of drinking water: preliminary field observations. *Aplied Microbiologi,* 30, 432-436.

REPINDEX. 1992. El colera. *Repidisca:* N°. 41. pp. 066-75.

ROJKO, C. 2003. Solar Disinfection of Drinking Water. Thesis Degree of Master of Science in Environmental Engineering of Woecester Potytechninc Institute.

SELADIS. 2002-2003. Libro de resultados de Cultivos Bacteriológicos del Instituto de Servicios de Laboratorio de Diagnostico e Investigación en Salud . La Paz.

SEDES. 2004. Servicio Departamental de Salud Cochabamba.  
SMITH R., SMITH T. 2001. Ecología. 4a ed. Ed. PEARSON EDUCACION, S.A., Madrid. pp 37-95.  
SODIS, 2000. Resumen Ejecutivo Proyecto SODIS. Cochabamba Bolivia.  
STANDAR METHODS. 1981. For the examination of water and wastewater. 17<sup>a</sup> ed. Ed. Joint Editorial Board.  
TORRICO, C A. FUENTES M I. 2004. Influencia de los parámetros físicos en la desinfección solar de Coliformes termotolerantes en el agua. Tesis de grado para obtener el Título de Licenciatura en Física. FCyT-UMSS. Cochabamba-Bolivia.  
WEGELIN, M., CANONICA, S., MECHSNER, K., 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.  
WRIGHT, B. y CAIRS, L. 2001. Luz UV. [www.ingenieroambiental.com](http://www.ingenieroambiental.com).  
ZARATTI, F. 1997. "La Radiación Solar". Memoria del Seminario: Naturaleza y Efectos de la Radiación Ultravioleta y la Capa de Ozono. Instituto de Investigaciones físicas – UMSA. La Paz. pp 1-6.  
ZARATTI, F. 1997. "La Radiación Solar". Memoria del seminario: Naturaleza y Efectos de la Radiación Ultravioleta y la Capa de Ozono. Instituto de Investigaciones Físicas UMSA. La Paz. pp1-6.

# CÁLCULO DE PROPIEDADES ÓPTICAS EN LOS PLÁSTICOS PET (POLIETILENO DE TEREFTALATO) PARA OPTIMIZAR EL MÉTODO SODIS

## RESUMEN

Se estudió en el proceso de desinfección solar del agua (SODIS) ciertos aspectos físicos como las propiedades ópticas de los recipientes utilizados en dicho método, por lo cual se recolectaron 14 tipos de botellas PET de diferente color (transparentes, celestes y verdes), grosor ( 0.24-0.60 [mm]) y diámetro ( 5-15.5 [cm]). Se realizaron medidas en un espectrofotómetro de rango (190 a 1100 [nm]). Los espectros de transmitancia obtenidos muestran que los PET transparentes y celestes tienen buena transmitancia en el rango visible e infrarrojo pero ésta va decreciendo gradualmente en el UV-A hasta hacerse nula para las bandas UV-B y UV-C. En base a estos espectros se obtuvieron otros parámetros como el índice de refracción, reflectancia, absorción y los coeficientes de extinción. También se encontró la pérdida global de radiación UV-A debido a la forma cilíndrica de las botellas y las paredes de los recipientes.

## INTRODUCCIÓN

Para una radiación solar característica, la eficacia de la técnica de desinfección solar del agua podría ser fuertemente afectada por la elección del contenedor, especialmente por su transmitancia a la componente ultravioleta. La calidad así como la cantidad de la radiación transmitida a través de las paredes está determinada por la forma, espesor y el material del cual está hecho el contenedor acompañado por la altitud solar y la distribución espectral de la radiación incidente.

La radiación solar que incide sobre una superficie transparente puede ser absorbida, reflejada fuera de la superficie o transmitida a través de la superficie. En otras palabras:

**Energía total incidente = energía absorbida + energía reflejada + energía transmitida.**

El que la energía sea absorbida, reflejada o transmitida es función de:

- la longitud de onda de la radiación incidente,
- el ángulo con el cual la radiación llega a la superficie,
- el índice de refracción del material, y
- el coeficiente de absorción del material y su grosor.

**Incidencia Normal:** Cuando una onda electromagnética incide normalmente sobre la interfase de dos medios lineales cuyos índices de refracción son  $n_1$  y  $n_2$ . Los

coeficientes de transmisión y reflexión están dados por:

$$R \equiv I_R/I_I = [(n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)]^2 \quad (1)$$

$$T \equiv I_T/I_I = 4n_1n_2/(n_1 + n_2)^2 \quad (2)$$

Se puede notar que en la interfase se cumple:

$$R + T = 1 \quad (3)$$

Como lo requiere el Principio de Conservación de la Energía

**Incidencia Oblicua:** Los coeficientes de reflexión y transmisión para polarización del campo eléctrico perpendicular y paralela al plano de incidencia son los siguientes:

$$T_{\parallel}(\theta_i, \theta_t) = \{(\sin 2\theta_i \sin 2\theta_t) / [\sin^2(\theta_i + \theta_t) \cos^2(\theta_i - \theta_t)]\} \quad (4)$$

$$T_{\perp}(\theta_i, \theta_t) = (\sin 2\theta_i \sin 2\theta_t) / \sin^2(\theta_i + \theta_t) \quad (5)$$

$$R_{\parallel} = 1 - T_{\parallel} \quad (6)$$

$$R_{\perp} = 1 - T_{\perp} \quad (7)$$

donde  $\theta_i$  y  $\theta_t$  son los ángulos de incidencia y transmisión (refracción), que están relacionados con los índices de refracción de los medios por la ley de refracción :

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

La luz natural es una onda totalmente de polarizada, en la que el campo eléctrico lleva una dirección completamente aleatoria dentro del plano perpendicular al vector de onda  $k_i$ . Una manera adecuada de representar este tipo de polarización es mediante luz polarizada lineal cuyo azimut  $\alpha_i$  toma valores al azar. De este modo es fácil obtener el coeficiente de reflexión (reflectancia) y el coeficiente de transmisión (transmitancia) a partir de las expresiones:

$$R(\alpha_i) = R_{\parallel} \cos^2(\alpha_i) + R_{\perp} \sin^2(\alpha_i) \quad (9)$$

$$T(\alpha_i) = T_{\parallel} \cos^2(\alpha_i) + T_{\perp} \sin^2(\alpha_i) \quad (10)$$

basta promediar estas fórmulas para todos los ángulos posibles en forma aleatoria, es decir

$$\begin{aligned} R_{nat} &= \text{Promedio}[R(\alpha_i)]; \\ T_{nat} &= \text{Promedio}[T(\alpha_i)] \end{aligned} \quad (11)$$

Por tanto, promediando las ecuaciones 9 y 10 sobre todos los ángulos  $\alpha_i$  posibles y teniendo en cuenta que  $\sin^2 2\alpha_i = \cos^2 2\alpha_i = 1/2$ , se tiene

$$R_{nat} = \frac{1}{2}(R_{\parallel} + R_{\perp}), \quad T_{nat} = \frac{1}{2}(T_{\parallel} + T_{\perp}). \quad (12)$$

$$T_{nat}(\theta_i, \theta_j) = \frac{1}{2}\{T_{\parallel}(\theta_i, \theta_j) + T_{\perp}(\theta_i, \theta_j)\}. \quad (13)$$

$$T_{nat}(\theta_i, \theta_j) = \frac{1}{2}\left\{\frac{\sin 2\theta_i \sin 2\theta_j}{\sin^2(\theta_i + \theta_j) \cos^2(\theta_i - \theta_j)} + \frac{\sin 2\theta_i \sin 2\theta_j}{\sin^2(\theta_i + \theta_j)}\right\} \quad (14)$$

Evidentemente, se sigue cumpliendo la siguiente relación:

$$R_{nat} + T_{nat} = I \quad (15)$$

La transmitancia global de un material transparente no solo depende de la proporción reflejada de la radiación incidente, sino también de la proporción absorbida al pasar a través del material. Si la longitud de la trayectoria es a través del material es  $L$  y si éste es visualizado como dividido en un número de capas  $dL$ , cada una de las cuales reduce la intensidad  $I$  por  $dI$  en proporción al grosor  $dL$  y el coeficiente de extinción  $K$  de la hoja, entonces:

$$-dI = I * K * dL$$

Lo cual integrando sobre la distancia entre los límites  $I$  y la intensidad original  $I_0$  da la siguiente expresión para la transmitancia  $\tau_a$ , (considerando absorción solamente),

$$\tau_a = e^{-KL}$$

donde  $L$  es la longitud atravesada por el haz.

### Materiales y Métodos:

Los recipientes utilizados en los experimentos fueron los siguientes:

Tipo	Característica	Volumen Lts.	Color	Diámetro cm.	Grosor mm.
2	No retornable	0.5	Transparente	6.4	0.30
1	No retornable	0.5	Celeste	6.4	0.30
12	No retornable	0.5	Verde	6.4	0.38
6	No retornable	1	Transparente	7.5	0.32
4	No retornable	2	Transparente	10.1	0.30
13	Retornable	2	Transparente	9.7	0.60
7	No retornable	2	Celeste	10.1	0.30
11	No retornable	2	Verde	10.1	0.30
3	No retornable	2.25	Transparente	10.1	0.24
10	No retornable	2.25	Verde	10.1	0.30
5	No retornable	2.5	Transparente	11.5	0.30
9	No retornable	5	Celeste	15.5	0.30
8	No retornable	5	Transparente	15.5	0.30

Los espectros de transmitancia en el UV, visible e infrarrojo fueron obtenidos mediante un espectrofotómetro Shimadzu modelo UV-1601 en el rango espectral de 190-1100 nm.

Las muestras de plástico de alrededor de 1 x 5 cm. fueron extraídas de la parte superior, media e inferior de las botellas y colocadas en un dispositivo que las mantiene transversales en el compartimento de muestras. No se usó un blanco específico.

Las lecturas de transmitancia con este método están afectadas por diferentes factores:

- reflexión en la interfase material/aire, que es alrededor de 8 % de la pérdida de transmitancia;
- refracción debido a una curvatura ligera de la muestra de plástico;
- dispersión debido a inhomogeneidades del material polimérico y raspaduras sobre la superficie (importante para botellas usadas);
- absorción por el material plástico.

Para tener un valor confiable de mediciones se tomaron de 5 a 7 barridos para cada

plástico, y se usó el promedio de estos como el espectro final.

### Cálculo del Índice de Refracción

En las mediciones realizadas con el espectrofotómetro se tienen dos interfaces y tres medios por los cuales la radiación atraviesa.

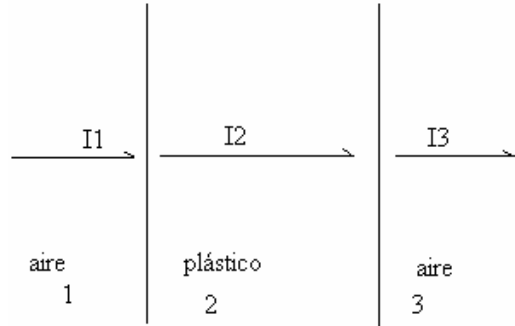


Figura 1. Medios por los que atraviesa la radiación en las mediciones con el espectrofotómetro

Cuando la onda pasa del aire ( $n_1 = 1$ ) al plástico ( $n_2 = n_p$ ),  $T_1$  será:

$$T_1 \equiv I_2/I_1 = 4n_1n_2/(n_1+n_2)^2 = 4n_p/(1+n_p)^2 \quad (1)$$

y cuando la onda sale del plástico ( $n_1 = n_p$ ) al aire ( $n_2 = 1$ ),  $T_2$  será:

$$T_2 \equiv I_3/I_2 = 4n_1n_2/(n_1+n_2)^2 = 4n_p/(n_p+1)^2 \quad (2)$$

Pero lo que el espectrofotómetro mide es:

$$T_3 \equiv I_3/I_1 \quad (3)$$

despejando de las anteriores ecuaciones obtenemos la transmitancia y reflectancia del plástico:

$$T_3 \equiv I_3/I_1 = 16n_p^2/(1+n_p)^4 \quad (4)$$

$$R_3 = T_3 - 1 \quad (5)$$

La ecuación (4) relaciona la transmitancia del material,  $T_3$  (medida

con el espectrofotómetro) con su índice de refracción.

Como se tiene los valores medidos de  $T_3$ , se ha obtenido el índice de refracción,  $n_p$ , como función de la longitud de onda,  $\lambda$ , para cada uno de los plásticos usando la ecuación:

$$n_p^4 + 4n_p^3 + (6-16/T_3)n_p^2 + 4n_p + 1 = 0 \quad (6)$$

Para esto se realizó un programa en Matlab R12, el cual primero lee el valor  $T_3$  correspondiente a cada  $\lambda$ , resuelve la ecuación (6) para  $n_p$ , verifica que la solución sea real y mayor a uno y finalmente almacena los valores  $n_p$  en un vector.

### Transmisión para incidencia aleatoria aire – plástico - agua

Cuando una botella es expuesta al sol los rayos solares de la radiación solar directa (onda totalmente despolarizada) chocan con la superficie de la botella con distintos ángulos de incidencia que varían en el rango  $0^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$  (Ver Fig. 8-13), lo cual provoca que la energía recibida por la superficie de la botella sea menor debido a las pérdidas por reflexión.

Además los rayos solares tienen que atravesar dos interfaces (aire – plástico, plástico - agua) y dos medios (plástico y agua) para llegar a los microorganismos presentes en el agua.

Según la ecuación (14) de la sección 3.2.2 el coeficiente de transmitancia, para la primera interface donde,  $n_i = n_{\text{aire}} = 1$ ,  $n_t = n_{\text{plastico}} = n_p$  y es:

$$T_{\text{natural } 1}(\theta_i, \theta_t) = \frac{1}{2}[\text{sen}2\theta_i \text{sen}2\theta_t / \text{sen}^2(\theta_i + \theta_t) \cos^2(\theta_i - \theta_t)]$$

$$+ \frac{\sin 2\theta_i \sin 2\theta_t}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)}] \quad (1)$$

rayos solares, es decir,

$$\sin \theta_i = n_p \sin \theta_t \quad (2)$$

$$T_{natural\ 3} = T_{natural\ 3}(\theta_i, n_p, n_{agua})$$

Y para la segunda,  $n_i = n_p$ ,  $n_t = n_{agua}$ , junto con:

$$T_{natural\ 2}(\theta_i, \theta_t) = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin 2\theta_i \sin 2\theta_t}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} \cos^2(\theta_i - \theta_t) + \frac{\sin 2\theta_i \sin 2\theta_t}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} \right] \quad (3)$$

$$n_p \sin \theta_i = n_{agua} \sin \theta_t \quad (4)$$

Finalmente, la proporción de radiación solar que atraviesa justo después de la segunda interfase es:

$$T_{natural\ 3} = T_{natural\ 1} * T_{natural\ 2} \quad (5)$$

Combinando las ecuaciones 1 al 4 y reemplazando en la ecuación 5 se ve que la transmitancia del recipiente a la radiación solar (onda totalmente despolarizada) a una determinada hora del día es función no sólo del índice de refracción del material y el agua sino también del ángulo de incidencia de los

### Reflexión para incidencia perpendicular aire – plástico - aire

Como dijimos en las mediciones realizadas con el espectrofotómetro se tienen dos interfaces y tres medios por los cuales la radiación atraviesa.

