

Desinfección de agua cruda con radiación solar (SODIS) para la remoción de coliformes totales

Disinfection of raw water with solar radiation (SODIS) for the removal of Total Coliforms

FERIA, Jhon J.¹

ÁLVAREZ, Ramón A.²

RODRIGUEZ, Juan P.³

Resumen

Muestras de agua cruda del río Sinú, Colombia, fueron sometidas a ensayos de desinfección solar (SODIS) durante un período de dos días. La información climática de radiación solar, temperatura y humedad relativa se obtuvo de una estación meteorológica ubicada en el campus de la Universidad de Sucre, Colombia. Luego de 18 horas acumuladas de radiación, se logró eliminar el total de los coliformes totales de las muestras y reducir en un 43% la turbidez inicial del agua. Se comprobó la efectividad de SODIS en la desinfección de agua cruda del río Sinú, en época de estiaje, y bajo condiciones climáticas propias de la época seca de la región.

Palabras clave: SODIS, coliformes totales, tiempo de desinfección, turbiedad del agua

Abstract

Raw water samples from Sinú River in Colombia, were subject to solar disinfection tests (SODIS) for two days. Climatic information of solar radiation, temperature and relative humidity was obtained from a meteorological station located at the campus of Universidad de Sucre. After 18 radiation accumulated hours, it was possible to eliminate total coliforms from samples and reduce water initial turbidity up to 43%. SODIS effectiveness was verified for the disinfection of raw water from the Sinú River, during and under the climatic conditions typical of the region's dry season.

key words: SODIS, total coliforms, exposure time, water turbidity

1. Introducción

De acuerdo con datos reportados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) para el año 2015, a nivel global, de los 159 millones de personas que utilizaron aguas superficiales como fuente de suministro de agua potable, 147 millones vivían en áreas rurales y más de la mitad de ellos vivían en África subsahariana, donde el 10% de la población aun bebía agua cruda, es decir, sin ningún tratamiento (UNESCO, 2019). Para el mismo año, en los países de América Latina y el Caribe, más del 20% de la población vivían en la zona rural, lo que equivale a más de 127 millones de personas (Mejía et al., 2016), que de igual manera, están expuestas al consumo de agua cruda como fuente principal de abastecimiento. La mala calidad del agua está asociada con las fuentes naturales

¹ Docente investigador. Facultad de Ingeniería. Universidad de Sucre, Colombia. jhon.feria@unisucra.edu.co . Autor de Correspondencia

² Docente investigador. Facultad de Ingeniería. Universidad de Sucre, Colombia. ramon.alvarez@unisucra.edu.co

³ Docente investigador. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. jrodriguez@udistrital.edu.co

y con la falta de tratamiento antes de su consumo, en particular, por la presencia de bacterias de la flora saprófita intestinal, como *Bacteroides fragilis*, Bacterias Mesófilas, Coliformes Totales (CT), Coliformes Fecales (CF), *Escherichia Coli* y *Streptococos Fecales* (Ríos et al., 2017). Por lo anterior, es indispensable tratar el agua cruda antes de su consumo con el fin de evitar las enfermedades ocasionadas por agentes patógenos biológicos.

