



Radiación ultravioleta-c para desinfección bacteriana (coliformes totales y termotolerantes) en el tratamiento de agua potable

Radiation ultraviolet-c for bacterial disinfection (total and thermotolerant coliforms) in the water treatment

Rossel Bernedo Luis Jhordan^{1*}, Rossel Bernedo Luis Alberth¹, Ferro Mayhua Félix Pompeyo³, Ferro Gonzales Ana Lucia⁴ & Zapana Quispe Ronal Reynaldo¹

¹ Facultad de Ingenierías, Universidad Privada San Carlos, Puno, Perú

² Laboratorios Bioproject S.A.C. de Puno, Perú

³ Salud Chucuito, Región de Salud Puno, Ministerio de Salud del Perú

⁴ Directora de Estudios Económicos de FerScar S.A.C. de Puno, Perú

*Autor para Correspondencia: jhordanrossel@gmail.com

Rossel Bernedo Luis Jhordan  <https://orcid.org/0000-0002-5800-7104>

Rossel Bernedo Luis Alberth  <https://orcid.org/0000-0002-7360-6359>

Ferro Mayhua Félix Pompeyo  <https://orcid.org/0000-0003-2986-2774>

Ferro Gonzales Ana Lucia  <https://orcid.org/0000-0001-7751-2782>

Zapana Quispe Ronal Reynaldo  <https://orcid.org/0000-0001-6826-6073>

ARTÍCULO ORIGINAL

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Artículo recibido: 02/09/2019

Artículo aceptado: 01/12/2019

En línea: 22/01/2020

PALABRA CLAVE:

Tiempo de exposición,
inactivación bacteriana,
Unidades Formadoras de Colonias,
Filtro de Membrana.

ORIGINAL ARTICLE

ARTICLE INFORMATION

Article received: 02/09/2019

Article accepted: 01/12/2019

On line: 22/01/2020

KEYWORD:

Exposure time,
bacterial inactivation,
Colony Forming Units,
Membrane Filter.

RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo evaluar la presencia de bacterias (coliformes totales y termotolerantes) en el tratamiento del agua haciendo uso de Radiación Ultravioleta clase C (UV-C), se realizó la investigación en el Laboratorio de Control de Calidad de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de la EPS, EMSA Puno, debido a que las normas vigentes exigen que las lecturas de coliformes totales y termotolerantes en el agua potable deben de ser 0 UFC/100 ml, siendo la radiación UV-C una alternativa para la disminución en el uso del Cloro. Por lo que se experimentó con una dosis de 0,00176 W/cm²/s de radiación UV-C con una longitud de onda dominante de 254 nm, las muestras de agua experimentales fueron sometidas a 1, 2, 3, y 4 segundos de exposición a la mencionada radiación. Para la determinación de la presencia bacteriana en agua (coliformes totales y termotolerantes), se optó por la metodología de Filtro de Membrana, los resultados obtenidos para el conteo de coliformes totales fueron lecturas en promedio de 200, 165, 59 y 0 UFC/100 ml y para el conteo de coliformes termotolerantes lecturas promedio de 4, 3, 1 y 0 UFC/100 ml. Concluyendo que, para la inactivación total de los coliformes totales y coliformes termotolerantes presentes en las muestras de agua, se requirió un tiempo mínimo de 4 s de exposición a la radiación UV-C.

ABSTRACT

The study aimed to evaluate the presence of bacteria (total and thermotolerant coliforms) in the treatment of water using Class C Ultraviolet Radiation (UV-C), the research was carried out in the Quality Control Laboratory of the Treatment Plant of Potable Water of the EPS, EMSA Puno, because current regulations require that total and thermotolerant coliform readings in drinking water should be 0 CFU / 100 ml, with UV-C radiation being an alternative for the decrease in Chlorine use. For what was experimented with a dose of 0,00176 W/cm²/s of UV-C radiation with a dominant wavelength of 254 nm, the experimental water samples were subjected to 1, 2, 3, and 4 seconds of exposure to the mentioned radiation. For the determination of the bacterial presence in water (total and thermotolerant coliforms), the Membrane Filter methodology was chosen, the results obtained for the total coliform count were readings on average of 200, 165, 59 and 0 CFU/100 ml and for the count of thermotolerant coliforms average readings of 4, 3, 1 and 0 CFU/100 ml. Concluding that, for the total inactivation of the total coliforms and thermotolerant coliforms present in the water samples, a minimum time of 4 s of exposure to UV-C radiation was required.