Cuando la onda pasa del aire ( $n_1 = 1$ ) al plástico ( $n_2 = n_p$ ), la transmitancia  $T_1$  será:

$$T_1 \equiv I_2/I_1 = \frac{4n_1n_2}{(n_1+n_2)^2} = \frac{4n_p}{(1+n_p)^2} \quad (1)$$

Y la proporción reflejada es:

$$R_1 \equiv 1 - T_1 = 1 - \frac{4n_p}{(1+n_p)^2} \quad (2)$$

y cuando la onda sale del plástico ( $n_1 = n_p$ ) al aire ( $n_2 = 1$ ), la transmitancia  $T_2$  será:

$$T_2 \equiv I_3/I_2 = \frac{4n_1n_2}{(n_1+n_2)^2} = \frac{4n_p}{(n_p + 1)^2} \quad (3)$$

Y la proporción reflejada en la segunda interface es:

$$R_2 \equiv 1 - T_2 = 1 - \frac{4n_p}{(1+n_p)^2} \quad (4)$$

Por lo tanto la proporción total de radiación reflejada calculada será:

$$R' = R_1 + R_2 = 2R_1 \quad (5)$$

Pero como se tiene los valores de  $T_3$

medidos con el espectrofotómetro:

$$T_3 \equiv I_3/I_1 \quad (6)$$

También podemos calcular la proporción total de radiación reflejada a partir de los datos  $T_3$  medidos través de:

$$R = I - T_3 \quad (7)$$

ya que  $T_3$  es la transmitancia real (medida).

En todo caso R deberá ser igual o inferior a  $R'$ . Pudiendo atribuirse la diferencia,  $R' - R$ , a la absorción de la radiación por el plástico como consecuencia de su paso a través de este.

Usando los valores calculados del índice de refracción de las Fig 8-10, 11y 12 se han obtenido los espectros de reflectancia teóricos usando las ecuaciones 2, 4 y 5. Asimismo se han obtenidos los espectros de reflectancia a partir de los espectros de transmitancia medidos usando la ecuación 7.

### Resultados para Incidencia perpendicular aire-plástico-aire

Se muestra como ejemplo un espectro de transmitancia para el plástico no retornable transparente de [2.25 Lts.] medido el cual tiene un error porcentual máximo del orden del 1%. El error absoluto va aumentando con la longitud de onda Fig. 2.

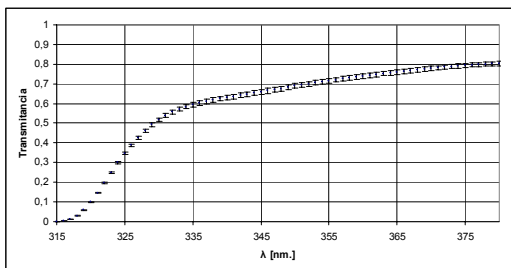


Figura 2. Espectro y comportamiento del error en el espectro de transmitancia (UV-A) del Pet transparente de 2.25 aire – plástico - aire

La siguiente tabla muestra los valores medios de la transmitancia en el rango global y UV-A para cada tipo de plástico.

Tipo	Volumen Lts.	Color	T UV-A	T Global
No retornable	0.5	Transparente	0.686	0.851
No retornable	0.5	Celeste	0.631	0.824
No retornable	0.5	Verde	0.372	0.711
No retornable	1	Transparente	0.630	0.801
No retornable	2	Transparente	0.687	0.861
Retornable	2	Transparente	0.464	0.771
No retornable	2	Celeste	0.648	0.818
No retornable	2	Verde	0.436	0.734
Retornable	2	Verde	0.238	0.575
No retornable	2.25	Transparente	0.689	0.844
No retornable	2.25	Verde	0.445	0.737
No retornable	2.5	Transparente	0.688	0.841
No retornable	5	Celeste	0.604	0.793
No retornable	5	Transparente	0.688	0.841

El comportamiento de los espectros de todas las botellas del mismo color es prácticamente el mismo notándose sólo una diferencia cuantitativa que se debe a la diferencia en el grosor.

Una característica común de todos los Pet estudiados es que ninguno transmite longitudes de onda inferiores a los 315 nm., es decir absorben todo el UV-B (280-315 nm) y también el UV-C ( $\lambda < 280$  nm.).

Cálculo del Índice de Refracción

A continuación se muestra un ejemplo de la dependencia del índice de refracción,  $n_p$ , con  $\lambda$  en el rango UV-A Fig 3:

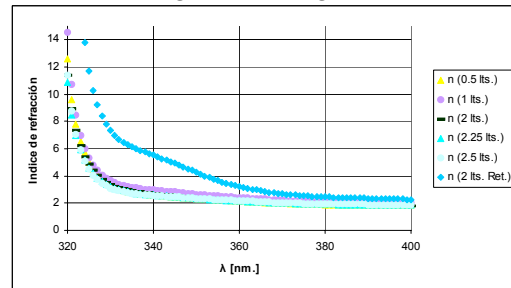


Figura 3. Índices de refracción (Pets Transparentes)

El valor medio de  $n_p$  en el rango UV-A para cada plástico se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Valor medio del índice de refracción,  $n_p$ , en el rango UV-A para cada plástico

Tipo	Volumen Lts.	Color	Diámetro cm.	$n$ (UV-A)
No retornable	0.5	Transparente	6.4	2.709
No retornable	0.5	Celeste	6.4	2.885
No retornable	0.5	Verde	6.4	5.316
No retornable	1	Transparente	7.5	3.010
No retornable	2	Transparente	10.1	2.676
Retornable	2	Transparente	9.7	5.292
No retornable	2	Celeste	10.1	2.877
No retornable	2	Verde	10.1	4.350
Retornable	2	Verde	10.1	8.724
No retornable	2.25	Transparente	10.1	2.631
No retornable	2.25	Verde	10.1	4.259
No retornable	2.5	Transparente	11.5	2.639
No retornable	5	Celeste	15.5	3.098
No retornable	5	Transparente	15.5	2.639

### Transmisión para incidencia aleatoria aire – plástico - agua

Por ejemplo para la botella transparente No Retornable de 2.25 Fig 4 Lts.  $T_{natural\ 3}$  tiene el siguiente comportamiento en la banda UV-A.

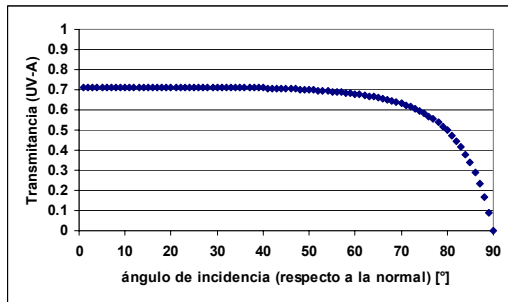


Figura 1. Influencia del ángulo de incidencia en la transmisión de radiación UV-A (aire –plástico – agua)

Como se puede observar en la Fig. 4 la transmitancia disminuye más rápidamente para ángulos de incidencia grandes ( $\theta_i > 60^\circ$ ).

Usando el valor medio de  $n_p$  en el rango UV-A de la Tabla 8-3, y  $n_{agua} = 1.34$  (en el rango UV-A) se obtuvo  $T_{natural\ 3}$  como función de  $\theta_i$  para cada una de las botellas.

Pero como en el mismo instante los ángulos de incidencia varían en el rango

$0^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$  debido a la forma del recipiente para obtener un valor representativo de la transmitancia de la radiación UV-A del plástico se ha promediado  $T_{natural\ 3}$  en el rango  $0^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$ .

Los valores medios de  $T_{natural\ 3}$  para cada tipo de botella se muestran en la Tabla 8-4.

Tabla 1. Valores medios de la transmitancia de los recipientes a la radiación solar (incidencia aleatoria),  $T_{natural\ 3}$

Tipo	Volumen Lts.	Color	Diámetro cm.	T UV-A	T Global	$T_{natural\ 3}$ UV-A
io retornable	0.5	Transparente	6.4	0.68570525	0.85074071	0.62669664
io retornable	0.5	Celeste	6.4	0.63137963	0.82374071	0.59872805
io retornable	0.5	Verde	6.4	0.37229218	0.7109312	0.33893475
io retornable	1	Transparente	7.5	0.62961728	0.80055641	0.57975852
io retornable	2	Transparente	10.1	0.6865679	0.86140256	0.63198624
Retornable	2	Transparente	9.7	0.46387654	0.7713375	0.34062766
io retornable	2	Celeste	10.1	0.64806173	0.81785026	0.5999407
io retornable	2	Verde	10.1	0.43618519	0.73386462	0.41839699
Retornable	2	Verde	10.1	0.23779012	0.5749	0.18524386
io retornable	2.25	Transparente	10.1	0.68937037	0.8437375	0.63950403
io retornable	2.25	Verde	10.1	0.4446749	0.73683205	0.42725899
io retornable	2.5	Transparente	11.5	0.68835391	0.84099209	0.63816889
io retornable	5	Celeste	15.5	0.60386914	0.79311795	0.566868
io retornable	5	Transparente	15.5	0.68835391	0.84099209	0.63816889

Los valores de  $T_{natural\ 3}$  (promediados para  $0^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$ ) son inferiores a los valores de T UV-A (para  $\theta_i = 90^\circ$ ) en un 4 a 10 % para la mayoría de los plásticos, lo que era de esperarse por las pérdidas de reflexión. Esta diferencia es máxima para los plásticos retornables verde y transparente, 28 y 36% respectivamente, esto debido a sus altos índices de refracción.

### Reflexión para incidencia perpendicular aire – plástico - aire

Las gráficas correspondientes a  $R' = 2R_1$  y R para un plástico Pet de cada tipo se muestran a continuación.

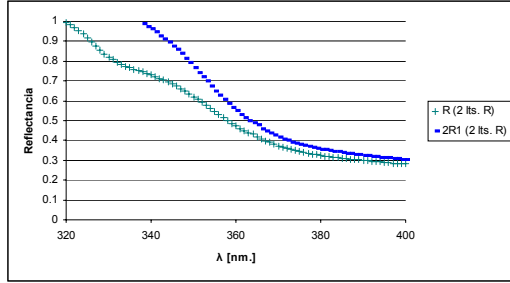


Figura 2. Reflectancia espectral para incidencia perpendicular (Pet transparente, aire -plástico - aire)

Se ve claramente y para todos los plásticos, que la reflectancia real R es menor a la teórica  $R' = 2R_1$ . Confirmando de esta manera que el plástico absorbe la proporción  $R - R'$ .

### Absorción para incidencia perpendicular aire - plástico - aire

Habiendo comprobado que la reflectancia real R es menor a la teórica  $R' = 2R_1$ . Y atribuyendo la diferencia  $R - R'$  a la absorción de la radiación solar en el plástico se han obtenido los espectros de absorción para cada uno de los plásticos Pet.

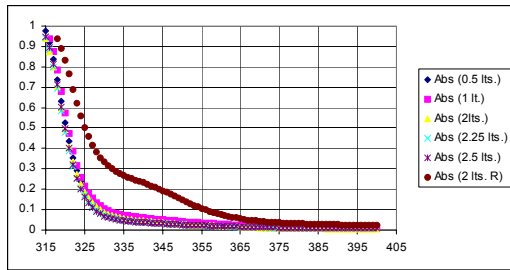


Figura 3. Absorbancia Espectral (Pets Transparentes)

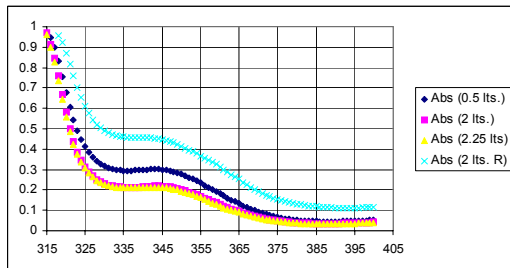


Figura 4. Absorbancia Espectral (Pets Verdes)

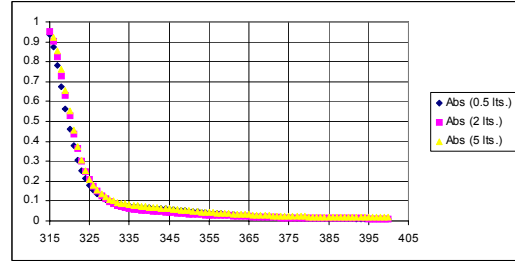


Figura 5. Absorbancia Espectral (Pets Celestes)

Por lo tanto, considerando solamente absorción de la radiación por el material, (sin tomar en cuenta reflexión) la proporción que transmite sería:

$$T_a = 1 - Abs \quad (1)$$

Como  $T_a$  se puede obtener a partir de los espectros de absorción usando la ecuación 1 y se ha medido el grosor  $L$ , de cada plástico; se ha obtenido el coeficiente de extinción  $k$  en función de  $\lambda$  a través de:

$$k = \ln(T_a) / L \quad (2)$$

A continuación se muestra el comportamiento del coeficiente de extinción en función a la longitud de onda para los plásticos Pet.

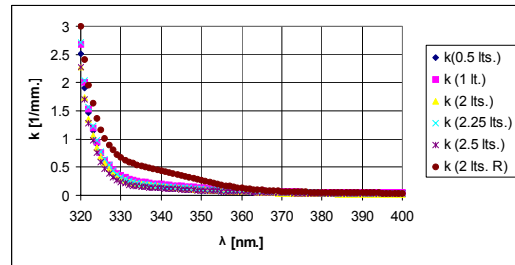


Figura 6. Coeficientes de Extinción (Pets Transparentes)

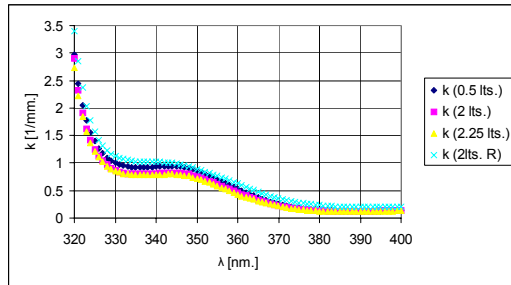


Figura 7. Coeficientes de Extinción (Pets Verdes)

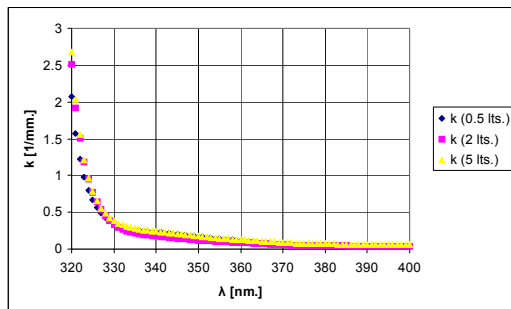


Figura 8. Coeficientes de Extinción (Pets Celestes)

Como se puede ver en las anteriores gráficas el coeficiente de extinción aumenta rápidamente al aproximarse al límite inferior de la banda UV-A lo cual explica la absorción total de las bandas UV-B y UV-C.