Cualquier tratamiento de agua se realiza en el contexto de un tren de tratamiento, es decir en una serie de procesos unitarios, entre los cuales, la desinfección es uno de los más importantes (Hendricks, 2011). La desinfección consiste en la destrucción selectiva de microbios patógenos a través de la aplicación de químicos o energía (Pankratz, 2001; Mackenzie, 2010). El método de desinfección más común disponible que asegura la calidad bacteriológica del agua potable, debido a su bajo costo y fácil manejo, es el método de la cloración (Crittenden et al., 2012). Sin embargo, en algunas zonas rurales debido a su localización geográfica apartada y la carencia de vías de acceso, no es fácil llevar insumos químicos para el tratamiento del agua cruda. Por otro lado, muchos habitantes de la zona rural no aceptan el sabor del cloro en el agua y lo asocian equivocadamente con efectos sobre la salud. Adicionalmente, tampoco hierben el agua por la falta de leña y su dificultad para transportarla o porque creen que la ebullición cambia el sabor del agua (Martín et al., 2005). Ante esta situación, la desinfección solar del agua (SODIS) resulta ser un método simple y económico para tratar aguas crudas de baja turbiedad, ambientalmente sostenible, que ha demostrado que elimina eficazmente hongos, virus, protozoos y helmintos (McGuigan et al., 2012), sin embargo, este método no ofrece protección contra la recontaminación (UNESCO, 2019; Crittenden et al., 2012; McGuigan et al., 2012) debido a que no deja ningún agente biosida residual, siendo esta una gran preocupación en la comunidad científica que investiga sobre el tema (Vivar & Fuentes, 2016). No obstante, esta tecnología es muy adecuada para comunidades rurales de bajos ingresos, que no tienen acceso a sistemas estándar de purificación de agua, no hierven ni cloran el agua, y solo están interesados en tratar el agua requerida para su consumo diario (Martín et al., 2005).

El método SODIS es un método de desinfección que utiliza la energía del sol y el uso de botellas de vidrio o de Tereftalato de Polietileno (PET) llenas de agua, para eliminar agentes patógenos gracias al efecto germicida de la radiación solar, especialmente de la radiación UV-A (Luzi et al., 2016). La eficiencia de la desinfección se ve afectada por muchos factores, los cuales causan un tiempo de tratamiento prolongado, un bajo rendimiento y un alto grado de incertidumbre sobre la cantidad de radiación recibida por el agua en diferentes condiciones climáticas (Loo et al., 2012). Entre los factores que más influyen en la efectividad antimicrobiana de la luz solar están las características del agua cruda, la intensidad de la radiación solar, la duración de la exposición y el tipo de recipiente (Mansoor et al., 2017), aunque otros autores han informado que el oxígeno disuelto (Reed, 1997), la temperatura del agua (Vivar et al., 2017), la turbidez y el volumen del contenedor también influyen en la eficiencia de SODIS (Kehoe et al., 2001). Debido a que la radiación solar no es uniforme alrededor del planeta, la ubicación geográfica, el clima y la nubosidad del sitio donde se aplicará la metodología SODIS son elementos muy importantes a considerar, ya que influyen directamente en el tiempo necesario de exposición del agua a la intemperie.

El propósito de este trabajo fue determinar la eficiencia del método SODIS en la eliminación de coliformes totales, bajo las condiciones de irradiación solar de una región tropical con niveles altos de radiación durante la mayor parte del año, y comprobar la viabilidad técnica para su implementación en zonas rurales de difícil acceso y de bajos ingresos económicos de países en vías de desarrollo.

2. Metodología

2.1. Muestras de agua

Las muestras de agua utilizadas en los ensayos SODIS, fueron tomadas directamente del canal principal del distrito de riego de Mocarí, en la ciudad de Montería, Colombia, en las coordenadas: 8°48'23" N y 75°51'11" W.

Este canal capta agua cruda directamente del río Sinú y se utiliza, principalmente en época seca, para el regadío de cultivos agrícolas. Las muestras fueron tomadas el día 18 de febrero de 2020, se etiquetaron, se refrigeraron, se transportaron y se conservaron para los ensayos de SODIS en las instalaciones de la Universidad de Sucre, en la ciudad de Sincelejo, Colombia.