INTRODUCCIÓN

El agua es el punto primordial de la vida sana, la seguridad alimentaria, la energía sostenible, la gestión ambiental, el desarrollo económico y social. Nuestro planeta emprenderá un déficit por este recurso equivalente a un 40% para el año 2030 (World Bank, 2018). Tal déficit tendrá una gran presión sobre los usuarios de agua dulce, además de que esta debe de cumplir con ciertos parámetros de calidad (Word Bank, 2019). La calidad del agua se define en función de un conjunto de variables fisicoquímicas y biológicas, así como sus valores de aceptación o rechazo, la calidad fisicoquímica y biológica se basa en la determinación de sustancias químicas específicas presentes en el agua que puedan afectar la salud (OMS, 2006). Las características microbianas del agua, están regidas por la población de microorganismos que alberga y que afectan de un modo importante a su calidad, algunos de estos organismos pueden dañar la salud humana dando lugar a las denominadas enfermedades hídricas (Marin, 2006).

Las normas de potabilidad establecen que un agua no debe de contener ningún germen patógeno. Sin embargo, debe de tenerse en cuenta que los gérmenes patógenos no se buscan directamente más que solo en casos muy especiales y que la calidad bacteriológica, buena o mala, de un agua solo se aprecia partiendo de un cierto número de análisis de gérmenes fáciles de aislar y de calificar tales como: *Escherichia coli*, *Streptococos* fecales y *Clostridium* sulfitorreductores. Entre los indicadores más usados se encuentran los coliformes, representados habitualmente por cuatro géneros de la familia Enterobacteriaceae: *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Escherichia* y *Klebsiella* (Jay, 2002). Al igual que lagunas beta proteobacterias presentes en el ciclo urbano del agua (Ferro, et al., (2019a)

La cloración es el procedimiento más extendido en la desinfección de aguas de consumo en razón a que el cloro reúne la mayoría de las propiedades del “desinfectante ideal”. El principal objeto de la cloración es la destrucción de microorganismos gracias a la acción germicida del cloro, pero también tiene una gran importancia la oxidación de sustancias inorgánicas reducidas (hierro, manganeso, sulfuros, etc.), la destrucción de compuestos que producen olor y sabor, eliminación de algas y microorganismos del légamo, así como el efecto coadyuvante en la coagulación. El cloro es un gas tóxico, de olor penetrante, más pesado que el aire y no combustible ni explosivo (Perez, 1995), y tiene efecto residual, lo que permite determinar así su presencia en las redes de distribución del agua, garantizando la potabilización del agua de consumo humano cuando su concentración es mínimamente 0.5 mg/L (Ministerio de salud, (2011); Ferro, et al., (2019b).

La principal desventaja de la cloración es la generación de subproductos tóxicos, fenómeno descubierto y ampliamente estudiado desde los años 70, encontrándose como subproductos los trihalometanos, ácidos haloacéticos y halógenos orgánicos disueltos, que han sido identificados como potencialmente cancerígenos en concentraciones menores de 0,1 mg/L (Osorio et al, 2011).

Hoy en día la desinfección con luz UV es un proceso que está ganando terreno con respecto a la cloración debido a la estricta reglamentación de los organoclorados que esta última ha generado (Droste, 1997). Comparada con la cloración, la luz UV desinfecta el agua potable sin la necesidad de almacenar o manejar reactivos químicos peligrosos y, por su corto tiempo de contacto (del orden de segundos o minutos), reduce el tamaño de los tanques de tratamiento y con ello el costo. Actualmente,

las lámparas de vapor de mercurio de presión media que generan radiación UV se utilizan ampliamente en potencias que van desde 20 W hasta 20 KW, y la longitud de onda que utilizan es 260 nm aproximadamente (Beck, et al, (2015)). La radiación ultravioleta (UV) tiene longitudes de onda más cortas a las de la luz visible, dentro de la radiación ultravioleta, existen categorías de longitudes de onda que se dividen en UV-A, UV-B y UV-C; de las cuales, nuestra atmósfera elimina por filtración las longitudes de onda UV-C. Las longitudes de onda de la radiación ultravioleta son: Onda larga: UV-A 400 nm – 315 nm, Onda media: UV-B 315 nm – 280 nm y Onda Corta: UV-C 280 nm – 100 nm. (Burns, 2003).

