



# MODELO CINÉTICO PARA LA INACTIVACIÓN DE MICROORGANISMOS EN DESINFECCIÓN DEL AGUA CON LUZ ULTRAVIOLETA Y ENERGÍA SOLAR

Dr. Antonio Sarmiento Sera  
Dr. Klaus U. Heinen  
Lic. Daysi Gómez Infante  
Ing. Luis Guerra Díaz  
Dr. David Toledano Lavín

## Resumen /Abstract

En el reporte se expone un modelo para el proceso cinético de inactivación de microorganismos en un sistema de desinfección del agua que utiliza luz ultravioleta y energía solar fotovoltaica. Se presentan los resultados de dos experimentos y el comportamiento del modelo propuesto para la caracterización cinética del proceso. El sistema está analizado como una posibilidad para la desinfección del agua con luz ultravioleta en tanques o recipientes domésticos, donde no es factible el uso de sistemas a flujo.

Palabras claves: Desinfección del agua, luz ultravioleta, energía fotovoltaica

*In the report, a model is exposed for the kinetic process of microorganisms inactivation in a water disinfecting system that uses ultraviolet light and photovoltaic solar energy. The results of two experiments and the behavior of the proposed model for the kinetic characterization of the process are presented. The system is analyzed as a possibility for the water disinfecting with ultraviolet light in tanks or domestic recipients, where it is not feasible the use of flow systems.*

*Key words: Water disinfections, ultraviolet light, photovoltaic energy*

## Introducción

En un reporte anterior [ 1 ] los autores expusieron sus primeros resultados en el tratamiento del agua con luz ultravioleta. En el presente informe, se describen nuevos experimentos, con condiciones generales similares, pero con el objetivo de determinar el comportamiento de los microorganismos en función de la dosis recibida, y desarrollando un modelo cinético para el proceso de inactivación de los microorganismos.

Los modelos para el cálculo de la intensidad radiante de una lámpara ultravioleta para los sistemas a flujo, han sido desarrollados ampliamente; en estos casos, el agua fluye a muy cortas separaciones de la lámpara. En el presente informe se aborda la situación de recipientes de agua con dimensiones relativamente mayores que las de la lámpara, y con bajo movimiento del agua ("bach"). Por esta razón, se presenta un modelo que toma en cuenta fundamentalmente estas situaciones.

## Descripción del modelo para la distancia eficaz

En el presente modelo para la distancia eficaz de la dosis radiante, se considera puntual a la fuente de radiación, con una distribución radial de la irradiación del tipo  $I \mu \frac{1}{4p x^2}$ .

Además, se tiene en cuenta la atenuación por absorción, según la Ley de Lambert, del tipo  $I \mu e^{-x/a}$

Se ha considerado el movimiento de una partícula, con velocidad radial constante, desde  $x_1$  hasta  $x_2$ , en un tiempo total  $t$ .

En la Fig. 1 se representa la partícula en una posición intermedia  $x$ .

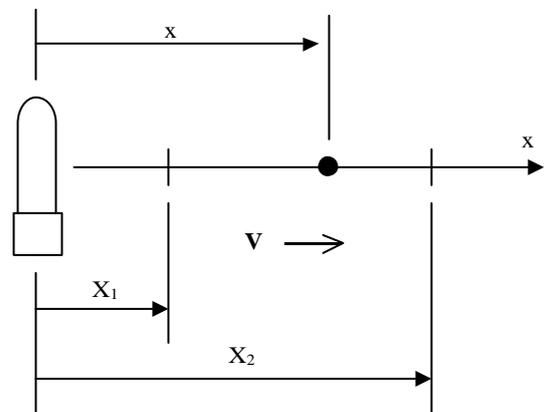


Fig.1 Esquema para el cálculo de la dosis

$$? x = x_2 - x_1 = v t_t$$

v: velocidad constante de la partícula  
 $t_t$ : tiempo total, desde  $x_1$  hasta  $x_2$

$$I = \frac{h P_0}{4 p x^2} e^{-\frac{x}{a}}$$

I: Irradiación UV (W/cm<sup>2</sup>)

$$dD = I dt$$

x: distancia a la fuente (cm)

dD: Dosis en un tiempo dt, en una posición

x

$$D = \frac{h P_0 t_t}{4 p \Delta x} \int_{x_1}^{x_2} \frac{e^{-\frac{x}{a}}}{x^2} dx$$