La onda reflejada en la primera interface (aire-plástico) no afecta al material (vuelve al aire), sin embargo la onda reflejada en la segunda interface (plástico- aire) genera una onda transmitida que vuelve a salir del plástico pero la onda reflejada vuelve a entrar al plástico, y este proceso se repite hasta que la intensidad de la onda reflejada dentro del plástico sea despreciable; esta es la razón por la cual los plásticos PET van cambiando sus propiedades ópticas después de largos períodos de exposición al sol.

### Conclusiones

El estudio de las propiedades de transmisión de los plásticos PET transparentes, celestes y verdes mostró que casi todos tienen buena transmitancia

en el rango visible (380-780 nm.) e infrarrojo cercano (780-1100 nm.), con algunos picos de absorción de los verdes y azules en el rango visible, sin embargo la transmitancia decrece en el rango UV-A gradualmente desde alrededor de 80% hasta hacerse nula para las bandas UV-B y UV-C, por lo que puede atribuirse el proceso de inactivación de *Coliformes termotolerantes* principalmente a la radiación solar UV-A. En base a los espectros de transmitancia de cada plástico se obtuvieron otros parámetros como el índice de refracción, reflectancia, absorción y los coeficientes de extinción. Además se obtuvo la transmitancia real de cada plástico tomando en cuenta la forma del recipiente, por ejemplo la forma cilíndrica de las botellas PET provoca pérdidas por reflexión en su superficie de un 7% a 30%, afectando de esta forma a la cantidad de radiación solar recibida por los microorganismos. Por lo tanto, la cantidad de energía transmitida al agua no sólo es reducida por las características del espectro de transmitancia y el grosor del plástico sino también por la forma del contenedor usado. La pérdida global debida a ambas causas está en el rango de 33% a 66%, con un máximo de 81.5 % en el caso del plástico retornable verde.

### Recomendaciones

Debido a su capacidad y buena transmitancia se recomienda usar las botellas transparentes o celestes de 5 Lts. o cualquiera de menor capacidad.

### Referencias

12. Wegelin, M., Canonica, S., Mechsner, K., 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.
13. Acra, A. Raffoul, Z., & Karahagopian,

- Y. (1984). Solar Disinfection of Drinking Water and Oral Rehydration Solutions. UNICEF. Paris.
14. Lawand T. A., Alward R., Odeyemi, O., Habn J., Kandpal, T. C., & Ayoub, J. (1988). Solar Water Disinfection. *Proceedings of a work-shop held at the Brace Research Institute. Montreal, Canada.* International Development Research Center, IDRC-MR231e, Ontario, Canada.
15. Liu B. Y. H. and Jordan R.C. Daily insolation on surfaces tilted toward the equator, ASHRAE J. 1961; 3(10): 53-59.
16. Griffiths David J. Introduction to electrodynamics. 1999; p. 384-386.
17. Cabrera J.M. Óptica Electromagnética Fundamentos, 1993; p.209-218.
18. Acra, A., Jurdi, M., Mu'Allem, H., Darahagopian, Y. & Raffoul, Z. (1990). Water Disinfection by Solar Radiation: Assessment and Applications. International Development Research Center. Ontario, Canada.

# INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS EN LA INACTIVACIÓN DE COLIFORMES TERMOTOLERANTES POR LA DESINFECCIÓN SOLAR DEL AGUA Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE SODIS EN COCHABAMBA Y BOLIVIA

## RESUMEN

En vista de que la eficacia del método SODIS en un determinado lugar y mes del año esta influenciada por aspectos físicos tales como la disponibilidad terrestre de radiación solar, transmisión de la radiación solar a través de las paredes de los recipientes usados y absorción espectral de la radiación solar por el agua en la presente investigación se desarrolló y validó (con ensayos SODIS) un modelo que explica y cuantifica la influencia de los parámetros físicos y biológicos en la desinfección solar de microorganismos en el agua. El análisis estadístico muestra una buena correlación entre las variables ( $R^2 > 0.9$ ), el modelo matemático:  $D_{\text{dosissolar de inactivación}} = [\ln(N_0)/k] / (T_{\text{botella}} * e^{-2.06 * x})$  muestra esta relación con  $k$  siendo la constante de inactivación,  $N_0$  la concentración inicial del microorganismo indicador,  $T_{\text{botella}}$  la transmisión real del recipiente a la radiación solar y  $x$  la profundidad del mismo. Incluyendo este modelo al que simula perfiles de radiación solar se ha desarrollado un programa que calcula los tiempos de exposición requeridos para: un determinado microorganismo indicador con una cierta concentración inicial expuesto en un determinado tipo de recipiente, lugar y mes del año. Se ha encontrado que en el área menos favorecida de Cochabamba y en el mes donde la radiación solar es mínima, todos los PET transparentes y celestes necesitan menos de 3.5 horas de exposición para reducir 2 unidades logarítmicas de Coliformes Termotolerantes. Este tiempo es 1.4, 2.1 y 3.4 veces superior para reducir 3, 4 y 5 unidades logarítmicas respectivamente. En el mes en que la radiación solar es máxima el tiempo requerido se reduce prácticamente a la mitad. Usando el mismo programa y aprovechando los mapas mensuales de energía total diaria que la NASA brinda para toda Bolivia se han obtenido los mapas mensuales de los tiempos de exposición requeridos por los distintos tipos de recipientes para inactivar Coliformes Termotolerantes 2, 3, 4 y 5 unidades logarítmicas en Bolivia. De los cuales se puede concluir que los recipientes más recomendables para SODIS son los PETs transparentes y celestes con los cuales se necesita menos de un día (12 [h.]) de exposición incluso para inactivar 5 unidades logarítmicas en invierno.

Palabras clave: Desinfección solar; Simulación Solar; Coliformes termotolerantes

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua representa una de las mayores fuentes de transmisión de enfermedades en el mundo, particularmente en áreas donde la higienización del agua no es disponible o es inadecuada. Se estima que alrededor de una tercera parte de la población de los países en desarrollo no tiene agua segura para beber [1] debido a muchos factores, principalmente la no disponibilidad de procedimientos apropiados de purificación e higienización de agua. La desinfección solar del agua es una tecnología simple que usa la radiación solar para inactivar y destruir bacterias patógenas presentes en el agua. Esencialmente, el tratamiento consiste en llenar contenedores limpios y transparentes con agua los cuales son puestos a pleno sol por varias horas. El uso de la energía solar,

la cual es universalmente disponible y libre de cargo, es la base de esta tecnología sustentable y de bajo costo. Pero aunque la aplicación de la purificación solar del agua es simple. La exposición de una pequeña cantidad de agua contaminada a la radiación solar es una compleja interacción de procesos físicos, químicos y biológicos, por lo cual la desinfección solar del agua también tiene sus límites [1]. La velocidad de destrucción de bacterias en realidad depende de un número de factores influyentes. Los más importantes incluyen los siguientes:

- Disponibilidad y distribución espectral de la radiación solar en un lugar específico;
- Intensidad de la radiación solar durante el tiempo de exposición, la cual

depende de la localización geográfica (i.e. latitud), variaciones estacionales y nubosidad, el rango efectivo de longitudes de onda del espectro, y tiempo del día;

- El tipo de bacteria a ser expuesto, la naturaleza y composición del medio, y la presencia de elementos nutritivos capaces de apoyar al crecimiento y multiplicación de los distintos microorganismos;

- Las características de los contenedores en los cuales es puesta el agua contaminada durante la exposición (i.e. el color, la forma, el tamaño, su transparencia a la radiación solar, y el grosor de sus paredes.);

- Las características de absorción espectral del agua (i.e. grado de turbiedad) y su profundidad, ambos siendo factores importantes que determinan el grado de penetración de la radiación solar, así como la posibilidad de escudar a los microorganismos de sus efectos letales.

Como se puede ver, en adición a los varios aspectos microbiológicos del proceso de desinfección solar del agua, ciertas cuestiones pertenecientes a la física de esta aparentemente simple tecnología pueden afectar significativamente su eficacia. [12,13]

En lo referente a la disponibilidad terrestre de radiación solar y la transmisión de la radiación solar a través de las paredes de los recipientes y el agua se tiene un estudio reportado con los siguientes resultados.

La buena concordancia de los datos de radiación global y UV-A recolectados en el monitoreo U.M.S.S.-C.A.S.A. con los datos proporcionados por el Mapa de Distribución de la Energía Solar en Bolivia y la NASA Langley Research Center Atmospheric Sciences Data Center permitió validar estas fuentes y obtener la variación mensual y espacial de la radiación solar en Bolivia [47]. La NASA Langley Atmospheric Sciences Data Center prové datos accesibles en la web sobre el promedio, mínimo y máximo (de 10 años, 1983-1993) de la cantidad total de energía recibida en un día representativo de cada mes. Estos datos tienen una resolución espacial de un grado

de latitud y longitud para el mundo entero y fueron obtenidos del sitio web: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.

Asimismo un estudio realizado sobre las propiedades de transmisión de los recipientes de 14 tipos de botellas PET de diferente color, grosor y diámetro (5-15.5 cm) reporta los siguientes resultados (Ver Tabla 1). (para más detalles sobre los cálculos consultar [47])

**Tabla 1 Valores medios de la transmitancia de los recipientes a la radiación solar**

Tipo	Diámetro		T Global	T <sub>natural 3</sub> (UV-A)	T Agua (UV-A)	T total (UV-A)
	cm.	T UV-A				
NR0.5T	6.4	0.686	0.851	0.627	0.877	0.524
NR0.5T	6.4	0.631	0.824	0.599	0.877	0.525
NR0.5V	6.4	0.372	0.711	0.339	0.877	0.297
NR1T	7.5	0.630	0.801	0.580	0.857	0.497
NR2T	10.1	0.687	0.861	0.632	0.812	0.513
R2T	9.7	0.464	0.771	0.341	0.819	0.279
NR2C	10.1	0.648	0.818	0.600	0.812	0.487
NR2V	10.1	0.436	0.734	0.418	0.812	0.340
R2V	10.1	0.238	0.575	0.185	0.812	0.150
NR2.25T	10.1	0.689	0.844	0.640	0.812	0.519
NR2.25V	10.1	0.445	0.737	0.427	0.812	0.347
NR2.5T	11.5	0.688	0.841	0.638	0.789	0.504
NR5C	15.5	0.604	0.793	0.567	0.727	0.412
NR5T	15.5	0.688	0.841	0.638	0.727	0.464

(Nota: NR0.5T= No Retornable de 0.5 litros Transparente; V=Verde; C=Celeste)

Donde,  $T_{natural 3}$  es la transmisión promedio a la banda UV-A de cada tipo de botella tomando en cuenta la forma cilíndrica de las botellas y que la radiación solar es una onda con polarización aleatoria;  $T_{agua}$  es la transmisión de una columna de agua igual al diámetro de cada tipo de botella y finalmente  $T_{Total}$  es la proporción real de radiación UV-A que llega al fondo de una botella con agua descontando las pérdidas por reflexión y absorción en el recipiente y el agua contenida en el.

También cabe mencionar que se han desarrollado modelos para simular el perfil diario de radiación solar a partir de la

cantidad total de energía recibida en un día [21]. Basándose en uno de estos modelos Peter M. Oates hizo una evaluación del potencial de aplicación de SODIS en Haití [19].

En vista de que la eficacia del método SODIS en un determinado lugar y mes del año esta influenciada por todos los factores anteriormente mencionados, el desarrollo de un modelo que explique y cuantifique la influencia de todos esos parámetros podría ser de utilidad en la determinación de la viabilidad de emplear el procedimiento bajo una condición medioambiental determinada. Tal necesidad dio lugar a esta investigación.

## 2. METODOLOGÍA

Para evaluar el potencial de desinfección para SODIS en Cochabamba y Bolivia tomando en cuenta la influencia de los aspectos mencionados se desarrolló un modelo que relaciona los parámetros físicos y los biológicos. Se validó el modelo a través de ensayos de exposición de los 14 tipos de botellas PET de diferente color, grosor y diámetro (5-15.5 cm) al sol en Cercado-Cochabamba. Y una vez validado el modelo se evaluó el potencial que las demás regiones de Cochabamba y Bolivia tienen para la aplicación de SODIS a través un algoritmo que calcula el tiempo necesario de exposición para:

- Un determinado tipo de microorganismo ( $k$ ) con una cierta carga inicial ( $N_0$ )
- Un tipo de recipiente con una transmitancia ( $T_{natural3}$ ) y profundidad ( $x$ ) determinado
- Un determinado lugar de exposición y
- Un mes del año (época del año)

### 2.1 Ensayos de exposición de botellas al sol

Los ensayos de exposición al sol se realizaron con botellas PET de distinta transmitancia y volumen con dos finalidades:

-Validar el modelo propuesto (ver ecuación (1)) y

-Obtener la constante de inactivación,  $k$ , y la *Dosis<sub>net</sub>* de inactivación para los *Coliformes termotolerantes*.

Para cada ensayo se procedió de la siguiente manera:

-El agua se recolectó de la red principal de SEMAPA,

-se eliminó el contenido de cloro por oxigenación con uno o dos días de anticipación,

- el día de la prueba se inocularon concentraciones de *coliformes termotolerantes* del orden de  $10^5$  [UFC/100 ml.]

-se mezclaron los bidones durante aproximadamente 40-60 segundos

-se llenaron las botellas con el agua hasta el tope

-se expusieron las botellas al sol sobre un soporte de calamina plateado inclinado hacia el norte aproximadamente  $20^\circ$  (ver Fig.1)



Figura 1. Ensayo típico en la terraza del C.A.S.A. - UMSS

Los valores medios de la intensidad de radiación solar global y UV-A fueron almacenados por un data logger cada 1, 5 ó 15 minutos.

### 2.2 Análisis microbiológico

Los análisis para Coliformes termotolerantes se realizaron siguiendo la técnica de la membrana filtrante descrita en APHA [45], que consiste en filtrar al vacío un determinado volumen del agua a ser analizada a través de una membrana de celulosa de 0.45 micras de porosidad.

Las bacterias retenidas en la superficie fueron incubadas en un medio de cultivo sólido selectivo, agar M-FC, en estufa a

Baño María a 44.5 °C de temperatura durante 24 horas, desarrollando colonias típicas de color azul (Fig. 2). Realizándose posteriormente el recuento de colonias, expresándose los resultados en Unidades Formadoras de Colonia presentes en 100 ml de muestra [UFC/100 ml].



Figura 2. Conteo de las unidades formadoras de colonia para las diferentes botellas

Cada ensayo se analizó alrededor de 5 a 7 botellas de cada tipo, con intervalos de 1 a 1.5 horas de exposición, desde aproximadamente las 9:00 A.M., esto con el propósito de construir el perfil de inactivación durante el día.

### 2.3 Análisis de los datos

El modelo propuesto en este trabajo consiste en descontar las pérdidas que la radiación solar experimenta al atravesar la botella y el agua (Ver Fig. 3), para obtener el efecto neto de la radiación solar UV-A sobre los microorganismos indicadores, que en nuestro caso son los *Coliformes termotolerantes*.