El efecto germicida de la radiación UV se vincula a la energía asociada a la longitud de onda o frecuencia de la luz UV que es capaz de producir daños fotoquímicos en los ácidos nucleicos de los microorganismos (Osorio, et. al, (2011)). Varios estudios han examinado la aplicabilidad de la radiación UV en la inactivación de patógenos para la desinfección del agua, varios estudios revelan que una longitud de onda alrededor de 265 nm tiene un efecto de inactivación relativamente mayor de organismos comparados a otras longitudes de onda (Oguma et al., (2013); Beck et al., (2017); Rattanukul y Omuga (2018)).

Haciendo uso de la Radiación UV-C junto con otros métodos de desinfección, se puede llegar a obtener un efecto sinérgico que se determina por la comparación los resultados de inactivación en tratamientos combinados y los resultados de la suma de los registros de inactivación de tratamientos individuales (Koivunen & Heinonen-Tanski, 2005), algo controvertido es que hasta la fecha efectos sinérgicos después de las aplicación de desinfección mediante la Radiación UV-C se han reportado en muy pocas referencias (Green,

y otros, 2018). Pero en algunos estudios los autores han informado hallazgos en los que no encontraron ningún efecto sinérgico (Oguma et al., (2013); Beck et al., (2017); Li et al., (2017)). Se tiene que tener consideración de la efectividad tanto de inactivación como de reactivación de las bacterias en casos de tratamientos combinados.

Los cambios fotoquímicos inducidos por la radiación ultravioleta en el material nuclear de un organismo (especialmente, en el ADN y el ARN) y por los cuales ocurre la desinfección han sido ampliamente estudiados. El ADN está constituido por nucleótidos compuestos a su vez por una molécula de azúcar, otra de fosfato y una base nitrogenada. Las bases nitrogenadas pueden ser púricas o pirimídicas. Los nucleótidos con base pirimídicas son la citosina (encontrada en el ADN y ARN), la timina (encontrada solamente en el ADN) y el uracilo (encontrado sólo en el ARN). Las de bases púricas son la adenina y la guanina (Metcalf y Eddy, 1996). La radiación de luz ultravioleta penetra la pared celular de los organismos y es absorbida por el ADN y el ARN dimerizando dos bases (las une entre sí con un doble enlace), lo cual impide la reproducción o produce la muerte de la célula. La dimerización de dos timinas es la más eficiente para inactivar los microorganismos (Darby, et al, (1995), Hijnen, et al, (2006) y McDonnell, et al, (1999)).

La transmitancia se define como la capacidad que tiene el agua para dejar pasar la luz, en este caso la UV, a través de ella. Es evaluada a una longitud de onda de 254 nm y se expresa como un porcentaje de la transmitancia que presenta el agua desionizada (establecida como 100 %). La transmitancia es disminuida por ciertos compuestos orgánicos e inorgánicos, así como por los sólidos suspendidos. La transmitancia de la luz UV tanto en el agua potable como

residual tratada depende del tipo de proceso de tratamiento y del origen del agua. El intervalo más frecuente para el agua potable es de 75 % a 95 %.

Por otro lado, Gutierrez et al. (2006), evaluó el tiempo de inactivación de coliformes totales y fecales en función a concentraciones de Dióxido de Titanio (TiO_2) con exposición a radiación solar, para los Coliformes totales, cada muestra tenía un valor de 3500 NMP/100 ml, llegando a una inactivación del 100% en un tiempo de exposición a la luz solar de 120 minutos (min) y una concentración de TiO_2 de 0,5011 mg/ml. Para los Coliformes fecales se tenía muestras de 2200 NMP/100 ml, logrando una inactivación del 100 % en un tiempo de 120 min a concentraciones de TiO_2 de 0,2880 mg/ml y 1,0073 mg/ml.

Sanchez et al. (2012), diseñó un equipo para la desinfección con luz UV para aguas residuales provenientes del sistema de la laguna de oxidación del Centro de Investigación del Agua de Venezuela, que poseía 1.4×10^3 NMP/100 ml de Coliformes Totales y 1.2×10^3 NMP/100 ml para Coliformes Fecales, obteniendo que para una remoción del 99.92 % de los microorganismos el mejor tiempo de incidencia de radiación fue de 90 s con una potencia de salida de la lámpara UV de 90 W.