D: dosis desde  $x_1$  hasta  $x_2$ , en un tiempo  $t_t$

Normalizando las variables:

$$r_1 = x_1 / \alpha$$

$$r_2 = x_2 / \alpha$$

$$\Delta r = \Delta x / \alpha$$

El resultado de la integral es:

$$D = \frac{h P_0 t_t C_e}{4 p a^2 \Delta r}$$

Donde  $C_e$  (coeficiente espacial) esta dado por:

$$C_e = \left\{ \frac{e^{-r_1}}{r_1} - \frac{e^{-r_2}}{r_2} - \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n \cdot n!} (r_2^n - r_1^n) \right\}$$

El análisis de la dosis, en términos eficaces, se basa en:

$$I_e = \frac{h P_0}{4 p x_e^2} e^{-\frac{x_e}{a}}$$

$$D_e = I_e t_t$$

Considerando además, las variables normalizadas y  $r_e = x_e / \alpha$

$$D_e = \frac{hP_0 e^{-r_e} t_t}{4pr_e^2 a^2}$$

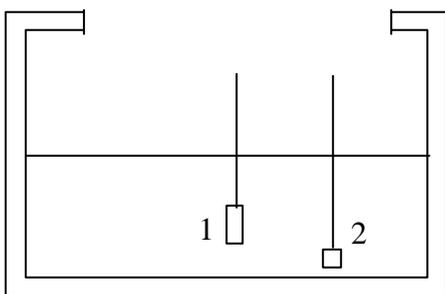
Para que  $D_e = D$ , lo que implica que la dosis calculada por integración sea igual a la dosis modelada en términos eficaces, debe cumplirse que:

$$r_e^2 e^{r_e} = \frac{\Delta r}{C_e} \quad (i)$$

El movimiento del microorganismo, modelado con un movimiento caótico, es aquí considerado con iguales posibilidades de encontrarse a cualquier distancia de la fuente, lo cual se obtiene similarmente, a través del modelo donde la partícula se mueve con velocidad radial constante.

### Descripción del experimento No. 1

Se utilizó un tanque de asbesto cemento, con un diámetro de 120 cm y con un nivel de agua de 41,3 cm, conteniendo 467 litros de agua. El agua se contaminó con 8 litros de un humedal que recibe residuos domésticos y se trabajó a 25 ° C.



1. Lámpara
2. Bomba de recirculación

Fig. 2. Esquema de la instalación experimental

La lámpara se colocó al centro del volumen del agua y se conectó a un sistema fotovoltaico que garantiza un suministro energético estable. La lámpara consume 10 W de potencia eléctrica y la bomba 11,8 W.

Los Coliformes totales fueron utilizados como indicadores de la contaminación y el Número Más Pro-

bable (NMP) de los microorganismos se determinó según el Standart Methods for Examination of Water and Wastewater [ 3 ]

En la Tabla I se presentan los datos primarios experimentales.

Tabla I. Datos del Número Más Probable y tiempo de radiación correspondientes.

NMP	Tiempo (min)
750	0
240	5
93	10
43	15
15	20
9	35
4	60

Para el análisis de la dosis irradiada, se utiliza el modelo descrito anteriormente:

$$I_e = \frac{h P_0}{4 p x_e^2} e^{-\frac{x_e}{a}} \quad (2)$$

Donde:

- $I_e$  : Irradiación UV eficaz (W/cm<sup>2</sup>)  
 $\eta$  : Eficiencia ultravioleta de la lámpara (53%)  
 $P_0$  : Potencia eléctrica de la lámpara (10 W)  
 $\alpha$  : Coeficiente de absorción UV en el agua (30 cm)  
 $x_e$  : Distancia eficaz

La distancia eficaz es la distancia constante modelada, de los microorganismos a la lámpara, de modo tal que en un mismo tiempo total, reciban la misma dosis que los microorganismos en su movimiento en el tanque.

El caso del experimento No. 1 :

$$\alpha = 30 \text{ cm} \quad \text{Radio de la lámpara}$$

$$X_1 = 1 \text{ cm}$$

$$X_2 = 60 \text{ cm} \quad \text{Radio del tanque o recipiente de agua}$$

Obteniéndose de la ec. (1), el valor de

$x_e = 8,22 \text{ cm}$  ( $r_e = 0,274$ ), que fue utilizado en la ec.(2) para obtener:

$$I_e = 4,72 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^2$$

A partir de este valor, los datos experimentales (Tabla I) se procesan, y se presentan en la Tabla II, utilizando

$De = (I_e) t$  donde  $De$  es la dosis eficaz y  $(t)$  es el tiempo de radiación

Tabla II. Reducción logarítmica y dosis eficaz correspondiente

ln (N/No)	De (mWs/cm <sup>2</sup> )
0,00	0
-1,14	1,42
-2,09	2,83
-2,88	4,25
-3,91	5,66
-4,42	9,91
-5,23	16,99