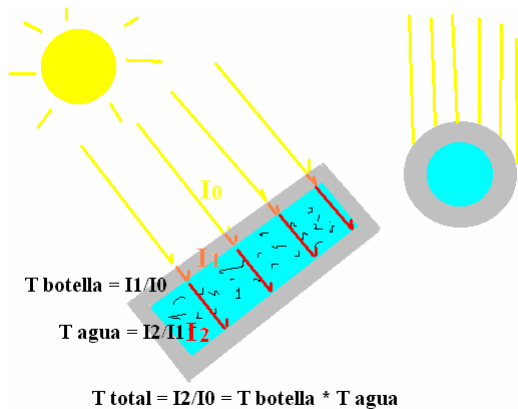


Figura 3. Esquema del modelo propuesto

Podemos dividir el desarrollo del modelo de la siguiente manera:

a) Transmisión de la botella a la radiación solar,  $T_{\text{botella}}$ :

La transmisión a la radiación solar de un determinado tipo de botella (en un determinado instante) no solo es función de las propiedades ópticas del material del cual está hecha la botella sino también del ángulo de incidencia de los rayos solares respecto de la superficie de la botella (influencia de la forma de la botella). Es por esta causa que se ha usado la denominada transmitancia,  $T_{\text{natural}}$  en el rango UV-A para cada tipo de botella (Ver Tabla 1).

b) Transmisión de la columna de agua a la radiación UV-A,  $T_{\text{agua}}$ :

Una vez que la radiación solar ha atravesado la botella, ésta es reducida exponencialmente con la profundidad de la botella, razón por lo que se usan los valores de transmitancia correspondientes a cada tipo de botella, usando el diámetro de cada botella como la máxima profundidad que la radiación solar debe atravesar.

c) Proporción recibida por los microorganismos,  $T_{\text{Total}}$ :

Finalmente se obtiene la proporción final (real) de radiación UV-A que los microorganismos reciben multiplicando las dos anteriores proporciones (Ver Tabla 1).

d) Dosis recibida por los microorganismos,  $Dosis_{\text{neta}}$ :

En base a los resultados del inciso c) podemos definir la dosis neta recibida por un microorganismo expuesto a la radiación solar durante un intervalo de tiempo como:

$$\begin{aligned}
 Dosis_{\text{neta}} &= Dosis_{\text{solar}} * (T_{\text{natural}} * T_{\text{agua}}) \\
 &= Dosis_{\text{solar}} * (T_{\text{natural}} * e^{-2.06 * x}) \\
 &= Dosis_{\text{solar}} * T_{\text{Total}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Donde,  $Dosis_{\text{solar}}$  es la dosis de radiación solar UV-A recibida por la superficie exterior de la botella, la cual es medida por el sensor UV-A.

e) Relación entre los parámetros físicos y los biológicos:

La relación entre los parámetros físicos como son la  $Dosis_{solar}$ , la  $T_{natural}$  ( $T_{botella}$ ) y  $T_{agua}$  con los parámetros biológicos propios de cada microorganismo, como ser la constante de inactivación,  $k$  y la  $Dosis_{neta}$  recibida por éste se obtuvo a través de los perfiles de inactivación obtenidos durante los ensayos de exposición de botellas a la radiación solar, en los que se usó la  $Dosis_{neta}$ . El perfil de inactivación se ajustó a la conocida cinética de inactivación:

$$N = N_0 e^{-kD} \quad (2)$$

Donde  $k$  es la constante de inactivación para un determinado microorganismo,  $N_0$  es la concentración inicial del microorganismo y  $D$  la  $Dosis_{neta}$  de radiación solar recibida por el microorganismo durante un intervalo de tiempo. Sin embargo, debido a que en los ensayos se alcanzaron concentraciones finales iguales a cero (valores que la ecuación (2) no admitiría a la hora de extrapolar los datos) se desplazó el perfil de inactivación una unidad hacia arriba (Ver Fig.4), para incluir estos valiosos datos que a la final sirvieron para calcular la llamada:  $Dosis_{neta}$  de inactivación y la constante de inactivación,  $k$ , correspondiente a cada ensayo, por extrapolación de la ecuación (2).

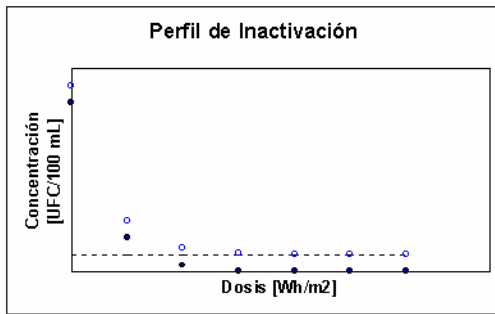


Figura 4. Corrección del Perfil de inactivación

Esta  $Dosis_{neta}$  de inactivación, se define como la dosis necesaria para un 100% de inactivación, y puede ser calculada a partir de la ecuación (2), a través de:

$$\ln N = \ln N_0 - kD \quad (3)$$

como  $N=1$  representa una concentración final nula debido al desplazamiento del perfil, la  $Dosis_{neta}$  de inactivación está dada por:

$$\begin{aligned} Dosis_{neta} \text{ de inactivación} &= (\ln(N_0) - \ln(1)) / k \\ &= \ln(N_0) / k \quad (4) \end{aligned}$$

Que como puede verse depende del tipo de organismo indicador usado y también de la concentración inicial de este organismo indicador en el agua.

f) Ensayos con botellas de distinta transmitancia y volúmen (profundidad):

Los ensayos de exposición al sol se realizaron con las botellas recolectadas, para las cuales se tienen los valores de  $T_{total}$ , según su transmitancia y volúmen (profundidad de agua). Estos ensayos se realizaron con dos finalidades:

- Validar el modelo propuesto y
- Obtener la constante de inactivación,  $k$ , para *Coliformes termotolerantes*.

La Tabla 2 resume el tratamiento de los datos.

**Tabla 2. Resumen del tratamiento de datos.**

Botella	$Dosis_{solar}$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	Concentración [UFC/100ml]	$T_{total}$	$Dosis_{neta}$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	Concentración corregida [UFC/100ml]
Tipo 1	$D_0$	$N_{0-1}$	$T_1$	$D_0 * T_1$	$N_{0-1} + 1$
	$D_1$	$N_{1-1}$	$T_1$	$D_1 * T_1$	$N_{1-1} + 1$
	...	...	...	...	...
Tipo 2	$D_0$	$N_{0-2}$	$T_2$	$D_0 * T_2$	$N_{0-2} + 1$
	$D_1$	$N_{1-2}$	$T_2$	$D_1 * T_2$	$N_{1-2} + 1$
	...	...	...	...	...
Tipo 3	$D_0$	$N_{0-3}$	$T_3$	$D_0 * T_3$	$N_{0-3} + 1$
	$D_1$	$N_{1-3}$	$T_3$	$D_1 * T_3$	$N_{1-3} + 1$
	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
Tipo m	$D_0$	$N_{0-m}$	$T_m$	$D_0 * T_m$	$N_{0-m} + 1$
	$D_1$	$N_{1-m}$	$T_m$	$D_1 * T_m$	$N_{1-m} + 1$
	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...

Donde:

- $D_i$ , es la dosis recibida desde el inicio de la exposición hasta el instante de tiempo en que se toma la  $i$ -ésima muestra (estas dosis se obtuvieron por integración numérica (método Simpson) del perfil de radiación solar UV-A medido para el día del ensayo).

- $N_i$  es la concentración de coliformes termotolerantes correspondiente al instante en que se toma la  $i$ -ésima muestra (la concentración de coliformes termotolerantes se obtuvo siguiendo la técnica de la membrana filtrante).

Después de corregir las dosis,  $D_i$  de radiación UV-A recibidas por los microorganismos usando la ecuación (1) y las concentraciones  $N_i$  como indica la Tabla 2 se obtuvo el perfil de inactivación (ver Fig. 5) correspondiente a cada ensayo con los datos de las dos últimas columnas.

A continuación se muestran, como ejemplo uno de los perfiles obtenidos en los ensayos.

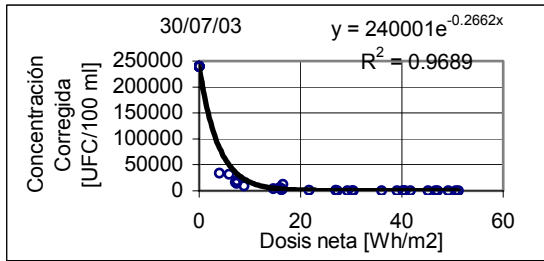


Figura 5. Perfil de Inactivación de Coliformes termotolerantes (30/07/03)

### III. RESULTADOS

#### 3.1 Modelo

Después de 15 ensayos con los distintos tipos de botellas ya mencionados y según la metodología descrita se obtuvo el valor medio tanto de la *Dosis neta de inactivación* (para una concentración inicial promedio de  $N_0 = 2.4 \cdot 10^5$  [UFC/100 ml]) como de la constante de inactivación,  $k$ , la cual no depende de la concentración inicial. Los valores obtenidos son:

$$k \text{ (UV-A)} = (0.275 \pm 0.006) [\text{m}^2/\text{Wh}], 2.4 \%$$

$$\begin{aligned} \text{Dosis neta de inactivación (UV-A)} &= (45 \pm 1) [\text{Wh}/\text{m}^2], \\ &2.41 \% \\ r &= 0.937 \end{aligned}$$

Valores que están en buen acuerdo con la bibliografía como se muestra en la siguiente Tabla.

**Tabla 3. Comparación entre los valores obtenidos y los reportados.**

	Obtenido	Reportado	Diferencia %
$k$ (UV-A) [ $\text{m}^2/\text{Wh}$ ]	0.275	0.279 [26]	1.4
Dosis neta de inactivación (UV-A) [ $\text{Wh}/\text{m}^2$ ]	45		
*Dosis solar de inactivación NR2T (UV-A) [ $\text{Wh}/\text{m}^2$ ]	87.7	83 [1]	5.7

\*Donde el valor de Dosis solar de inactivación NR2T se ha obtenido a partir de la Dosis neta de inactivación usando la ecuación (1).

Asimismo la correlación entre las variables ( $r = 0.937$ ), valida el modelo mostrando que el modelo explica y cuantifica bien la influencia tanto de la transmitancia de la botella como del volumen (profundidad del agua) de los recipientes sobre la desinfección solar de un determinado microorganismo indicador.

Cabe mencionar que las temperaturas máximas alcanzadas en los ensayos fueron de alrededor de  $44^\circ\text{C}$  las cuales fueron inferiores al mínimo requerido de  $\sim 50^\circ\text{C}$  [1] para que haya un efecto sinérgico entre la temperatura y la radiación solar.

#### 3.2 Evaluación del potencial de desinfección a través del programa

Con el modelo validado y habiendo obtenido la constante de inactivación,  $k$ , para los Coliformes termotolerantes se puede obtener la *Dosis solar de inactivación* para una determinada concentración inicial ( $N_0$ ) de coliformes termotolerantes expuestos a la radiación solar en un determinado tipo de recipiente (con sus características propias de transmisión a la radiación solar,  $T_{\text{natural}}$  y tamaño,  $T_{\text{agua}}$ ) usando la ecuación (1):

$$Dosis_{solar \text{ de inactivación}} = Dosis_{neta \text{ de inactivación}} / T_{Total} \\ = (\ln(N_0/k) / (T_{natural} * e^{-2.06 * x})) \quad (5)$$

Como se puede observar la dosis solar de inactivación que el microorganismo debe recibir depende de:

-la concentración inicial ( $N_0$ ) y el tipo de microorganismo indicador ( $k$ )

-el tipo de recipiente usado, es decir, su transmisión a la radiación solar UV-A ( $T_{natural}$ ) y su volúmen (profundidad de agua  $x$ )

Para encontrar la  $Dosis_{solar \text{ de inactivación}}$  para los diferentes tipos de botellas variando los valores de  $N_0$  se ha escrito un código en Matlab el cual calcula  $Dosis_{solar \text{ de inactivación}}$  para cada tipo de plástico y con un valor de  $N_0$  usando la ecuación (5).

Una vez que se tiene la  $Dosis_{solar \text{ de inactivación}}$  correspondiente a cada tipo de botella el siguiente problema es saber: ¿en cuánto tiempo de exposición a la radiación solar se alcanza esa  $Dosis_{solar \text{ de inactivación}}$  en un determinado lugar de Bolivia y mes del año?

Para lo cual se obtuvieron los perfiles diarios (promedio mensual) para las distintas grillas (1° Lat. por 1° Long.) de Cochabamba y Bolivia usando el programa descrito en [19], previa adaptación y validación para Bolivia [47].

Sin embargo, para el cálculo del tiempo de exposición a partir del perfil diario de intensidad de radiación solar (promedio mensual) se ha escrito otro código en Matlab. El cual en síntesis lo que hace es integrar numérica e iterativamente (método Simpson) el perfil de radiación solar global simulado alrededor del mediodía solar hasta que el nivel integrado de radiación solar sea mayor a la  $Dosis_{solar \text{ de inactivación}}$  requerida para cada tipo de botella, y en base al número de iteraciones realizadas calcula el tiempo de exposición (alrededor del medio día solar) necesario para una inactivación eficiente de los organismos indicadores.

Es así que adaptando el programa que simula perfiles diarios (promedio mensual) para Bolivia y complementándolo con los dos anteriores subprogramas se han obtenidos los tiempos de exposición

requeridos para cuatro concentraciones iniciales de *Coliformes termotolerantes* usando los datos obtenidos del sitio web de la NASA Langley Atmospheric Sciences Data Center.

### 3.3 Tiempos de exposición para inactivar *Coliformes termotolerantes*

Se han obtenido los tiempos de exposición para las 8 grillas de Cochabamba y para concentraciones iniciales de  $10^2$ ,  $10^3$ ,  $10^4$  y  $10^5$  [UFC/100 ml] *Coliformes termotolerantes* (El total de los gráficos obtenidos en Matlab con el programa anteriormente mencionado pueden obtenerse en [47]). A continuación se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos.

Los tiempos de exposición calculados con el programa difieren con los tiempos de exposición observados en los ensayos en alrededor de 6.3 % con un rango de 5.7% a 12%. Este error está dentro del rango de incertidumbre de los datos de la NASA que es del 14.2%.

Cabe mencionar que los tiempos de exposición requeridos para cuatro concentraciones iniciales distintas fueron obtenidos por un lado para ilustrar lo que este programa hace y por otro para mostrar que el método es aún viable para concentraciones tan altas como  $10^3$ ,  $10^4$  y  $10^5$  [UFC/100 ml]. Considerando que las concentraciones encontradas en aguas de consumo son menores o iguales a  $10^2$  [UFC/100 ml].

La finalidad principal de la realización de este programa es brindar una herramienta que pueda ser utilizada de acuerdo a las condiciones particulares en la que el método vaya a ser empleado, es decir, se puede cambiar el microorganismo indicador ( $k$ ), la concentración inicial de este ( $N_0$ ) e incluso cambiar el sitio para el que se hace la evaluación por cualquier lugar del planeta; porque los datos que brinda la NASA Langley Research Center Atmospheric Sciences Data Center están disponibles para cualquier lugar del planeta.

Como ejemplo las Figuras 6 y 7 muestran (para las 8 áreas de Cochabamba) los

tiempos de exposición requeridos por los distintos tipos de botellas en los meses donde la radiación solar es máxima y mínima respectivamente.