En esta investigación el objetivo fue evaluar la presencia bacteriana (Coliformes totales y coliformes termotolerante) en el tratamiento de agua potable, haciendo uso de la radiación UV-C, específicamente a una longitud de onda de 245 nm, evaluando la dosis requerida para la inactivación de las bacterias.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en la Ciudad de Puno, la experimentación fue realizada

en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP), ubicada en Aziruni – Puno, durante el año 2015. El agua utilizada para realizar la experimentación con radiación UV-C, fue tomada en el ingreso de la tubería a la Sala Química, siendo estas muestras de agua libres de cualquier tratamiento químico o físico (Agua Cruda).

Para el experimento, se utilizó representación a escala (1/100) del canal que se encuentra en la PTAP- Aziruni Puno (Figura 1), dicho canal se posiciona entre la salida del canal de Parshall y el inicio del laberinto de floculación, se utilizó este canal como referencia, para un futuro uso de la radiación UV-C en la potabilización del agua destinada para el consumo humano de la ciudad de Puno.



Figura 1. Vista frontal de prototipo, donde se muestra la ubicación de los focos que emiten la radiación ultravioleta.

Estimación de la Intensidad de radiación UV-C

A partir de un canal a escala (1/100, 9.5 cm. X 10 cm. X 70 cm.), se realizó la experimentación, para lo cual se hizo variaciones en el caudal de agua cruza para obtener los distintos tiempos de exposición a la Radiación ultravioleta de Clase C (UV-C), 2 tubos fluorescentes de radiación UV-C de 15W. c/u de marca OSRAM), haciendo uso a la vez de fórmulas matemáticas como perímetro de círculo, área de un rectángulo. Para poder hallar la longitud de arco se usó la función de ley de senos, como también la inversa proporcional de un seno de ángulo. Y la relación entre el área total y la potencia aplicada para poder hallar la dosis.

La estimación de la intensidad de la radiación UV-C aplicada fue establecida mediante la dosis aplicada y el tiempo de exposición.

Lo focos emisores de radiación ultravioleta, fueron de la Marca OSRAM, modelo HNS Puritec (Potencia Nominal de 15 W), de radiación ultravioleta clase C con una longitud de onda de 200 nm a 280 nm y un onda dominante de 245 nm con una potencia de 4,9 W de emisión, el foco posee un vidrio que absorbe la longitud de onda de los 185 nm, suprimiendo la formación de ozono, y así asegurando que en la experimentación solo se utilizó a la radiación como único desinfectante, con dimensiones de 438,0 mm de largo y un diámetro de 26,0 mm, datos utilizados para hallar la dosis aplicada.

Se aplicó una dosis $0,00176 \text{ W/cm}^2/\text{s}$, está siendo no variable, por tanto, se utilizó el tiempo de retención como variable modificable. En la investigación de Acosta, Caro, & Perico (2015), utilizó una longitud de onda de 253,7 nm, y distintas dosis de radiación que van

desde 1029,2 mWs/cm² hasta 10392 mWs/cm², obteniendo resultados de inactivación a la mayor dosis, esto lo sustenta debido a que el agua sometida al tratamiento tenía un alto grado de turbiedad, por lo contrario a las muestras de la presente investigación, que presentaban un grado relativamente bajo de turbiedad.

Determinación de la calidad bacteriológica del agua cruda y tratada con radiación UV-C

La determinación y recuento de coliformes totales y termotolerantes se realizó por el método; Filtro de Membrana (APHA, 1992), considerando que dicha metodología es un estándar utilizado hasta la actualidad por su gran precisión y confiabilidad de los resultados, este método permite evaluar volúmenes variados de agua con un resultado directo en cuanto a la concentración de bacterias coliformes totales, se utilizó medio de cultivo m-Endo para determinar el grupo coliformes total.

El proceso de filtración consistió en la filtración de 100 ml la muestra a través de la membrana de celulosa (0.45 micrones), a través de los embudos de filtración y el soporte para filtro de membrana, todo con ayuda de una bomba de vacío (figura 2), en una placa Petri se tiene el Pad absorbente o almohadilla impregnada con 2ml. de caldo de cultivo, sobre el cual reposara la membrana de celulosa. La placa inoculada fue colocada en una incubadora a 35.5°C y 45 °C según corresponda para coliformes totales y termotolerantes, para ambos casos durante 24 h. Los resultados serán obtenidos rápidamente, posteriormente se procedió al conteo de número de colonias formadas.