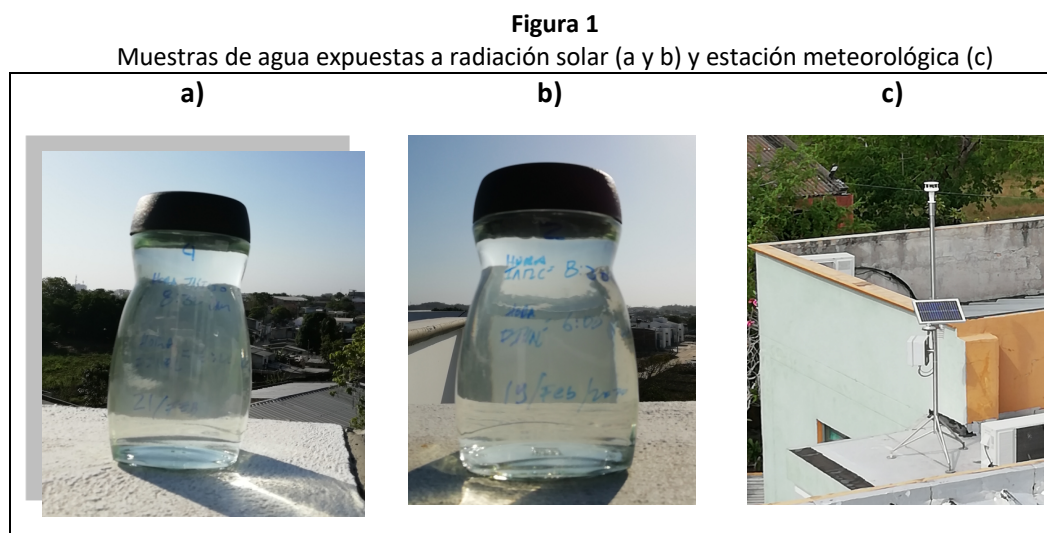
2.2. Parámetros fisicoquímicos, biológicos y días de monitoreo

Para comprobar la eficiencia del método SODIS en la desinfección de las muestras ensayadas, se analizó la remoción de coliformes totales y la turbidez, en un período de tiempo de 18 horas durante los días 19 y 20 de febrero de 2020. Se utilizaron 5 recipientes de vidrio de 600 mL cada uno. Se midió por triplicado la turbidez de todas las muestras de agua con un turbidímetro ORION AQ3010. La Turbidez y los Coliformes Totales (CT) de las muestras, se realizaron siguiendo los protocolos de medición establecidos en los Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potable y Residual según la American Public Health Association (APHA, 2012).

2.3. Parámetros fisicoquímicos, biológicos y días de monitoreo

La información de radiación solar, temperatura ambiental y humedad relativa fue tomada de una estación meteorológica digital de última generación, marca Netux referencia NxS-MiEstación-THPM, ubicada en el campus de la Universidad de Sucre en Sincelejo, Colombia. La estación meteorológica está emplazada en las coordenadas: 9°18'54" N y 75°23'14" W.

En la Figura 1, se muestra el tipo de recipientes y la estación meteorológica instalada en la azotea del edificio de laboratorios de la Universidad de Sucre.