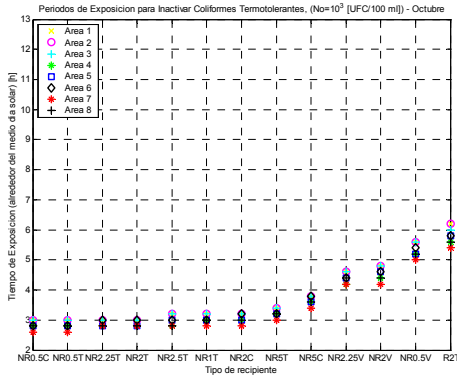


Figura 6. Tiempos de exposición para el mes de Octubre ( $N_0=10^3$  [UFC/100 ml]).

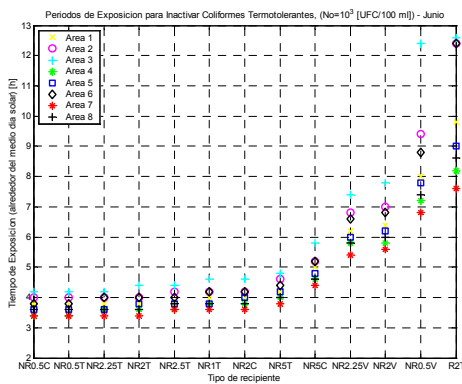


Figura 7. Tiempos de exposición para el mes de Junio ( $N_0=10^3$  [UFC/100 ml]).

Se puede observar la diferencia en los tiempos de exposición requeridos en las distintas áreas lo cual muestra la importancia de la variación espacial de la radiación solar. Por otra parte se puede observar que los tiempos de exposición para todos los plásticos no retornables transparentes y celestes con volúmenes entre 0.5 y 5 litros son relativamente constantes y oscilan en el rango de 3 a 4.5 horas de exposición en el mes de Octubre y de 3 a 6 horas en el mes de Junio. Sin embargo los plásticos verdes y el retornable transparente necesitan mayores tiempos de exposición, entre 4 a 7.5 horas en Octubre y de 4.5 a 12.5 horas en Junio. Los tiempos de exposición correspondientes a

los demás meses y para otras concentraciones de *Coliformes termotolerantes* pueden obtenerse en [47]. La Fig. 8 da una información más detallada sobre la variación mensual de los tiempos de exposición para una determinada grilla, que en este caso es la correspondiente a Cercado.

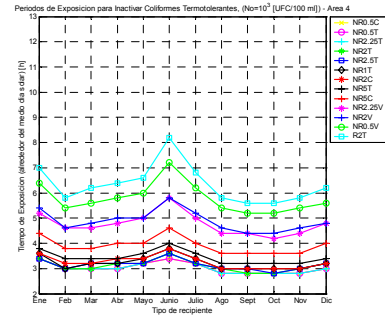


Figura 8. Variación mensual de los períodos de exposición de los diferentes plásticos para el área 4 ( $N_0=10^3$  [UFC/100 ml]).

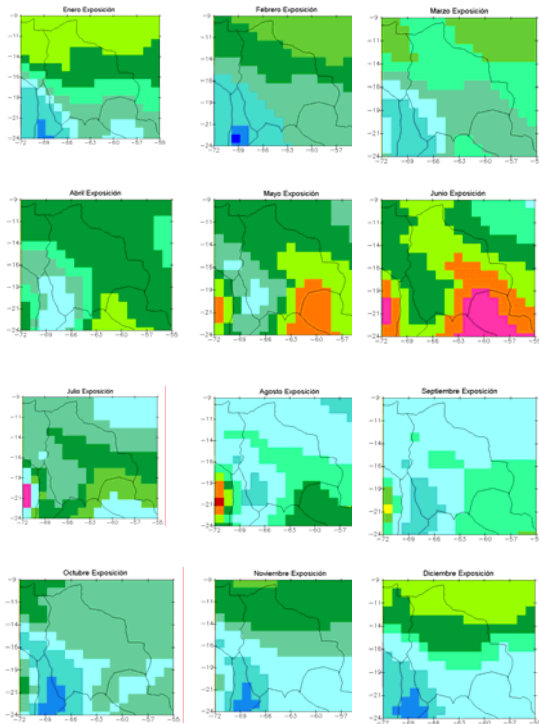
El hecho de que los niveles de radiación en promedio sean más altos en Octubre y no en Diciembre donde los niveles de radiación alcanzados en días soleados son máximos, se explica debido a que la época lluviosa en los últimos y primeros meses del año provoca que el promedio mensual de los niveles integrados diarios sea inferior por la presencia de días nublados.

### 3.4 Mapas de tiempos de exposición para inactivar *Coliformes termotolerantes*

Introduciendo los datos de radiación total diaria obtenidos del sitio web de la NASA Langley Atmospheric Sciences Data Center en el programa descrito en la sección 3.2 se han obtenido los tiempos de exposición para inactivar *Coliformes termotolerantes* 2,3,4 y 5 unidades logarítmicas. A partir de estos tiempos se obtuvieron los mapas mensuales de tiempos de exposición para *Coliformes termotolerantes* para Bolivia.

A continuación se muestra un ejemplo.

$N_0 = 10^3$  [UFC/100ml] *Coliformes termotolerantes*



Tipo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
NR0.5C	2.00	2.58	3.15	3.73	4.30	4.88	5.45	6.03	6.60	>6.6						
NR0.5T	2.00	2.58	3.15	3.73	4.30	4.88	5.45	6.03	6.60	>6.6						
NR2.25T	2.00	2.60	3.20	3.80	4.40	5.00	5.60	6.20	6.80	>6.8						
NR2T	2.00	2.83	3.25	3.88	4.50	5.13	5.75	6.38	7.00	>7						
NR2.5T	2.20	2.83	3.45	4.08	4.70	5.33	5.95	6.58	7.20	>7.2						
NR1T	2.20	2.83	3.45	4.08	4.70	5.33	5.95	6.58	7.20	>7.2						
NR2C	2.20	2.88	3.55	4.23	4.90	5.58	6.25	6.93	7.60	>7.6						
NR5T	2.20	2.98	3.75	4.53	5.30	6.08	6.85	7.63	8.40	>8.4						
NR5C	2.60	3.83	5.05	6.28	7.50	8.73	9.95	11.18	12.40	>12.4						
NR2.25V	3.00	4.35	5.70	7.05	8.40	9.75	11.10	12.45	13.80	>13.8						
NR2V	3.20	4.55	5.90	7.25	8.60	9.95	11.30	12.65	14.00	>14						
NR0.5V	3.60	5.05	6.50	7.95	9.40	10.85	12.30	13.75	15.20	>15.2						
R2T	3.80	5.33	6.85	8.38	9.90	11.43	12.95	14.48	16.00	>16						

[horas]  
(alrededor del medio día solar)

Figura 9. Mapas mensuales de tiempos de exposición de los diferentes recipientes para inactivar *Coliformes termotolerantes* ( $N_0=10^3$  [UFC/100 ml])

#### IV. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado y validado mediante ensayos SODIS un modelo que explica y cuantifica la influencia de los parámetros físicos y biológicos sobre la desinfección solar de microorganismos en el agua. El análisis estadístico muestra una buena correlación entre las variables ( $R^2>0.9$ ), el modelo matemático:

$Dosis_{solar} \text{ de inactivación} = [Ln(N_0)/k] / (T_{botella} * e^{-2.06 * x})$  muestra esta relación con  $k$  siendo la constante de inactivación del microorganismo indicador,  $N_0$  la

concentración inicial de éste y  $T_{botella}$  la transmisión real del recipiente. También se ha obtenido el valor de  $k = 0.275 \pm 0.006$  [ $m^2/Wh$ ] en el rango UV-A para *Coliformes termotolerantes*, valor que está en buen acuerdo con la bibliografía.

Para evaluar el potencial de desinfección en Cochabamba y Bolivia se desarrolló un programa que calcule los tiempos de exposición para los diferentes tipos de botellas, en diferentes épocas del año y en las distintas regiones de Cochabamba y Bolivia. Este programa puede ser adaptado para calcular el tiempo de exposición de otros tipos de bacterias y en cualquier lugar del planeta usando los datos de la NASA Langley Research Center Atmospheric Sciences Data Center. Para propósitos prácticos podemos asumir como mínimos estándar para toda Cochabamba los tiempos de exposición correspondientes al área menos favorecida (en cuanto a radiación solar) de Cochabamba y al mes en el que la radiación solar pasa por su valor mínimo, teniendo en cuenta que en el mes más favorable el tiempo de exposición requerido se reduce a la mitad del tiempo requerido en invierno. En forma resumida podemos decir lo siguiente:

-Todos los PET transparentes y celestes necesitan menos de 3.5 horas de exposición para reducir 2 unidades logarítmicas. Sin embargo, los Pet verdes y el transparente retornable necesitan de 3.5 a 5.5 horas de exposición.

-Todos los PET transparentes y celestes necesitan menos de 5 horas de exposición para reducir 3 unidades logarítmicas, con excepción del celeste de 5 Lts. que necesita 6 horas. Sin embargo, los Pet verdes y el transparente retornable necesitan de 7 a 12.5 horas de exposición.

-Todos los PET transparentes y celestes necesitan menos de 7.5 horas de exposición para reducir 4 unidades logarítmicas, con excepción del celeste de 5 Lts. que necesita casi 11 horas. Sin embargo, los Pet verdes y el transparente retornable necesitan de 13 a 15.5 horas de exposición.

-Todos los PET transparentes y celestes necesitan un día de exposición para reducir 5 unidades logarítmicas, con excepción del celeste de 5 Lts. que necesita casi 14 horas. Sin embargo, los PET verdes y el transparente retornable necesitan de 15.5 a 19 horas de exposición.

Aprovechando los mapas mensuales de energía total diaria que la NASA brinda para toda Bolivia se han obtenido los mapas mensuales (para toda Bolivia) de los tiempos de exposición requeridos por los distintos tipos de recipientes para inactivar diferentes concentraciones iniciales de Coliformes termotolerantes. La información contenida en los Mapas está resumida en el siguiente gráfico

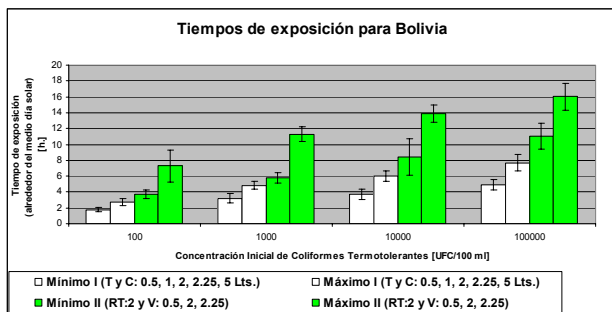


Figura 10. Tiempos de exposición para Bolivia  
(Nota: las barras en las columnas no son barras de error, sólo muestran los intervalos en los que caen los tiempos requeridos por cada tipo de botella.)

Donde se ha agrupado las botellas más eficaces en el grupo I y las menos eficaces en el grupo II. Para ambos grupos se muestran los tiempos de exposición máximos y mínimos requeridos en invierno y verano respectivamente.

Como se puede observar en la Fig. 11 usando las botellas del grupo I, es decir las PET transparentes o celestes con volúmenes de 0.5, 1, 2, 2.25, 2.5 y 5 Lts. los tiempos de exposición en invierno son menores a 3 y 9 [hr.] para reducir 3 y 5 unidades logarítmicas respectivamente.(en verano los tiempos son menores en un 40 a 50%)

## V. RECOMENDACIONES

Debido a su capacidad y buena transmitancia se recomienda el uso de las

botellas transparentes o celestes de 5 Lts. o cualquiera de menor capacidad para el método SODIS.

Se sugiere estudiar la inclusión de la temperatura, oxigenación y turbiedad del agua en el modelo como parámetros (si bien no determinantes pero con alguna influencia) en el proceso de desinfección.

Como Bolivia está en un lugar privilegiado de radiación solar, es necesario motivar el establecimiento de estaciones de monitoreo y la creación de Centros de Investigación Aplicada de la radiación solar.

## REFERENCIAS:

1. Wegelin, M., Canonica, S., Mechsner, K., 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.
2. Thielman, N.M., Geurrant, R.L., From Rwanda to Wisconsin : the global relevance of diarrhoeal diseases. *J. Med. Microbiol.* 1996;44(3): 155-6.
3. UNICEF. The global water supply and sanitation assessment 2000 report, 2000. p. 1-5.
4. Fujioka, R.S., Hashimoto, H.H., Siwak, E.B., Young, R.H. Effect of sunlight on survival of indicator bacteria in sea water. *Appl. Environ. Microbiol.* 1981; 41 (3) : 690-6.
5. Ciochetti, D.A., Metcalf, R.H. Pasteurization of naturally contaminated water with solar energy. *Appl. Environ. Microbiol.* 1984; 47(2) : 223-8.
6. Davies C.M., Evison L.M. Sunlight and the enteric bacteria in natural waters. *J. Appl. Bacteriol.* 1991;70(3):265-74.
7. Conroy R.M., Elmore-Meegan M, Joyce T, McGuigan K.G., Barnes J. Solar disinfection of drinking water and diarrhoea in Maasai children: a controlled field trial. *Lancet* 1996; 348(9043): 1695-7.
8. Conroy R.M., Elmore-Meegan M, Joyce T, McGuigan K.G., Gillespie J.B. Solar

- disinfection of drinking water contained in transparent plastic bottles: characterizing the bacterial inactivation process. J Appl Microbiol 1998; 84(6):1138-48.
9. Conroy R.M., Joyce T, McGuigan K.G. Solar disinfection: use of sunlight to decontaminate drinking water in developing countries. J Med Microbiol 1999; 48(9):785-7.
  10. Conroy R.M., Meegan M. E., Joyce T. M., McGuigan K.G., Barnes J. Solar disinfection of water reduces diarrhoeal disease: an update. Arch. Dis. Childhood 1999;81(4): 337-8.
  11. Reed R.H., Mani S.K., Meyer V. Solar photo-oxidative disinfection of drinking water: preliminary field observations. Lett. Appl Microbiol. 2000; 30 (6) : 432-6.
  12. Acra, A. Raffoul, Z., & Karahagopian, Y. (1984). Solar Disinfection of Drinking Water and Oral Rehydration Solutions. UNICEF. Paris.
  13. Lawand T. A., Alward R., Odeyemi, O., Habn J., Kandpal, T. C., & Ayoub, J. (1988). Solar Water Disinfection. *Proceedings of a work-shop held at the Brace Research Institute. Montreal, Canada.* International Development Research Center, IDRC-MR231e, Ontario, Canada.
  14. Acher A. J., Juven B.J. Destruction of coliforms in water and sewage by dye-sensitised photooxidation. Appl. Environ. Microbiol. 1977;33(1): 1019-22.
  15. Bekbolet M. Araz C.V. Inactivation of *Escherichia coli* by photocatalytic oxidation. Chemosfere 1996; 32(5): 959-65.
  16. Reed, R. H. (1997). Solar inactivation of fecal bacteria in water: The critical role of Oxygen. Lett. Appl. Microbiol., 24, 276-280.
  17. Fjendbo Jorgensen A.J., Nohr K., Sorensen H, Boisen F. Decontamination of drinking water by direct heating in solar panels. J Appl. Microbiol. 1998; 85(3): 441-7.
  18. Safapour N, Metcalf R.H. Enhancement of solar water pasteurisation with reflectors. Appl. Environ. Microbiol. 1999;65(2):859-61.
  19. Oates P. M. Solar Disinfection For point of use water treatment in Haiti. Mastering Tesis, 2001.
  20. Spenser J.W. Fourier Series representation of the position of the Sun. Search 1971; 2 (5): 172.
  21. Duffie J.A. and Beckman W.A. Solar Engineering of thermal Processes. Wiley, New York, 1980.
  22. Iqbal. Muhammad, An introduction to solar radiation, 1983
  23. Liu B. Y. H. and Jordan R.C. Daily insolation on surfaces tilted toward the equator, ASHRAE J. 1961; 3(10): 53-59.
  24. Griffiths David J. Introduction to electrostatics. 1999; p. 384-386.
  25. Cabrera J.M. Óptica Electromagnética Fundamentos, 1993; p.209-218.
  26. Acra, A., Jurdi, M., Mu'alle, H., Darahagopian, Y. & Raffoul, Z. (1990). Water Disinfection by Solar Radiation: Assessment and Applications. International Development Research Center. Ontario, Canada.
  27. Brock, T. (1981). Calculating solar radiation for ecological studies. Ecological Modeling, 14, 1-19.
  28. Brooks, F. A., Miller, W. (1963). Availability of solar energy. In A. M. Zarem and D. Erway (Eds.) Introduction to the utilization of solar energy. (pp. 30-58). New York: McGraw-Hill.
  29. Cooper, P. I. (1969). The absorption of solar radiation in solar stills. Sol. Energy, 12, 3.
  30. Cubbage, C. P., Gannon, J. J., Cochran, K. W., Williams, & G. W. (1979.) Loss of Poliovirus 1 in river water under