Figura 2. Proceso de filtración al vacío, a través de la membrana de celulosa de 0.45 micrones.

RESULTADOS

Determinación de la calidad bacteriológica del agua cruda y tratada con radiación UV-C

Coliformes totales.

La cantidad de coliformes totales encontrados en el agua sin tratamiento fue mayor a 200 UFC/100 ml, comparado a las muestras sometidas a la radiación UV-C, teniendo a los 2 segundos (s) de exposición un resultado que se encontraba entre mayor a 200 UFC/100 ml y como mínimo 80 UFC/100 ml, para un tiempo de exposición de 3 s se obtuvo un máximo de 98 UFC/100 ml y un mínimo de 37 UFC/100 ml, y para la muestra expuesta durante 4 s se obtuvo 0 UFC/100 ml.

Tabla 1.

Cantidad de coliformes totales encontrados en el agua cruda sometidos a Radiación UV-C.

Nº de muestra	COLIFORMES TOTALES UFC/100ml				
	CONTROL	TIEMPO DE EXPOSICIÓN			
		1 s	2 s	3 s	4 s
1	>200	>200	>200	45	0
2	>200	>200	180	56	0
3	>200	>200	>200	98	0
4	>200	>200	80	37	0

Recuento de coliformes totales en UFC/100ml

UFC: Unidades Formadoras de Colonias

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Control de Calidad – PTAP

Después de realizar la prueba estadística de ANDEVA se determinó que la concentración de coliformes totales, presenta diferencias significativas, siendo $F_c = 34,04$, ($GL = 3,12$; $F_{t(0,05)} = 3,49$)

Según la prueba de Tukey, con resultado de un $HSD = 66,71$, se determina que estadísticamente la mayor diferencia se encuentra entre los tratamientos de 1 s y 4 s, demostrando que durante el 1 s y 2 s de exposición no hubo disminución significativa en la cantidad de UFC/100 ml, esto debido a que se trabajó con un tope de medición de 200 UFC/100 ml, cantidades superiores se consideraron dentro de la misma medida. Para el 3 s y 4 s de exposición se tiene una diferencia significativa respecto al 1 s como también una diferencia entre el 3 s y 4 s, siendo a los 4 s que se obtuvo la inactivación al 100 % de las bacterias pertenecientes al Grupo de Coliformes Totales.

Coliformes termotolerantes

Los coliformes termotolerantes (fecales) encontradas en el agua sin ningún tipo de tratamiento se contaron con un máximo de 21 UFC/100 ml y un mínimo de 5 UFC/100 ml, con 1 s de exposición se redujo la cantidad con un máximo de 7 UFC/100 ml y un mínimo de 3 UFC/100 ml. Cuando fue sometido a 2 s y 3 s aún se tuvo presencia de coliformes termotolerantes, pero con una clara disminución, teniendo un máximo de 5 UFC/100 ml y un mínimo de 0 UFC/100 ml. Cuando las muestras fueron sometidas a 4 s de exposición, el resultado fue de 0 UFC/100 ml. Siendo 4 s el tiempo de exposición adecuado para la eliminación total de coliformes totales.

Tabla 2.
Cantidad de coliformes termotolerantes encontrados en el agua cruda sometidos a Radiación UV-C.

N° de muestra	COLIFORMES TERMOTOLERANTES				
	UFC/100ml	TIEMPO DE EXPOSICIÓN			
		CONTROL	1 s	2 s	3 s
1	21	7	5	3	0
2	7	3	2	1	0
3	12	4	2	1	0
4	5	3	1	0	0

Recuento de coliformes termotolerantes en UFC/100ml

UFC: Unidades Formadoras de Colonias

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Control de Calidad - PTAP

Los datos fueron sometidos a la prueba de ANDEVA, encontrando que la concentración de coliformes termotolerantes, presenta diferencias significativas, siendo $F_c_{(0,05)} = 6.45$, ($GL = 3,12$; $F_t_{(0,05)} = 3.49$).