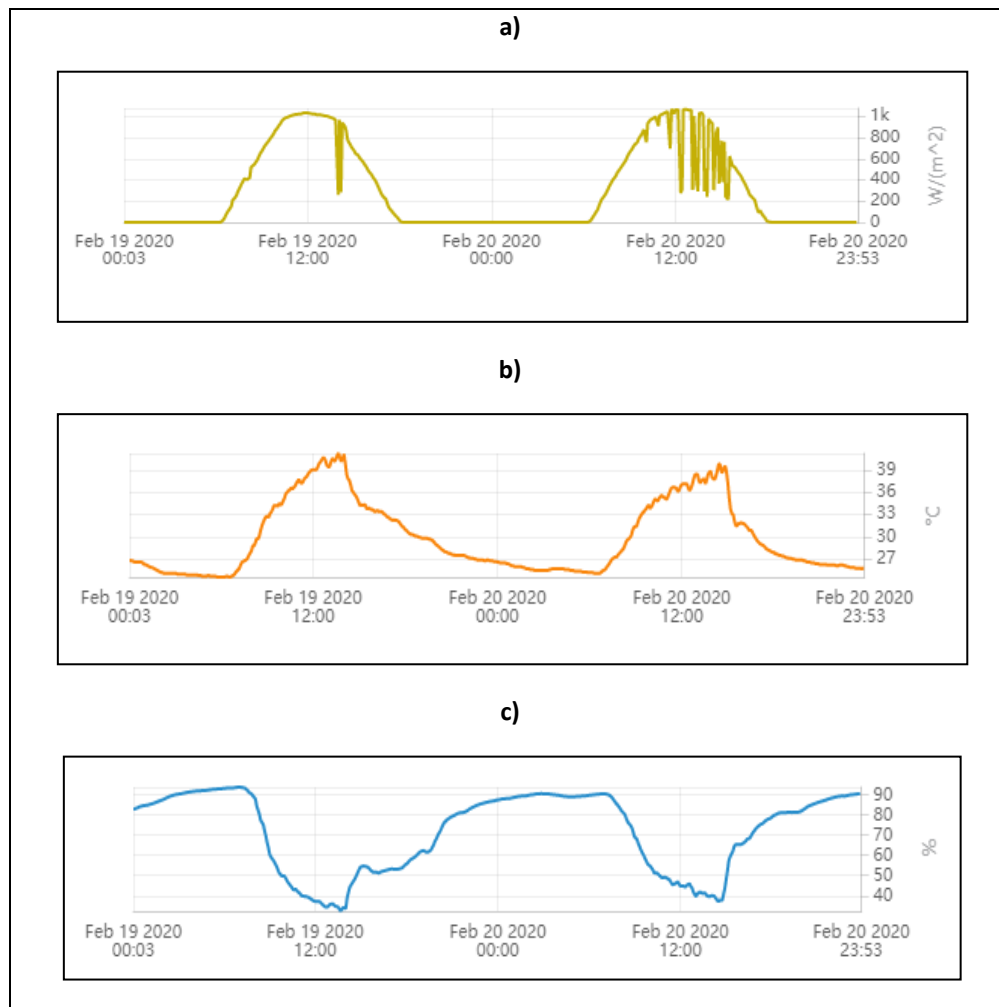
Fuente: Los autores

3. Resultados

3.1. Influencia de los factores climáticos en el tratamiento SODIS

En Colombia, el recurso solar es de especial importancia debido a su disponibilidad en prácticamente todo el territorio nacional con un promedio diario multianual cercano a 4500 W/m², sin embargo, en la zona donde se realizaron los ensayos de SODIS (Región Caribe) la disponibilidad promedio multianual de energía solar es de 1825 W/m² (IDEAM, 2005). En la Figura 2, se muestran las condiciones climáticas para los días del monitoreo, donde se puede apreciar el comportamiento de la radiación solar, temperatura y humedad relativa del lugar donde se realizaron los ensayos.

Figura 2
 Datos Estación Meteorológica de Sincelejo: a) Radiación Solar (W/m^2),
 b) Temperatura ($^{\circ}C$) y c) Humedad Relativa (%)



Fuente: Los Autores

Durante los ensayos SODIS, la duración de la radiación solar fue de 12 horas continuas (6:00 am – 6:00 pm). En general, la radiación solar tuvo comportamientos similares durante los dos días de monitoreo, registrando un valor promedio de $608,99 W/m^2$. Este valor está por debajo del valor promedio registrado para la región caribe colombiana, sin embargo, radiaciones de $555 W/m^2$ durante 6 horas de exposición en países tropicales y en un rango de longitud de onda de 350-450 nm, son suficientes para garantizar una efectiva eliminación de agentes patógenos como *E. coli*, *Enterococcus faecalis*, *Vibrio Cholerae* y algunos rotavirus (Luzi et al., 2016; Wegelin et al., 1994). Al medio día se registró el valor máximo de radiación solar ($1037 W/m^2$) y durante 7 horas continuas (8:30 am hasta 3:30 pm) se registraron valores de radiación superiores a los $555 W/m^2$, es decir, que la radiación solar donde se realizaron los ensayos permite la aplicación del método SODIS para las muestras ensayadas.