- simulated field conditions. Wat. Res. **13**, 1091-1099.
31. Maier (2000).
  32. EAWAG/SANDEC. (1999, March). SODIS Conference Synthesis. [http://www.sodis.ch/synthesis\\_e.html](http://www.sodis.ch/synthesis_e.html) (cited 5 Nov. 2000).
  33. EAWAG/SANDEC. (1997, August). SODIS News No. 1.
  34. EAWAG/SANDEC. (1999, May). SODIS News No. 4. <http://www.sodis.ch> (cited 5 Nov. 2000).
  35. EAWAG/SANDEC. (1998, August). SODIS News No. 3. <http://www.sodis.ch> (cited 5 Nov. 2000).
  36. EAWAG/SANDEC. Technical Notes. <http://www.sodis.ch> (cited 5 Nov. 2000).
  37. Lindell, M. J., Granéli, W., & Tranvik, L. J. (1995). Enhanced bacterial growth in response to photochemical transformation of dissolved organic matter. Limnol. Oceanogr., **40**(1), 195-199.
  38. Milankovitch, M., (1930). *Mathematische Klimalehre und Astronomische Theorie der Klimaschwankungen*. Handbuch der Klimatologie, Band I, Teil A. Gebrüder Borntraeger, Berlin.
  39. Moran, M. A. & Zepp, R. G. (1997). Role of photoreactions in the formation of biologically labile compounds from dissolved organic matter. Limnol. Oceanogr., **42**, 1307-1316.
  40. NASA Langley Research Center Atmospheric Sciences Data Center. (2001). Surface Meteorology and Solar Energy Data Set. <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> (cited 6 Feb. 2001).
  41. Reed, R. H. (1997). Sunshine and Fresh Air: A practical approach to combating water-borne disease. Waterlines. **15** (4), 295-296.
  42. Reed, R. H. (1996). Sol-Air Water Treatment. 22<sup>nd</sup> WEDC Conference: Discussion paper. New Delhi, India. 295-296.
  43. Sommer, B., Marino, A., Solarte, Y., Salas, L. M., Dierolf, C., Valiente, C., Mora, D., Rechsteiner, R., Setters, P., Wirojanagud, W., Ajarmeh, H., Al-Hassan, A., & Wegelin, M. (1997). SODIS – an Emerging Water Treatment Process. J. Water SRT-Aqua. **46**(3), 127-137.
  44. Torrez R. Blacut L. Magnitud de las componentes UV-A y UV-B de la radiación solar en Cota-Cota Revista Boliviana de Física 2000; (6): 54-78.
  45. APHA, AWWA & WPCF (1985) *Standard Methods of the Examination of Water and Wastewater*. USA. 168 pp.
  46. Martinic, N. (1990) *Análisis numérico con Linux, UMSA*
  47. Torrico Chávez Abraham, Fuentes Miranda Iván (2004) *Influencia de los parámetros físicos en la desinfección solar de Coliformes termotolerantes en el agua*, Tesis de Grado.

Alvaro Mercado<sup>1</sup>, Ana María Romero<sup>1</sup>,  
Oliver Coronado<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Centro de Aguas y Saneamiento  
Ambiental, Universidad Mayor de San  
Simón, Cochabamba, Bolivia.

## DESINFECCIÓN SOLAR DEL AGUA EN BOLIVIA: PROYECTO PILOTO SACABAMBA Y DIFUSIÓN INICIAL (1996- 2000)

### RESUMEN

La desinfección del agua mediante la radiación solar nació en Beirut hace más de 20 años, Aftim Acra (1984) examinó que el sol podía matar los microorganismos presentes en el agua. El Instituto Federal Suizo realizó diversas investigaciones de la aplicación de la energía solar en el proceso de desinfección solar del agua; para incentivar su promoción a nivel mundial, invita a diversos países del mundo, entre ellos a varios de América Latina a participar en un concurso internacional para realizar un proyecto demostrativo en una comunidad rural sobre la Desinfección Solar del Agua (SODIS). Bolivia, se presenta al concurso a través del Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental de la Universidad Mayor de San Simón con su Proyecto localizado en la comunidad de Sacabamba, naciendo de esta forma el Proyecto de Desinfección Solar en Cochabamba – Bolivia.

Para la ejecución del proyecto se firma un Convenio, en el año 1995, entre el Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental de la UMSS y el Instituto Federal Suizo para las Ciencias del Medioambiente y Tecnología. El proyecto se desarrolla en los ambientes del CASA y en Sacabamba, con el principal objetivo de validar la metodología en las condiciones locales (altura sobre el nivel del mar, radiación UV, calidad del agua y materiales locales), y realizar la introducción del método en una comunidad rural para verificar su aceptación por la población.

### INTRODUCCIÓN – TECNOLOGÍA

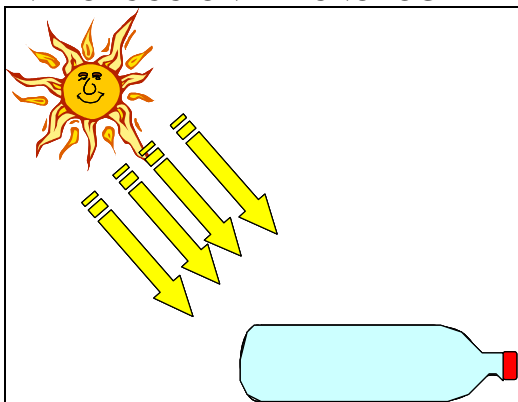


Figura 1.- Como funciona SODIS

La Desinfección Solar del Agua (SODIS) es una solución simple, de bajo costo y ambientalmente sostenible para el tratamiento de agua para consumo humano a nivel doméstico en lugares en los que la población consume agua cruda y microbiológicamente contaminada.

El método SODIS usa la energía solar para destruir los microorganismos patógenos que causan enfermedades transmitidas por el agua y de esa manera mejora la calidad del agua utilizada para el consumo humano. Los

microorganismos patógenos son vulnerables a dos efectos de la luz solar: la radiación en el espectro de luz UV-A (longitud de onda 320-400nm) y el calor (incremento en la temperatura del agua). Se produce una sinergia entre estos dos efectos, ya que el efecto combinado de ambos es mucho mayor que la suma de cada uno de ellos independientemente.

SODIS es ideal para desinfectar agua con baja turbiedad a nivel del hogar. El agua contaminada se coloca en botellas de plástico transparente, las cuales se exponen a la luz solar durante seis horas. La exposición al sol destruye los patógenos. Cuando la nubosidad es mayor de 50%, es necesario exponer las botellas de plástico durante 2 días consecutivos para obtener agua segura para el consumo humano. Es posible mejorar la eficacia del tratamiento si las botellas de plástico se exponen a la luz solar mediante superficies reflectoras como calaminas de aluminio o fierro corrugado.



Figura 2.- Los cinco pasos del procedimiento SODIS

Pero, si bien la tecnología es muy sencilla, en el momento de su implementación surgen una serie de interrogantes en que medida sería cierta esta tecnología?, funciona en las condiciones locales de Cochabamba y Bolivia?, y en Sacabamba, como sería la receptividad de la gente ante la nueva tecnología?, si funciona la tecnología que estrategias se podrían seguir para su introducción?

El proyecto inicia con una primera fase demostrativa del método con su validación a nivel de laboratorio y su implementación en la comunidad rural de Sacabamba. Posteriormente, debido al éxito obtenido en su primera fase se prosigue con una segunda fase de difusión de SODIS a nivel nacional.

## FASE I

### Trabajo en el Programa de Aguas

Este se dividió en tres fases:

- 1.- Verificación de la eficiencia del método
- 2.- Elaboración de material de difusión
- 3.- Construcción de bases de botellas

### Validación de la Tecnología

Para responder a varias de las interrogantes, y sobre todo en relación a su funcionamiento y aplicabilidad a nivel local se realizaron pruebas preliminares a nivel de laboratorio. En una primera fase se siguió la metodología señalada por EAWAG, uso de bolsas negras (enviadas por EAWAG/SANDEC), botellas de vidrio transparentes pintados lateralmente con pintura negra colocadas en soporte de calamina corrugada y expuestas al sol en un ángulo de 30° por un lapso de 6 horas. Adicionalmente, se realizaron pruebas utilizando botellas de vidrio transparentes y botellas de plástico transparentes sin el

pintado con negro. Cada hora se midieron la temperatura ambiente, del agua, y del agua embotellada, también se colectaron muestras para la realización de análisis de coliformes fecales. Para la medición de la temperatura se utilizaron termómetros de vidrio (-10°C a 100°C). Por lo que se colocaron termómetros en la sombra para la medición de la temperatura ambiental, y para la medición de temperatura en los frascos, se colocaron termómetros al interior de las botellas. Los análisis de coliformes fecales fueron realizados por la técnica de Membrana Filtrante, para lo cual, un volumen determinado de muestra fue filtrada en un filtro de 0,45 micrones de porosidad y la membrana fue colocada en un medio adecuado (M-FC) e incubada a 44,5oC por 24 horas, al cabo de las cuales se realizó el conteo de las colonias típicas de los coliformes fecales y reportadas en unidades formadoras de colonias por 100 ml de muestra (ufc/100 ml).

### Elaboración de material de capacitación

Inicialmente se elaboró una cartilla rustica en blanco y negro, (Fig. 3) basada en los materiales de referencia enviados desde Suiza. Adicionalmente se realizaron afiches rústicos a mano con colores, para motivar a la gente. Tres tipos de cartillas fueron utilizadas, una enviada por EAWAG donde se hace énfasis sobre las condiciones que deben reunir las botellas, la segunda cartilla muestra los resultados obtenidos sobre el método a nivel laboratorio, explica el tiempo de exposición, manejo de botellas, la tercera cartilla va dirigida para los capacitadores

como apoyo didáctico en la promoción de difusión de SODIS.

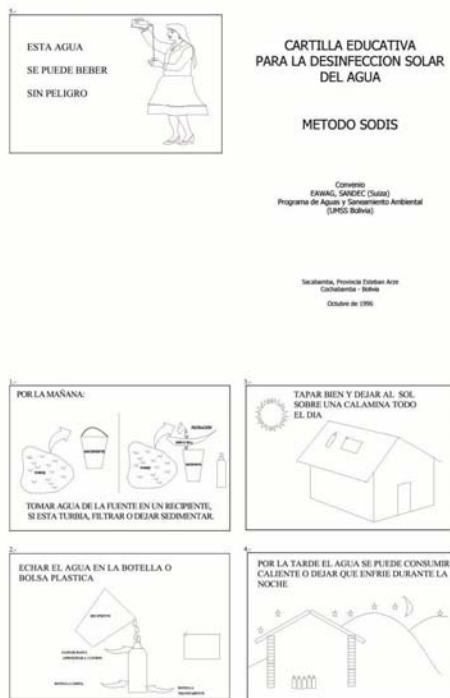


Figura 3.- Primera cartilla elaborada y utilizada por el Programa de Aguas y Saneamiento Ambiental

### ***Construcción de soportes de botellas.***

Para facilitar la aplicación de SODIS en los domicilios, y tomando en cuenta que la mayoría de los techos de la zona de trabajo eran de paja, se fabricaron soportes de botellas, con trozos de calamina y madera. A las primeras familias que trabajaron con el proyecto se les dio el soporte completo, y a las últimas se les entregó solamente trozos de calamina con clavos para que ellos construyeran sus propios soportes.

### ***Trabajo en Campo***

Sacabamba se encuentra aproximadamente a 90 Km al sur de la ciudad de Cochabamba, es 2da. sección de la provincia Esteban Arce del Departamento de Cochabamba. La implementación de SODIS se llevó a cabo en las comunidades de Mayola, YunKhataqui, Ichu-Ichu, Alisomayu y Quewiñamayu pertenecientes a Sacabamba.

El trabajo de campo en Sacabamba estuvo dividido en las siguientes fases:

#### ***- Coordinación del trabajo***

Se coordinó con el Centro de Formación Rural Jesús María, ONG presente en la zona y con el hospital de la zona, la misma que apoyó en la organización de las reuniones comunitarias, y el Hospital de Sacabamba, cuyo personal a cabeza de su director se encargó de la coordinación local y monitoreo del uso de SODIS a los primeros usuarios de este método.

#### ***- Introducción del método***

Inicialmente el método se introdujo por medio de reuniones ya establecidas a nivel comunal y por la ONG de trabajo, estas reuniones en general eran en las noches. También se introdujo el método en internados rurales administrados por la ONG, con la idea de que los niños, aprendieran SODIS en el internado, y lo transmitieran en el hogar.

#### ***- Encuestas***

Al inicio del trabajo se encuestó a aproximadamente 80 familias, para conocer la forma del consumo de agua a nivel domiciliario, la fuente de aprovisionamiento, y la predisposición a trabajar con SODIS. Al finalizar el proyecto se encuestaron a 15 familias sobre la continuidad del uso del método SODIS. El resultado fue que la mayoría de la gente tomaba agua de vertientes, y que pocos hervían el agua, con respecto a la intención de trabajo con SODIS, solo algunas familias no deseaban, pues tenían rechazo a instituciones externas.

#### ***- Visitas de seguimiento***

Se hicieron catorce visitas de seguimiento durante un año, las primeras fueron mas frecuentes. En estas visitas, se visitaba a los domicilios que habían aceptado trabajar con SODIS, y se motivaba a otros a integrarse al proyecto. Se inició el proyecto con 6 familias, y al final del año se tenía 39.