La prueba de Tukey, con resultado de un HSD = 3,0006, se determina que estadísticamente no existe una diferencia significativa entre los tratamientos de 1 s, 2 s y 3 s. La única diferencia estadísticamente significativa se encuentra entre el 1 s y el 4 s de exposición, en la que de una cantidad promedio de 4,25 UFC/100 ml disminuye a 0 UFC/100 ml, obteniendo así la inactivación al 100% de las bacterias pertenecientes al grupo de Coliformes Termotolerantes.

DISCUSIÓN

Coliformes Totales:

Sarmiento et al. (2003), en su estudio nos señala que uso focos de radiación UV convencionales de 10 W, con lo que logro la inactivación de coliformes totales y termotolerantes con un intervalo de tiempo de exposición de 30 a 60 minutos, comparado a los 4 s de la radiación UV-C, siendo un proceso 99.89 % más efectivo en cuanto a la desinfección. Gutiérrez et al.

(2006), haciendo uso de la radiación solar y Dióxido de titano para la desinfección de aguas de manantial y de pozo respectivamente, se requirió un total de 15 y 120 minutos para lograr la inactivación de coliformes totales, siendo procesos, más ineficientes que el uso de radiación UV-C.

La mejor eficacia en nuestra experimentación se obtuvo a un tiempo de exposición de 4 s, obteniendo para las 4 muestras un total de 0 UFC/100 ml, siendo el valor adecuado establecido en el Reglamento de calidad del agua para consumo humano (Ministerio de Salud, 2011), y tal como indica la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006), debe existir ausencia de coliformes totales inmediatamente después de la desinfección.

Coliformes Termotolerantes:

Se refiere que puede existir una desinfección instantánea mediante la inactivación por radiación UV-C a una longitud de onda de 265 nm siendo aplicado en un caudal de 100 ml/ min. (Matsumoto, Tatsuno, & Hasegawa, 2019), en nuestra investigación los mejores resultados se tienen a un tiempo de exposición de 4 s, obteniendo para las 4 muestras un total de 0 UFC/100 ml, siendo un valor establecido en el Reglamento de calidad del agua para consumo humano (Ministerio de Salud, 2011). Así también como lo dictamina la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006), no debe existir presencia de *E. coli*. Ya que constituye una prueba concluyente de contaminación fecal. En forma práctica el análisis de coliformes termotolerantes es aceptable para determinar la posible presencia de *E. coli*.

En la investigación de Acosta, Caro, & Perico (2015), detallan que obtuvieron efecto de inactivación de los microorganismos a un

tiempo de exposición de 300 s, un tiempo superior al nuestro de 4 s, esto es debido al grado de turbiedad que presentaba el agua sometida a la experimentación, puesto que las partículas presentes en el agua actúan como escudo de los microorganismos contra la radiación, a mayor turbiedad, menor será el efecto de inactivación y se requerirá mayor tiempo de exposición.

La radiación UV-C demuestra una gran eficiencia en la desinfección de agua, pero al no poseer desinfección residual, es pertinente añadir una dosis pequeña de un desinfectante persistente, como el Cloro que actuó como un conservante durante la distribución. (OMS, 2006).

En investigaciones como las de Sarmiento et al. (2003) y Gutiérrez et al. (2006), no se detalla claramente la dosis aplicada, se basan solo en la potencia de consumo requerida por los focos de radiación UV, teniendo en cuenta que existe pérdida de energía en forma de calor y luz durante el proceso de la producción de radiación UV, por tanto la potencia entregada para el tratamiento es mucho menor a la potencia utilizada.

Por otro lado, Onkundi et al. (2018), utilizaron LED's, con distintas longitudes de onda, en las que detalla las de 267 nm y 275 nm, ambas dentro del espectro de radiación Ultravioleta C, en ambos casos se demostró una inactivación de *E. coli* (Coliforme termotolerante), pero teniendo reacciones posteriores de reactivación, obteniendo mejores porcentajes de reactivación fallida para la longitud de onda de 275 nm. Igualmente, Ferro et al., (2019), en un estudio realizado señalan que UV elimino bacterias del género *Ralstonia* en 45 segundos, tanto en bacterias resistentes y susceptibles a aminoglucósidos. Por tanto, existen muchas evidencias sobre la eficacia de

UV en la desactivación de microorganismos en el agua de consumo humano.