La temperatura promedio registrada fue de $31.38^{\circ}C$, con una temperatura mínima de $24.9^{\circ}C$ y una máxima de $41.2^{\circ}C$ al medio día. El comportamiento de la temperatura fue proporcional a la radiación solar efectiva, es decir, a mayor radiación mayor temperatura ambiental (Ortiz et al., 2018). Teniendo en cuenta que es necesario una gran cantidad de calor para poder elevar la temperatura del agua (Sierra, 2011), ésta siempre será menor a la temperatura ambiental. Tal situación repercute en las tasas de eliminación de los patógenos, que suelen necesitar temperaturas del agua en el rango de $45^{\circ}C$ a $63^{\circ}C$ (Berney et al., 2006). Por debajo de

aproximadamente 45°C, la dependencia térmica de las tasas de inactivación es débil y aproximadamente lineal (Fisher et al., 2008). A 50°C, la dosis de irradiación requerida y/o el tiempo de exposición se reducen hasta en dos tercios (Wegelin et al., 1994). Debido a que la temperatura ambiental máxima registrada no permitió temperaturas del agua por encima de los 45°C, es posible que la exposición de las muestras a la radiación solar sea mayor a la recomendada en la literatura técnica, es decir 6 horas (Luzi et al., 2016), para lograr la inactivación de los CT en las muestras.

La humedad relativa es la relación del contenido del aire con el contenido de agua de saturación en la atmósfera (Nevers, 1998). Durante los días de monitoreo, la humedad relativa varió de 32,3% a 93,9%, pero con un comportamiento inverso al de la radiación solar y la temperatura, es decir, a mayor radiación solar y temperatura, menor humedad relativa se presentó en la atmósfera. Estas condiciones de humedad relativa son favorables para los ensayos SODIS, ya que, con menor presencia de agua en la atmósfera en las horas de mayor radiación solar, menor será la refracción de la radiación UV-A (Mansoor et al., 2017).

3.2. Eliminación de coliformes totales y turbiedad

En el Cuadro 1, se muestran los resultados de los ensayos SODIS para la remoción de Coliformes Totales y Turbiedad.

Cuadro 1
Resultados de los ensayos de Desinfección Solar (SODIS)

Muestras	Fecha y hora	Horas de exposición	Coliformes totales (NMP/100mL)	Turbiedad (UNT)
Blanco	10:50 am (18/02/2020)	0	1090	10,52 ± 0,16
#1	8:30 am-2:30 pm (19/02/2020)	6	373	9,53 ± 0,06
#2	8:30 am-6:30 pm (19/02/2020)	10	11	9,14 ± 0,19
#3	8:30 am (19/02/2020) 2:30 pm(20/02/2020)	18	7	6,40 ± 0,07
#4	8:30 am (19/02/2020) 6:30 pm (20/02/2020)	22	0	6,00 ± 0,05

Concentración promedio ± Desviación estándar. Fuente: Los Autores

En las aguas superficiales, las bacterias coliformes son más abundantes que las bacterias patógenas y, tienden a menudo, a permanecer vivas en el medio acuático durante períodos de tiempo más prolongados, por esta razón como regla general, el agua con cualquier coliforme detectable se considera no segura para beber (Chin, 2013). Por lo anterior, la presencia o ausencia de CT en el agua se considera un buen indicador de su calidad microbiológica (Sierra, 2011; Howe et al., 2012).

La muestra del blanco corresponde a agua cruda tomada del río Sinú, con una concentración de CT de 1090 MPN/100mL, este valor está acorde con las concentraciones típicas de muchos ríos o estanques comunes, que suelen estar alrededor de 1000 MPN/100 mL o menos (Sommer et al., 1997). La muestra #1 se retiró de la radiación solar luego de 6 horas de exposición y mostró una concentración de CT de 373 MPN/100 mL que, aunque había reducido cerca del 66% de los CT de la muestra, este valor estaba por fuera de la concentración exigida por las autoridades sanitarias colombianas (0.00 MPN/100 mL) (Ministerio de Salud, 2007). Las muestras #2 y #3 se retiraron de la exposición solar después de 10 y 18 horas, respectivamente, logrando eficiencias de remoción superiores al 98%, sin embargo, aún había presencia de CT en ambas muestras de agua. Solo con la muestra #4 y con una exposición solar de 22 horas se logró la eliminación completa de los CT en el agua cruda.