Adicionalmente en las visitas domiciliarias se realizaba análisis bacteriológicos de la calidad del agua cruda y del agua tratada, para verificar la correcta aplicación del método.

## Resultados

El gráfico 1, muestra un promedio de los resultados obtenidos a nivel de laboratorio, del mismo se desprende que después de un lapso 3 horas de exposición al sol de botellas de agua de vidrio y plástico transparente contaminadas con coliformes fecales se tiene una disminución del contenido de coliformes fecales en 2 unidades logarítmicas para el agua en la botella de vidrio y de 6 unidades logarítmicas para el agua en la botella de plástico.

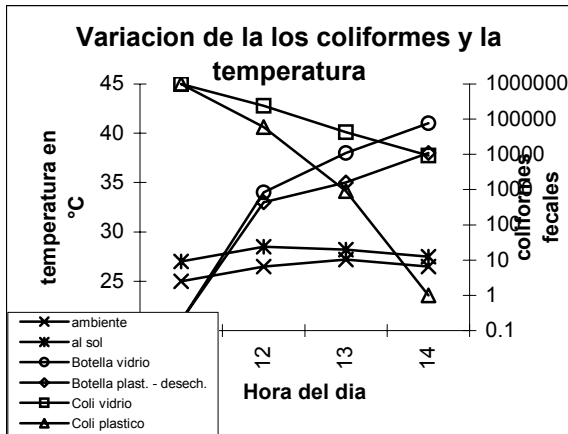


Gráfico 1. Efecto de la radiación solar (radiación UV y temperatura) en la remoción de coliformes fecales presentes en agua embotellada en frascos de vidrio y plástico expuestos al sol por 4 horas continuas.

Los niveles de eficiencia entre los diferentes tipos de botellas y bolsas fueron muy similares, por lo que para su aplicación en campo se sugiere el uso de botellas plásticas transparentes, por su fácil manejo, bajo costo debido a que se estuviera dando una utilidad a las botellas de plástico que se venden con refresco y que por lo general son desechadas.

La temperatura del agua dentro la botella alcanzó en algunas ocasiones hasta los 50°C, lo cual favorece el proceso de remoción bacteriana e incrementa la eficiencia del método.

Esta nueva tecnología en Sacabamba fue aceptada sin mayores problemas, las explicaciones realizadas sobre el método en su idioma nativo (quechua) simplificaron el entendimiento del mismo por parte de la población. Como lo demuestra las encuesta

realizada al final del trabajo de intervención, 90 % de las familias aceptaron continuar con el uso de SODIS y solo un pequeño porcentaje indico que no, por falta de tiempo.

Para el uso de SODIS a nivel comunitario se introdujeron algunos cambios sobre todo en relación al tipo de soporte, en las zonas rurales no siempre se cuenta con techos de calamina corrugada, por lo que se dió las opciones de exponer las botellas sobre tableros construidos con calamina corrugada o utilizar los techos que tenían (si eran de calamina) como soportes.

En la tabla 1., se presenta un resumen de los resultados del uso de SODIS por los comunarios de Sacabamba, del mismo se desprende que las fuentes de agua presentan elevados niveles de contaminación por coliformes totales y fecales. Por lo que al inicio del tratamiento la mayoría de las aguas estaban contaminadas, después de la exposición al sol entre 4 a 7 horas, los niveles de contaminación en las botellas disminuyeron notablemente. En un alto porcentaje la remoción alcanzó al 100 %.

Lugar	Fuente	pH	Turbi- dad NT U	Tiem- po de exposi- ción Hrs.	Antes del tratamiento		Después del tratamiento	
					CT (UFC/10 0 ml)	CF (UFC/10 0 ml)	CT (UFC/10 0 ml)	CF (UFC/10 0 ml)
Ichu Ichu	Pozo	6.2			600	1	2	0
Mayola	Vertiente	6.7		4	232	168	68	7
Ichu Ichu	Río	6.8	> 5	5	1430	512	32	2
Sacabamba	Galería	6.7	> 5	7	0	0	0	0
Mayola	Agua detenida		22	4	1200	206	30	6
Ichu Ichu	Bolsa SODIS				116	114	10	0
Quewi;amay u	Bolsa SODIS				94	92	0	0
Mayola	Bolsa SODIS				164	76	23	13
Ichu Ichu	Botella SODIS				16	2	16	0
Alisomayu	Botella SODIS					8		0
Ichu Ichu	Botella SODIS					224		0
Mayola	Botella SODIS					24		0
Ichu Ichu	Botella SODIS					2000		0
Kiwinamayu	Botella SODIS					4		0
Ichu Ichu	Botella SODIS					28		0
Sistema Mayola Bajo	Botella SODIS					0		0

Tabla 1. Resultados de seguimiento realizados a las familias que utilizaban SODIS en las comunidades de Sacabamba.

Nota: Las casillas vacías indican que los parámetros no fueron medidos.

De los resultados obtenidos en campo se demuestra la efectividad del método, por cuanto la remoción de coliformes fecales alcanza entre el 99 a 100%. Quedando de este modo validada la tecnología en su aplicación en campo.

### ***Conclusiones principales del trabajo***

- Se verificó que no es necesario pintar de negro transversalmente las botellas, pues la eficiencia es similar cuando no se tiene pintada la botella.
- Se verificó la eficiencia de SODIS a temperaturas del agua menores a 50°C, probablemente por la influencia de la radiación ultravioleta.
- Se observó una gran aceptación de la aplicación de la tecnología por familias de las comunidades de intervención.
- 90% de las familias de trabajo afirmó que continuaría aplicando SODIS en el futuro.
- Se vio que si bien la tecnología es sencilla, la forma de comunicar esta es el problema mayor a ser resuelto.

## **FASE II**

### **Metodología de Disseminación de la Información**

De los resultados obtenidos emanaron las primeras recomendaciones para el uso de esta tecnología en Bolivia: uso de frascos de plástico transparentes, llenados con agua clara, colocación de las botellas sobre superficies como ser calamina corrugada, de paja u otro tipo de soporte, colocación de botellas en un ángulo de 30° y su exposición al sol por 6 horas.

Para proseguir con la segunda fase se estudiaron las diversas estrategias que permitan la mejor disseminación de la información, los materiales a utilizar (los tipos de soporte, las botellas) y el material educativo. Lo que mas apoyó en este proceso es el éxito observado en la fácil aceptabilidad de la tecnología por parte de la comunidad.



Figura 4. Un usuario de las comunidades de Sacabamba.

### **Difusión del método a nivel Nacional**

Entre el año 1999 y el año 2000, mediante un convenio con EAWAG – SANDEC, se realizaron actividades tendientes a que la sociedad, conociera de SODIS, y a que instituciones que tenían que ver con agua y saneamiento lo conocieran, y aplicaran en su área de trabajo. Se elaboraron materiales de difusión para que la tecnología llegara a las familias que mas lo necesitaran, considerando que estas familias no tenían acceso a educación adecuada.

La difusión del método a nivel nacional implicó la identificación de las instituciones potencialmente interesadas en la aplicación del método en otras comunidades. Para incentivar el interés y motivar el uso de SODIS se programó la realización de una serie de talleres de difusión en los cuales se demostró en forma teórica y práctica el método SODIS.

Para los talleres se preparó un material educativo base como ser: rotafolios,

cartillas, díptico, postres, videos y cuentos infantiles. La tabla 2, resume las características de cada material educativo.

S	Característica
R O T A F O L I O	- Participativo - Audiencia con poco conocimiento técnico - Temas: o Fuentes de agua o Saneamiento o Métodos de desinfección o SODIS o Los pasos para aplicar SODIS
CARTILLA Y DÍPTICO	- Conceptos de necesidad de cuidado del agua. o Para niños, pero no exclusivo para ellos o Contenido similar al del rotafolio o Resume aspectos técnicos o Ilustraciones de aplicación - Para personal con cargos de decisión
POSTER	- Presenta los pasos a seguir en la aplicación de SODIS - Destinado a ser un recordatorio - Tiene dos caras
VIDEO	Tiene tres partes: - SODIS desinfección solar de agua - SODIS Sacabamba - SODIS procedimental
CUENTOS RADIALES EN CASSETTE	Historietas infantiles dirigida hacia los niños que relacionan el cuidado del medio ambiente y la salud con la aplicación de SODIS o La gotita mágica nos enseña o El valle del Dios Sol

Tabla 2. Material educativo elaborado por el Programa de Aguas y Saneamiento Ambiental para la difusión de SODIS a nivel nacional.

Nota: Este material, posteriormente fue utilizado por la Fundación SODIS en una primera instancia.

En la tabla 3 se resume los principales talleres llevados a cabo a nivel nacional en el periodo comprendido entre 1999 al 2000. A los mismos asistieron personal de salud, profesionales que trabajan el campo de agua y saneamiento, promotores, estudiantes y profesores.

Lugar	Fecha	Organizador
Cochabamba	10-11/8/99	UNICEF
Oruro	19-20/8/99	UTO/PROSABAR
Potosí	23-24/8/99	CDR/PROSABAR
Sucre	26-27/8/99	SIB/PROSABAR
La Paz	11-12/10/99	IIS/PROSABAR
Tarija	11-12/11/99	PROSABAR
Santa Cruz	18-19/11/99	PROSABAR
Cochabamba	17-18/2/00	ETS/PROSABAR
Villa Chuquiimia (Oruro)	25-26/11/99	CEMEI
Japo (Cochabamba)	17-18/4/00	Cruz Roja Suiza
Yapacaní (Santa Cruz)	4-5/5/00	CEPAC
Tarata (Cochabamba)	13-14/6/00	CODERTA

Tabla 3. Talleres locales y nacionales de capacitación (1999-2000)

Además de estos talleres se dieron otros seminarios cortos (4 horas) para distintas instituciones según requerimiento.

Del proceso de difusión se vio la necesidad y pertinencia de contar con una unidad que se dedique con exclusividad a la difusión de SODIS y no solo en el contexto nacional

sino a nivel internacional, ello dio a luz la constitución de la Fundación SODIS, hoy es la unidad que se dedica a la difusión de SODIS a nivel nacional como también a nivel de Latinoamérica.

## CONCLUSIÓN GENERAL

El trabajo de investigación, permitió hacer más sencillo el método SODIS, para las familias que lo fueran a aplicar, ya que a partir de las investigaciones se eliminó el paso del pintado longitudinal de las botellas y el uso de soportes conforme a las condiciones socioeconómicas de la población que utilice SODIS.

El trabajo desarrollado en Bolivia por el Programa de Aguas, sirvió de base para iniciar una difusión a nivel latinoamericano con la creación de la Fundación SODIS a principios del año 2001.

## AGRADECIMIENTOS

El presente proyecto fue llevado a cabo gracias al convenio interinstitucional entre el Programa de Aguas y Saneamiento Ambiental de la Universidad Mayor de San Simón y Swiss Federal Institute for Environmental Science & Technology, Water & Sanitation in Developing Countries Switzerland. Así como también con el apoyo del personal del Programa de Aguas y Saneamiento Ambiental, una mención especial a la Lic. Virginia Rodríguez, Directora de la unidad en ese entonces, al personal del Centro de Promoción Rural Jesús María y a la Comunidad de Sacabamba. La realización de los Talleres contaron con la colaboración de UNICEF – Cochabamba, Universidad Técnica de Oruro, UNASBA – PROSABAR – Oruro, Sucre y Potosí, ABIS, Centro para el Desarrollo Regional de Potosí, Universidad San Francisco Javier de Chuquisaca, Sociedad de Ingenieros de Bolivia, filial Sucre y a EMBOL por la donación de botellas para la realización de las practicas en el proceso de capacitación.

## REFERENCIAS

Coronado, O., Mercado, A., Fuentes, R., Peredo, S., Gonzales, C., Mendoza, E.,

Orellana, D., Villarroel, T., Mora, M.A., 1997. Informe final, Desinfección Solar de Aguas (SODIS), Programa de Aguas y Saneamiento Ambiental, Universidad Mayor de San Simón – Swiss Federal Institute for Environmental Science & Technology, Water & Sanitation in Developing Countries Switzerland.

Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental, 1999. Proyecto SODIS, Fase de diseminación, Primer reporte de avance, Universidad Mayor de San Simón.

Bruno Gremion, 2000. Reporte de actividades, Convenio Centro de Aguas y

Saneamiento Ambiental - EAWAG / SANDEC.

-----  
**CENTRO DE AGUAS Y  
SANEAMIENTO AMBIENTAL**  
Facultad de Ciencias y Tecnología, UMSS

Casilla: 5783

Tel: (591) - (4) - 4250660

Fax: (591) -(4) - 4229480

Cochabamba - Bolivia

aguas@fcyt.umss.edu.bo

[www.fcyt.umss.edu.bo/investiga/aguas/](http://www.fcyt.umss.edu.bo/investiga/aguas/)

Martin Wegelin<sup>1</sup>, Regula Meierhofer<sup>1,3</sup>,  
Alvaro Mercado<sup>2</sup>, Matthias Saladin<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>Instituto Federal de Ciencias y  
Tecnologías Ambientales (EAWAG),  
Departamento de Agua y Saneamiento en  
Países en Desarrollo (SANDEC)  
<sup>2</sup>Centro de Aguas y Saneamiento  
Ambiental  
<sup>3</sup>Fundación SODIS

## DIFUSIÓN MUNDIAL DE LA TECNOLOGÍA DE SODIS

### EL CONTEXTO

La falta de agua segura para el consumo para 1.1 billones de personas tiene consecuencias dramáticas: cerca de 4 billones de diarreas se reportan anualmente, de las cuales 2.5 millones terminan en la muerte. Diariamente fallecen cerca de 7.000 niños por falta de agua de consumo de calidad adecuada. El criterio de abastecimiento de agua mejorado, solo considera la disponibilidad de agua (mas de 20 litros por persona día) y su accesibilidad (menor a 1.000 metros de distancia). Sin embargo, dado que no se considera la calidad de esta agua, la situación es aun más dramática ya que 1.1 billones de personas se encuentran expuestas a agua de consumo no segura.

En América Latina, se estima que cerca de 76 millones de personas no tienen acceso a sistemas mejorados de dotación de agua (WHO/UNICEF 2004). Adicionalmente, la mayoría de los sistemas de agua rurales no están siendo desinfectados con cloro, exponiendo de esta manera a los usuarios a grandes riesgos de salud. La magnitud del problema fue demostrada en la década de los 90 cuando una epidemia de cólera cobró cientos de vidas.

La calidad del agua puede considerarse segura en el punto de distribución, pero no en el punto de uso. La contaminación secundaria es frecuentemente introducida por el inadecuado manejo del agua. Aguas subterráneas recolectadas por medio de bombas manuales son generalmente seguras pero se exponen a contaminación durante el transporte y el almacenamiento. Incluso el agua distribuida por un sistema de tuberías puede ser de calidad incierta, especialmente si las fugas y la operación intermitente

afectan la confiabilidad del sistema de distribución.

La gente de países en desarrollo considera que el agua de sus sistemas de distribución es insegura para su consumo y por tanto hierve o filtra su agua, la desinfecta con cloro o radiación ultravioleta o compra agua embotellada. Sin embargo, estos métodos son aplicados por personas con recursos económicos; la mayoría de las personas del mundo no puede pagar por tales tratamientos y permanece expuesta a agua de consumo no segura.