Zeng et al. (2020), detallaron en su investigación en donde realizaron dos experimentaciones, una aplicando solo radiación ultravioleta y una segunda mezclando la radiación ultravioleta con la oxidación mediante peróxido de Hidrogeno, obteniendo mejores resultados en la segunda experimentación, esto aplicado a bacterias resistentes al Cloro, que se encuentran en aguas tratadas por cloración para su desinfección.

CONCLUSIONES

El tratamiento con radiación UV-C, con una longitud de onda predominante de 245 nm, es efectiva en la desinfección de coliformes totales y termotolerantes apreciándose que la calidad bacteriológica (coliformes totales y termotolerantes), tratada con radiación UV-C, se encuentra dentro de los parámetros para coliformes totales 0 UFC/100 ml, y coliformes termotolerantes 0 UFC/100 ml, establecidos por el Ministerio de Salud del Perú (Ministerio de salud, 2011).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, P. M., Caro, C. A., & Perico, N. R. (2015). Análisis de interferencia de parámetros físicos del agua, en desinfección por radiación UV. *Revista de Tecnología*, 105-112. doi: <https://doi.org/10.18270/rt.v14i2.1874>
- APHA, W. A. (1992). *Metodos Estandar para la Examinacion de Agua y Aguas Residuales*. Madrid.
- Beck, S. E., Ryu, H., Boczek, L. A., Cashdollar, J. L., Jeanis, K. M., Rosenblum, J. S., . . . Linden, K. G. (2017). Evaluating UV-C LED disinfection performance and investigating potential dual-

- wavelength synergy. *Water Research*, 207-216. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.024>
- Beck, S. E., Wright, H. B., Hargy, T. M., Larason, T. C., & Linden, K. G. (2015). Action spectra for validation of pathogen disinfection in medium-pressure ultraviolet (UV) systems. *Water Research*, 27-37. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.11.028>
- Burns, R. A. (2003). *Fundamentos de Química, 4ta Edición*. Mexico: Pearson.
- Darby, J., Health, M., Jacangelo, J., Loge, F., Swaim, P., & Tchobanoglous, G. (1995). *Comparison of UV Radiation to Chlorination: Guidance of Achieving Optimal UV Performance*. Water Environmet Research Foundation.
- Droste, R. (1997). *Teoria y Practica de Agua y Tratamiento de Aguas Residuales*. USA: Ed. Jhon Wiley and Sons Inc.
- Ferro, P., Ferro, P., & Ferro, A. (2019b). Distribución temporal de las enfermedades diarreicas agudas, su relación con la temperatura y cloro residual del agua potable en la ciudad de Puno, Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 69-80. doi: <http://dx.doi.org/10.18271/ria.2019.446>
- Ferro, P., Vaz-Moreira, I., & Manaia, C. M. (2019a). Betaproteobacteria are predominant in drinking water: are there reasons for concern? *Critical Reviews in Microbiology*. doi: <https://doi.org/10.1080/1040841X.2019.1680602>
- Green, A., Pocović, V., Pierscianowski, J., Biancaniello, M., Warriner, K., & Koutchma, T. (2018). Inactivation of *Escherichia coli*, *Listeria* and *Salmonella* by single and multiple wavelength ultraviolet-light emitting diodes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 353-361. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.03.019>
- Gutierrez Rico, C., Robles Davila, L., Ortiz Arredondo, F., & Martinez Garcia, L. (2006). Desinfección Foto-catalítica del Agua para Consumo Humano usando Luz Solar y Dioxido de Titanio Inmovilizado. *Centro de Estudios Academicos sobre Contaminacion Ambiental*, 1-10. Obtenido de [http://www.elaguapotable.com/DESINFECCI%C3%93N%20FOTO-CATAL%20DEL%20AGUA%20PARA%20CONSUMO%20HUMANO%20USANDO%20LUZ%20SOLAR%20Y%20DI%C3%93XIDO%20DE%20TITANIO%20\(TiO2\)%20INMOVILIZADO.pdf](http://www.elaguapotable.com/DESINFECCI%C3%93N%20FOTO-CATAL%20DEL%20AGUA%20PARA%20CONSUMO%20HUMANO%20USANDO%20LUZ%20SOLAR%20Y%20DI%C3%93XIDO%20DE%20TITANIO%20(TiO2)%20INMOVILIZADO.pdf)
- Jay, J. (2002). *Microbiología Moderna de los Alimentos* (4 edición ed.). España: Acribia S.A.
- Koivunen, J., & Heinonen-Tanski, H. (2005). Inactivation of enteric microorganisms with chemical disinfectants, UV irradiation and combined chemical/UV treatments. *Water Research*, 1519-1526. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.01.021>
- Li, G.-Q., Wang, W.-L., Huo, Z.-Y., Lu, Y., & Hu, H.-Y. (2017). Comparison of UV-LED and low pressure UV for water disinfection: Photoreactivation and dark repair of *Escherichia coli*. *Water Research*, 126-143. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.09.030>
- Marin, G. R. (2006). *Fisicoquímica y Microbiología de los medios acuáticos. Tratamiento y control de calidad de aguas*. Madrid, España: Diaz de Santos.
- Matsumoto, T., Tatsuno, I., & Hasegawa, T. (2019). Instantaneous Water Purification by Deep Ultraviolet Light in Water Waveguide: *Escherichia Coli* Bacteria Disinfection. *Water*, 1-9. doi: <https://doi.org/10.3390/w11050968>
- Metcalf y Eddy. (1996). *Ingeniería de Aguas*