Estos resultados obedecen a que los CT son más difíciles de eliminar que otro tipo de indicador biológico y requieren una cantidad mayor de irradiación solar para desactivarse (Martín et al., 2005). Por otra parte, estudios realizados a coliformes y *Escherichia coli*, sugieren que las bacterias extraídas de aguas residuales o de aguas naturales, son más resistentes a la radiación solar que las bacterias cultivadas en el laboratorio (Fisher et al., 2012). Por lo tanto, es probable que los experimentos de SODIS con organismos cultivados en laboratorio sobreestimen de alguna manera la eficacia de la desinfección de SODIS en aplicaciones de campo, y los resultados de estos estudios deben interpretarse con cautela (Luzi et al., 2016). De esta forma, queda claro entonces que 6 horas de exposición solar son insuficiente para lograr la inactivación total de CT y de los patógenos anexos a estas bacterias, como lo recomienda el Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology de Dübendorf Switzerland, que es una autoridad técnica a nivel mundial sobre SODIS. La ingesta de agua expuesta a períodos menores a dos días de radiación solar, incluso en regiones tropicales, conlleva a un alto riesgo de infección debido a que el agua cruda no se desinfecta completamente. Aunque existe el riesgo de que los patógenos se recuperen de los efectos de la radiación solar o aumenten su presencia después de aplicar SODIS, no hay evidencia contundente en la literatura técnica disponible que sea concluyente. Sin embargo, varios autores sostienen que el daño celular causado por la radiación UV-A en los patógenos es irreversible y su crecimiento posterior al tratamiento SODIS es poco probable (Boyle et al., 2008; Bosshard et al., 2009; Dessie et al., 2014).

La turbiedad inicial del agua cruda fue de 10.52 NTU al inicio de los ensayos SODIS, un valor aceptable para la aplicación de esta metodología de desinfección ya que se recomienda para muestras de agua cruda menores a 30 NTU (Luzi et al., 2015). Sin embargo, estudios realizados para estimar la influencia de SODIS en función de la turbidez, hallaron que en aguas crudas con turbidez de 26 NTU, la intensidad de la radiación UV-A disminuye aproximadamente en un 50% después de una profundidad de penetración de 10 cm, en comparación con lo que ocurre en aguas más claras, que solo llega a ser del 25% (Sommer et al., 1997). Otros estudios también demostraron que la tasa de eliminación de patógenos de SODIS disminuye con el aumento de la turbidez del agua (McGuigan et al., 2012; Kehoe et al., 2001; Gómez et al., 2009). Este comportamiento obedece a que a niveles bajos de turbiedad los patógenos no encuentran refugio en los coloides que la causan, quedando más expuestos a la influencia directa de la radiación solar UV-A (Sierra, 2011).

A lo largo del período de aplicación de SODIS, la turbiedad tuvo un comportamiento descendente. Durante el primer día de ensayos la turbidez bajó solo un 13%, pero al finalizar los ensayos y con un tiempo total de sedimentación de 34 horas, la turbidez de la muestra #4 fue de 6.0 NTU, lo que equivale a una remoción del 43%. No obstante, esta concentración no cumple con el valor máximo aceptable exigido en las normas sanitarias colombianas para la turbiedad (2.0 NTU) (Ministerio de Salud, 2007). Para lograr cumplir con la calidad del agua potable, es necesario aplicar previamente a los ensayos SODIS, un proceso de clarificación de las muestras mediante sedimentación y decantación, filtración con tela o arena, y de ser posible, aplicar un coagulante sintético o natural que floculen los coloides causantes de la turbidez del agua, hasta llegar a niveles de turbiedad permisibles por las normas sanitarias.

4. Conclusiones

La desinfección solar en zonas suburbanas y rurales de países ubicados en el trópico, es una metodología de desinfección efectiva en la remoción de Coliformes Totales, siempre y cuando las muestras de agua se expongan a radiación solar durante dos días continuos. En este trabajo se pudo constatar que, aunque se recomienda recipientes de Tereftalato de Polietileno (PET) para el almacenamiento del agua durante los ensayos de SODI, el uso de recipientes de vidrio son también una alternativa efectiva y práctica ya que pueden ser reutilizables muchas veces, a diferencia de las botellas de PET, que tienden a disminuir la transmisión de la radiación UV-A debido al desgaste del recipiente por la exposición continua a los rayos solares.