Para mejorar las condiciones de vida de los no privilegiados, las Naciones Unidas han formulado los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), que apuntan a reducir a la mitad el número de personas sin acceso a agua segura para el año 2015. Esta ambiciosa tarea supone que en los siguientes 10 años, un millón de personas se beneficiará de un sistema de distribución de agua mejorado cada semana. Este objetivo solo puede ser alcanzado si se cambian las estrategias, enfoques y métodos de distribución de agua de consumo. Los enfoques basados en el hogar, involucrando tanto de la población objetivo como sea posible son una estrategia, y la promoción de métodos de bajo costo y replicables, son una opción potencial para encarar el desafío del MDG. La Desinfección solar del agua (SODIS) es una respuesta a este desafío.

### EL PROYECTO

#### Las fases del proyecto

EAWAG (Instituto Federal Suizo para Ciencias y Tecnologías Ambientales) y específicamente su departamento SANDEC (Abastecimiento de Agua y Saneamiento en Países en Desarrollo), apuntaron a

desarrollar un sistema de desinfección que solo utilizara recursos disponibles localmente, y a promocionarlo internacionalmente una vez que se hubiera establecido la eficiencia del método.

El proyecto se inició en el año 1991 con extensivas pruebas de laboratorio y de campo realizadas en EAWAG Suiza. La luz del sol y su UV-A (efecto de la radiación) y la luz infrarroja (efecto térmico), demostraron ser efectivos en la inactivación de bacterias y virus, y las botellas de plásticos probaron ser contenedores adecuados para el tratamiento. Había nacido un nuevo método de desinfección de agua: SODIS (Desinfección Solar del Agua).

Entre 1994 y 1998, los resultados de la investigación en Suiza fueron verificados por medio de ensayos de campo en Colombia, Jordania y Tailandia. A pesar de que la aplicación de la tecnología SODIS es más bien simple, su uso por la población objetivo es más complejo. Por tanto, se realizaron proyectos demostrativos en siete diferentes países en Asia, África y Latinoamérica, entre los que estuvo Bolivia, para determinar el interés, la aceptación y la aplicación de SODIS por los usuarios. Los proyectos demostrativos revelaron un gran interés y aceptación de SODIS por la población objetivo: 80% de las familias participantes en los proyectos, declaró que continuarían usando el método luego de haber sido capacitados, guiados y supervisados por un año.

SODIS es una tecnología de costo casi cero ya que la luz del sol es gratuita y las botellas de plástico son un producto de deshecho de nuestra sociedad de consumo. Ya que no se pueden obtener beneficios económicos con el método, se deben desarrollar nuevas estrategias de promoción y difusión. Desde 1999, SODIS es introducido y aplicado por ONG locales en países en desarrollo, y su promoción internacional es coordinada por EAWAG/SANDEC. SODIS es actualmente aplicado en 20 países formalmente, y muchos gobiernos locales han reconocido el método como una opción eficiente de desinfección de agua. El presente estudio de

caso ilustra su uso y promoción internacional.



Foto 1: Muchas personas dependen de sistemas no convencionales como los carros cisternas (Lima, Perú)

### **Estrategia de promoción**

SODIS es una opción para desinfectar el agua de consumo. El método se presenta a la población objetivo junto con otras alternativas, tales como el hervido del agua, la cloración y la filtración por filtros cerámicos. Se debe involucrar a la población objetivo en la etapa de planificación para que ellos y ellas decidan qué método usarán para desinfectar su agua de consumo.

El mejoramiento de la calidad de agua de consumo es una forma de intervención para mejorar la situación de salud. El manejo correcto del agua a nivel del hogar y otras medidas deberían formar parte de las intervenciones para obtener una mejora significativa de la situación de salud. Por tanto, la promoción de SODIS debería ser combinada con otras medidas de intervención.

SODIS puede ser utilizado como una semilla (iniciador) de un proyecto de conciencia en salud. La botella, un transportador de mensajes a la comunidad, puede iniciar discusiones de cómo el agua de consumo debería ser transportada, almacenada y tratada, además se puede establecer los vínculos entre la calidad del agua, la higiene personal, el saneamiento y el control de diarreas. Por tanto, SODIS, se puede usar como un punto de entrada de un programa de campañas de salud, o integrado como un componente adicional en una variedad de otros tipos de intervenciones en proyectos

existentes. La promoción de SODIS debería usar las estructuras existentes, ya que la creación de nuevas es en general un desperdicio de recursos y tiempo.

SODIS es mejor promocionado y difundido por instituciones basadas en áreas de proyecto. Los niños de las escuelas y sus maestros juegan papeles importantes, apoyados por las asociaciones de padres; organizaciones de base, tales como clubes de mujeres, asociaciones de jóvenes o grupos de autoayuda; organizaciones no gubernamentales (ONG) sólidamente establecidas que trabajan en proyectos de desarrollo comunitario; organizaciones institucionales del sector de salud y educación, tales como postas de salud, hospitales, centros de adiestramiento de maestros y finalmente, programas del gobierno local y central. Ya que personas, tales como líderes comunitarios y religiosos, políticos y gente con capacidad de decisión, en general tienen un papel importante en la promoción y difusión de SODIS, estos deberían estar involucrados desde el inicio en una campaña de promoción de SODIS.

## LOGROS Y FACTORES DE EXITO

### Resultados

- SODIS ya es usado en más de 20 países. El método recibe atención mundial de organizaciones locales, organizaciones nacionales, agencias multinacionales, y organizaciones internacionales
- Actualmente, cerca de un millón de personas son usuarias regulares de SODIS y este número se incrementa rápidamente. SODIS es bien aceptado por la población objetivo y el porcentaje de usuarios regulares está entre el 40 y 80% de la gente capacitada.



Fotos 2, 3: Algunos de los 200,000 usuarios que se estiman en América Latina al fin del 2004

- Los beneficios en la salud por el uso de SODIS son significantes. La reducción de las diarreas entre los usuarios SODIS varía entre el 20 y el 75%. Se logran mayores beneficios para la salud combinando proyectos SODIS con programas de lavado de manos.
- SODIS está bien documentado en sitios de Internet: ([www.sodis.ch](http://www.sodis.ch), [www.fundacionsodis.org](http://www.fundacionsodis.org)); y los socios locales han producido una variedad de diferentes materiales de capacitación y promoción (volantes, afiches, manuales, videos, etc.).
- Agencias de ayuda internacional (por ejemplo CARE, Cruz Roja, PLAN, Ayuda en Acción, PCI, ADRA) y gobiernos locales (por ejemplo en Bolivia, Ecuador, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Guatemala, Uzbekistán, Pakistán) promueven e implementan SODIS dentro de sus propios programas.
- Agencias de las Naciones Unidas han reconocido el potencial de SODIS como una opción para desinfectar agua de consumo (UNICEF, Organización Mundial de Salud, Día mundial del agua 2001) y declarado el método como una opción de las mejores prácticas (HABITAT, 2002).
- Empresas privadas (por ejemplo IBM Suiza, Georg Fischer, Migros) y clubes internacionales (por ejemplo Lions Club Internacional, Clubes Rotarios) apoyan la promoción de SODIS para demostrar su compromiso social.

## **Razones para el éxito**

- SODIS es de simple aplicación, económico y la población objetivo aprecia el sabor del agua tratada.
- Las botellas SODIS no son solo utilizadas para tratar el agua sino para transporte y almacenamiento del agua. El almacenar el agua tratada en botellas de plástico reduce el riesgo de recontaminación del agua.
- SODIS es un método de tratamiento de agua sostenible ya que se basa en recursos disponibles localmente como la luz solar y botellas de plástico, estas últimas son en general un producto de deshecho de nuestra sociedad de consumo.
- SODIS ha sido desarrollado y perfeccionado en investigaciones de campo y laboratorio. Muchos equipos de investigación bien establecidos han reportado evidencia científica de su eficiencia.
- SODIS no tiene valor financiero y por tanto no está sujeto a elementos de corrupción. El método de hecho es promovido por muchos equipos de proyecto motivados y dedicados en muchos países, bajo el liderazgo mundial de EAWAG / SANDEC.
- Los equipos SODIS trabajan con un enfoque continuado y de largo plazo. De esta manera se crean confianza y entendimiento entre diferentes socios.
- El desarrollo de SODIS fue apoyado por COSUDE (Agencia Suiza para el Desarrollo), su promoción actual está financiada entre otros por la Fundación AVINA, Fundación SOLAQUA, el Servicio de Desarrollo de Liechtenstein, Michel Comte Water Foundation, Georg Fischer, Clubes de Leones, Clubes Rotarios, etc.

## **LOS DESAFÍOS**

### **Limitaciones**

- A veces SODIS es considerada demasiado simple para ser efectivo por personas externas. Por tanto se hacen necesarias campañas demostrativas para probar lo contrario.
- SODIS solo mejora la calidad microbiológica del agua; no cambia la composición química. Por tanto, las fuentes

de agua deben ser protegidas de la contaminación química.

- SODIS requiere de condiciones climáticas adecuadas, por ejemplo suficiente luz solar. Durante los períodos nubosos, las botellas deben ser expuestas por dos días consecutivos. Durante los períodos lluviosos, fuentes alternativas de agua como agua de lluvia o de tratamiento (hervido) se deben aplicar.

- SODIS todavía no es un método auto-replicable. La población objetivo requiere de capacitación, guía y monitoreo extensivos hasta cambiar sus prácticas de manipulación del agua.

### **Potencial de expansión**

- SODIS se debería transformar en una práctica común de desinfección de agua. La transformación a la auto-promoción se puede alcanzar a nivel regional y nacional por el creciente número de usuarios SODIS difundiendo el mensaje.
- SODIS aun necesita ser introducido a través de proyectos demostrativos en muchos países en desarrollo. El método debería ser integrado en programas de mejoramiento de salud implementados por agencias de ayuda externa y gobiernos locales.
- SODIS es fácilmente replicable y no requiere de infraestructura costosa. Sin embargo, la promoción de SODIS requiere capacitación y educación extensiva de la población objetivo y costos aproximados entre 1 y 2 dólares por usuario SODIS en proyectos demostrativos. Instituciones gubernamentales, tales como Ministerios de Salud o Ministerios de Educación, socios ideales para la promoción de SODIS, pueden compartir los costos con agencias de ayuda externas.
- SODIS es un método práctico de desinfección de agua, para segmentos privilegiados y no privilegiados de la sociedad. Los más ricos a menudo tienen sus propios sistemas de desinfección de agua en el hogar. El uso de SODIS por la gente de alto rango podría motivar a los pobres a adoptar la metodología.
- Cerca de 1.1 billones de personas en el mundo no tienen acceso a sistemas

mejorados de abastecimiento de agua, pero son muchas más si es que se incluye el criterio de la calidad del agua en las estadísticas. Los ODM apuntan a dotar con agua segura a la mitad de la población actualmente no servida para el año 2015. Esta es una tarea enorme que requiere nuevas estrategias y métodos. Incluso si este ambicioso objetivo fuera logrado, la otra mitad de la población también requeriría acceder a una mejor calidad de agua, que SODIS puede proveer.

### **EL CASO DE BOLIVIA**

Bolivia fué uno de los países que primero empezó con la investigación y la difusión del método SODIS. El proyecto piloto ejecutado por el Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental (CASA) de la Universidad Mayor San Simón en Cochabamba, Bolivia, mostró la aceptación del método por la población. Basado en estas experiencias positivas, se decidió, en el año 2000, basar la Fundación SODIS para América Latina en Cochabamba. La Fundación SODIS es una organización sin fines de lucro y actualmente coordina proyectos SODIS en 8 países de América Latina. El objetivo de esta entidad es lograr que 300,000 personas en América Latina estén utilizando el método SODIS hasta fines del 2005. En el cuadro de abajo, se muestran las instituciones que actualmente implementan proyectos SODIS en América Latina.

En Bolivia, el Vice-Ministerio de Servicios Básicos y Vivienda incluyó el método SODIS dentro de los métodos recomendados a nivel del hogar. El Ministerio de Salud actualmente está promocionando SODIS dentro de su programa 'Extensión de Cobertura de Servicios de Salud – EXTENSA'. Este proyecto brinda asistencia médica a 2,400 comunidades rurales que carecen servicios de salud, y dentro de sus campañas de prevención, el mensaje de tomar agua de buena calidad es central. Además, agencias como UNICEF están implementando proyectos en varios departamentos del país, y para ONGs como PCI ('Project Concern International'),

ADRA, CARITAS, Save the Children y otros, SODIS ya se ha vuelto parte integral de sus intervenciones para la población más necesitada. Sin embargo, todavía el método es poco conocido en muchos lugares y se necesita más esfuerzo por parte de todos los actores para lograr que todas las personas tomen agua segura y de esa manera se reduzca la mortalidad infantil causada por diarrea.

El método SODIS es un ejemplo de cómo una tecnología fue transferida de los laboratorios de las universidades al campo. Durante este proceso, la tecnología se ha desarrollado en un hábito saludable. Permanentemente surgían dudas de los usuarios e instituciones implementadoras, y gracias a la cercanía entre la Fundación SODIS y CASA, la mayoría de estas dudas pudieron ser resueltas. Sin embargo, el desarrollo de la tecnología continúa, e innovaciones permitirán mejorar el método en beneficio de los usuarios.

Figura 1: Esquema de difusión de innovaciones y su retroalimentación hacia los investigadores.

El proceso de difusión de innovaciones desde las Universidades hacia la población y la retroalimentación desde la población hacia las Universidades es un proceso muy importante para que las instituciones de investigación beneficien a la sociedad en general. En el caso de SODIS, este proceso de difusión y retroalimentación fue facilitado por la Fundación SODIS y sus socios, en beneficio de la población que no tiene acceso a agua segura.

Actualmente en el Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental se está investigando aspectos nuevos de la tecnología SODIS, por ejemplo maneras de mejorar la eficiencia de proceso SODIS con el objetivo de tratar el agua en menos tiempo, y herramientas simples que indiquen que el proceso de desinfección está terminado.

### **REFERENCIAS INSTITUCIONALES**

EAWAG/SANDEC

Martín Wegelin, Líder del grupo mundial de difusión de SODIS.

Regula Meirhofer, Asistente del proyecto  
SODIS  
P.O. Box 611, 8600 Duebendorf, Suiza  
[www.sodis.ch](http://www.sodis.ch)

**FUNDACIÓN SODIS**

Marcelo Encalada, Director Ejecutivo  
Matthias Saladin, Director Adjunto

Alvaro Mercado, Centro de Aguas y  
Saneamiento Ambiental  
Facultad de Ciencia y Tecnología, UMSS  
Cochabamba - Bolivia  
Tel./Fax: (591) - (4) - 4542259  
[sodis@fundacionsodis.org](mailto:sodis@fundacionsodis.org)  
[www.fundacionsodis.org](http://www.fundacionsodis.org)



**Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental**  
Teléfono: 4250660 • Fax: 4229480 • Casilla 5783  
E-mail: [aguas@fcyt.umss.edu.bo](mailto:aguas@fcyt.umss.edu.bo)  
Cochabamba - Bolivia