En la Fig. 3, se representan los datos de la Tabla II

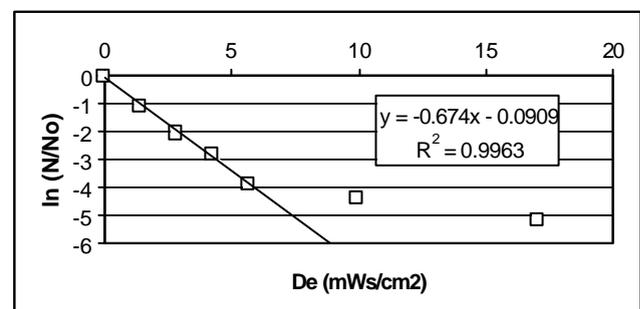


Fig.3 Reducción logarítmica vs. dosis eficaz en el experimento No. 1

En la Fig. 3 se observa un aceptable cumplimiento de la Ley de Chick, así como el efecto de “cola”, reportado [ 4 ] como algo característico.

De la Fig. 3 se obtiene el valor de la pendiente  $k = 0,674 \text{ cm}^2/\text{mWs}$ , interpretado como la constante de inactivación de los microorganismos, y con éste se obtiene el coeficiente de reducción al 99% de los microorganismos:

$$D_{99\%} = 4,6/k = 6,8 \text{ mWs}/\text{cm}^2$$

El valor obtenido para  $D_{99\%}$  refleja una buena coincidencia con el valor  $D_{99\%} = 6,6 \text{ mWs}/\text{cm}^2$  reportado [ 4 ] por otros autores

## Descripción del experimento No. 2

También se utilizó el modelo en un segundo experimento. En este caso se utilizó un tanque de menores dimensiones, siendo el diámetro de 45 cm y altura de agua 62 cm. La contaminación inicial fue de  $2,1 \times 10^5 \text{ NMP}/100 \text{ mL}$

Utilizando el modelo, la distancia efectiva es de: 3,39 cm

Y la intensidad efectiva:  $32,6 \times 10^{-3} \text{ W}/\text{cm}^2$

En la Fig. 4 se muestran los resultados del experimento 2.

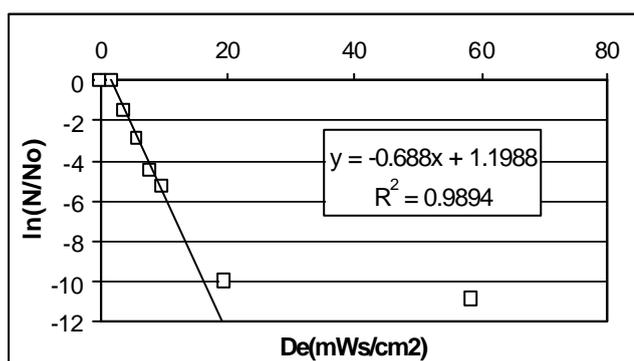


Fig.4 Reducción logarítmica vs. dosis eficaz en el experimento No. 2

En el experimento 2, se obtuvo un valor de  $D_{99\%} = 6,7 \text{ mWs}/\text{cm}^2$

A partir de los resultados presentados aquí, y considerando que una dosis de  $30 \text{ mWs}/\text{cm}^2$  logra un adecuado nivel de desinfección [ 4 ] para la mayoría de los microorganismos, el tiempo de radiación necesario para una desinfección “total” es de 1,75 horas, ratificando el criterio expuesto por los autores en un reporte anterior [ 1 ], donde se recomienda un tiempo de 2 horas.

## Conclusiones

El modelo presentado por los autores para los valores eficaces de irradiación, dosis y distancias consideradas, refleja un buen comportamiento, lo cual le hace recomendable como herramienta de análisis en el tratamiento ultravioleta para la desinfección del agua, en las condiciones de recipientes muchos más anchos que las lámparas y sistemas estacionarios o sin flujo de agua.

## Referencias

- [1] L. Guerra, D. Gómez, A. Sarmiento y K. Heinen. “Desinfección del agua con luz ultravioleta y energía solar fotovoltaica”. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. Vol. XXII, No. 4, pp. (36 – 38), Cuba, (2001)
- [2] “Standard methods for the examination of water and wastewater”, 20<sup>th</sup> Edition, American Public Health Association, (2000).
- [3] Wright H. Y Caims W. “Desinfección de agua por medio de luz ultravioleta” *Symposium regional sobre calidad del agua*, Lima, Perú, (1999)

## AUTORES

Dr. Antonio Sarmiento Sera  
 Dr. Klaus U. Heinen  
 Lic. Daysi Gómez Infante  
 Ing. Luis Guerra Díaz  
 Dr. David Toledano Lavín