Aunque las posibilidades de un nuevo crecimiento de las bacterias patógenas en las muestras tratadas no son claras, es aconsejable almacenar el agua en un lugar fresco y consumirla poco tiempo después del tratamiento. Sin embargo, es recomendable aplicar pequeñas dosis de cloro (Hipoclorito sódico) con el fin garantizar la continuidad de la desinfección luego del tratamiento, sin que ello implique un cambio de color o sabor del agua. De igual manera se recomienda para muestras de agua cruda, aplicar un período de aquietamiento previo al tratamiento de SODIS, para que los coloides causantes de la turbidez del agua se precipiten y permitan aún más la efectividad de la radiación UV-A en la eliminación de los patógenos.

Referencias bibliográficas

- American Public Health Association – APHA. (2012). *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 22nd ed.* Washington D.C.: APHA.
- Berney, M., Weilenmann, H. U., Simonetti, A. & Egli, T. (2006). Efficacy of solar disinfection of *Escherichia coli*, *Shigella flexneri*, *Salmonella Typhimurium* and *Vibrio cholera*. *Journal of Applied Microbiology*, 101(4), 828-36. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2006.02983.x>
- Bosshard, F., Berney, M., Scheifele, M., Weilenmann, H. U. & Egli, T. (2009). Solar disinfection (SODIS) and subsequent dark storage of *Salmonella typhimurium* and *Shigella flexneri* monitored by flow cytometry. *Microbiology-Sgm*, 155, 1310-1317. <https://doi.org/10.1099/mic.0.024794-0>
- Boyle, M., Sichel, C., Fernandez, P., Arias, G. B., Iriarte, M., Mercado, A., Ubomba, E. & McGuigan, K. G. (2008). Bactericidal effect of solar water disinfection under real sunlight conditions. *Applied and Environmental Microbiology*, 74(10), 2997-3001. <https://doi.org/10.1128/AEM.02415-07>
- Chin, D. A. (2013). *Water-Quality Engineering in Natural Systems: fate and transport processes in the water environmental*. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons.
- De Nevers, N. (1998). *Air Pollution Control Engineering*. Mexico D. F.: McGraw-Hill Companies Inc.
- Dessie, A., Alemayehu, E., Mekonen, S., Legesse, W., Kloos, H. & Ambelu, A. (2014). Solar disinfection: an approach for low-cost household water treatment technology in Southwestern Ethiopia. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12(1), pp. 25-30. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-25>
- Fisher, M. B., Keenan, C. R., Nelson, K. L. & Voelker, B. M. (2008). Speeding up solar disinfection (SODIS): effects of hydrogen peroxide, temperature, pH, and copper plus ascorbate on the photoinactivation of E-coli. *Journal of Water and Health*, 6(1), 35-51. <https://doi.org/10.2166/wh.2007.005>
- Fisher, M. B., Iriarte, M. & Nelson, K. L. (2012). Solar water disinfection (SODIS) of *Escherichia coli*, *Enterococcus spp.*, and MS2 coliphage: Effects of additives and alternative container materials. *Water Research*, 46(6), 1745-1754. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.048>
- Gómez, H., Fontan, M., McGuigan, K. G. & Ares, E. (2009). Effect of the radiation intensity, water turbidity and exposure time on the survival of *Cryptosporidium* during simulated solar disinfection of drinking water. *Acta Tropica*, 112(1), 443-448. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2009.06.004>
- Hendricks, D. (2011). *Fundamentals of Water Treatment Unit Processes: Physical, Chemical, and Biological*. Boca Raton, USA: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Howe, K. J., Hand, D. W., Crittenden, J. C., Trussell, C. & Tchobanoglous, R. R. G. (2012). *Principles of Water Treatment*. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons.