- Residuales. Tratamiento y Reutilizacion.* España: Ed. McGrawHill. 3ra Edición.
- Ministerio de Salud. (2011). *Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano DS N° 031-2010-SA.* Lima: Ministerio de Salud. Obtenido de http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/Reglamento_Calidad_Agua.pdf
- Oguma, K., Kita, R., Sakai, H., Murakami, M., & Takizawa, S. (2013). Application of UV light emitting diodes to batch and flow-through water disinfection systems. *Desalination*, 24-30. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.08.014>
- Onkundi, P., Qin, Y., Chen, G., Zhang, B., & Lu, Y. (2018). Effects of single and combined UV-LEDs on inactivation and subsequent reactivation of E . coli in water disinfection. *Water Research*, 331-341. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.014>
- Organizacion Mundial de la Salud. (2006). *Guias para la Calidad del Agua Potable.* Ginebra. Obtenido de https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf
- Organizacion Panamericana de la Salud. (2004). *Guias para la Calidad del Agua Potable (Vol. 2).* Obtenido de <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/41985/9243545035-spa.pdf>
- Osorio Robles, F., Torres Rojo, J. C., & Sánchez Bas, M. (2011). *Tratamiento de Aguas para la Eliminacion de Microorganismos y Agentes Contaminantes.* España: Diaz de Santos. Obtenido de <https://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788479789039.pdf>
- Perez, J. A. (1995). *Desinfeccion del Agua. Cloracion.* Granada: Universidad de Granada.
- Rattanukul, S., & Oguma, K. (2018). Inactivation kinetics and efficiencies of UV-LEDs against *Pseudomonas aeruginosa*, *Legionella pneumophila*, and surrogate microorganisms. *Water Research*, 31-37. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.047>
- Sanchez, M., Villalobos, N., Gutierrez, E., & Caldera, Y. (2012). Diseño de un Equipo de Desinfeccion por Luz Ultravioleta para el Tratamiento de Aguas Residuales con fines de Reutilizacion. *Revista Tecnocientifica URU*, 11-18.
- Sarmiento, A., Gomez, D., Guerra, L., Toledano, D., Gonzales, F., & Rodriguez, J. (2003). Aplicacion de la Energia Solar y Luz Ultravioleta en la Potabilizacion del Agua en Escuelas Primarias. *Revista Energetica*, XXIV, 1-8. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/266369465_APLICACION_DE_LA_ENERGIA_SOLAR_Y_LA_LUZ_ULTRAVIOLETA_EN_LA_POTABILIZACION_DEL_AGUA_EN_ESCUELAS_PRIMARIAS
- Word Bank. (2019). *Water.* Recuperado el 26 de Diciembre de 2019, de <http://www.worldbank.org/en/topic/water/overview>
- World Bank. (2018). *Water in Agriculture.* Recuperado el 25 de Diciembre de 2019, de <https://www.worldbank.org/en/topic/water-in-agriculture>
- Zeng, F., Cao, S., Jin, W., Zhou, X., Ding, W., & Tu, R. (2020). Inactivation of chlorine-resistant bacterial spores in drinking water using UV irradiation , UV / Hydrogen peroxide and UV / Peroxymonosulfate : Ef fi ciencia y mechanism. *Journal of Cleaner Production*, 118666. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118666>