- Kehoe, S. C., Joyce, T. M., Ibrahim, P., Gillespie, J. B., Shahar, R. A. & Mcguigan, K. G. (2001). Effect of agitation, turbidity, aluminium foil reflectors and container volume on the inactivation efficiency of batch-process solar disinfectors. *Water research*, 35(4), 1061–1065. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00353-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00353-5)
- Loo, S. L., Fane, A. G., Krantz, W. B. & Lim, T. T. (2012). Emergency water supply: are view of potential technologies and selection criteria. *Water Research*, 46(10). 3125–3151. Recuperado de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22521949/>
- Luzi, S., Tobler, M., Suter, F. & Meierhofer, R. (2016). *SODIS manual Guidance on solar water disinfection*. Dübendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.
- Mackenzie, D. (2010). *Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice*. New York: McGraw-Hill Companies Inc.
- Mansoor, A. M., Dave, Sh. & Nair, A. T. (2015). Effect of water quality parameters on solar water disinfection: a statistical experiment design approach. *Desalination and Water Treatment*, 56(2), 315-326. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.940398>.
- McGuigan, K. G., Conroya, R. M., Mosler, H. J., Preezc, M. d, Ubomba-Jaswac, E. & Fernandez-Ibañez, P. (2012). Solar water disinfection (SODIS): A review from bench-top to roof-top. *Journal of Hazardous Materials*, 235-236, 29-46. Recuperado de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22906844/>
- Mejía, A., Castillo, O. & Vera, R. (2016). *Agua potable y saneamiento en la nueva ruralidad de América Latina*. Agua para el desarrollo: Bogotá, Colombia: CAF.
- Ministerio de la Protección Social and Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). *Resolución número 2115 (22 jun 2007)*. Bogotá, Colombia: Minsalud & Minambiente. Recuperado de https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf
- Ortiz, H. A., Escobar, C. D., & Sepúlveda, S. B. (2018). Statistical analysis of climatological variables in the city of Cucuta. *Respuestas*, 23(1), 39 - 44. <https://doi.org/10.22463/0122820X.1328>
- Pankratz, T. M. (2001). *Environmental engineering dictionary and directory*. Washington, D. C.: Lewis Publishers.
- Reed, R. H. (1997). Solar inactivation of faecal bacteria in water: The critical role of oxygen. *Letters in Applied Microbiology*, 24, 276-280. <https://doi.org/10.1046/j.1472-765X.1997.00130.x>
- Ríos, S., Agudelo R. M. & Gutiérrez, L. A. (2017). Pathogens and microbiological indicators of the quality of water for human consumption. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 35(2), 236-247. <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.v35n2a08>
- Sierra, C. A. (2011). *Calidad del Agua: Evaluación y Diagnóstico*. Medellín, Colombia: Universidad de Medellín, Ediciones de la U.
- Sommer, B., Marino, A., Solarte, Y., Salas, M. L., Dierolf, C., Valiente, C., Mora, D., Rechsteiner, R., Setter, P., Wirojanagud, W., Ajarmeh, H., AlHassan, A. & Wegelin, M. (1997). SODIS - An emerging water treatment process. *Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua*, 46(3), 127-37. Recuperado de <https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag:13929>
- UNESCO, World Water Assessment Programme (WWAP). (2019). *The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind*. Paris: UNESCO.

- Unidad de Planeación Minero Energética, UPME and Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (2005). *Atlas de radiación solar de Colombia*. Bogotá, Colombia: IDEAM-UPME.
- Vivar, M. & Fuentes, M. (2016). Using solar disinfected water: On the bacterial regrowth over 1-week of water usage including direct intake after sun exposure and long-term dark storage. *Solar Energy*, *131*, 138–148. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X16001535>
- Vivar, M., Pichel, N., Fuentes, M. & López-Vargas, A. (2017). Separating the UV and thermal components during real-time solar disinfection experiments: The effect of temperature. *Solar Energy*, *146*, 334-341. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.053>
- Wegelin, M., Canonica, S., Mechsner, K., Fleischmann, T., Pesaro, F. & Metzler, A. (1994). Solar water disinfection: Scope of the process and analysis of radiation experiments. *Journal of Water Supply: Research and Technology AQUA*, *43*(3), 154-169. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.214>